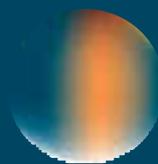


Faits marquants spectaculaires

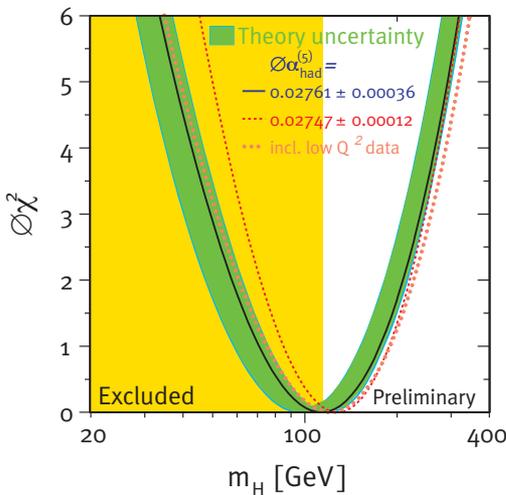


38	Legs LEP
39	Babar
40	D0
41	Atlas, CMS et LHCb
45	Nemo3, CNGS et Opera
46	Rhic
47	Alice
48	Structure du nucléon
49	Structure nucléaire aux limites
50	Radioactivité deux protons et tétra neutron
51	Structures nucléaires exotiques
52	Archeops
53	Supernovæ Ia
54	Edelweiss
55	Virgo
56	Antares
57	Hess
58	Auger
59	Muse
60	Coupleurs de puissance
61	Cavités « spoke »
62	Datagrid
63	Physique-biologie-médecine
64	Électronique

LEP Le legs du collisionneur électron-positon

L'arrêt définitif du LEP en novembre 2000 a mis fin à un programme d'exploitation du collisionneur de près de douze ans. La moisson des résultats obtenus avec les expériences Aleph, Delphi, L3 et Opal s'est soldée par une avancée spectaculaire de notre compréhension du monde subnucléaire, qu'il s'agisse de la validité du Modèle standard (MS), de la recherche du boson de Higgs ou de celle de manifestations de physique au-delà du MS.

Contraintes sur la masse (m_H) du boson de Higgs. La région exclue par la recherche directe est représentée en jaune. Les paraboles expriment les variations du χ (i. e. de la probabilité) d'ajustement de m_H aux fluctuations quantiques du vide physique extraites des mesures expérimentales. Ces variations sont montrées pour trois conditions d'ajustement différentes. © Cern



Dans sa première phase (LEP-1), qui s'est terminée en 1995, le LEP a fonctionné à une énergie proche de la masse du boson Z^0 , le vecteur neutre de l'interaction faible, dont les propriétés ont été explorées dans leurs moindres détails. Si nombre de ces études ont été menées à bien dans les premières années consécutives à l'arrêt de la phase LEP-1 (cf. *Rapport d'activité 1998-2000*), certaines - particulièrement complexes - ont nécessité un dépouillement beaucoup plus long. Il en est ainsi de la détermination de l'angle de mélange électrofaible (θ_W), qui exprime le rapport entre les intensités des forces électromagnétique et faible. Son évaluation, délicate, s'appuie sur plus d'une centaine de mesures d'observables physiques. La précision ultime obtenue a permis de percevoir les discrètes fluctuations quantiques du vide physique sensibles au boson de Higgs. Celles-ci étant fonction de la masse (m_H) de ce boson, on a recherché les valeurs de m_H pour lesquelles le MS reproduit les mesures expérimentales et obtenu une indication indirecte indépendante de l'observation du boson, précisant dans quel domaine cinématique il fallait le rechercher.

Par ailleurs, une chasse intensive aux manifestations directes du boson de Higgs a été menée sur une vaste gamme de masses du boson, culminant à près de 115 GeV/c² à LEP-2. En dépit de quelques signes avant-coureurs, aucune signature indubitable du boson n'a été observée. En combinant les résultats de cette recherche directe avec ceux de la mesure de l'angle θ_W (figure), on peut

aujourd'hui prédire que le boson de Higgs du MS doit avoir une masse comprise entre 114 et 300 GeV/c² environ. LEP-2 a également permis un examen fouillé des propriétés des bosons W^{+-} , les vecteurs chargés de l'interaction faible; leur masse a été déterminée à 0,05 % près et leurs couplages aux particules élémentaires ont été trouvés en excellent accord avec le MS, confirmant ainsi le rôle des symétries de jauge dans l'interaction électrofaible.

Le LEP a aussi été le théâtre de multiples recherches de processus physiques non standards, témoignant d'une description de la nature plus générale que celle du MS et palliant certaines de ses lacunes. Aucun processus inattendu n'a été observé, mais les valeurs permises des paramètres fondamentaux des théories testées ont été fortement contraintes. L'ensemble de ces résultats marque un tournant dans notre compréhension du monde subnucléaire, le MS ayant été consacré à un degré inattendu. Et si la brisure de la symétrie électrofaible garde ses mystères, l'existence du boson de Higgs restant à démontrer, la valeur de sa masse a néanmoins été circonscrite. Quant aux théories plus générales que le MS, les valeurs d'un bon nombre de leurs paramètres fondamentaux ont été délimitées. Ces avancées spectaculaires constituent la base de grands programmes de recherche du futur: d'abord au LHC, qui doit entrer en fonction dès 2007, puis au collisionneur linéaire à électrons, qui pourrait délivrer ses premières collisions vers 2015.

 M. Davier *et al.*, Avancées en physique des particules: la contribution du LEP, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. 4 (2002) n° 9.

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DES COLLABORATIONS ALEPH,
DELPHI ET L3**

CNRS/IN2P3: CPPM, IPNL, IReS, LAL, LAPP, LLR, LPC Clermont, LPNHE, LPSC, PCC. | CEA/DSM: Dapnia.



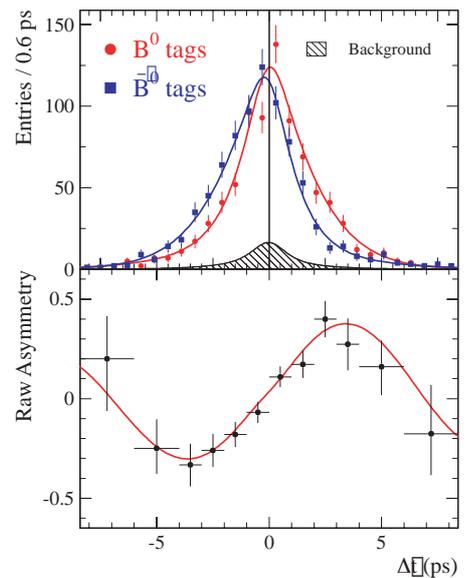
Denis Bernard,
Jean-Pierre Lees

BABAR La violation de CP dans tous ses états

L'expérience Babar, installée sur l'anneau de stockage e⁺e⁻ PEP-II à Slac, étudie la violation de CP dans le système des mésons B. Elle mesure les effets de cette violation dans un grand nombre de canaux, mettant à l'épreuve les prédictions du Modèle standard.

Distribution en temps propre des événements signés B⁰ ou B⁰. On note une nette différence entre les deux catégories d'événements, qui illustre de manière spectaculaire la violation de CP dans le système

*des B. L'asymétrie correspondante suit une loi en sinus dont la période est celle des oscillations B⁰B⁰ et dont l'amplitude est proportionnelle à la valeur de sin(2β).
© Collaboration Babar*



La violation de CP se manifeste par des différences subtiles entre les désintégrations des particules et celles de leurs antiparticules: c'est un des ingrédients nécessaires pour expliquer l'absence d'antimatière dans l'Univers. Découverte en 1964 dans le système des kaons neutres, elle reçoit une explication en 1972 quand M. Kobayashi et T. Maskawa proposent dans le cadre du Modèle standard (MS) l'existence de la 3^e génération de quarks.

Des asymétries dues à la violation de CP sont prédites dans certaines désintégrations des mésons B, mais, en raison de la rareté des modes incriminés, il a fallu attendre 1999 et la mise en route de véritables usines à B pour en entreprendre l'étude. Les équipes de l'IN2P3 et du CEA participent à l'expérience Babar qui a déjà enregistré 177 millions de paires B.

Les principales asymétries étudiées correspondent à une différence entre les désintégrations du B⁰ et du B⁰ vers un état final commun f et interviennent à travers l'oscillation B⁰B⁰: le terme d'interférence entre les processus B⁰→f et B⁰→B⁰→f génère une asymétrie entre les désintégrations des B⁰ et celles des B⁰. Le MS rend compte de la violation de CP par l'existence d'un terme complexe dans la matrice de mélange entre quarks. Les relations d'unitarité entre

éléments de cette matrice peuvent être représentées graphiquement par un triangle directement connecté à des grandeurs mesurables dans les désintégrations des mésons B. Ainsi les mesures de violation de CP permettent-elles d'accéder, selon les modes de désintégration étudiés, à chacun des trois angles α, β et γ de ce triangle. Les désintégrations et le mélange B⁰→B⁰ sont connectés quant à eux aux cotés du triangle: la redondance des mesures permet de tester la cohérence du modèle. Pour les modes B⁰→ψK⁰, l'asymétrie varie de façon sinusoidale en fonction du temps de désintégration et son amplitude est mesurée par sin(2β). Babar a mesuré sin(2β) = 0,741 ± 0,067(stat) ± 0,034(syst), en très bon accord avec le MS. Avec la mesure de sin(2β) dans les transitions telles que B⁰→D^{(*)+D^{(*)-}, φK⁰, η'K⁰, ψπ⁰, K⁰_Sπ⁰, une campagne de tests systématiques a désormais commencé. Elle vise à comprendre le rôle des différents sous-processus et des différentes transitions entre quarks, ainsi qu'à rechercher des manifestations d'une nouvelle physique. La violation de CP dans les transitions b→u permet d'accéder à l'angle α, une fois les incertitudes théoriques maîtrisées. Les années écoulées ont vu les premières mesures d'asymétrie dans le canal B⁰→π⁺π⁻. En 2003, la désintégra-}

tion B⁰→π⁰π⁰, dernière pièce manquante du puzzle, a été observée. La mesure de α à partir des canaux B⁰→ρπ et B⁰→ρρ semble être un complément prometteur: Babar a publié des premiers résultats encourageants sur ces canaux.

L'année 2003 a également apporté son lot de surprises avec l'observation de deux nouveaux mésons de masses voisines: 2,317 GeV/c² et 2,460 GeV/c². Enfin, la recherche de désintégrations rares et d'effets de violation directe de CP, ainsi que le développement de méthodes pour mesurer le troisième angle γ viennent compléter ces analyses qui, avec plus de 600 millions de paires BB⁰ prévus à l'horizon 2006, ont encore de beaux jours devant elles.



<http://www.slac.stanford.edu/BFROOT>

Measurement of the CP-violating asymmetry amplitude sin(2β), *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 201802.

A study of time-dependent CP-violating asymmetries and flavor oscillations in neutral B decays at the Υ(4S), *Phys. Rev. D* 66 (2002) 032003.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAL, LAPP, LPNHE, LLR. |
CEA/DSM: Dapnia.

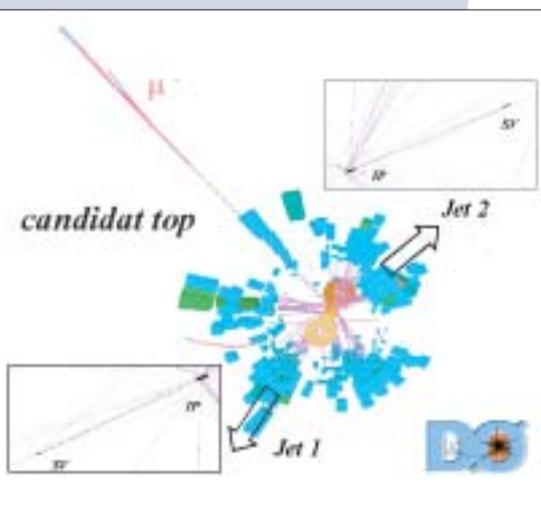


D0 Les premiers résultats du Run II

Éric Kajfasz

Les équipes de l'IN2P3, impliquées depuis fin 1997 dans la préparation du Run II du Tevatron, ont commencé à récolter les fruits de leurs efforts. Grâce aux améliorations récentes du complexe d'accélérateurs du Fermilab, Do devrait collecter 500 pb⁻¹ de données d'ici à fin 2004 et 2 fb⁻¹ d'ici à fin 2006.

Exemple de candidat top-antitop sélectionné dans les données 2003. Les algorithmes développés par les équipes de l'IN2P3 ont reconstruit jets, énergie transverse manquante et étiquetage de la beauté de deux jets de cet événement. Les agrandissements montrent les deux vertex secondaires (SV) bien séparés du vertex primaire (IP) correspondant à la désintégration des hadrons beaux.
© Collaboration D0



Jusqu'au démarrage du *large hadron collider* au Cern, le Tevatron, collisionneur p-pbar implanté au Fermilab près de Chicago, aux États-Unis, aura la suprématie en termes d'énergie disponible dans le centre de masse (1,96 TeV). Il permet à D0, une des deux expériences auprès du Tevatron, d'accéder à un programme de physique très riche incluant: mesures de précision du Modèle standard (masse du top, masse du W), étude de la production et des propriétés du quark top, physique du B (spectroscopie, violation de CP, oscillations du Bs, désintégrations rares), QCD (physique des jets, physique diffractive), recherche du boson de Higgs et de nouveaux phénomènes.

Pour réaliser ce programme, l'énergie et la luminosité du Tevatron ont été augmentées par rapport au Run I (1992-1996). La plupart des difficultés rencontrées auprès du Tevatron au début du Run II en mars 2001 ont été résolues. Les progrès constants ont permis d'accroître de façon très substantielle sa fiabilité et ses performances. Récemment, une luminosité intégrée de 12 pb⁻¹ a été obtenue chaque semaine. D0 a ainsi déjà pu enregistrer 300 pb⁻¹ de données dans le Run II et d'autres améliorations en cours devraient permettre d'atteindre environ 9 fb⁻¹ en 2009. D'autre part, des modifications importantes apportées au détecteur de D0 l'ont rendu plus efficace et performant. Les groupes de l'IN2P3 ont participé très activement à la mise à niveau d'une partie de l'électronique du calorimètre et à la construction du trajectographe à silicium. Ils ont joué un rôle primordial dans le démarrage et la mise en service de ces sous-détecteurs.

Issues de sept laboratoires, les équipes de l'IN2P3 sont composées de quarante-huit physiciens dont trente et un permanents. Elles ont un rôle majeur au sein de la collaboration D0 dans le support, le suivi et la calibration du calorimètre, le suivi et l'amélioration de la qualité des données, les algorithmes d'identification (jets, énergie manquante, électrons, taus, étiquetage des jets des saveurs lourdes), le système de déclenchement de niveau 2 (matériel et micrologiciel) et de niveau 3 (algorithmes), les outils logiciels d'analyse (algorithmes, visualisation d'événements, format condensé de données), le développement de capacité de calcul au CCIN2P3 pour l'analyse de données, mais aussi pour la reconstruction d'une partie des données et la production massive d'événements de simulation dans le cadre de la grille de calcul SAMGrid.

Les premiers résultats du Run II, dont la plupart donneront lieu à publication d'ici à fin 2004, sont centrés sur la physique au-delà du Modèle standard (supersymétrie avec et sans conservation de la parité R, dimensions supplémentaires, lepto-quarks, quarks excités), la physique du quark top (section efficace de production top-antitop, production électrofaible du top), la physique du Higgs (section efficace Wbb, modes de production WH->evbb et ZH->vbb), QCD (jets à grande énergie transverse) et la physique électrofaible (masse du W). Les onze thèses soutenues entre 2000 et 2003 montrent l'attention portée par ces équipes à la formation par la recherche. Celle-ci sera poursuivie: quatorze thèses sont déjà en cours, à soutenir d'ici à 2006.

-  <http://d0-france.in2p3.fr>
- <http://www-d0.fnal.gov>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CPPM, IPNLL, IReS, LAL, LPC
Clermont, LPNHE, LPSC. I CEA/DSM: Daphnia.



ATLAS, CMS ET LHCb Trois expériences auprès du futur LHC

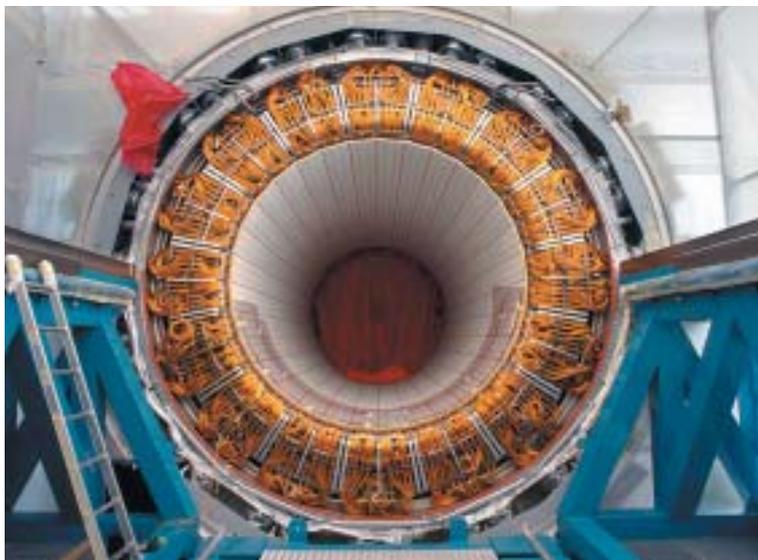
Helenka Przywiecniak,
Morgan Lethuillier
et Frédéric Machefert

Le LHC, prochain grand accélérateur du Cern, produira des collisions proton-proton à des luminosités (jusqu'à $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) et à des énergies (14 TeV) jamais atteintes auparavant. Les détecteurs situés sur l'anneau du collisionneur sont à un stade avancé de construction et seront prêts en 2007 pour le début de la prise de données. La principale motivation d'Atlas et de CMS est la recherche de nouvelles physiques (Higgs, supersymétrie, dimensions supplémentaires...). Le détecteur LHCb se focalisera sur la physique des mésons B et l'étude de la violation de la symétrie CP.

ATLAS

Le détecteur Atlas est composé de plusieurs sous-détecteurs: les détecteurs centraux, conçus pour identifier les traces très près du point d'interaction des protons et baignant dans un champ magnétique de 2 T produit par un solénoïde, le calorimètre électromagnétique permettant d'identifier et de mesurer l'énergie des photons et des électrons, et le calorimètre hadronique. Le tout est entouré par des détecteurs à muons, pour lesquels un ensemble d'aimants supraconducteurs génère un champ magnétique toroïdal. L'IN2P3 est impliqué, depuis le début des années 1980, dans la conception et la construction de tous les sous-détecteurs, ainsi que dans l'électronique, le software et le système d'acquisition de données.

*Calorimètre électromagnétique d'Atlas: le premier demi-tonneau avec tous ses câbles vient d'être inséré dans le cryostat (octobre 2003).
© CNRS/IN2P3*



La calorimétrie tient un rôle central dans le système de déclenchement et les analyses de physique. Les laboratoires français ont été fortement impliqués dans la construction du calorimètre électromagnétique à échantillonnage en plomb et en argon liquide. Il est constitué de trois parties principales: un cylindre central (tonneau), deux «roues» aux extrémités (les bouchons) et un prééchantillonneur. La taille de ce dernier (environ 8 m de long sur 4,5 m de diamètre), la géométrie en accordéon de ses composants, et le nombre élevé de canaux d'électronique (environ 200 000, assurant une fine granularité) sont autant de défis techniques qui ont été relevés.

La France est également engagée dans l'ensemble cryostats-cryogénie, qui représente une partie importante du détecteur à argon liquide. Les trois cryostats requis, entièrement réalisés en aluminium, supportent le poids des détecteurs et du bain de liquide, et isolent sous vide le calorimètre du monde extérieur, la sortie des signaux étant assurée par près de 200 000 traversées étanches. La phase de construction est sur le point de s'achever. Deux des trois calorimètres ont été insérés dans leur cryostat, et seront testés à chaud et à froid au cours de l'année 2004.

Le calorimètre hadronique en fer et en tuiles scintillantes (TileCal) entoure le calorimètre électromagnétique. D'une masse totale de 2900 t, le TileCal est composé de trois tonneaux d'une longueur totale de 13 m pour un diamètre extérieur d'une dizaine de mètres. L'essentiel de la masse est formé de blocs de fer répartis en 192 modules. L'Institut est un des acteurs majeurs de la conception et de la construction du TileCal.

Situé au cœur d'Atlas, le détecteur à pixels est le premier détecteur rencontré par les particules issues des collisions proton-proton et permet de mesurer leurs trajectoires avec une précision de l'ordre d'une dizaine de micromètres. Sa position le rend ainsi très compact -

50 cm de diamètre pour 1,4 m de long - malgré ses cent millions de canaux. L'Institut, qui a participé à l'essor de cette technologie, a été au cours des années passées très impliqué dans la conception de ces circuits électroniques de lecture particulièrement complexes.

Avec une collision proton-proton toutes les 25 ns, le volume des données générées sera gigantesque, même après un rapport de réduction de l'ordre d'un million assuré par les systèmes d'acquisition et leurs filtrages en ligne (environ 1 petabyte (10^{15} bytes) par an). L'Institut contribue au système de sélection de haut niveau des événements, ainsi qu'à la définition des moyens nécessaires pour traiter ces données (projet DataGrid).

Le détecteur Atlas au LHC permettra donc de mesurer avec une grande précision les caractéristiques du boson de Higgs, s'il existe, et sera un puissant outil pour la recherche de nouveaux phénomènes. Dans le futur immédiat, de mai à septembre 2004, une tranche quasi complète du détecteur Atlas (détecteur central interne, calorimètres, spectromètre à muons) sera testée en faisceau au SPS du Cern. À tous les niveaux, les groupes français sont au premier plan et les différents projets évoluent avec assurance vers le printemps 2007, date des premières collisions.

CMS

La période 2001-2003 fut celle de la finalisation des choix technologiques et du passage de la phase de recherche et de développement à la production de masse pour la construction du détecteur CMS à laquelle participent quatre laboratoires de l'IN2P3.

La construction du calorimètre électromagnétique, pièce maîtresse pour la détection d'un boson de Higgs dans le domaine de masse favorisée par les mesures électrofaibles, se poursuit à un rythme soutenu: près de 40 % des 61200 cristaux de la partie centrale ont été produits, plus de 60 % des capsules de lecture qui intègrent deux photodiodes à avalanche ont été assemblées, testées et étalonnées dans les laboratoires de l'IN2P3, 1/6^e des 36 supermodules nus (non équipés d'électronique) est assemblé. L'Institut est également profondément impliqué dans la conception et la validation de l'électronique de lecture. Il a joué un rôle majeur dans la conception du circuit FPPA, l'élément le plus complexe (amplification, mise en forme et multigain) de la chaîne de lecture du photodétecteur. Toutefois, l'émergence de la technologie silicium 0,25 μm durci aux radiations a permis, en 2003, de totalement repenser l'architecture de l'électronique de lecture: l'intelligence de déclenchement est désormais embarquée sur le détecteur, réduisant ainsi le nombre de fibres optiques nécessaires pour extraire les données du détecteur, et un nouvel amplificateur multigain, le MGPA, offrant des cycles de production plus rapides, des rendements plus élevés, un niveau de bruit intrinsèque plus faible ainsi qu'un coût moindre, a été retenu. Les laboratoires de l'Institut assurent l'étalonnage des cartes de lecture frontales, ainsi que la conception et la construction des cartes de déclenchement. Ils jouent également un rôle prépondérant dans la mise en œuvre et dans l'analyse des tests en faisceau. Le dernier test opéré à l'automne 2003 sur un supermodule dont 100 voies

étaient équipées d'une électronique finale a établi le parfait fonctionnement de la nouvelle architecture. Les performances obtenues, notamment la résolution en énergie, correspondent aux objectifs ambitieux initialement fixés.

L'Institut est également fortement impliqué dans la construction du trajectographe au silicium, avec la responsabilité des hybrides de lecture, de l'architecture du système d'acquisition, et de l'intégration et de la mise en service d'un bouchon complet, soit environ 50m² de détection comportant trois millions de canaux. L'intégralité du spectre des activités liées à la construction du trajectographe est couverte: contrôle de la qualité des senseurs au silicium; développement, production et suivi en qualité des hybrides de lecture, avec environ 5000 des 16000 hybrides déjà réalisés et une production se poursuivant au rythme de 1500 hybrides par mois; microcâblage par «bonding» des modules de détection formés d'un couple senseur/hybride; mise en œuvre d'un automate de précision pour le collage des modules sur un cadre en fibre de carbone, avec une production de 3000 modules, soit un bouchon, prête à démarrer; étude des services des bouchons; conception d'une base de données de construction. L'ensemble de ces activités de développement a débouché sur le succès en 2003 du test en faisceau d'un secteur de bouchon comprenant vingt-huit modules, pour lequel les cartes de déclenchement et les systèmes d'acquisition et de contrôle sont développés au sein de l'Institut.

La fin des activités de R&D a permis le renforcement du troisième axe d'implication de l'Institut, à savoir le calcul et l'analyse. Des progrès considérables ont été enregistrés au cours de la période 2001-2003: abandon d'Objectivity au profit du cadre de persistance Pool commun au LHC, migration vers Geant 4, première production adaptée à la grille de calcul à hauteur d'environ deux millions d'événements, arrivée à maturité



- <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/>
- <http://atlas-France.in2p3.fr/Atlas/index.html>

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

CNRS/IN2P3: CPPM, LAL, LAPP, LPC
Clermont, LPNHE, LPSC. I CEA/DSM: Dapnia.

du logiciel de reconstruction Orca avec des contributions dans le domaine de la reconstruction des vertex, des traces et de l'énergie électromagnétique. 2003 a vu la publication du TDR (*Technical Design Report*) consacré au système d'acquisition et au système de sélection de haut niveau étroitement lié au développement des algorithmes d'Orca. Ce recueil ouvre la voie au TDR de physique qui sera publié en 2005. Les équipes de l'Institut ont déjà acquis la responsabilité de plusieurs analyses: mise en évidence de dimensions supplémentaires signées par une paire d'électrons, recherche du boson de Higgs dans le canal $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4e$ et dans le canal de production associée suivie d'une

désintégration en deux photons, recherche d'un boson de Higgs chargé dans les désintégrations du quark top.



<http://cmsinfo.cern.ch>

ECAL Design Report: Cern/LHCC 97-33.

Tracker Design Report: Cern/LHCC 98-6 et Cern/LHCC 2000-016.

DAQ & High Level Trigger Design Report: Cern/LHCC 2002-026.

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

CNRS/IN2P3: IPN Lyon, IReS, LAPP, LLR. |
CEA/DSM: Dapnia.

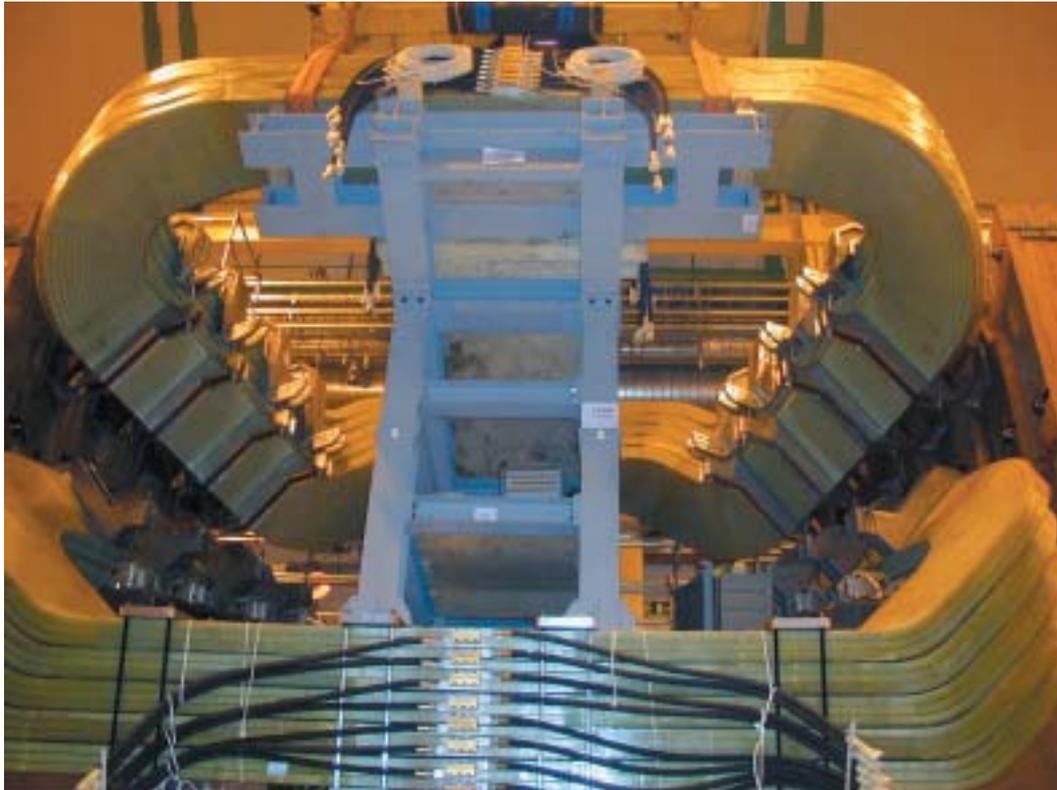
LHCb

Le but de l'expérience LHCb est de contraindre l'ensemble des paramètres du Modèle standard responsables de la «violation de la symétrie de CP» (charge-parité), et à l'origine du comportement (subtilement) différent de la matière et de l'antimatière dans l'Univers. Au point d'interaction des faisceaux du LHC, les deux états sont produits sous la forme de hadrons B et anti-B dont on étudie les propriétés et les différences. L'objectif est de mesurer les paramètres du modèle théorique, de découvrir la nouvelle physique sous-jacente (par exemple, en mettant à jour des inconsistances) et de mieux comprendre le phénomène.

Au cours des dernières années, le détecteur LHCb a fortement évolué. Au-delà du travail de développement de l'expérience, une réoptimisation complète a été engagée en 2001 afin d'accroître ses performances. Les modifications apportées ont permis de réduire la quantité de matière devant les calorimètres et d'améliorer le déclenchement de l'acquisition en identifiant plus efficacement les événements de désintégration d'un hadron B. Ainsi, les nombres de stations de mesure dans le détecteur de vertex et de chambres pour la reconstruction des traces ont été réduits (notamment par la suppression de ces dernières dans le volume de l'aimant), tout en maintenant une excellente qualité de mesure. La liste des améliorations apportées est longue et concerne également le tube à vide, les sous-détecteurs Rich servant à identifier les types des particules les traversant, la première chambre de détection des muons, etc. À l'issue de ces modifications, une campagne de simulation et de reconstruction dans le détecteur, dans sa nouvelle configuration, a été lancée et a permis de produire plus de dix millions d'événements. En parallèle, les programmes d'analyse de physique ont été peaufinés et appliqués sur ces simulations. Il est à noter que, si la simulation se fait toujours (et jusqu'à mi-2004) en

Secteur d'un bouchon
du trajectographe
de CMS partiellement
équipé.
© CNRS/IN2P3





Aimant du détecteur LHCb en cours de montage dans le puits de l'expérience. © Cern

Fortran, la reconstruction des événements pour la production massive de 2003, à l'instar des programmes d'analyse, a été effectuée avec un programme écrit complètement en C++ et qui sera le programme utilisé pendant le fonctionnement normal de l'expérience à partir de 2007. Les résultats des analyses ont montré la validité des choix qui ont été faits pendant ces deux dernières années. Alors que l'électronique de déclenchement de premier niveau est maintenant figée, le déclenchement de second niveau est en cours de développement avec une architecture différente de celle prévue dans le TP (*Technical Proposal*). La collaboration a décidé de distribuer les données en parallèle sur un millier de PC qui traiteront les événements. Ce choix permet une bien meilleure flexibilité de l'expérience. Les équipements électroniques pour rassembler les données, les mettre en forme et les distribuer, cela à la fréquence du LHC, sont actuellement en cours de développement. Deux TDR dits de «*réoptimisation*» et

«*trigger*» (déclenchement) sont parus en 2003 pour présenter ces choix et les études correspondantes. Seul le TDR «*computing*» reste à écrire avant l'arrivée des premières données.

La construction proprement dite a débuté dans le puits avec la mise en place de l'aimant. D'autres éléments ont également été réalisés. Ainsi, respectivement 100 % et 60 % des cellules des calorimètres électromagnétique et hadronique ont été montées et sont prêtes à être descendues au fond du puits. Les groupes français de l'IN2P3, dont les principaux engagements concernent les calorimètres et le détecteur de muons, ont également participé activement au travail de réoptimisation (par exemple dans le cadre de la reconstruction des traces), aux systèmes de «*déclenchement*», et aux programmes d'analyse et de reconstruction du détecteur. Le développement de l'électronique est arrivé dans la phase finale au cours de laquelle les derniers prototypes sont testés et les productions en série débutent. Les détec-

teurs de lumière pour les Rich et des calorimètres sont maintenant choisis et les premiers lots de composants sont qualifiés dans les laboratoires. 2004 verra notamment le lancement d'une nouvelle campagne de simulation où deux cent cinquante millions d'événements seront produits et analysés. Mais l'expérience sera prête à répondre aux questions fondamentales que nous nous posons sur «*la violation de la symétrie CP*» dès 2007.

-  • <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/>
- <http://lhcb.web.cern.ch/lhcb/TDR/TDR.htm>

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

CNRS/IN2P3: CPPM, LAL, LAPP, LPC, LPNHE.



NEMO3, CNGS ET OPERA

À la recherche de la masse du neutrino

Imad Laktineh

Les résultats de SuperKamiokande (SK), qui ont montré, grâce à l'observation de ses oscillations, que le neutrino est massif, ont donné un grand élan mondial à cette recherche. À l'IN2P3, des axes déjà existants, comme celui de la détermination de la nature du neutrino, ont été renforcés et d'autres, destinés à étudier la nature de ses oscillations, ont été créés.

NEMO3

La recherche et l'observation des désintégrations de type $0\nu\beta\beta$ ont pour but de vérifier si le neutrino est identique à son antiparticule, de mesurer sa masse effective $\langle m_\nu \rangle$ et de montrer la violation du nombre leptonique en contradiction avec le Modèle standard. Le défi d'une telle expérience est de supprimer la quasi-totalité du bruit de fond associé au signal recherché. Installé à Fréjus, Nemo a réussi son pari grâce à un détecteur formé d'un trajectographe fait de cellules à dérive, entouré par un calorimètre de plastique scintillant équipé de PMT à très bas bruit. Les sources émettrices étudiées sont placées à l'intérieur du trajectographe où règne un champ magnétique permettant de séparer efficacement les électrons des positons et d'effectuer une analyse topographique des événements. Associées à une bonne résolution en énergie et en temps, ces caractéristiques ont permis à l'expérience Nemo3, démarrée en février 2003, de vérifier, par l'étude des désintégrations connues de type $2\nu\beta\beta$, qu'elle atteindrait ses objectifs.

CNGS

Afin de valider l'oscillation des ν_μ vers des ν_τ suggérée par les résultats de SK, un faisceau de ν_μ à flux contrôlé sera produit au Cern et orienté vers le laboratoire de Gran Sasso (GS) en Italie. Ce faisceau utilisera des protons produits par le SPS à un taux très élevé. Les pions et kaons produits de la collision des protons avec une cible fixe seront triés, focalisés et ensuite conduits dans un tunnel. Une fois désintégrés en vol, ils produiront des ν_μ qui poursuivront leur

chemin vers le GS. L'IN2P3 participe à la fabrication de ce faisceau en développant les éléments optiques nécessaires à sa focalisation.

OPERA

C'est l'un des deux détecteurs qui seront installés à GS pour étudier l'oscillation des neutrinos. Afin de pouvoir étudier des interactions dont la topologie est à l'échelle micrométrique, Opera fera appel à la technique des émulsions nucléaires utilisée avec succès dans l'observation du ν_τ par Donut. Deux cent mille briques constituées de feuilles de plomb et d'émulsion seront utilisées pour mettre en évidence l'apparition du ν_τ en observant son lepton chargé: le τ . La localisation des interactions sera réalisée grâce à un trajectographe dont la lecture des données se fera en utilisant le concept de capteur intelligent fondé sur le standard Ethernet. Pour pouvoir attribuer une interaction à un ν_μ ou à un ν_τ , un «scan» des émulsions et une analyse topologique de l'événement doivent ensuite être réalisés. La grande surface à étudier nécessite des systèmes de scan ultrarapides ($20 \text{ cm}^2/\text{h}$) et de précision micrométrique. L'IN2P3 est fortement impliqué dans Opera. Les groupes français ont la responsabilité de la construction du trajectographe et de l'électronique associée. Ils ont en charge la mise en place du système d'acquisition et le développement logiciel, ainsi que la construction d'un robot permettant de manipuler les briques. Ils participent également au développement d'un système de scan possédant la rapidité et la précision requises. Une station de scan est en cours de construction à Lyon. Le démarrage d'Opera est prévu en septembre 2006 juste après celui du CNGS.

Construction des plans de scintillateurs d'Opera à l'IReS.
© CNRS/IN2P3



LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

NEMO CNRS/IN2P3: CENBG, IReS, LAL, LPC Caen.

CNGS CNRS/IN2P3: LAL.

OPERA CNRS/IN2P3: LAL, LAPP, IPNL, IReS.

RHIC Le déconfinement des quarks et des gluons

Une nouvelle ère dans la recherche du plasma de quarks et de gluons a vu le jour au Laboratoire national de Brookhaven (États-Unis) avec la mise en route, en juin 2000, du premier collisionneur d'ions lourds, Rhic. Les équipes françaises ont joué un rôle très significatif dans l'instrumentation des détecteurs et se sont fortement impliquées dans la production et l'analyse des données.

Deux anneaux indépendants supraconducteurs offrent la possibilité au Rhic de produire des collisions très diverses (proton-proton, deuton-or, silicium-silicium, or-or...) pour un large domaine en énergie dans le centre de masse (de ~ 30 à 200 GeV). La communauté française à Brookhaven s'élève à une quarantaine de physiciens et d'ingénieurs. Avec ses vingt-cinq semaines de prises annuelles de données, le Rhic doit permettre à la physique du plasma de quarks et de gluons de réaliser ses plus belles promesses avant la fin de la décennie.

La participation de l'IN2P3 à l'expérience Star a débuté en 1998 avec le projet français SSD consistant à concevoir, à financer et à réaliser un détecteur silicium à «micropistes». Le détecteur de Star se compose principalement de trois chambres à projection temporelle (TPC), d'un calorimètre électromagnétique et d'un détecteur de vertex. Situé entre ce dernier et la TPC centrale, le détecteur SSD doit augmenter significativement les performances de trajectographie de Star. L'IN2P3 a pris en charge les capteurs au silicium, la responsabilité de l'électronique en aval du capteur, de la mécanique et de l'assemblage du SSD et son contrôle global. Une première moitié du SSD a été installée à l'été 2003 pour la prise de données «run4» (2004). La seconde moitié sera opérationnelle pour le «run5». La contribution française à l'expérience Phenix a débuté en 1998 avec une participation à la «calibration» en ligne du calorimètre électromagnétique. L'IN2P3 et le CEA/Dapnia ont pris en charge en 2000 le financement et la réalisation d'un projet d'électronique de lecture des chambres à traces pour les deux spectromètres à

muons, et la création d'un site de production et d'analyse des données correspondantes (CC-IN2P3). Outre ces deux spectromètres, le détecteur de Phenix possède un spectromètre central composé, entre autres, de chambres à dérives et d'un calorimètre électromagnétique. Les deux spectromètres à muons ont été opérationnels pour le «run3» (2003) et ont donné entière satisfaction.

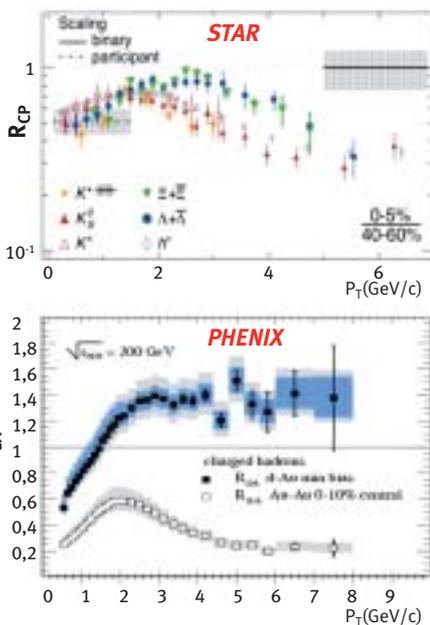
Les domaines d'analyse pris en charge par l'IN2P3 recouvrent la distribution des pions neutres à grande impulsion transverse, la production des baryons et antibaryons multiétranges, la mesure du charme ouvert et la production des charmonia. Les trois campagnes de prises de données (Au-Au à 130 et à 200 GeV (faible luminosité) et d-Au à 200 GeV) ont fourni un premier ensemble de résultats remarquables. À ce jour, le fait marquant des résultats du Rhic est l'observation d'une nouvelle manifestation de la formation du plasma: le «jet quenching» (figure). La théorie prédit que les gluons et les quarks doivent perdre beaucoup d'énergie en traversant un milieu déconfiné, dense en charges de couleur. Cela doit se traduire par une relative suppression dans la production des particules à grande impulsion transverse. L'étude des collisions d-Au a montré que cette suppression observée dans les collisions Au-Au n'est pas due aux modifications des fonctions de structure des partons dans la matière nucléaire «froide», mais aux effets d'un milieu dense à très hautes températures. Les premiers résultats du Rhic ne comportent aucun résultat (ou très peu) sur l'écrantage des charmonia et la production de photons thermiques dans le plasma. La mise en évidence de ces signatures constitue la priorité de la prise de données 2004.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNO, IReS, LLR, LPC
Clermont, Subatech. | CEA/DSM: Dapnia.

Mesure de la suppression à grande impulsion transverse pour la production de mésons et de baryons (Star, en haut). L'expérience Phenix (en bas) observe uniquement cette suppression des «jets» de particules dans les collisions Au-Au les plus centrales. © Collaboration Star/Phenix





ALICE La construction de l'expérience



Lorsqu'en 2007 le LHC réalisera les premières collisions de protons et de noyaux de plomb, commencera, pour l'expérience Alice, l'exploration des propriétés de la matière primordiale, constituée de quarks et de gluons libres. La construction d'Alice a atteint le rythme de croisière qui lui permettra d'être prête pour ce rendez-vous.

Depuis 2003, le point P2 fourmille d'activités. À près de 100 m de profondeur, autour de l'un des quatre points d'intersection où, dès 2007, les faisceaux de protons et de plomb du collisionneur LHC entreront en collision à quasi la vitesse de la lumière, se construit Alice, l'expérience dédiée à la physique des ions lourds et regroupant environ mille physiciens et ingénieurs (une cinquantaine en France) issus de quatre-vingts instituts (six laboratoires de l'IN2P3 et du Dapnia) répartis dans une trentaine de pays. L'énergie d'une collision étant environ trente fois supérieure à celle obtenue au Rhic, la matière créée, probablement sous la forme déconfinée d'un plasma de quarks et de gluons, atteindra des températures plus élevées, bien au-delà de la température critique de déconfinement, occupera un volume plus étendu et demeurera dans cet état suffisamment longtemps pour qu'une étude inédite de ses propriétés puisse être menée. De plus, la production

abondante de sondes pénétrantes permettra d'aborder cette étude sous un angle nouveau : à l'instar de la tomographie, les particules de très grande impulsion (de l'ordre de la centaine de GeV) ou de masse élevée (telles les saveurs lourdes charme et beauté) seront les témoins privilégiés des propriétés du milieu traversé. Les détecteurs d'Alice ont été conçus pour identifier et mesurer la plupart des particules, parmi les milliers, voire en dizaines de milliers (la théorie n'est pas en mesure de faire des prédictions précises) qui seront produites lors de chaque collision frontale de noyaux de plomb. La trajectoire des particules chargées, incurvée par le champ magnétique (0,5 T) d'un imposant aimant solénoïdal, sera reconstruite avec une précision sub-millimétrique par un ensemble de trajectographes entourant le vertex d'interaction. Les détecteurs Si à micropistes double face des deux couches les plus externes (5,6 m², 2,6 millions de voies) du trajec-

*Assemblage de la culasse de l'aimant dipôle du spectromètre muons vu de l'intérieur de l'aimant solénoïdal de l'expérience Alice.
© Cern*

topraphe interne ont été développés par l'IN2P3 : conception du capteur et de l'électronique frontale. Aux angles avant, un ensemble sophistiqué de matériaux absorbants protège du flux de hadrons les chambres de trajectographie du spectromètre de muons dont l'élément le plus imposant est un énorme aimant dipolaire. Le Dapnia assure la coordination de ce projet. Le Dapnia et l'IN2P3 ont conçu et construisent en partie les trajectographes (chambres à gaz multifils de très grande dimension), l'électronique de lecture (plus d'un million de voies), ainsi que l'électronique de déclenchement. Le parfait alignement de chacune des chambres et le repérage continu de leur position dans l'espace sont vitaux pour une reconstruction précise des trajectoires des muons : le système en charge de ces fonctions est conçu par l'IN2P3. La partie la plus visible de ces contributions s'est matérialisée à P2 par la livraison des deux énormes bobines de 30 t de l'aimant dipôle fabriquées par une entreprise de Vannes. La conception d'un autre détecteur, V0 (scintillateurs plastiques), modeste par sa taille mais indispensable pour signaler l'occurrence des collisions, est de la responsabilité de l'IN2P3. Enfin, signalons le bel exploit qu'a été la production d'événements simulés par des ordinateurs distribués sur une trentaine de centres de calcul, dont celui de l'IN2P3, grâce à une infrastructure logicielle développée par la collaboration Alice et qui préfigure la grille de calcul pour le LHC.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : LPC Clermont, IPNO, IPNL, IReS, Subatech. | CEA/DSM : Dapnia.

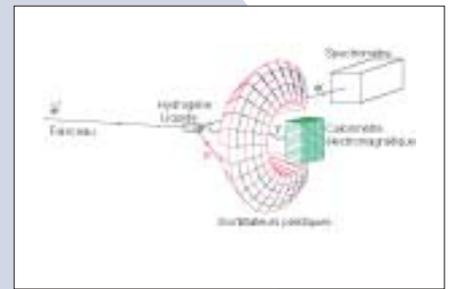


GPD Structure du nucléon

Les facteurs de forme sont directement liés à la structure spatiale du nucléon, laquelle peut être reliée - non sans hypothèse théorique - aux distributions spatiales de charges et de magnétisation. Les fonctions de structure, au travers des distributions de partons ordinaires, fournissent des renseignements sur la probabilité de présence d'un parton portant une fraction donnée de l'impulsion du nucléon. Ces deux descriptions du nucléon étaient jusqu'alors indépendantes puisque se référant à des dimensions disjointes (position, impulsion). Le formalisme des GPD permet dans un premier temps d'unifier ces deux descriptions puisque les distributions de partons ordinaires ne sont qu'une limite mathématique des GPD et que les facteurs de forme apparaissent dans des règles de somme des GPD. Bien entendu, les GPD sont bien plus que l'addition des concepts précédemment établis: elles décrivent la structure du nucléon en termes de corrélation entre partons d'impulsions différentes. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui a popularisé les GPD, lesquelles permettent en effet d'accéder au moment angulaire total porté par les quarks. Il est ainsi apparu

Ces dernières années est apparu un outil indispensable à la compréhension du nucléon, les GPD, sigle anglais pour Generalized Parton Distribution, ou distributions de partons généralisées, dont les premières validations expérimentales ont été obtenues ces trois dernières années comme sous-produits d'expériences plus générales de diffusion de leptons.

*Dispositif expérimental réalisé pour l'expérience DVCS dans le Hall A.
© CNRS/IN2P3*



récemment que la connaissance des GPD permettait en outre de corréler les informations spatiales des facteurs de forme et les informations d'impulsion des distributions de partons, et ainsi de comprendre le nucléon en tant qu'objet dynamique en trois dimensions. Ces GPD, qui ne sont accessibles aux expériences que depuis les récents progrès réalisés dans les domaines des accélérateurs et de l'instrumentation des détecteurs, vont ainsi permettre de mieux comprendre le nucléon à travers des mesures directes, le développement de modèles phénoménologiques ou, encore, la confrontation à des calculs QCD sur réseau.

Plusieurs expériences à Hera (H1 et Hermes) ont mis en évidence un signal lié à la diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS, sigle anglais pour *Deeply Virtual Compton Scattering*). D'autres mesures, portant la signature de physiciens de l'IN2P3 et du CEA/Dapnia, utilisant le spectromètre Clas au Thomas Jefferson National Laboratory (TJNAF) ont démontré que le concept de GPD semblait applicable même à des énergies de faisceau de

l'ordre de 6 GeV. Nos laboratoires construisent à l'heure actuelle les détecteurs pour deux nouvelles expériences dans les Halls A et B du TJNAF. Les prises de données sont prévues entre 2004 et 2005, et fourniront des données d'une précision encore jamais atteinte, permettant d'aller au-delà de la simple comparaison avec les modèles phénoménologiques et d'y apporter de fortes contraintes.



<http://www.jlab.org/~sabatie/dvcs/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPC Clermont, LPSC, IPNO. |
CEA/DSM: Dapnia.



Dominique Curien

VIVITRON La structure nucléaire aux limites

L'étude détaillée de la structure nucléaire aux conditions extrêmes, à la limite du moment angulaire (spin) et de l'isospin (rapport proton/neutron), permet d'effectuer des tests décisifs sur l'interaction effective agissant entre les nucléons du noyau. Cette étude a été menée de façon intensive en utilisant les faisceaux de l'accélérateur Vivitron.

structures rares développées par le noyau permet ainsi d'affiner les modèles nucléaires. Un important programme a été mené ces dernières années au Vivitron (*European Large Scale Facility*) en utilisant les multidétecteurs Euroball IV, Charissa, Demon et Icare. Quelques exemples de résultats d'Euroball sont mentionnés ici.

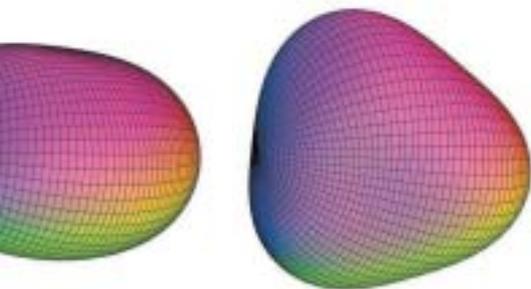
Pour répondre aux contraintes de rotation, le noyau peut changer de « forme ». La prédiction de formes très allongées, comme l'hyperdéformation (HD, noyau de symétrie axiale de rapport d'axe d'environ 3/1), ou encore l'apparition de nouveaux degrés de liberté, comme la symétrie tétraédrique, sont particulièrement intrigantes. La recherche de l'HD dans le noyau de ^{126}Ba a fait l'objet d'une expérience récente qui est en cours d'analyse. Les premiers résultats indiquent que les conditions de sa production en laboratoire sont plus restrictives qu'attendues. Dans certains cas de rotation, la symétrie axiale est brisée et le noyau peut alors adopter une forme triaxiale (forme du Kiwi), avec pour conséquence directe une excitation dite de « *wobbling* » dont l'analogue classique serait le mouvement de précession d'une toupie. Prédite il y a plus de trente ans, cette excitation a été mise en évidence pour les isotopes $^{163,165}\text{Lu}$ dans lesquels des familles de bandes superdéformées se dés excitent de l'une à l'autre montrent la signature caractéristique d'une excitation collective de *wobbling* à 0, 1 et 2 phonons.

Les quantités prépondérantes pour prédire les propriétés d'un noyau à partir d'une interaction effective donnée sont le nombre de nucléons et le rapport N/Z des neutrons aux protons. Les extrêmes

de ces quantités définissent les limites d'existence pour la matière nucléaire. Le noyau ^{100}Sn ($N = Z = 50$) est le plus lourd des noyaux doublement magiques; son étude est cruciale pour définir les paramètres d'entrée des calculs de modèles en couches et identifier un possible appariement proton-neutron. Comme ^{100}Sn ne peut pas être produit avec un faisceau stable, c'est l'étude des niveaux excités de ses voisins (comme ^{98}Cd) qui a été entreprise: elle a permis d'en déduire une valeur du gap $N = 50$. L'étude de l'évolution des propriétés nucléaires le long d'une chaîne isotopique donnée est du plus haut intérêt. Un exemple en est l'étude des premiers états excités des isotopes de l'argent ^{95}Ag ($N = Z + 1$) et ^{116}Ag (riche en neutrons).

Il a été décidé d'arrêter le Vivitron en décembre 2003. Il en restera la mémoire d'une machine quelquefois revêche, mais qui fournissait environ quatre mille cinq cents heures de faisceau stable par an à des énergies proches de la barrière coulombienne parfaitement adaptées aux études de structure nucléaire aux limites de la stabilité. Une moisson de près de quatre cents publications signées par des physiciens de vingt-quatre nationalités est là pour en témoigner.

Vue d'artiste en fausses couleurs d'un noyau triaxial (observé au Vivitron) et tétraédrique (prédit).
© CNRS/IN2P3-ULP



Le noyau atomique est le paradigme d'un système mésoscopique de fermions en interaction forte où les effets quantiques jouent un rôle central. À la limite de la stabilité en spin ou en isospin, certaines composantes des forces nucléaires comme l'appariement sont proportionnellement très amplifiées ou, au contraire, diminuées. L'étude des

 G. de Angelis, A. Bracco et D. Curien, The Euroball gamma ray detector array, *EuroPhysics News*, September/October 2003, p. 181.
J. Dudek *et al.*, We're all made of pyramids, *NewScientists*, 8 juin 2002, p. 7.
D.R. Jensen *et al.*, Evidence for Second-Phonon Nuclear Wobbling, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 142503.
M.G. Porquet *et al.*, Evolution of the $\pi g9/2^* \nu h11/2$ configuration in the neutron-rich $^{110,112}\text{Rh}$ and $^{114,116}\text{Ag}$ isotopes, *Eur. Phys. J.* A18 (2003) 25.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IReS, CENBG, CSNSM, IPNL, IPNO, LPSC. I CEA/DSM: Dapnia.

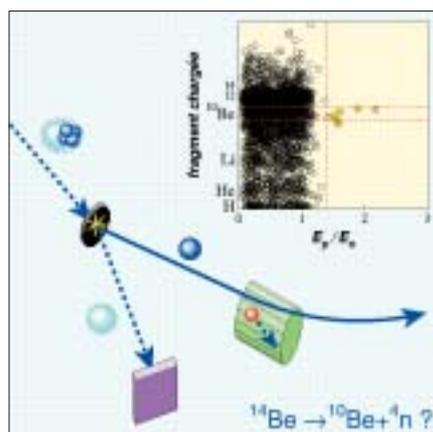


DEUX DÉCOUVERTES

La radioactivité deux protons et le tétraneutron

Bertram Blank

Vue schématique du dispositif expérimental et spectre montrant les six événements « tétraneutron ».
© CNRS/IN2P3



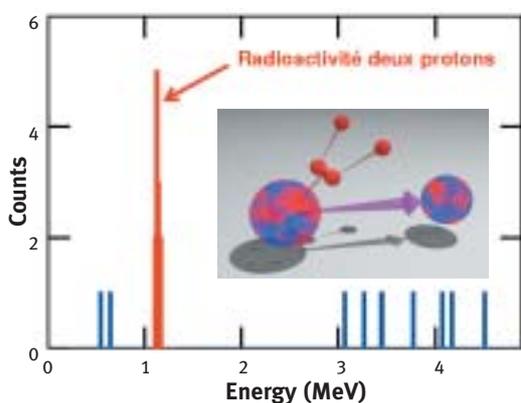
Dans deux expériences indépendantes au Ganil et au GSI, une nouvelle radioactivité deux protons a été découverte récemment. Les résultats des expériences au Ganil qui cherchent le tétraneutron sont également décrits.

LA RADIOACTIVITÉ DEUX PROTONS

Les noyaux atomiques stables se caractérisent par un équilibre entre leurs nombres de protons et de neutrons (nucléons). Lorsque cet équilibre est rompu par un excès de l'un de ces deux types de nucléons, le noyau devient instable. Il se désintègre alors en émettant généralement un électron ou un positon (radioactivité bêta) en transformant un neutron excédentaire en proton, ou *vice versa*. En cas de déséquilibre plus grand, l'émission directe de particules devient possible. Ainsi, la radioactivité un proton a été observée dans les années 1980 et la théorie nucléaire prédit depuis les années 1960 un nouveau mode de désintégration radioactive: l'émission simultanée de deux protons. Deux expériences récentes réalisées au Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) et au Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) ont mis en évidence pour la première fois ce phénomène dans le noyau fer-45.

L'étude de cette radioactivité permettra de mieux comprendre le mécanisme de l'émission des deux protons et ouvre une nouvelle voie pour l'observation des forces régnant au sein du noyau atomique, et notamment l'appariement des nucléons.

Spectre expérimental de la désintégration du fer-45 et représentation schématique de la radioactivité deux protons.
© CNRS/IN2P3



LE TÉTRANEUTRON

La compréhension des mécanismes de construction des noyaux à partir de leurs constituants, les nucléons, représente un des enjeux majeurs de la physique nucléaire. Ainsi, on sait que les noyaux, à l'exception de l'hydrogène, sont des combinaisons de protons et de neutrons. On sait également qu'un système de deux neutrons est faiblement non lié et que l'addition d'un neutron supplémentaire à un noyau accroît souvent sa stabilité.

La question se pose alors de savoir si un système neutronique composé de plus de deux neutrons pourrait exister. Une expérience effectuée au Ganil avec les détecteurs Charissa et Demon a révélé six événements compatibles avec les caractéristiques d'un tétraneutron - un système composé uniquement de quatre neutrons - qui serait produit lors de la cassure de noyaux de ^{14}Be . Ce nombre d'événements est supérieur au niveau du bruit de fond estimé en fonction de la possibilité d'occurrence d'autres processus. Pour confirmer ce résultat, il est alors essentiel de poursuivre ces études afin de savoir si le tétraneutron constitue un système lié ou faiblement non lié - une «résonance».

Une expérience récente réalisée par la collaboration Must au Ganil avec un faisceau de ^8He avait pour objectif la mesure de la masse du tétraneutron. Une analyse préliminaire semble indiquer que celui-ci existerait en tant que résonance. Si d'autres expériences confirmaient ces résultats et si la masse du tétraneutron était déterminée précisément, nous disposerions alors d'informations précieuses pour les modèles d'interaction nucléon-nucléon et les systèmes composés d'un petit nombre de particules.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

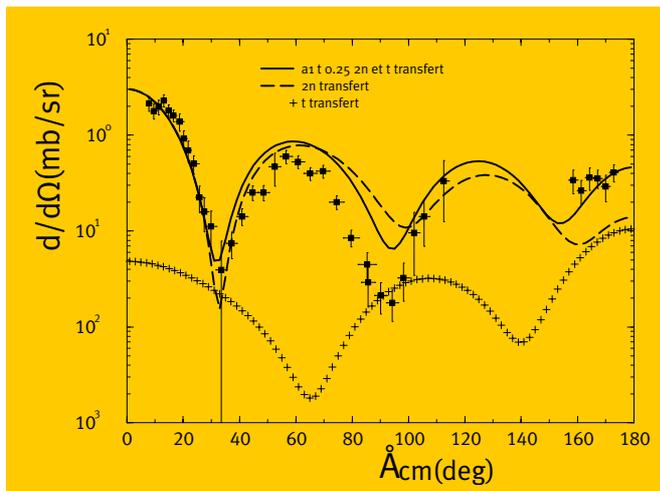
CNRS/IN2P3: CENBG, LPC Caen, Ganil, IPNO. | CEA/DSM: Dapnia. | CEA/DAM: Bruyères-le-Châtel.



NOYAUX À HALO BORROMÉENS et autres structures exotiques

Patricia Roussel-Chomaz

Distribution angulaire mesurée pour la réaction ${}^6\text{He}(p, t)\alpha$. Les facteurs spectroscopiques $S_{\alpha-2n}$ et S_{t-t} des configurations $\alpha + 2n$ et $t + t$ dans l'état fondamental



Le développement régulier de nouveaux outils de détection permet d'étudier les noyaux légers dans leurs configurations les plus exotiques et de révéler ainsi de nouvelles structures. Les plus spectaculaires sont celles des noyaux à halo Borroméens, où deux neutrons s'éloignent du «cœur» du noyau, formant une structure nucléaire à trois corps.

Il est possible de produire, par fragmentation de noyaux stables, des faisceaux secondaires constitués de toutes sortes de noyaux. On dispose aujourd'hui de tels faisceaux pour tous les isotopes des éléments légers, des moins riches aux plus riches en neutrons. Cela a permis de découvrir, il y a une quinzaine d'années, que les plus riches en neutrons possèdent parfois une taille «anormalement grande», la faible liaison des derniers neutrons pouvant conduire à la formation d'un nuage neutronique autour d'un cœur, un «halo», conférant à ces isotopes les dimensions des noyaux les plus lourds. Lorsque ce halo est constitué de deux neutrons, ces noyaux présentent une structure dite «Borroméenne»: les sous-systèmes à deux corps (cœur-n et n-n) sont non liés et seule la présence des trois corps (cœur-n-n) permet la liaison. Cette propriété explique, par exemple, la synthèse des noyaux plus lourds à partir

des nucléons et des particules α : celle-ci ne peut en effet procéder que par la formation de structures triples (α -n-n, α - α -n ou α - α - α), les structures doubles (α -n, α -p et α - α) n'étant pas liées.

Dans le cas de ${}^6\text{He}$, certains modèles prévoient que la fonction d'onde de l'état fondamental devait comporter, en plus de la configuration $\alpha + 2n$, une proportion non négligeable de la configuration à deux tritons. Une expérience a été réalisée pour tester cette prédiction, à partir de l'étude de la réaction de transfert ${}^6\text{He}(p, t)\alpha$. En effet, cette réaction peut être interprétée soit comme un transfert de deux neutrons (${}^6\text{He} = \alpha + 2n$), soit comme un transfert de triton (${}^6\text{He} = t + t$). La mesure de la distribution angulaire de cette réaction a permis de montrer que le facteur spectroscopique de la configuration à deux tritons est très faible par rapport aux prévisions théoriques, et que l'image de noyau à halo

de ${}^6\text{He}$ sont déduits principalement de la section efficace mesurée aux angles proches de 0° et 180° respectivement.
© CNRS/IN2P3-CEA

avec un cœur d' α et un halo de deux neutrons est valable pour ${}^6\text{He}$. Cette expérience a été réalisée avec un faisceau de ${}^6\text{He}$ produit par Sissi en utilisant le spectromètre Speg et l'ensemble Must de détection de particules chargées légères.

Grâce à Spiral, le Ganil dispose maintenant de faisceaux de ${}^8\text{He}$ de relativement bonne intensité et plusieurs expériences ont étudié les réactions induites par ce faisceau sur des cibles légères: diffusions élastique, inélastique et transfert. En particulier, une expérience réalisée à basse énergie (environ 4 MeV/n) avec la cible active Maya, et dont le but principal était l'étude des états isobariques analogues de ${}^9\text{He}$, a montré que les sections efficaces pour les réactions de transfert de un et deux neutrons sont très importantes à basse énergie. Le faisceau de ${}^8\text{He}$ a également été utilisé pour étudier les caractéristiques du système à quatre neutrons.

Pour les noyaux un peu plus lourds, une expérience de mesure des distributions en moments des fragments du cœur et des sections efficaces de cassure d'un neutron a montré que ${}^{14}\text{B}$ pouvait présenter une distribution légèrement étendue de ses neutrons de valence, ainsi que ${}^{15}\text{C}$, bien que le comportement de ce dernier noyau soit moins clair.



- L. Giot, P. Roussel-Chomaz *et al.*,
Proceeding of the Conference on clustering aspects of nuclear structure and dynamics, Nara, Japan, 24-29 November 2003, accepté dans *Nucl. Phys. A*.
W. Mittig *et al.*, Proc. NENS03, A new era of nuclear structure physics, Kurokawa Village, Japan, 19-22 novembre 2003, à paraître.
E. Sauvan *et al.*, *Phys. Rev. C*, 69 (2004) 044603.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPC Caen, IPNO. I
CNRS/CEA: Ganil. I CEA/DSM: Dapnia/SPhN.



ARCHEOPS Un progrès dans la compréhension de la naissance de l'Univers

Archeops est une expérience de mesure du rayonnement fossile dont l'étude est essentielle pour obtenir des informations précises sur l'évolution de l'Univers: densité, taux d'expansion, âge, etc. Conçue comme un prototype de l'instrument à haute fréquence du futur satellite Planck, qui sera lancé en 2007 par l'ESA, Archeops est une expérience embarquée sous ballon stratosphérique, constituée d'un miroir de 1,5 m de diamètre dont le plan focal est composé de vingt et un bolomètres mesurant le rayonnement du fond du ciel dans quatre domaines de fréquences (143, 217, 353 et 545 GHz). Après les vols de juillet 1999 et de janvier 2001, Archeops a permis, le 7 février 2002, lors du dernier vol du ballon d'une durée de dix-neuf heures assuré par le Cnes depuis la base de Kiruna en Suède, d'obtenir des mesures de la température du rayonnement fossile, parmi

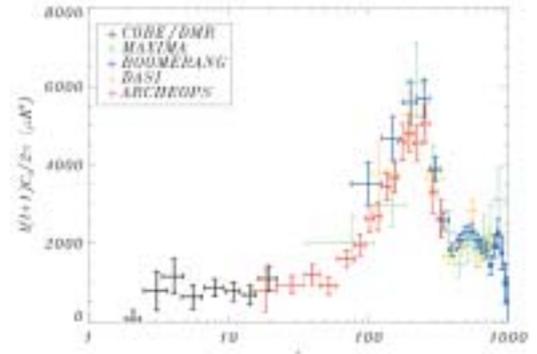
Les anisotropies du fond diffus cosmologique contiennent une mine d'informations permettant de contraindre le modèle cosmologique du big-bang décrivant l'Univers dans lequel nous vivons: de la genèse des fluctuations primordiales aux structures (galaxies, amas de galaxies...) que nous observons aujourd'hui. Archeops a permis de poser un jalon important dans l'étude de ces anisotropies.

les plus précises jamais obtenues sur une grande gamme d'échelles angulaires (30 % du ciel). Ces résultats ont conforté et amélioré ceux de ses prédécesseurs (Boomerang, Maxima, Cobe...) en détectant pour la première fois le premier pic acoustique à $l = 220 \pm 6$ (amplitude $\Delta T = 71,5 \pm 2 \mu K$). Ils confirment que l'Univers est spatialement plat et fournissent une estimation de son contenu en matière ordinaire (baryonique) qui est en parfait accord avec la théorie de la production des noyaux au cours du big-bang (nucléosynthèse primordiale).

L'instrument était aussi muni de six voies polarisées à 353 GHz qui ont permis de mesurer la polarisation de la poussière galactique, composante dominant à cette fréquence et constituant l'avant-plan le plus important pour la polarisation du fond diffus cosmologique. Archeops a ainsi fourni, dans le domaine millimétrique, la première carte du rayonnement polarisé sur de grandes échelles angulaires avec une résolution de 13 arcminutes. L'analyse de cette carte a permis d'isoler plusieurs zones, s'étendant sur plusieurs degrés carrés à proximité du plan galactique, avec un taux de polarisation allant de 5 à 20 %.

La collaboration française à cette expérience internationale a été dominante. Outre leur participation à l'étalonnage et à l'intégration de l'instrumentation, les laboratoires de l'IN2P3 ont contribué de façon majeure à l'analyse, à l'extraction et à l'interprétation des données.

Depuis l'annonce de ces conclusions, une équipe américaine a rendu publics ses premiers résultats obtenus sur la totalité du ciel avec le satellite WMAP équipé d'une technologie radio. Cependant, cette technologie trouve probablement



Spectres de puissance des anisotropies du fond diffus cosmologique mesurés par différentes expériences en satellite [Cobe/DMR (1992)], en ballon stratosphérique [Boomerang (2001), Maxima (2002) et Archeops (2003)] et au sol [Dasi (2002)]. © Collaboration Archeops

avec WMAP son aboutissement, alors que l'approche d'Archeops, fondée sur l'utilisation de bolomètres refroidis à un dixième de degré au-dessus du zéro absolu, arrive aujourd'hui à maturité et permettra d'obtenir avec Planck un saut qualitatif majeur par rapport aux expériences actuelles.



<http://www.archeops.org/>

A. Benoît *et al.*, Archeops collaboration, The cosmic microwave background anisotropy power spectrum measured by Archeops, *A&A* 399 (2003) L19-L23.

A. Benoît *et al.*, First detection of polarization of the submillimetre diffuse galactic dust emission by Archeops, *A&A* accepté pour publication.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAL, PCC-APC, CSNSM, LPSC. | CNRS/SPM: CRTBT. | CNRS/Insu: CESR, Laboratoire d'astrophysique de l'Observatoire Midi-Pyrénées, IAP, LAOG, IAS. | CEA/DSM: Dapnia (SPP et SA).

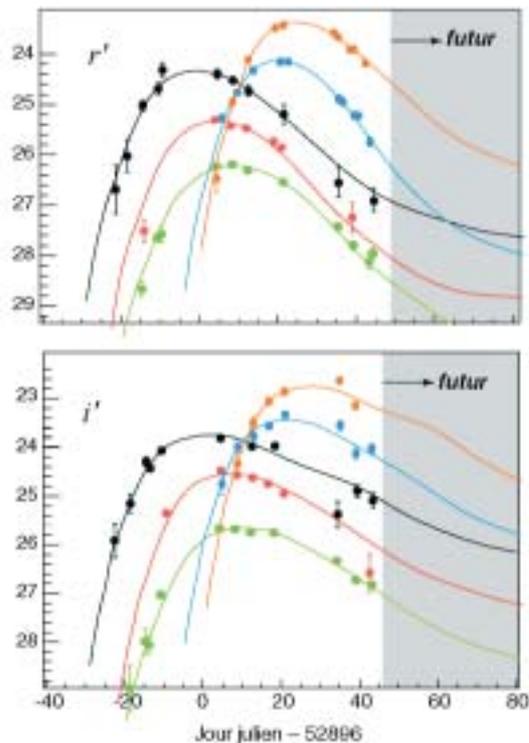


Pierre Astier

SUPERNOVÆ IA Un accès à l'histoire récente de l'expansion de l'Univers

Courbes de lumière de supernovæ mesurées par le programme SNLS avec Megacam au CFHT, dans les bandes r' et i'. L'observation répétée des mêmes champs permet de mesurer les courbes de lumière avant même d'avoir découvert les supernovæ et garantit ainsi que le flux maximal (qui indique la distance) sera bien mesuré.

© Collaboration SNLS



Les supernovæ (SN) sont des explosions cataclysmiques d'étoiles qui produisent pendant quelques mois énormément de lumière, parfois autant qu'une galaxie tout entière. Une classe de supernovæ, les supernovæ de type Ia, présente une luminosité très reproductible, ce qui permet de les utiliser comme indicateurs de distance. Depuis une dizaine d'années, on sait les détecter à des distances cosmologiques et ainsi accéder à l'histoire récente de l'expansion de l'Univers.

Fin 1998, deux équipes publient des résultats surprenants: les luminosités observées des supernovæ distantes sont trop faibles pour un Univers en décélération. Elles suggèrent toutes deux que l'expansion de l'Univers s'accélère aujourd'hui, sous l'influence d'une mystérieuse «énergie sombre». Ce résultat inattendu a depuis été confirmé par d'autres approches observationnelles. Il a finalement conduit au «modèle de concordance» dans lequel la matière contribue pour environ un tiers à l'énergie de l'Univers, le reste étant attribué à cette énergie sombre, dont la propriété caractéristique est qu'elle ne se dilue pas (ou presque pas) avec l'expansion de l'Univers. Paradoxalement, c'est cette «indifférence» à l'expansion qui l'accélé-

rerait. En 1998, une équipe de l'IN2P3 rejoint le *Supernovæ Cosmology Project* (SCP), l'une des deux équipes pionnières, avec le projet de détecter des supernovæ plus lointaines (sont alors visés des décalages vers le rouge dépassant 1) en réalisant les mesures de photométrie avec le télescope spatial Hubble. Le groupe français fournit un apport clé au dispositif: il obtient du temps d'observation auprès du télescope Canada-France-Hawaii (CFHT), qui domine la classe des 4 m par son imageur grand champ et la qualité d'image qu'il fournit en routine. Un lot de supernovæ distantes est ainsi détecté en 2001 et mesuré avec le télescope spatial Hubble, dont une à un décalage vers le rouge de 1,12. Les traitements des images faisaient appel à des logiciels de seconde génération développés par ce même groupe.

Fin 2002, le CFHT met en service Megacam, un nouvel imageur de 1 degré carré construit au CEA. Avec cet instrument, il est désormais possible de découvrir et de mesurer les supernovæ. C'est l'objet du programme SNLS, qui utilise un volume important de temps d'observation au CFHT mais aussi sur les télescopes de 8 m nécessaires à l'identification des candidats. Ce programme se donne pour but premier de caractériser l'énergie noire, à l'aide de plusieurs centaines de supernovæ Ia mesurées en cinq ans. L'IN2P3 est aussi engagé dans le programme *SuperNova Factory*, qui ambitionne des mesures spectrophotométriques de SN Ia proches, à l'aide d'un instrument dédié construit dans cet objectif sous maîtrise d'œuvre du CRAL à Lyon. Cet instrument doit commencer les observations scientifiques à l'été 2004. Il fournira les données précieuses nécessaires à l'amélioration des mesures de distance à l'aide des SN Ia, indispensable pour tirer parti de la grande statistique escomptée du SNLS. Finalement, la caractérisation fine de l'énergie sombre à l'aide des SN Ia nécessite d'observer depuis l'espace. Trois équipes de l'IN2P3 se sont engagées dans les développements scientifiques et instrumentaux d'un projet qui pourrait voir le jour dans les prochaines années (voir Snap/JDEM).

 <http://supernova.in2p3.fr>

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**

CNRS/IN2P3: LPNHE, IPNL, CPPM. |
CNRS/Insu: CRAL. | CEA/DSM: Dapnia (SPP).



Jules Gascon

EDELWEISS À la recherche de la matière noire

Les récentes observations cosmologiques confirment qu'une grande partie de la masse de l'Univers serait constituée d'un nouveau type de particule interagissant très faiblement avec la matière. L'expérience Edelweiss a obtenu une sensibilité inégalée dans la détection des très rares collisions entre ces particules, piégées dans le champ de notre galaxie, et des noyaux cibles.

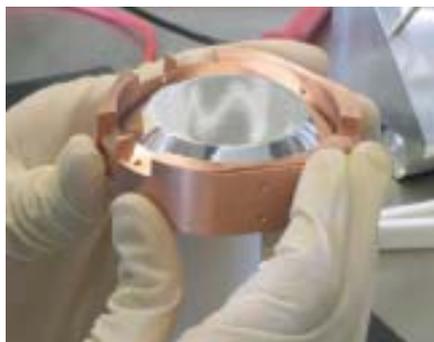
La matière noire, qui serait répartie en un gigantesque halo autour de notre galaxie, est activement recherchée sous la forme de particules massives interagissant faiblement avec la matière (Wimp, selon l'acronyme anglais) et prédites par les théories de supersymétrie, avec des masses de l'ordre de celles des noyaux atomiques. Leurs collisions avec des atomes en laboratoire devraient produire des noyaux de recul ayant des énergies cinétiques de l'ordre de la dizaine de keV. Cependant, le taux de collisions attendu est très certainement inférieur à un par jour et par kilo de matière cible, voire à un par an et par kilo. Ces faibles taux, combinés aux modestes énergies en jeu, représentent un défi expérimental de taille que la collaboration Edelweiss est en voie de relever grâce à une technique innovante utilisant des détecteurs cryogéniques en germanium semi-conducteur. C'est avec de tels détecteurs d'une masse de 320 g, et avec une exposition totale de 11,7 kg.j, que cette collaboration de laboratoires français, à laquelle l'IN2P3 participe, a réalisé et publié, en 2002, les résultats de la recherche la plus sensible réalisée jusqu'à présent. Grâce au très bas bruit de fond obtenu, les résultats sont meilleurs que ceux obtenus avec des techniques plus conventionnelles utilisant pourtant des détecteurs dix à cent fois plus massifs et des temps d'exposition de un à plusieurs ordres de grandeur plus élevés.

La réduction du bruit de fond est le fruit d'un travail méticuleux de sélection de matériaux de basse radioactivité, de l'utilisation de blindages et de l'installation dans un site exceptionnel, le Laboratoire souterrain de Modane, dont la couverture rocheuse de 1 700 m réduit

le flux de muons cosmiques d'un facteur supérieur à un million. Elle tient également à la technique de détection des reculs nucléaires. Chaque détecteur fonctionne à la fois comme un détecteur à ionisation, où les charges arrachées par le noyau de recul sont collectées, et comme un bolomètre, mesurant l'énergie totale de l'interaction. En effet, les détecteurs refroidis à ~ 20 mK sont munis de thermomètres sensibles qui mesurent avec précision l'énergie totale déposée lors de chaque interaction. En la comparant au nombre de charges collectées simultanément, on réussit à rejeter plus de 99,9 % du bruit de fond dominant dû à la radioactivité gamma naturelle.

Depuis 2002, les campagnes de prises de données se sont poursuivies. Avec une exposition multipliée par quatre, la sensibilité atteinte précédemment et l'excellente fiabilité des détecteurs ont été confirmées. C'est sur cette base que se prépare actuellement la prochaine phase de l'expérience, Edelweiss-II, qui vise à améliorer la sensibilité de plus d'un facteur 10. Le nouveau cryostat permet l'utilisation simultanée, dans un premier temps, de vingt-huit détecteurs. Avec un effort particulier sur l'amélioration des blindages et la sélection de matériaux à bas bruit radioactif, l'augmentation de la sensibilité sera telle qu'il deviendra nécessaire d'ajouter un dispositif identifiant la dizaine de rayons cosmiques traversant chaque jour le dispositif expérimental. La prochaine phase de prise de données est prévue en 2005.

Un des détecteurs germanium d'Edelweiss, avant son installation dans le cryostat à très faible radioactivité.
© CEA



<http://edelweiss.in2p3.fr/>

A. Benoit *et al.*, *Phys. Lett. B* 545 (2002) 43.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, CSNSM. |

CNRS/Insu: IAP. | CNRS/SPM: CRTBT. |

CEA/DSM: Dapnia, Drecam.



Benoît Mours

VIRGO La recherche d'ondes gravitationnelles

La construction de Virgo, un grand interféromètre dédié à la recherche d'ondes gravitationnelles et cofinancé par le CNRS et l'INFN, vient de s'achever en Italie, près de Pise. Après avoir apporté une contribution majeure à sa réalisation, l'Institut a participé activement à sa mise en route, ainsi qu'à la préparation de l'analyse des données.

L'objectif de l'expérience Virgo est la détection directe des ondes gravitationnelles produites par des phénomènes astrophysiques violents mettant en jeu des masses considérables subissant de violentes accélérations (supernovæ, coalescences d'étoiles à neutrons ou de trous noirs...). Leur détection devrait donc permettre une meilleure compréhension de la force de gravitation et ouvrir une nouvelle voie d'exploration de l'Univers, en particulier des régions cosmiques très denses et éloignées.

Les ondes gravitationnelles induisent d'infimes « déformations de l'espace », lesquelles conduisent à une modification de la distance entre deux points qui est proportionnelle à leur séparation. Virgo mesure les variations de distance entre les miroirs d'un interféromètre dont les bras sont longs de 3 km et sera capable de mesurer des variations de distance relatives de quelque 10^{-23} , soit un déplacement de l'ordre de 10^{-19} m.

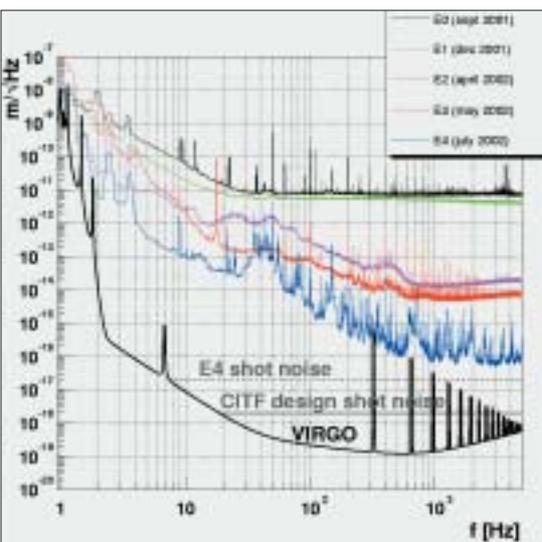
Les laboratoires de l'IN2P3 ont fortement contribué à la construction de Virgo en réalisant l'ensemble de l'enceinte à vide de l'interféromètre, les traitements de surface des miroirs, le système de détection, une grande partie des systèmes de contrôles (électronique et logiciels), l'acquisition des données, ainsi que de nombreux logiciels allant de la simulation à l'analyse des données. Ils sont aussi impliqués dans la mise en route et le fonctionnement de Virgo. Depuis 2001, le consortium EGO (European Gravitational Observatory), société de droit civil initiée par le CNRS et l'INFN, gère le site.

La construction de la partie centrale de l'interféromètre (CITF) s'est achevée en 2001 et a ouvert la voie aux premiers

tests d'un interféromètre de taille réduite (bras de 6 m de long) mais utilisant l'essentiel des éléments de Virgo. La mise au point progressive du CITF a duré un peu plus d'un an et a été ponctuée par plusieurs prises de données techniques qui ont permis de valider les progrès réalisés. La sensibilité du détecteur est ainsi passée de 10^{-11} m/Hz^{-1/2} à 10^{-16} m/Hz^{-1/2} en un an (figure), au fur et à mesure de la mise en route de différents composants tels que le système de recyclage de la lumière (courbe E2), l'alignement automatique (courbe E3) ou le laser de 10 W (courbe E4).

La construction a été achevée au printemps 2003 et, en juillet, l'interféromètre a été inauguré par les ministres de la Recherche italien et français.

La mise en route de Virgo dans sa totalité a eu lieu fin 2003, la cavité Fabry-Perot du bras nord ayant été asservie en octobre et celle du bras ouest en décembre. La recombinaison de ces deux faisceaux a été réalisée pour la première fois fin février 2004. Plusieurs mois de travail sont encore nécessaires pour que la sensibilité soit suffisante. C'est donc vers la fin 2004 que Virgo devrait démarrer sa première prise de données scientifiques. Les méthodes de recherche de coalescence d'objets compacts binaires, de pulsars ou de sources impulsives de type supernova actuellement développées par les laboratoires de l'IN2P3 permettront de réaliser les premières analyses.



Courbes de sensibilité de l'interféromètre central illustrant les progrès accomplis au fur et à mesure des cinq prises de données techniques réalisées de septembre 2001 (E0) à juillet 2002 (E4).
© Collaboration Virgo

 www.virgo.infn.it

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, LAL, LAPP. |

CNRS/Insu: Observatoire de la Côte d'Azur. |

CNRS/SPM: Spectroscopie en lumière polarisée.



John Carr

ANTARES Un télescope sous-marin à neutrinos



Déploiement d'une ligne du détecteur Antares.
© CNRS

Fruit d'une collaboration internationale, Antares sera le premier télescope à neutrinos en opération en mer profonde. Les télescopes à neutrinos ouvrent de nouvelles fenêtres sur l'Univers pour l'étude des sources cosmiques extrêmement puissantes et la recherche de la matière noire. La construction, sur un site au large de Toulon, du détecteur Antares sera achevée en 2007.

Le télescope à neutrinos Antares est constitué de modules optiques, placés sur des lignes verticales de 450 m de haut, ancrées à 2400 m de profondeur, au sud de l'île de Porquerolles (Var). Les modules optiques observent les interactions des neutrinos qui ont traversé la Terre et interagissent avec elle. Ces interactions produisent des muons qui émettent dans l'eau de mer des sillages de lumière. La mesure de ces sillages permet de reconstituer la direction des neutrinos. La mer permet également de protéger les détecteurs du rayonnement cosmique. Ainsi, une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers va pouvoir

être ouverte, ce qui va permettre de tester les modèles astrophysiques dans des domaines d'énergie encore inaccessibles aux accélérateurs terrestres.

En France, l'expérience Antares regroupe des chercheurs du CEA (DSM/Dapnia), du CNRS (IN2P3 et Insu) et des universités, ainsi que des experts du milieu et des techniques liées à la mer de l'Ifremer. Des équipes italiennes, allemandes, espagnoles, néerlandaises et russes contribuent fortement à la collaboration.

Le programme d'Antares prévoit la réalisation d'un détecteur de douze lignes comprenant environ mille modules

optiques, prélude à un futur télescope couvrant un volume effectif de 1 km³. Après de longues années de travail en laboratoire et sur le site, la «boîte de jonction», pièce maîtresse du télescope, a été immergée en décembre 2002 et connectée au câble électro-optique sous-marin. Long d'une quarantaine de kilomètres, celui-ci a été déployé en octobre 2001 entre la station à terre de La Seyne-sur-Mer et le site sous-marin. La boîte de jonction est l'interface entre le câble et les lignes comprenant les modules optiques. Elle permet non seulement de distribuer l'énergie nécessaire aux lignes, mais aussi de concentrer les données qui sont ensuite transmises, par les fibres optiques du câble sous-marin, à la station à terre pour y être analysées. Fin janvier 2003, une première ligne prototype équipée de quinze modules optiques et une ligne d'instrumentation pluridisciplinaire ont été déployées sur le site. Ces deux lignes ont ensuite été raccordées le 16 mars à la boîte de jonction par des câbles de liaison électro-optiques de quelques centaines de mètres de longueur grâce à l'intervention du sous-marin grand fond de l'Ifremer, le *Nautile*, leur offrant ainsi une liaison directe avec la station de contrôle terrestre. La ligne d'instrumentation fournit essentiellement des mesures de propriétés océanographiques du site, telles que la température et la salinité de l'eau ou l'amplitude et la direction du courant sous-marin. Elle sert également d'interface à un sismographe installé à proximité de la ligne. La construction et l'installation des douze lignes du télescope Antares seront ensuite réalisées entre 2004 et 2007.



<http://antares.in2p3.fr/>

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**
CNRS/IN2P3: CPPM, IReS. |
CNRS/Insu: LAM, OOV. | Ifremer.



Michael Punch

HESS Une pleine sensibilité depuis décembre 2003

Hess fonctionne à pleine sensibilité depuis décembre 2003. Il permet d'explorer les objets les plus violents de l'Univers grâce à leur émission en rayons gamma. Ses caractéristiques lui confèrent un gain en sensibilité de plus d'un ordre de grandeur par rapport à la génération d'expériences précédente. Plusieurs résultats marquants ont été publiés ou sont en cours d'analyse. Hess se place au premier rang mondial dans ce domaine.



Les quatre télescopes de Hess-I sur le site en Namibie.
© Collaboration Hess

La détection par Hess (*High Energy Stereoscopic System*) des rayonnements ayant une énergie comprise entre quelques dizaines de GeV et une centaine de TeV complète les observations effectuées dans les autres gammes d'énergie. L'ensemble permet de comprendre les mécanismes de production et d'accélération des particules dans les objets les plus violents de l'Univers, de vérifier la thèse selon laquelle les restes de supernovæ sont à l'origine des rayons cosmiques, de contraindre la densité du rayonnement infrarouge intergalactique par la distorsion qu'elle induit dans les spectres en énergie des sources lointaines (noyaux actifs de galaxies) ou alors de contraindre l'existence de particules nouvelles plus massives et interagissant faiblement (les Wimps).

Fruit d'une collaboration internationale (principalement franco-allemande) et installé en Namibie, Hess est un multi-imageur Cherenkov de nouvelle génération dédié à l'astronomie gamma de très haute énergie. Il est composé de quatre télescopes, chacun doté d'un miroir de 107 m² de surface, équipés avec des caméras de neuf cent soixante photomultiplicateurs (champ de vue de 5°) et d'une électronique rapide (échantillonnage au GHz). Il est parfaitement adapté pour détecter l'impulsion lumineuse de quelques nanosecondes émise par la cascade de particules produite par l'interaction d'un gamma dans l'atmosphère. Ses caméras à imagerie fine et son électronique rapide lui permettent de rejeter une grande partie du bruit de fond dominant dû aux rayons cosmiques chargés.

Sa surface de collection de plusieurs hectares permet d'être sensible à des flux de 10⁻¹³ photons/cm²/s à un seuil de 100 GeV, soit un gain de plus d'un ordre de grandeur par rapport à la génération précédente.

La partie française de la collaboration a conçu et construit les caméras: mécanique, électronique d'acquisition et de déclenchement, système d'acquisition embarqué et système de calibrage. La France occupe également une place centrale dans toutes les étapes de reconstruction, d'analyse et de simulation des données. Elle prend part à la définition du programme d'observation et à l'interprétation des résultats.

Le premier télescope a enregistré ses premières images le 11 juin 2002. Dès le mois de juillet, l'émission de la nébuleuse du Crabe à plus de 10 écarts standards, ainsi que celle d'un sursaut d'activité du noyau actif de galaxie PKS2155-304 ont été détectées. Les données prises depuis ont confirmé les premiers résultats et plusieurs autres sources ont été détectées. Durant toute l'année 2003, l'installation des trois autres télescopes s'est poursuivie parallèlement à la montée en puissance de l'acquisition des données. Le premier événement à quatre télescopes a été enregistré le 10 décembre 2003.

Les données de ~ 40 sources sont en cours d'analyse et des articles sont en préparation. Des campagnes d'observation multilongueurs d'onde sont en cours. D'ores et déjà, les retombées scientifiques sont à la hauteur des engagements français et l'expérience est au premier rang mondial des détecteurs dans ce domaine.



<http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LLR, LPNHE, PCC, GAM. |
CNRS/Insu: Observatoire de Paris, LAOG,
CESR. | CEA/DSM: Dapnia.

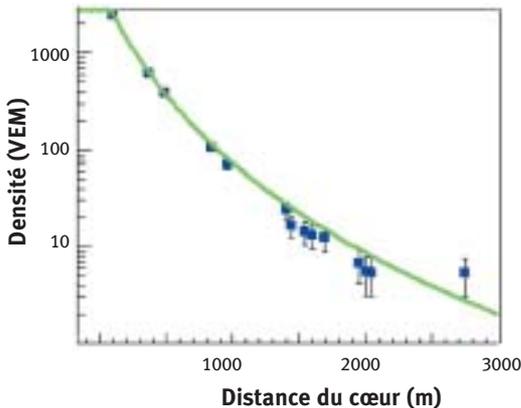


Tiina Suomijärvi

AUGER L'Observatoire décrypte les messages de l'Univers extrême

L'Observatoire Pierre-Auger, dont la construction est en cours en Argentine, a commencé la traque des particules d'énergie ultime, au-delà de 10^{20} eV. Celles-ci pourraient être accélérées par des phénomènes astrophysiques d'une extrême violence ou provenir de reliques, encore inconnues, des tout premiers instants de l'Univers. Leur étude est ainsi reliée à celles de l'Univers primordial, de l'Univers lointain et de ses objets extrêmes.

La densité du signal au sol en fonction de la distance au cœur de la gerbe pour un événement détecté par le réseau de surface de l'Observatoire Pierre-Auger. La ligne continue représente un fit préliminaire de la fonction latérale. © Collaboration Pierre Auger



L'Observatoire Pierre-Auger est la réponse au problème scientifique majeur que pose l'existence des rayons cosmiques (RC) ultra-énergétiques (RCUE), au-delà de 10^{20} eV. Leur énergie défie en effet les mécanismes traditionnels d'accélération astrophysique; leur propagation semble en outre contredire les propriétés attendues, à savoir une coupure (dite GZK) dans le spectre, autour de $8 \cdot 10^{19}$ eV, due aux interactions avec le rayonnement cosmologique. La résolution de ce mystère, qui pourrait révéler d'importants concepts de physique nouvelle, passe par la construction d'un détecteur gigantesque, permettant de détecter un nombre suffisant de ces particules extrêmement rares (1 par siècle, par km^2 et par stéradian).

Le site sud de l'Observatoire, dont la construction a débuté en 2000 sur la pampa argentine, constitue déjà le plus grand détecteur de RC au monde et devra couvrir 3000 km^2 vers la fin 2005. Outre sa grande taille, son originalité consiste à détecter les gerbes de particules induites dans l'atmosphère par ces RC avec deux méthodes indépendantes et complémentaires (détection hybride): 1° échantillonnage au sol des particules de la gerbe au moyen d'un réseau de mille six cents cuves à effet Cherenkov; et 2° observation de la lumière fluorescente induite, avec un ensemble de vingt-quatre télescopes braqués sur l'atmosphère et répartis sur quatre sites autour du réseau. Les quelque quatre cents détecteurs et vingt-quatre télescopes déjà opérationnels ont permis à la collaboration Auger de démarrer l'analyse de données.

L'intensité du signal détecté par le réseau de surface en fonction de la distance au cœur de la gerbe permet d'estimer l'énergie incidente de la particule. La reconstruction de sa direction se fait par triangulation, à partir des temps de passage du front de gerbe sur chaque détecteur. La figure montre une distribution latérale ainsi obtenue: une analyse préliminaire donne une énergie supérieure à $7 \cdot 10^{19}$ eV et un angle zénithal autour de 34° pour la particule incidente. Quant aux détecteurs de fluorescence, ils mesurent le profil longitudinal de la gerbe. L'analyse des événements hybrides permettra l'étalement croisé des deux méthodes, levant leurs contradictions actuelles et améliorant notablement la précision.

Les groupes français jouent un rôle majeur dans la plupart des aspects du détecteur de surface, du « hardware » au système central d'acquisition, de l'électronique à la gestion des temps, de l'analyse des données à l'interprétation astrophysique, et s'investissent dans la reconstruction hybride. Leurs compétences multiples sont reconnues et couronnées par l'attribution de nombreuses responsabilités au sein de la collaboration internationale, dans la construction comme dans l'analyse des données.

Les données du site sud permettront de confirmer ou d'infirmer l'existence de la coupure GZK, répondant ainsi à l'une des questions majeures de l'astrophysique moderne. Par la suite, la recherche systématique d'anisotropies et/ou de sources ponctuelles sera une étape cruciale qui nécessitera une couverture complète du ciel; la construction du second observatoire, celui de l'hémisphère Nord, sera le prochain défi de la collaboration.

 <http://www.auger.org>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNO, LAL, LPNHE, PCC. I
CNRS/Insu: LAOB.



MUSE Le premier réacteur sous-critique piloté par accélérateur

Pilotage du réacteur par modulation de l'intensité de la source externe; les zones des décroissances prompte et retardée sont présentées avec une échelle de temps dilatée.
© CNRS/IN2P3

Comprendre la physique de la multiplication neutronique en milieu sous-critique était l'objectif principal du programme Muse. La campagne 2003 a permis de définir les techniques de contrôle de la réactivité et de la puissance d'un réacteur assisté par accélérateur, ouvrant la voie au contrôle d'installations de puissance.

Depuis le couplage effectif de la source de neutrons pulsée Genepi au réacteur Masurca en novembre 2001, le programme expérimental Muse-4 s'est poursuivi par différentes phases sous-critiques. L'objectif principal était de mettre au point une technique expérimentale de mesure en ligne du niveau de sous-criticité. En effet, la connaissance de ce paramètre est cruciale pour le pilotage de futurs ADS (*Accelerator Driven System*) car il gouverne la sûreté du réacteur. Le coefficient de multiplication effectif k_{eff} d'un réacteur peut être obtenu à partir de deux paramètres caractérisant la cinétique: le facteur prompt k_p , qui caractérise la multiplication prompte des neutrons de fission, et la fraction retardée β_{eff} des neutrons issus des désintégrations bêta de certains produits de fission. La grandeur k_p est obtenue à partir de spectres temporels consécutifs à l'injection d'impulsions de neutrons dans le massif sous-critique. La méthode repose sur un modèle décrivant l'évolution de la population neutronique à partir de la distribution des intervalles de temps intergénération, elle-même obtenue par une simulation rendant compte

de la neutronique, du rôle du réflecteur et des captures dans le combustible. La dépendance temporelle du flux induit par l'impulsion de neutrons est reconstituée, pour différents niveaux de sous-criticité, à partir de la distribution des intervalles de temps.

La mesure de k_p consiste alors à comparer la dérivée du taux de comptage de chambres à fission à la dérivée calculée pour différentes valeurs de k_p . Celle s'ajus-

tant le mieux aux données expérimentales donne accès au facteur de multiplication.

Une seconde méthode a ensuite été utilisée afin de déterminer la fraction de neutrons retardés β_{eff} . Le massif sous-critique est d'abord soumis à une source d'intensité élevée, permettant d'atteindre l'équilibre, puis cette source est soudainement diminuée (au moins d'un facteur 10). À la suite de cette variation, les neutrons « prompts » disparaissent très rapidement (quelques dizaines de microsecondes), puis la population de précurseurs décroît beaucoup plus lentement (quelques secondes). La mesure de la population de neutrons juste avant et juste après la brusque variation d'intensité permet d'obtenir directement la fraction de neutrons retardés. En pratique, cette méthode est appliquée en faisant varier la fréquence de la source pulsée de neutrons entre une fréquence haute et une fréquence basse, ce qui revient à piloter la puissance du réacteur à l'aide de l'accélérateur (entre 26 W et 2 W à $k_{eff} = 0,994$).

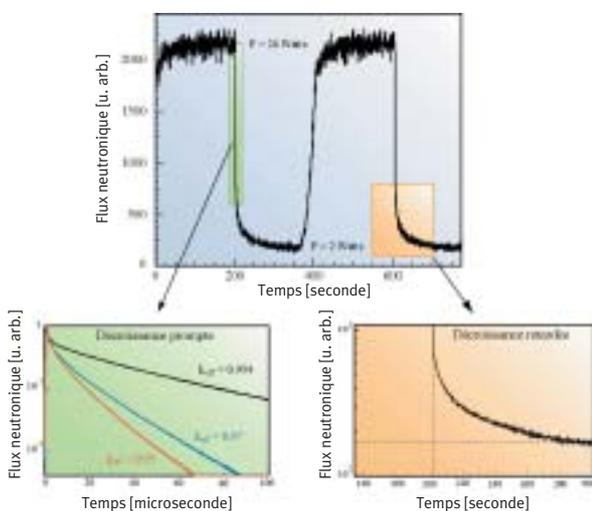
Au cours de l'année 2003, ces méthodes ont été appliquées à plusieurs niveaux de sous-criticité (figure). Elles ont permis de retrouver des valeurs de β_{eff} et de k_{eff} en excellent accord avec des mesures réalisées à partir d'une configuration critique du réacteur. Cela démontrait que des outils parfaitement adaptés au suivi de la réactivité des futurs ADS pouvaient être mis en œuvre sans référence à une phase critique.

 <http://lpsc.in2p3.fr/gpr/french/experience>

The Muse-4 experiment: prompt reactivity and delayed neutron measurements, International Conference Global 2003, 16-20 November 2003, New Orleans, USA.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPSC. | CEA/DEN: LPE.





Terence Garvey

COUPLEURS DE PUISSANCE pour cavités supraconductrices

L'été 2003 a vu la mise en route d'une nouvelle station d'essais des coupleurs de puissance au Laboratoire de l'accélérateur linéaire d'Orsay (LAL). Cette station d'essais a pour but de valider les performances des prototypes des nouveaux coupleurs et de faire la mise au point des coupleurs fabriqués en industrie pour l'accélérateur TTF.



Coupleurs de puissance en cours de montage en salle blanche classe 10.
© CNRS/IN2P3

Depuis dix ans, la collaboration internationale Tesla pilotée par le laboratoire de Desy (Hambourg) vise à réaliser un accélérateur linéaire supraconducteur à hautes performances. Deux objectifs sont poursuivis : la réalisation d'un laser à électrons libres fonctionnant dans la gamme des rayons X, le projet X-FEL, et la réalisation d'un collisionneur linéaire d'électrons-positons, le projet Tesla (*Tera Electron-Volt Superconducting Linear Accelerator*).

Depuis le début de cette collaboration, de très fortes améliorations ont été obtenues en ce qui concerne les champs accélérateurs des cavités supraconductrices. Aujourd'hui, la valeur maximale se situe autour de 35 MV/m par rapport à

5 MV/m en 1992. Néanmoins, pour bénéficier de ce progrès en performance cavité, il est indispensable de poursuivre l'amélioration des performances des coupleurs de puissance, dispositifs qui alimentent les cavités en puissance hyperfréquence (HF) à partir de la source HF (un klystron). Dans le cadre d'un accord de collaboration avec Desy, le LAL a commencé, en 2001, à mettre en place les équipements nécessaires à la préparation de ces coupleurs en vue de leur montage sur le banc d'essai avant de les tester en forte puissance (~ 2 MW) HF. Pour que le coupleur ne nuise pas à la performance d'une cavité supraconductrice, il est impératif qu'il soit traité et manipulé très soigneusement. Pour

assurer le bon traitement des coupleurs, surtout la qualité de l'état de surface et le niveau de propreté, une salle blanche (37 m²), avec une zone en classe 10 (13 m²), a été construite. Cette salle permet d'assembler les coupleurs dans des conditions de bonne propreté. Avant d'entrer dans la zone classe 10, ceux-ci subissent un rinçage en eau ultrapure (résistivité électrique ~ 18 MΩ.cm), filtrée à 0,22 μm, dans un bain ultrasonique. Après séchage dans un flux laminaire en zone classe 1000, ils sont étuvés dans un four sous vide à 400 °C. Ce four a été construit en industrie suivant une étude faite par le service accélérateur du laboratoire. Il est intégré à l'une des parois de la salle blanche afin d'éviter d'exposer les coupleurs à l'air ambiant avant leur montage et leur mise sous vide. Une fois mis sous vide et leur étanchéité vérifiée, les coupleurs sont prêts à être testés avec la HF de puissance. Pour ces tests, un ensemble modulateur/klystron (fréquence = 1 300 MHz) et un réseau HF, permettant d'alimenter les coupleurs avec des impulsions allant jusqu'au 5 MW pendant 2 ms à une cadence de 10 Hz, ont été construits avec l'aide de l'équipe de Desy. L'ensemble de ces équipements fait de la station d'essais du LAL un outil unique pour le développement de ces coupleurs. Les premiers tests des nouveaux prototypes coupleurs ont commencé à l'été 2003. Le « conditionnement » d'une série de trente coupleurs pour le *Tesla Test Facility* (linac prototype de Tesla) commandée chez la société CPI (Boston) est en cours. Ces études bénéficieront d'un important soutien financier de l'Union européenne dans le cadre du 6^e PCRDT.



T. Garvey et al., *The Tesla high power coupler program at Orsay*, contribution at 11th Workshop on RF Superconductivity (SRF2003), 8-12 September 2003, Travemünde, Allemagne.

**LABORATOIRE FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**
CNRS/IN2P3: LAL.



Tomas Junquera

CAVITÉS «SPOKE» Des cavités accélératrices supraconductrices

Depuis maintenant trois ans, l'Institut de physique nucléaire d'Orsay (IPNO) a démarré un programme de recherche sur un nouveau type de cavité accélératrice supraconductrice dénommée «spoke». Un premier prototype a été conçu et testé avec succès, ouvrant ainsi la voie aux futurs accélérateurs linéaires de faisceaux intenses de protons de haute énergie (plusieurs mégawatts).

De nombreux projets proposent l'utilisation d'accélérateurs linéaires de protons de haute énergie pour, entre autres, le pilotage des futurs réacteurs dédiés à la transmutation des déchets nucléaires (XADS/Eurotrans, Myrrha), la production de faisceaux d'ions radioactifs (Eurisol) ou de faisceaux de protons pulsés pour des sources de neutrons (Care/Hippi), ou encore comme source de neutrons de spallation. Les sections dites de basses et moyennes énergies (entre 5 et 100 MeV) de ces accélérateurs étaient, jusqu'à présent, composées de structures classiques en cuivre. Les études récentes sur les cavités supraconductrices et les excellentes performances de la cavité «spoke», en particulier, permettent maintenant d'étendre l'emploi de la supraconductivité à l'ensemble de l'accélérateur. L'utilisation de la technologie supraconductrice pour les cavités accélératrices présente de nombreux avantages comparée aux structures en cuivre: des coûts de fonctionnement limités du fait de dissipations de puissance quasi négligeables, une faible activation des structures en raison d'une ouverture plus grande des tubes faisceau, et, surtout, une flexibilité et une fiabilité accrues grâce à une structure modulaire (une source de puissance par cavité).

La conception du prototype de cavité «spoke» en niobium massif (fréquence 352 MHz, bêta 0,35) a été réalisée à l'aide de logiciels de simulation (Mafia pour l'étude électromagnétique et Cosmos/Micav pour la partie mécanique). Cette phase d'optimisation poussée a abouti à un «design» particulier qui confère à cette cavité d'excellentes propriétés mécaniques (grande rigidité) et des para-

mètres RF (champ accélérateur) permettant de remplir le cahier des charges des différents projets cités précédemment. La fabrication a été confiée à la société Cerca/Framatome (Romans, Isère), partenaire de l'IPNO depuis de nombreuses années. Après avoir fait suivre à ce premier prototype les différentes phases de préparation indispensables pour atteindre de très hauts champs accélérateurs (décapage chimique, rinçage à haute pression à l'eau ultrapure et montage en salle blanche) avec le concours précieux du laboratoire du SACM du CEA/Saclay, il a été testé à basse température (4,2 K) au laboratoire: la cavité a ainsi atteint un champ accélérateur maximal de 12,5 MV/m, soit très au-delà des 7 MV/m requis dans les projets XADS/Eurotrans et Eurisol. Fort de ces excellents résultats, l'IPNO a conçu un deuxième prototype de même fréquence mais de bêta plus faible (0,15), mieux adapté aux basses énergies (proches de 5 MeV), dont la fabrication a commencé début 2004. En parallèle, les études d'un coupleur de puissance de 20 kW sont activement poursuivies, ce qui permettra, à terme, le test en ligne auprès d'un injecteur tel qu'Iphi ou bien, à plus faible puissance, auprès d'un accélérateur tel que le Tandem d'Orsay. Dans ce même contexte, l'étude et la réalisation d'un prototype de cryomodule, équipé de deux cavités «spoke», ont été proposées dans le cadre du 6^e PCRD.

*Préparation et montage en salle blanche de la cavité supraconductrice «spoke» avant le test en cryostat vertical à 4 K.
© CNRS-IN2P3*



 <http://ipnweb.in2p3.fr>

G. Olry et al., *R&D on spoke-type cryomodule*, EPAC2002, Paris, June 2002.

G. Olry et al., *Development of SRF spoke cavities for low and intermediate energy ion Linacs*, SRF2003, Lübeck/Travemünde, September 2003.

LABORATOIRES FRANÇAIS

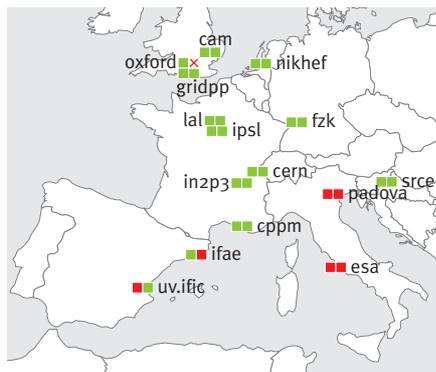
DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNO. | CEA/DSM: Dapnia.



Guy Wormser

DATAGRID Un projet de grille de calcul



Le concept de grille de calcul, laquelle permettrait un accès transparent à d'immenses ressources informatiques distribuées, s'est imposé comme la solution pour traiter les volumes énormes de données produits par le LHC, les satellites ou le décodage du génome. Datagrid a pour objectif d'en démontrer la faisabilité.

L'augmentation énorme des besoins informatiques pour l'exploitation des expériences du LHC, couplée à la progression ultrarapide des performances des réseaux informatiques, a conduit la communauté, début 2000, à considérer la grille de calcul, dispositif logiciel permettant un accès transparent et facile à un vaste ensemble de ressources informatiques réparties, comme la technologie la plus appropriée pour l'avenir. Le projet Datagrid a donc été monté en 2000 afin de démontrer la faisabilité d'une grille de calcul distribuée à l'échelon international, en construisant un banc test informatique capable de partager des ressources et des données à travers l'Europe. Doté de 10 M€, Datagrid a regroupé vingt et un partenaires dont le CNRS, le CEA et la Compagnie des signaux, soit une équipe d'environ vingt-cinq chercheurs et ingénieurs en France et cent cinquante en Europe.

Après un effort massif de développement logiciel, la version finale du logiciel

Datagrid est déjà utilisée dans trois domaines scientifiques majeurs: la physique des hautes énergies, les applications biomédicales et l'observation de la Terre. Ce logiciel forme la base de l'infrastructure LHC Computing Grid (LCG) à laquelle il va permettre de stocker et d'analyser les pétaoctets de données réelles et simulées produites par les expériences installées auprès de l'accélérateur LHC du Cern. Il est également utilisé par dix applications biomédicales et cinq instituts d'observation de la Terre. Le banc test Datagrid a permis de rassembler jusqu'à mille ordinateurs et plus de quinze téraoctets de stockage répartis sur vingt-cinq sites en Europe, en Russie et jusqu'à Taiwan. Ces ressources ont été mises au service permanent de cinq cents scientifiques regroupés en douze organisations virtuelles. L'IN2P3, en partenariat avec trois autres départements du CNRS (SDU, SDV, STIC), a joué un rôle déterminant dans le succès de Datagrid puisqu'il a assumé, entre autres, la responsabilité du

État à un moment donné du banc de test de Datagrid (disponible en ligne) montrant quinze sites (dont quatre en France) de huit pays différents participant à la collaboration. Ce système de surveillance a été réalisé par le CNRS. © CNRS

déploiement du banc test et des applications biomédicales.

L'héritage de Datagrid, au niveau du logiciel comme de l'infrastructure, va former le point de départ du nouveau projet Egee qui a pour ambition de créer une infrastructure de production à travers l'Europe disponible 24 heures sur 24. Egee couvrira une gamme large d'applications scientifiques ou industrielles, parmi lesquelles deux secteurs pilotes (physique des particules et biologie/médecine), pour certifier les performances et les fonctionnalités de l'infrastructure. L'IN2P3 s'apprête à jouer un rôle de même ampleur dans Egee où il est responsable de la partie française de la grille, d'une des «tours de contrôle» de l'ensemble installée à Lyon, et de la coordination générale des applications scientifiques et industrielles.

Ainsi, Datagrid a fourni aux scientifiques européens la première démonstration convaincante à grande échelle d'une grille en fonctionnement. Egee permettra un accès fiable et régulier à cette technologie pour toute la science en Europe, ainsi qu'au secteur de la R&D industriel. De la même façon qu'avec le Web, initialement conçu au Cern pour couvrir des besoins scientifiques particuliers, l'impact de la technologie émergente des grilles de calcul sur la société européenne est aujourd'hui difficile à prédire en détail, mais il promet d'être immense.



<http://www.eu-datagrid.org>

P. Kunszt *et al.*, *The European Datagrid Project*, NIM A502 (376) 2003.

C. Loomis *et al.*, *Crunching real data on the Grid: practice and experience with the European DataGrid*, *Journal of Grid Computing*.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAPP, LPC Clermont, LPSC, CC, CPPM, LPNHE, LAL. | CNRS/STIC: UREC, CReatis, LIP, RESAM, LIMOS. | CNRS/Insu: IPSL. | CNRS/SDV: IBCP, BBE, LBP. | CEA/DSM: Dapnia.



Philippe Lanièce

PHYSIQUE-BIOLOGIE-MÉDECINE

Une interface en plein essor

Les activités situées à la frontière entre la physique, la biologie et la médecine auront connu, entre 2001 et 2003, un véritable essor, marqué par une forte implication des laboratoires de l'Institut, dans les domaines de l'étude des biomatériaux, de la radiobiologie, de l'imagerie, de la radiothérapie et de la bio-informatique.

*L'imageur Poci (Peroperative Compact Imager).
© CNRS/IN2P3*



national, la discipline n'a pas été en reste et a activement participé aux développements de méthodes d'analyse, de diagnostic et de thérapie associées au domaine du cancer. Ainsi, on retiendra, d'un point de vue fondamental, la montée en puissance de la radiobiologie tournée principalement vers la compréhension des effets des rayonnements ionisants sur le vivant et pour laquelle peut être cité le projet Aifira (Applications interdisciplinaires des faisceaux d'ions en région Aquitaine). Sous un aspect plus clinique, des progrès ont été réalisés dans le domaine de l'imagerie, avancées marquées par le développement à la fois de systèmes miniaturisés pour guider le geste du chirurgien en bloc opératoire lors de l'exérèse de tissus cancéreux (projet Poci, *Peroperative Compact Imager*) et d'une instrumentation et d'outils d'analyse et de simulation dédiés à l'optimisation des caméras médicales exploitées, en particulier, en oncologie pour le diagnostic (collaboration openGate). Enfin, sous un aspect directement thérapeutique, les traitements du cancer par radiothérapie font appel à des outils et à des méthodes familiers aux chercheurs et ingénieurs de l'Institut. C'est le cas du contrôle précis des trajectoires des faisceaux d'ions, domaine pour lequel un projet très ambitieux de centre médical de traitement par faisceau de carbone en Rhône-Alpes a été proposé et dont l'avant-projet a été réalisé en grande partie au sein de l'Institut (projet Etoile, Espace de traitement oncologique par ions légers dans le cadre européen). C'est également le cas de la mesure du rayonnement, pour laquelle des dosimètres performants ont été développés qui permettent

un contrôle encore plus précis de la dose distribuée.

Enfin, l'Institut a participé à des programmes plus fondamentaux et interdisciplinaires comme celui dédié à l'imagerie du petit animal (programme CNRS/CEA 2000-2004), dans lequel il s'est fortement impliqué. Pas moins de cinq laboratoires de l'Institut ont en effet consacré une partie de leur recherche durant ces dernières années à la conception de systèmes d'imagerie *in vivo* adaptés aux contraintes particulières du petit animal, principalement des rongeurs comme le rat ou la souris ; il s'agit notamment des projets Imhotep, un microtomographe à émission de positon, Tohr, un microtomographe à émission simple photon, ou bien encore Pixscan, un microscanner X.

La période 2001-2003 aura été riche en faits marquants qu'il est possible de classer selon trois niveaux d'implication différents.

Au sein même de l'Institut, l'interface entre la physique subatomique et les sciences du vivant a connu une croissance particulièrement marquée et remarquable, matérialisée par l'implication de dix laboratoires sur dix-huit, alors qu'on ne répertoriait pas plus de trois laboratoires ayant une affinité avec ce thème lors du passage à l'an 2000. Ces activités se sont naturellement structurées et ont conduit à l'émergence de cinq pôles de recherche impliquant chacun plusieurs laboratoires : l'étude de biomatériaux, la radiobiologie, la radiothérapie, l'imagerie biomédicale et la bio-informatique. Au sein des grands programmes biomédicaux et en particulier de celui dédié au cancer, à l'heure où la lutte contre le cancer est devenue un grand engagement



AIFIRA

<http://www.cenbg.in2p3.fr/extra/aifira.html>

OPENGATE:

<http://www.lphe.epfl.ch/~PET/research/gate/>

POCI ET TOHR

http://ipnweb.in2p3.fr/recherche/frame_recherche.html

IMHOTEP

<http://lyoinfo.in2p3.fr/imagemed/ETOILE>

<http://etoile.univ-lyon1.fr/>

IMAGERIE DU PETIT ANIMAL

<http://www.cnrs.fr/SDV/Actions/pi/ipa/ipa.html>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CENBG, CPPM, IPNL, IPNO, IReS, LPC Caen, LPC Clermont, LPSC, Subatech.



ÉLECTRONIQUE De nombreuses réalisations

Christophe de La Taille

Dans le domaine de l'électronique, les trois dernières années ont été dominées par l'aboutissement des très nombreux développements de circuits intégrés (Asic) nécessaires aux expériences LHC: Alice, Atlas, CMS et LHCb. Une quinzaine de circuits intégrés très complexes, produits en tout à plus de deux cent mille exemplaires, ont ainsi été réalisés par les laboratoires de l'Institut, générant un formidable savoir-faire qui profite à d'autres expériences, mais aussi à d'autres domaines (astrophysique, imagerie, biomédical) ou fait l'objet de valorisation industrielle.



Carte calibration pour l'expérience Atlas: 128 Asics générateurs d'impulsions 100 μ V-5V

de précision 0,2% pour étalonner le calorimètre argon liquide. © CNRS/IN2P3

MICROÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE ET MIXTE

L'accès aux technologies microélectroniques (Asic) a été initié à la fin des années 1980 par la nécessité, avec les détecteurs de traces (*trackers*), de placer l'électronique de lecture directement sur le détecteur et de réduire ainsi la taille des pixels à quelques centaines de microns carrés.

Ces circuits réalisent maintenant une intégration très poussée de nombreuses fonctionnalités pour des mesures de position à 40 MHz, avec une sensibilité d'une centaine d'électrons et une tenue aux radiations de plusieurs dizaines de Mrad permettant leur utilisation sur les détecteurs LHC. Plusieurs laboratoires participent à ces développements qui utilisent les technologies les plus récentes (0,25 μ m) et ont également des débouchés dans l'imagerie X industrielle ou médicale.

L'utilisation des Asics s'est depuis répandue dans l'ensemble de la physique des particules, en particulier pour les expériences LHC, permettant d'améliorer performance, fiabilité et coût des systèmes de lecture. Par exemple, pour lire et calibrer le calorimètre électromagnétique d'Atlas, pas moins de dix Asics ont été développés, dont sept par l'IN2P3, du préamplificateur ultrabas bruit au contrôleur de carte.

Ces circuits ont tous été produits, certains à plus de cinquante mille exemplaires, et testés, grâce à un robot dédié, entre 2000 et 2003.

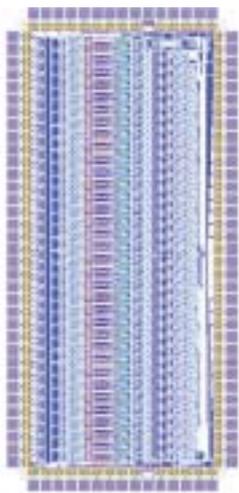
Alice muon	discr trigger	LPC Clrt	3 800
Alice tracker	SSD readout chip	IReS	36 000
Atlas Lar	shaper trigain 18bit 50ns	LAL	80 000
Atlas calo	mémoire analogique 13bit 40MHz	LAL	80 000
Atlas Lar	contrôleur série (SPAC)	LPNHE	4 000
Atlas Lar	multiplexeur 32bit 80MHz	LPSC	5 000
Atlas calib	16bit HF pulser	LAL	32 000
Atlas calib	16bit DAC	LAL	2 000
Atlas calib	décodeur I2C	LAPP	2 000
CMS Preshower	preampli-shaper	IPNL	5 000
CMS calo	LVDS translator	IPNL	200 000
LHCb	shaper integrateur 40MHz	LPC Clrt	3 000
LHCb	shaper 13bit 25ns	LAL	3 200
LHCb	delay programmable 1ns	LAL	3 000
LHC machine	mesure faisceau	LPC Clrt	120

Asics produits par les laboratoires de l'IN2P3 pour le LHC.

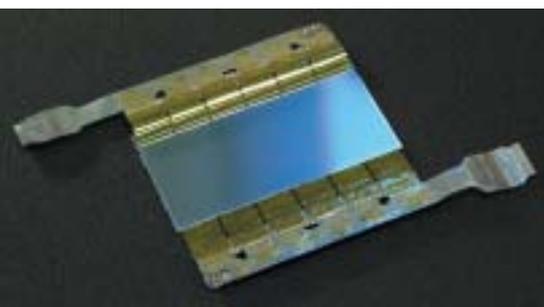
Beaucoup d'autres expériences ont également bénéficié de développements d'Asics (Antares, Hess, Opera, FLC...) produits à plusieurs milliers d'exemplaires par la trentaine de microélectroniciens de l'IN2P3 qui réalisent plus d'une vingtaine de prototypes par an dans diverses technologies analogiques et mixtes. L'utilisation de logiciels communs de simulation et des liens très forts entre les laboratoires permettent de plus une collaboration étroite entre les différents groupes et une réduction des temps de développement des Asics.

Au-delà des Asics, de nombreuses cartes d'électronique mettant en œuvre ces circuits intégrés sont aussi réalisées pour les expériences. Elles intègrent simultanément des fonctions analogiques très bas bruit ou de grande précision, et des fonctions numériques sophistiquées.

Carte DCEU de l'expérience Planck: permet le contrôle, par dilution, des refroidisseurs du satellite pour maintenir l'antenne de bolomètres à 0,1 K. © CNRS/IN2P3



« Layout » de l'Asic de lecture des photomultiplicateurs 64-anodes de l'expérience Opera au Gran Sasso. © CNRS/IN2P3



Module détecteur du SSD Alice avant repliement, équipé de deux circuits hybrides

de très faible masse constitués chacun de six circuits HAL25 « tabbé ».
© CNRS/IN2P3

Pour de telles cartes, les problèmes d'intégrité du signal, de fiabilité et de densité sont essentiels.

ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE D'ACQUISITION ET DÉCLENCHEMENT

L'électronique numérique utilisée pour traiter le flot colossal de données en provenance des détecteurs a largement bénéficié de la révolution des circuits logiques programmables (FPGA) et de l'augmentation de vitesse et de puissance des processeurs dédiés (DSP).

Les cartes sont ainsi passées de châssis entiers de circuits numériques à quelques FPGA de dernière génération, couplés à des DSP cadencés au GHz, dont la puissance de calcul en temps réel

permet aux expériences d'utiliser du traitement numérique du signal pour optimiser la performance des détecteurs.

De nombreuses cartes ont ainsi été développées pour diverses expériences (Atlas, CMS, D0, LHCb, Opera...): des téraoctets de données y sont rassemblés par des liens série Gb/s et traités en temps réel à 40 MHz pour ne garder qu'un millionième des données intéressantes pour l'analyse de physique.

ÉLECTRONIQUE SPATIALE

Le savoir-faire acquis sur les expériences LHC en termes de fiabilité et de tenue aux radiations a été mis à profit pour contribuer à l'équipement des expériences spatiales auxquelles l'Institut participe (AMS, Planck). L'Institut prépare également les circuits pour les expériences futures. Dans un domaine où la compétence et l'expérience sont la clé du succès, l'IN2P3 réalise des Asics (AMS) ou des cartes numériques ou de contrôleurs de vol suivant les procédures spatiales en vigueur.

CAPTEURS CMOS MONOLITHIQUES

Les capteurs CMOS sont développés pour répondre au besoin croissant de détecteurs très granulaires et rapides, dont l'énorme flot de données impose



Carte trigger muon LHCb: reçoit vingt-quatre liens optiques 1,4 Gb/s et traite les données dans quatre

FPGA haute densité (600000 portes) pour accepter ou rejeter les événements toutes les 25 ns. © CNRS/IN2P3

d'intégrer l'électronique de traitement du signal au plus près du volume sensible des détecteurs (système-sur-puce). Après validation de cette nouvelle technique de détection des particules chargées (cf. *Rapport d'activité 1998-2000*), le premier capteur macroscopique (réunissant un million de pixels sur 3,5 cm²) a vu le jour. Une version dérivée doit équiper l'expérience Star au Rhic (Brookhaven) vers 2008.

Le temps de lecture de quelques millisecondes de ce capteur n'impose pas d'y intégrer une architecture de suppression des pixels non touchés. Pour les applications nécessitant un temps de lecture beaucoup plus court (typiquement 10-100 μs), une nouvelle génération de capteurs est donc développée. Les pixels y sont regroupés en colonnes lues en parallèle, chacun d'eux étant équipé d'un microcircuit d'une trentaine de transistors réalisant l'amplification du signal et la suppression des piédestaux. La discrimination des signaux est obtenue à l'extrémité de chaque colonne. Plusieurs prototypes conçus selon ce principe sont en cours d'évaluation.



<http://events.lal.in2p3.fr/conferences/gienso2>

LABORATOIRES FRANÇAIS AYANT PARTICIPÉ À CES RÉALISATIONS

CNRS/IN2P3: IReS, CPPM, LAL, LPSC, LPNHE, LAPP, IPNL, LPC Clermont. | CNRS/Insu: IAS. | CEA/DSM: Dapnia. | Université Louis-Pasteur: LEPSI.