

Faits marquants



PHYSIQUE DES PARTICULES

Expériences en cours

36 Tevatron

37 BaBar

38 H1

LHC

39 Atlas, CMS et LHCb

43 La Grille de calcul du LHC

44 La Grille européenne

PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET HADRONIQUE

Structure du nucléon

45 Contenu étrange du nucléon

46 Les Distributions de Partons Généralisées

47 Recherche de baryons exotiques

Plasma de quarks et de gluons

48 NA60

49 Phenix

50 Star

51 Alice

53 Fopi et Hades

Structure, dynamique nucléaire aux extrêmes

55 Les nombres magiques

56 Les vibrations géantes du noyau

57 Spectroscopie des noyaux lourds

58 Décroissance bêta d'ions dans un piège de Paul

59 Avancées dans la thermodynamique des petits systèmes

60 Avancées dans la description microscopique
de la structure d'un noyau et de ses modes de désintégration

ASTROPARTICULE ET NEUTRINO

61 Glast

62 CNGS et Opera

64 Virgo

66 LSM

68 Antares

69 Hess

70 L'Observatoire Pierre Auger

71 Eros2

INTERDISCIPLINAIRE

72 Application biomédicale

74 Activités et événements marquants du musée Curie

• PHYSIQUE DES PARTICULES

Expériences en cours

Tevatron : foison de résultats et perspectives enthousiasmantes au Run II

Éric Kajfasz

La moisson de résultats au Run II du Tevatron est abondante pour les équipes de l'IN2P3 impliquées dans D0 et CDF.

Le Tevatron, collisionneur p-pbar implanté au Fermilab près de Chicago aux États-Unis, de par sa luminosité et son énergie au centre de masse (1,96 TeV), permet aux expériences D0 et CDF d'accéder à un programme de physique très riche. Il comprend des mesures de précision du Modèle Standard, l'étude de la production (forte et faible) et des propriétés du quark top, la physique du B, des mesures de QCD, la recherche du boson de Higgs et de phénomènes nouveaux. La mise en œuvre de ce programme a déjà conduit D0 et CDF à publier plus de cent soixante articles dans des revues à comité de lecture.

Des progrès constants ont permis d'accroître la fiabilité et les performances du Tevatron, conduisant à des luminosités intégrées record de 170 pb^{-1} par mois. D0 et CDF ont déjà enregistré plus de 2 fb^{-1} de données chacune. Grâce à d'autres améliorations en cours, il est raisonnable d'espérer qu'elles obtiennent plus de 8 fb^{-1} fin 2009. Elles seraient alors en mesure de pou-

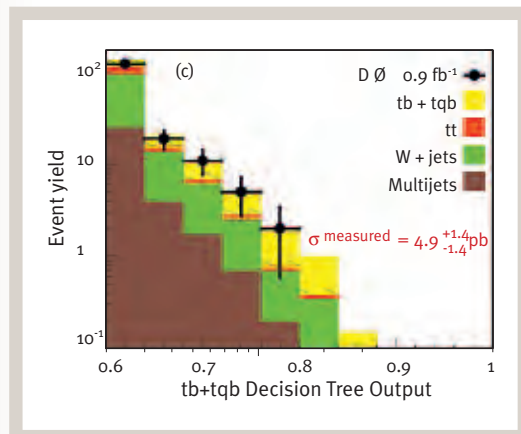
voir mettre en évidence la production d'un boson de Higgs léger.

Les équipes D0 (CDF) de l'IN2P3 sont composées de 42 (5) physiciens dont 28 (2) permanents. Les équipes de D0 jouent un rôle primordial dans le support, le suivi, la calibration et la simulation du calorimètre, le suivi et l'amélioration de la qualité des données, les algorithmes d'identification, les systèmes de déclenchement de niveau 1, 2 et 3, les outils logiciels d'analyse, le développement de capacité de calcul au CCIN2P3 pour l'analyse, la reconstruction d'une partie des données sur les grilles de calcul SAMGrid et LCG et la production massive d'événements de simulation, hors grille. L'équipe de CDF joue un rôle prépondérant dans la simulation du détecteur et la production massive au CCIN2P3 d'événements de simulation sur Grid et bientôt sur LCG.

Pour les analyses, l'IN2P3 a concentré ses efforts dans D0 sur la physique au-delà du Modèle Standard, la physique du quark top, la recherche du boson de Higgs, QCD et la mesure de la masse du W. Dans CDF, l'accent a été mis sur la physique du W, du B et du top. Entre 2004 et 2006, 14 (2) thèses ont été soutenues dans D0 (CDF). L'attention portée par nos équipes à la formation par la recherche se poursuit, avec 10 (1) thèses en cours. Pour les équipes de l'IN2P3 au Tevatron, de nouvelles publications sont en préparation et la chasse au boson de Higgs est ouverte !

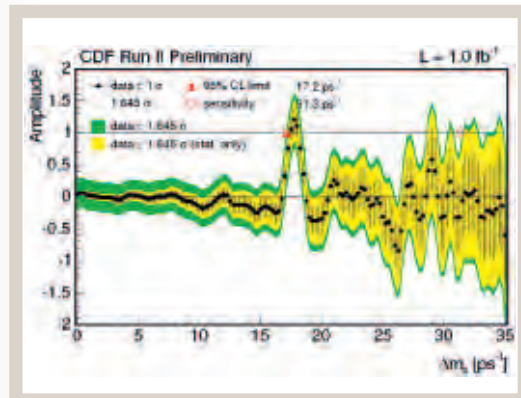
Mise en évidence de production faible du quark top

Une technique d'analyse sophistiquée, appelée arbre de décision, a permis à D0 de mettre en évidence la production faible du quark top et de mesurer pour la première fois sa section efficace ($4,9 \pm 1,4 \text{ pb}$), en bon accord avec le Modèle Standard.



Mesure de Δm_s

Amplitude de l'oscillation $B_s - \text{anti-}B_s$ mesurée dans les données du Run II du Tevatron, en fonction de la fréquence d'oscillation Δm_s , qui a permis à CDF d'extraire la première mesure précise de $\Delta m_s = 17,77 \pm 0,10 \text{ (stat)} \pm 0,07 \text{ (syst)} \text{ ps}^{-1}$, affinant le résultat initial de D0 établissant que Δm_s est situé dans l'intervalle $17 < \Delta m_s < 21 \text{ ps}^{-1}$.



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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION D0

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION CDF

CNRS/IN2P3 : LPNHE.

BaBar et la violation de CP : précision et redondance

Denis Bernard

L'expérience BaBar, au Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), étudie la violation de CP dans le système des mésons B. Avec 450 millions de paires BB̄ enregistrées depuis 1999, l'expérience met le Modèle Standard à l'épreuve.

Le Modèle Standard (MS) prédit une asymétrie entre les désintégrations des particules et celles de leurs antiparticules, due à la violation de CP, dans de nombreux canaux rares de désintégration des mésons B. L'accélérateur PEP-II produit par collisions e⁺e⁻ des mésons γ(4S), qui se désintègrent pour moitié en B⁰B⁰ et en B⁺B⁻, que l'expérience BaBar étudie. Une luminosité de 1,2 x 10³⁴cm⁻²s⁻¹ a été atteinte, soit quatre fois celle initialement prévue. Le programme scientifique continue ainsi de s'étendre : 280 articles ont déjà été publiés par PRL ou PRD.

Le MS rend compte de la violation de CP par l'existence d'un terme complexe dans la matrice CKM, qui relie les états propres d'interaction faible des quarks à leurs états propres de masse. Les mesures de violation de CP permettent d'accéder à chacun des trois angles α, β, et γ de l'un de ces triangles qui représente l'unitarité de cette matrice. Les taux de désintégration de certains

canaux et le mélange B⁰↔B⁰ sont eux reliés aux longueurs des côtés du triangle. La confrontation des mesures permet de tester la cohérence du MS.

Pour les modes B⁰→ charmonium K⁰, l'asymétrie varie sinusoidalement en fonction du temps de désintégration avec une amplitude proportionnelle à sin(2β), maintenant mesuré de façon extrêmement précise, sin(2β) = 0,710 ± 0,034 ± 0,019. L'angle β peut être aussi mesuré en utilisant des désintégrations rares, sensibles à la présence éventuelle de particules et de phases additionnelles dans les diagrammes en boucle. La moyenne mondiale ainsi obtenue, sin(2β) = 0,53 ± 0,05, est inférieure à la valeur précédente par 2,6 déviations standard (l'incertitude théorique sur cette moyenne fait débat). Ceci est prometteur mais pas encore suffisant pour conclure à la présence de nouvelle physique.

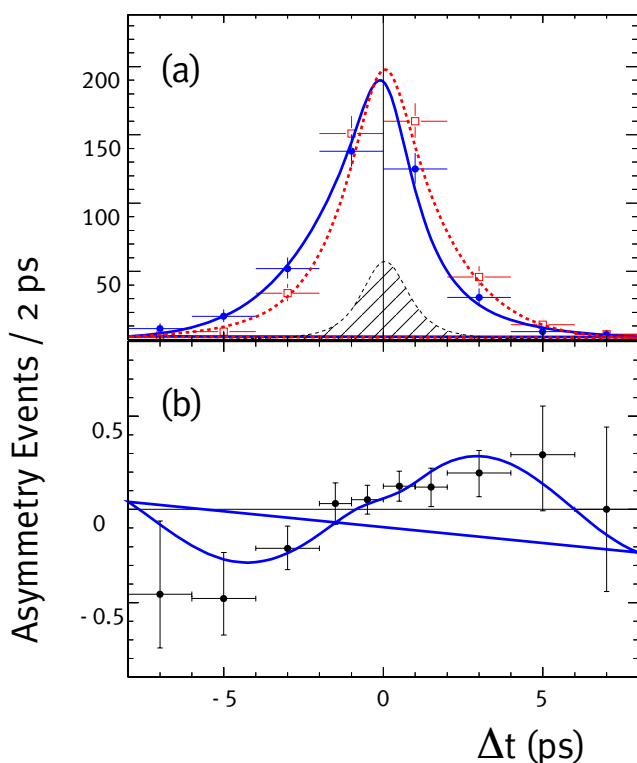
La violation de CP dans les transitions b→u permet d'accéder à l'angle α via une analyse en isospin. En combinant les trois modes ππ, ρπ et ρρ, BaBar mesure l'angle α = (97,5^{+16,5}_{-11,5})⁰.


Enfin l'angle γ peut être obtenu avec une incertitude théorique faible par l'étude des asymétries entre les taux de branchement B⁺→D⁰K⁺ et B⁻→D⁰K⁻ où le D⁰ se désintègre vers un état propre de CP (π⁺π⁻, K⁺K⁻...). L'ensemble de ces mesures détermine la valeur de γ avec une incertitude d'environ 25°.

Après sept années de mesures redondantes et de précision croissante, le MS est beaucoup mieux connu et affirme toujours sa validité.

BaBar poursuit sa moisson de nouvelles résonances. Nous avons observé un nouvel état se désintégrant en J/ψ π⁺π⁻, à une masse de 4,26 GeV/c², produit avec rayonnement d'un photon dans l'état initial, ce qui signe un état de nombres quantiques J^{PC}=1⁻. Ce nouvel état ne peut être un méson ordinaire : peut-être le premier méson hybride, état lié q-q-gluon.

Observation de la violation de CP dans un mode b → q q̄ : B⁰ → η' K⁰S avec sin(2β_{eff}) = 0,58 ± 0,10 ± 0,03 : distribution du temps de désintégration pour un étiquetage B⁰ (bleu) et B⁰ rouge.



 Babar général : <http://www.slac.stanford.edu/BFROOT>
 Babar grand public : <http://www-public.slac.stanford.edu/babar/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

H1 : l'expérience auprès du collisionneur électron-proton Hera

Zhiqing Zhang

Depuis fin 2003, Hera fonctionne avec une efficacité accrue et des modes d'opération plus variés mettant en jeu des faisceaux d'électrons et de positrons polarisés longitudinalement. Les équipes de l'IN2P3 et du CEA/Dapnia, très impliquées dès le début dans l'expérience H1, continuent à jouer des rôles de premier plan dans la collaboration et à avoir des contributions majeures sur les activités *hardware* et les analyses des données.

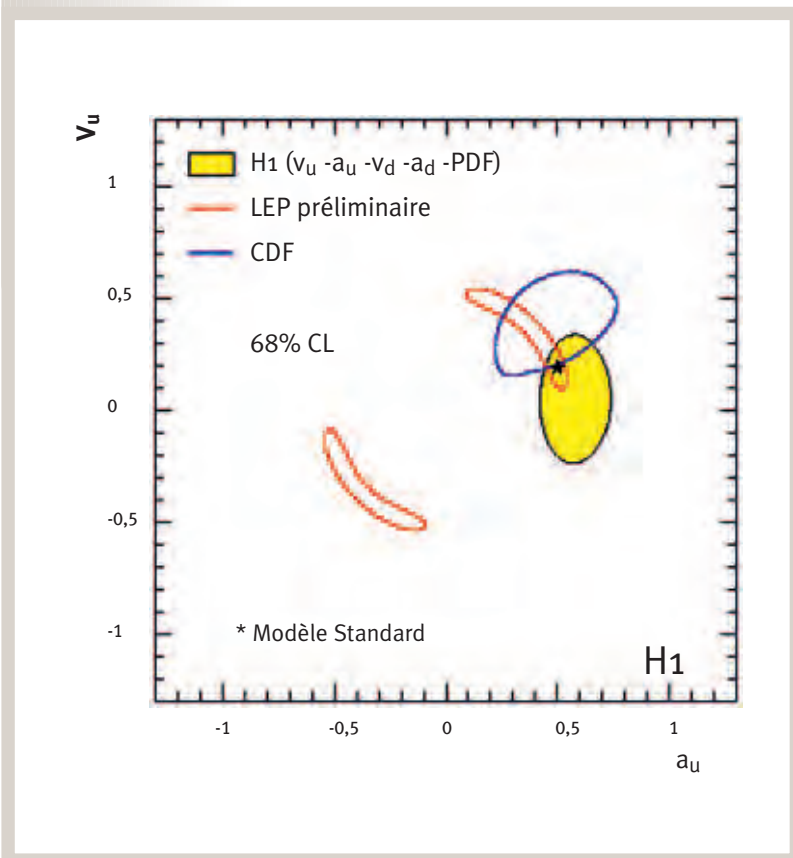
Hera, l'unique collisionneur électron-proton du monde, est entré dans sa deuxième phase d'opération (Hera-II) depuis 2003. Cette nouvelle phase a permis aux expériences H1 et Zeus d'avoir accès à des collisions de protons avec des faisceaux d'électrons ou de positrons polarisés longitudinalement et cela avec une luminosité instantanée augmentée par un facteur 3. Par rapport à Hera-I, les quantités de données ont été augmentées d'un facteur 12 en mode électron-proton et d'un facteur 3 en mode positron-proton.


Les laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans l'expérience H1 ont des contributions majeures dans

cette nouvelle phase du programme de Hera. Un système d'acquisition amélioré pour le traitement des données du calorimètre à argon liquide de H1 et un nouveau calorimètre à fibres optiques et tungstène pour la mesure de luminosité ont été réalisés avec succès et sont en opération routinière. Un nouveau polarimètre utilisant une cavité Fabry-Pérot fonctionne maintenant, après qu'ont été résolus un certain nombre de problèmes expérimentaux. Il permet d'augmenter la précision de la polarisation mesurée par les autres polarimètres, cette précision étant facteur limitant dans les analyses actuelles.

Les physiciens (CNRS/IN2P3 et CEA/Dapnia) ont des responsabilités très importantes au sein de la collaboration H1 (porte-parole, coordinateur de physique et coordinateurs de plusieurs groupes de physique et technique). Ils ont aussi des contributions prépondérantes dans le développement des logiciels d'analyse et dans l'analyse des données. Ils ont obtenu des nombreux résultats marquants sur des sujets très variés : sur les mesures de précision (les sections efficaces des processus courant neutre et chargé, les fonctions de structure, la diffusion Compton profondément virtuelle) et leurs interprétations (les fonctions de distribution des partons, α_s et les paramètres électrofaibles), et sur les recherches de nouvelles particules ou de nouveaux phénomènes (les leptoquarks, le boson de Higgs doublement chargé, les événements rares ayant soit un lepton isolé et de l'énergie manquante soit plusieurs leptons de très grande énergie). Ils s'engagent maintenant très fortement sur l'analyse de la dernière phase de prises de données et la finalisation des résultats de Hera, dont la fin de fonctionnement est prévue pour mi-2007.

Les couplages axial (a_u) et vectoriel (v_u) du quark u au boson Z^0 déterminés dans un ajustement QCD-électrofaible en utilisant les données de H1 prises à Hera-I, comparés à ceux obtenus par CDF au Tevatron et par le groupe électrofaible au LEP.



 <http://www-h1.desy.de/general/home/H1homepage.shtml>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CPPM, LAL, LLR |
CNRS/DSM : Dapnia.

Atlas, CMS et LHCb, trois expériences auprès du LHC

Le Grand Collisionneur Hadronique, LHC, du Cern, produira des collisions proton-proton à des luminosités (jusqu'à $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) et des énergies (14 TeV) jamais atteintes auparavant. Les détecteurs situés sur l'anneau du collisionneur sont à un stade avancé de montage et d'intégration et seront prêts en 2008 pour le début de la prise de données. La principale motivation d'Atlas et de CMS est la recherche de nouvelle physique : Higgs, super symétrie, dimensions supplémentaires, etc. L'expérience LHCb se consacrera à l'étude précise de la violation de la symétrie CP et des désintégrations rares des particules belles.

1

Expérience Atlas

Daniel Fournier

La période 2004-2006 a été celle de la fin de construction et de l'installation de la plupart des détecteurs autour du point de collision, l'installation des parties les plus fragiles (comme le détecteur de vertex) devant s'effectuer en 2007.

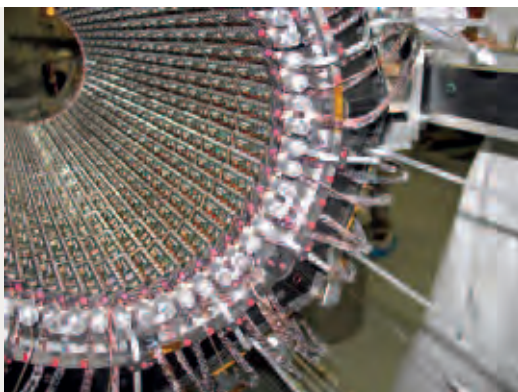
Positionnée au point de collision numéro 1 des faisceaux de protons ($2 \times 7 \text{ TeV}$) du LHC, l'expérience Atlas se propose d'étudier l'ensemble des phénomènes dans lesquels apparaissent des particules avec une grande impulsion perpendiculaire à la direction des faisceaux. Ces réactions sont celles susceptibles de faire apparaître le plus clairement les phénomènes nouveaux, comme la production de particules lourdes encore inconnues (et en particulier le boson de Higgs, ou les particules super symétriques), l'existence de dimensions d'espace-temps « supplémentaires » par rapport aux 3+1 auxquelles nous sommes accoutumés, ou même l'existence de sous structures dans les quarks du nucléon. Le détecteur est également conçu pour permettre des mesures de précision contraignant le Modèle Standard et sa relation avec les états qui verraient être découverts. Rentrent dans ce cadre la mesure de la masse du boson de Jauge W et celle du quark top.

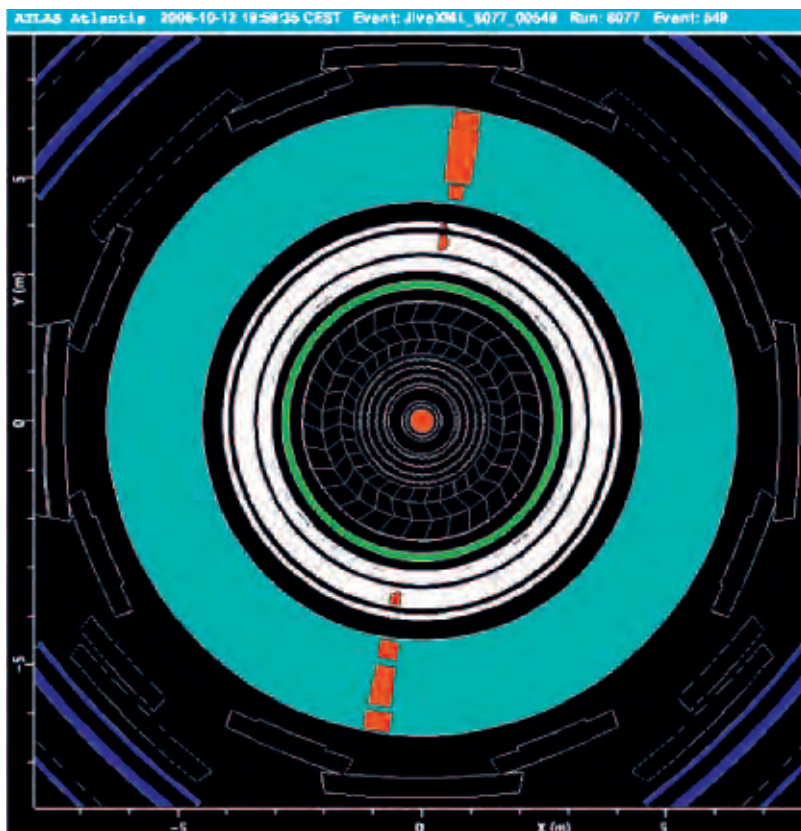
Les différentes « couches » de détection sont, en partant du point de collision, le détecteur de vertex à pixels, le détecteur de traces et le solénoïde

qui les entoure le calorimètre électromagnétique, puis le calorimètre hadronique, et enfin le spectromètre à géométrie toroïdale destiné à mesurer les muons, seules particules chargées capables (en première approximation) de traverser la masse des calorimètres. Comparativement aux détecteurs de la génération précédente, la difficulté principale dans l'élaboration et la construction d'Atlas a été la taille – dictée par le saut en énergie d'un facteur 7 par rapport au Tevatron – et le taux d'interaction. À la luminosité nominale de $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, il y aura une collision de paquets de protons chaque 25 ns, produisant chacune en moyenne une vingtaine d'interactions inélastiques. Ce taux a des conséquences sévères sur l'électronique comme sur les détecteurs, qui doivent répondre rapidement (quelques dizaines de ns) et résister aux radiations associées.

L'installation part, à l'inverse, de l'extérieur vers l'intérieur, et après l'installation des premières bobines du toroïde central est venue la descente dans le puits des calorimètres centraux, une seule pièce pour le calorimètre à argon liquide dans son cryostat, mais soixante-quatre secteurs pour le calorimètre à tuiles scintillantes qui l'entoure. L'IN2P3, particulièrement impliquée dans ces détecteurs a joué son rôle dans la mise en place, le câblage, et les tests de ces éléments. Un moment particulièrement impressionnant a été l'insertion du calorimètre central ainsi complété dans la cavité du toroïde central (photo ci-contre). Une fois en place, le calorimètre central à argon liquide a été relié à l'ensemble cryogénique destiné à le piloter, puis refroidi, et rempli de liquide (40m^3). L'électronique frontale a été alors installée, puis reliée à la salle USA15 où se situe toute l'électronique de traitement. La même procédure a été suivie pour le calorimètre à tuiles, et l'ensemble est maintenant en test, avec pour premier objectif d'effectuer une calibration complète (grâce à des signaux électroniques, et pour le calorimètre à tuiles grâce aussi à des faisceaux laser et des sources radioactives). L'étape

Détecteur interne de traces à pixels d'Atlas.
© Cern.





Rayon cosmique observé pendant les tests de réception des calorimètres.

La figure ci-dessus montre une première « photo » d'événement de ce type. La suivante est la détection de rayons cosmiques (il en reste une fraction à 100 m sous terre, la plupart pénétrant à travers les puits d'accès encore ouverts), afin de vérifier l'alignement en temps du système d'échantillonnage électronique, et l'alignement dans l'espace des différents détecteurs.

Pendant que les parties centrales du calorimètre étaient soumises aux tests fonctionnels, la partie « bouchon » était à son tour installée. En particulier le premier calorimètre bouchon à argon liquide était refroidi à sa température de fonctionnement en février 2007, le second, déjà en place, devant suivre après 2 à 3 mois.

L'autre contribution matérielle majeure de l'IN2P3 se situe au niveau du détecteur de vertex à pixels. Cet ensemble cylindrique, de seulement 30 cm de diamètre et 2 m de longueur comporte 80 millions de canaux. Sa principale fonction est de signer les particules à vie très courte comme les hadrons dont un constituant est le quark b et les leptons τ , eux-même signatures de phénomènes recherchés (quark top, Higgs, supersymétrie). Le CPPM a assemblé plus d'un tiers des éléments de ce détecteur, et participé activement à son intégration finale au Cern.

De façon inévitable les tests fonctionnels simultanés ont fait apparaître quelques problèmes qu'il faut corriger, comme un champ magnétique résiduel (issu du toroïde) un peu trop grand au niveau de l'électronique des calorimètres bouchons, et des parasites électroniques générés par un calorimètre vers un autre.

En parallèle avec le *hardware*, un effort tout à fait considérable a été fait au niveau des logiciels de traitement de l'information que ce soit en ligne (avec 3 niveaux de déclenchement) ou de façon différée. Le système de déclenchement a en particulier la tâche très difficile de réduire à ~100 par seconde le nombre d'événements conservés sur stockage de masse (un facteur de réduction de près de 10 millions, par rapport aux collisions initiales) tout en ne conservant avec une efficacité meilleure qu'à 90% les événements intéressants, en général rares. L'IN2P3 joue un rôle important au niveau du *software* général et des bases de données dans la reconstruction des traces et des vertex, et dans la reconstruction des « clusters » calorimétriques, source principale d'information pour former électrons, photons et jets.

Différents « data challenges » ont été effectués, et sont encore en cours, pour tester l'adéquation du *software*, des réseaux, et des moyens de calcul au « modèle de calcul d'Atlas ». Dans ce modèle, le CC-IN2P3 (Tier1) et les centres de la région parisienne (GRIF) et de Clermont-Ferrand jouent un rôle important pour Atlas, au niveau de ~10% de sa capacité de calcul, et un rôle essentiel pour les chercheurs français (la capacité à effectuer une analyse restant la même quelque soit le laboratoire IN2P3 où le chercheur est installé).

Des groupes de travail (Computing Atlas-France, Physique Atlas-France, voir <http://atlas-france.in2p3.fr>) ont été mis sur pied pour préparer l'analyse. Les groupes français sont actifs dans tous les domaines (physique du Modèle Standard, recherche du boson de Higgs, des particules supersymétriques...).

 Atlas général :

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

2

Expérience CMS

Yves Sirois

La période 2004-2006 a été marquée par une accélération de la production de masse pour la construction du détecteur CMS et par une série de tests des systèmes complets équipés de l'électronique d'acquisition définitive. Quatre laboratoires de l'IN2P3 participent à l'expérience CMS. Ils ont contribué au développement et à la réalisation du trajectographe et du calorimètre électromagnétique (ECAL). Ces détecteurs devraient jouer un rôle essentiel dans la découverte du (ou des) boson de Higgs ainsi que dans la recherche de nouvelle physique telle la supersymétrie.

La construction du tonneau du Ecal se termine. Plus de 90% des 61200 cristaux de cette partie centrale ont été produits: toutes les capsules de lecture qui intègrent deux photodiodes à avalanche ont été assemblées, testées et étalonnées dans les laboratoires de l'IN2P3, qui assurent également l'étalonnage des cartes de lecture frontales ainsi que la conception et la construction des cartes de déclenchement. Les cartes nécessaires pour le tonneau ont été construites et calibrées. Pour les bouchons, les cartes de lecture frontales ont été fabriquées et devraient être bientôt calibrées.

Une série de supermodules du tonneau Ecal ont pu être inter-calibrés en faisceau d'électrons en 2006, avec un rôle prépondérant de l'IN2P3. Les performances obtenues sont excellentes et correspondent complètement aux objectifs ambitieux initialement fixés (ci-dessous à gauche).

L'Institut a été également fortement impliqué dans la construction du trajectographe au silicium, avec de nombreuses responsabilités:

- développement, production et suivi en qualité des hybrides de lecture,
- contrôle de la qualité des senseurs au silicium,
- assemblage de précision de 3000 modules élémentaires de détection des bouchons,
- micro-câblage par « bonding » de ces modules de détection formés d'un couple senseur/hybride,
- assemblage des modules sur leur structure porteuse, appelée pétale, et qualification approfondie de la connectique et de la qualité des signaux,
- étude des services des bouchons,
- conception et développement de la base de données de construction.

Ces activités ont pu être complétées avec succès en 2006 et les développements ont été validés au cours de tests d'une tranche des détecteurs sous rayons cosmiques à l'automne 2006 (voir schéma ci-dessous).

En parallèle, l'intégration des éléments du trajectographe au centre d'intégration installé au Cern progressait rapidement. L'Institut est en charge de l'intégration et de la mise en service d'un bouchon complet (photo ci-contre), de l'architecture du système d'acquisition, de la gestion des bases de données et du contrôle en ligne de la prise de données du trajectographe.

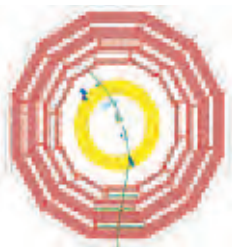
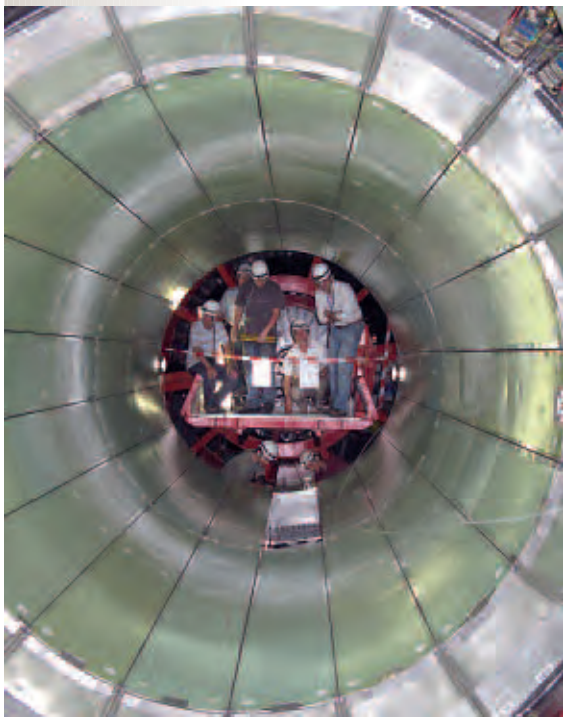
Les groupes de l'IN2P3 ont fortement participé à la préparation en 2005-2006 des « Technical Design Reports » de l'expérience consacrée aux performances des détecteurs (volume I) et à la prospective de physique (volume II).

L'Institut a été impliqué dans un test majeur de calcul distribué visant à traiter un flux d'événements correspondants à environ 25% du flux attendu pour la physique en 2008.

Un des bouchons du trajectographe de CMS. © Cern.



Installation du dernier élément du calorimètre électromagnétique (ECAL). © Cern.



Visualisation d'un rayon cosmique dans CMS. © Cern.



CMS général:

<http://cms.cern.ch/>

CMS France:

<http://polywww.in2p3.fr:8081/CMS>

CMS «outreach»:

<http://cmsinfo.cern.ch/outreach/>

CMS wikipedia:

http://en.wikipedia.org/wiki/Compact_Muon_Solenoid

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION CMS

CNRS/IN2P3: IPNL, IPHC, LAPP, LLR |
CEA/DSM: Dapnia.

La Grille de calcul du LHC (W-LCG) et la contribution française (LCG-France)

Fairouz Malek

Avec 40 millions de collisions par seconde et 10^{10} collisions enregistrées par an, les données générées par le LHC (une quinzaine de pétaoctets) et leur exploitation représentent un véritable défi informatique de par le flux et le volume à traiter. Potentiellement, à tout instant, 10 000 chercheurs (environ 2500 par expérience) pourront solliciter des calculs d'analyse des données fournies par le LHC. Ceci nécessite une infrastructure distribuée et souple. De cette initiative est née la collaboration W-LCG (WorldWide LHC Computing and Grid) dont l'objectif est de réaliser le projet LCG.

L'infrastructure de grille de W-LCG dépendra de trois types de technologie de grille, l'Européenne EGEE (European Grid for EsciencEs), l'Américaine OSG (Open Science Grid) et celle de l'Europe du Nord, NDGF (Nordic Data Grid Facility).

Avec 40 millions de collisions par seconde et 10^{10} collisions enregistrées par an, les données générées par le LHC (une quinzaine de pétaoctets) et leur exploitation représentent un véritable défi informatique de par le flux et le volume à traiter. Potentiellement, à tout instant, 10 000 chercheurs (environ 2500 par expérience) pourront solliciter des calculs d'analyse des données fournies par le LHC. Ceci nécessite une infrastructure distribuée et souple. De cette initiative est née la collaboration W-LCG (WorldWide LHC Computing and Grid) dont l'objectif est de réaliser le projet LCG. L'infrastructure de grille de W-LCG dépendra de trois types de technologie de grille, l'Européenne EGEE (European Grid for EsciencEs), l'Américaine OSG (Open Science Grid) et celle de l'Europe du Nord, NDGF (Nordic Data Grid Facility).

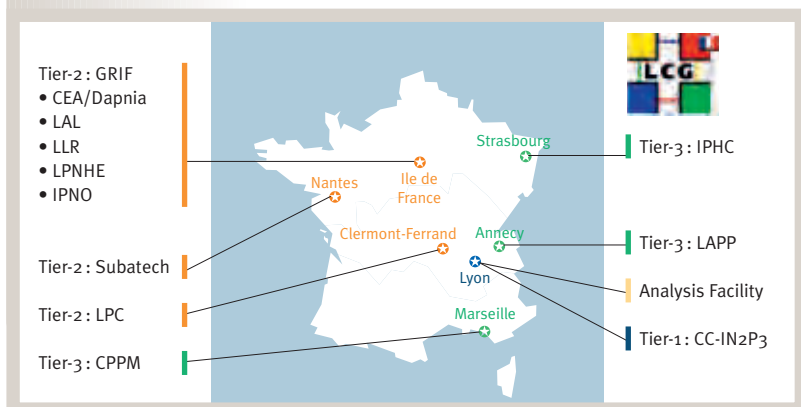
Constituée seulement de douze centres de calcul lors de son lancement en septembre 2003, la grille de calcul du LHC est aujourd'hui un réseau de deux cents sites situés sur trois continents: Europe, Amérique, Asie et elle est d'ores

et déjà opérationnelle. Elle se présente comme un ensemble de centres de calcul hiérarchisés en trois niveaux. Au niveau 0, appelé Tier-0 (au Cern) les données brutes produites par le LHC seront stockées, partiellement reconstruites, puis distribuées au second niveau, appelé Tier-1. Celui-ci est constitué de onze centres de calculs, dits « centres névralgiques », dans lesquels les données feront l'objet de reconstructions plus fines et seront mises à disposition de manière pérenne. Les centres névralgiques devront fournir une capacité de calcul adaptée, une capacité de stockage disque de l'ordre de 6 pétaoctets et une vitesse de circulation des données avec le niveau Tier-0 d'un minimum de 10 gigabits par seconde. Le 3^e niveau, appelé Tier-2, est constitué d'environ soixante-dix centres, qui feront l'interface directe avec les physiciens utilisateurs, recevront les données reconstruites du Tier-1 et assureront la production d'événements simulés, lesquels seront stockés dans le Tier-1. Enfin, des centres de tailles plus modestes formeront un quatrième niveau, appelé Tier-3, qui étant à usage local, ne fait pas formellement partie de W-LCG.

Les premières expériences de validation de la grille LCG ont été lancées en 2003. Un travail indispensable qui a « éprouvé » par des données de simulation le logiciel des expériences et les capacités de gestion des diverses technologies de grilles associées au LHC. Ce type d'opération « d'épreuve par les données » va se poursuivre jusqu'à la mise en service du LHC. Plus de cent millions d'événements simulés ont ainsi déjà été produits, traités, et stockés sur les ressources distribuées des grilles. Une série d'épreuves liées au « Service » de la grille mondiale a été mis en place dès 2005, dont le 4^e du genre est en cours et devra se poursuivre jusqu'à l'été 2007.

Dans ce projet, nos efforts devront mener à une infrastructure de calcul stable, fiable et efficace, au service des expériences et de la science.

La France met en œuvre l'un des centres Tier-1 du W-LCG, au centre de calcul (CC-IN2P3) situé à Villeurbanne et plusieurs sites de niveau Tier-2 et Tier-3.



LCG : <http://lcg.web.cern.ch/lcg/>

LCG News:

<http://lcg.web.cern.ch/lcg/LCGnews.html>

LCG Real time monitoring:

<http://gridportal.hep.ph.ic.ac.uk/rtm/>

LCG-France : <http://lcg.in2p3.fr/>

La grille européenne

Fairouz Malek

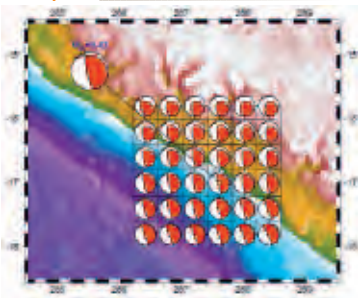
C'est en 2000 que prend corps l'idée de construire en Europe une vaste grille de calcul, réseau distribué de ressources de calcul offrant aux utilisateurs un accès facile et transparent à d'immenses moyens informatiques. Les besoins estimés pour le futur collisionneur LHC sont à l'époque la principale motivation pour une telle entreprise mais son potentiel pour l'ensemble des autres disciplines est d'ores et déjà remarqué.

Le projet Datagrid (2001-2004) est le programme de R&D destiné à prouver la faisabilité d'un tel concept. L'IN2P3 s'était fortement engagé dans Datagrid en assumant la responsabilité de nombreuses tâches dont, en particulier, le banc-test sur lequel plusieurs applications prototypes ont été essayées. Le succès de Datagrid permet donc de passer à la vitesse supérieure et de construire fin 2003 début 2004 le programme Egee (2004-2006) suivi d'Egee-II de 2006 à 2008. Le but d'Egee est de construire un intergiciel (ou middleware) baptisé gLite adapté aux spécifications des différentes communautés d'applications et de réaliser une véritable infrastructure de production fournissant 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 des ressources de calcul à plusieurs communautés d'utilisateurs pérennes. Cet objectif réunit plus de 70 partenaires provenant d'une vingtaine de pays européens, dix unités du CNRS dont 7 de l'IN2P3. Les responsabilités françaises s'articulent autour des points forts de Datagrid : développements des applications, maîtrise opérationnelle de la grille, interface avec les réseaux européens à grande vitesse (Geant). En particulier, l'IN2P3 s'engage à obtenir à la fin d'Egee au moins 3 communautés d'applications pleinement engagées dans Egee. La physique des particules et les expériences du LHC sont bien sûr les premiers cobayes d'Egee avec la communauté biomédicale et celle des sciences de la terre. La collecte des besoins liés à des applications aussi diverses fut une des tâches les plus délicates mais aussi les plus importantes puisque cela a permis en fin de compte de réaliser un logiciel permettant de satisfaire en détail l'ensemble des besoins. Les premières simulations d'Atlas, CMS, Alice et LHCb sont portées sur la grille courant 2004. Les expériences organisent alors des « data challenges » avec des performances de plus en plus satisfaisantes au cours de cette période, grâce aux améliorations successives de gLite. Les nouvelles possibilités offertes par la grille notamment en ce qui concerne la manipulation de très vastes quantités de données

permettent en 2005 la publication de résultats scientifiques novateurs sur la couche d'ozone – en permettant un croisement inédit de grandes bases de données réparties – et sur le traitement de la malaria, en sélectionnant parmi des centaines de milliers de composants chimiques ceux dont la structure tri-dimensionnelle peut laisser espérer une action efficace contre le parasite. Un autre domaine où l'apport des grilles s'avère décisif est le calcul en urgence, lié aux catastrophes (tremblements de terre, inondations, tsunami, etc.). La mobilisation automatique des ressources nécessaires permet (voir fig.) la post-simulation de tous les tremblements de terre majeurs en moins de 24 heures afin d'en comprendre leur mécanisme et d'en prévoir leurs répliques possibles.

Les compétences opérationnelles du centre de calcul de Lyon et des équipes situées aux autres nœuds de la grille se développent considérablement et permettent d'obtenir une très bonne efficacité de fonctionnement pour la partie française d'Egee, ainsi que la mise au point de nombreux outils de surveillance globale d'Egee. On compte fin 2006 plusieurs milliers d'utilisateurs réguliers d'une grille comportant 200 nœuds, 35 000 processeurs et gérant 10 PétaOctets de données, avec plus d'un million de travaux soumis par mois. Les équipes de l'IN2P3 sont également très actives pour sensibiliser les industriels à ce nouveau concept et l'*Industry Forum* d'Egee permet de diffuser à plus d'une centaine de compagnies françaises et étrangères, de taille et d'activité très diverses les résultats remarquables d'Egee. Enfin de la même façon qu'Egee s'est construit sur les succès de Datagrid, la nature complètement opérationnelle d'Egee permet de se projeter vers la création d'une structure européenne pérenne basée sur les initiatives nationales solidement implantées. L'IN2P3 jouera un rôle déterminant dans la création de ces structures du futur et participe au projet européen en ce sens. En conclusion, la période 2004-2006 s'est avérée extrêmement productive pour Egee puisque c'est au cours de ce laps de temps qu'on est passé graduellement d'un banc test limité à une gigantesque infrastructure de production complètement opérationnelle produisant des résultats scientifiques dans beaucoup de domaines et devenant l'outil de base de milliers de scientifiques dans le monde. Nul doute que la période suivante permettra d'amplifier encore ces succès remarquables.

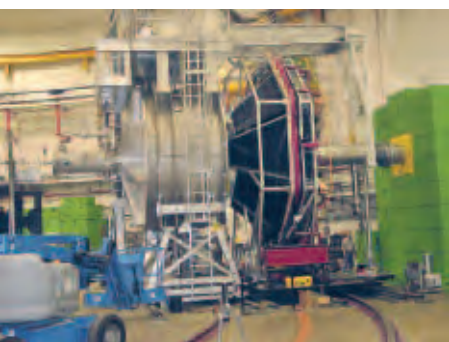
La simulation d'un tremblement de terre réalisé en moins de vingt-quatre heures sur la grille Egee.



Contenu étrange du nucléon

Jean-Sébastien Réal

Une image simple du proton est de le décrire en termes de trois quarks de valences de deux saveurs différentes : *up* et *down*. Dans cette image, ces trois quarks doivent permettre de reproduire toutes les propriétés du proton, comme sa masse, son spin etc. Dans les années quatre-vingt, les physiciens ont trouvé que ce n'était pas le cas, laissant la porte ouverte à de nouvelles hypothèses. La plus communément acceptée est la contribution non négligeable de quarks fugitifs dont fait partie le quark étrange.



Expérience G0.

Les trois quarks de valences du proton sont liés ensemble par l'interaction forte véhiculée par les gluons. La Chromodynamique Quantique, qui est la théorie décrivant l'interaction forte, prédit l'existence de quarks supplémentaires. Les gluons échangés par les quarks de valence passent par des états intermédiaires de paires de quarks/anti-quarks, dont la durée de vie est très courte, formant « la mer de quarks et de gluons ». N'importe quelle des six saveurs existantes est possible, mais les plus légers (*up*, *down* et étrange) ont une probabilité plus grande de participer. Les saveurs *up* et *down* ayant une contribution de valence, le quark étrange est le meilleur candidat pour étudier la hauteur de la contribution des quarks de la mer aux propriétés des nucléons.

L'IN2P3 s'est engagé depuis 1998 dans la mesure de la contribution du quark étrange aux distributions électrique et magnétique du nucléon. Pour déterminer expérimentalement cette contribution, les facteurs de forme faibles du proton sont mesurés en diffusion élastique d'électrons polarisés longitudinalement sur des cibles d'hydrogène et de deutérium. Dans ce processus, nous nous intéressons à l'interaction faible neutre (échange de bosons Z^0) qui est très petite à nos énergies mais qui est mesurable grâce à la non-conservation de la parité. L'expérience demande un contrôle soigneux des biais expérimentaux car une précision absolue meilleure que 10^{-6} est requise. Une série de mesures à différents angles de diffusion (cinématiques avant et arrière) et pour différentes cibles (hydrogène et deutérium) permet d'accéder aux distributions spatiales de charge et de magnétisation *faibles* dans le proton. En combinant ces mesures avec des mesures de facteurs de forme électromagnétique sur le proton et le neutron, il est possible d'isoler la contribution individuelle

de chacune des saveurs de quarks (pour cela il faut faire l'hypothèse de la symétrie d'isospin, et négliger les saveurs des trois quarks les plus lourds).

L'IN2P3 est très fortement impliqué dans deux expériences, l'expérience G0 aux États-Unis et l'expérience PVA4 en Allemagne. G0, qui se déroule au Jefferson Laboratory (Virginie, USA), prend des données depuis 2003 et se terminera en 2007. La première période (jusqu'à 2005) a permis de mesurer la somme des contributions électrique et magnétique à dix-huit cinématiques différentes, la seconde permettra la séparation de ces deux termes à deux cinématiques. PVA4 se déroule sur l'accélérateur Mami à Mayence. Deux cinématiques ont déjà été mesurées, une deuxième période visant à séparer les termes électrique et magnétique est en cours.

La détermination définitive de la contribution des quarks étranges ne sera possible qu'après ces expériences terminées et analysées. Cependant, les résultats actuels montrent pour la première fois une possible contribution significative du quark étrange pour les contributions électrique et magnétique individuelles, contributions qui s'annulent lorsqu'on mesure la somme, due à des signes opposés.

 Go :

<http://lpsc.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html#go>

<http://www.npl.uiuc.edu/exp/Go/>

Communiqué de presse CNRS :

<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqué/709.htm?print=1>

Communiqué de presse de Jlab :

<http://www.jlab.org/news/releases/2005/gzeropr.html>

<http://www.jlab.org/news/releases/2005/gzero.html>

(avec plusieurs références de publications/communiqués dans la presse)

Physical Review Letters 95 (2005) 092001

Article spécial (focus) de *Physical Review Letter* :

<http://focus.aps.org/story/v16/st7>

PVA4 :

<http://ipnweb.in2p3.fr/~phase/pva4/index2.html>

Phys.Rev.Lett. 94 (2005) 152001

Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 022002

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

CNRS/IN2P3: LPSC, IPNO.

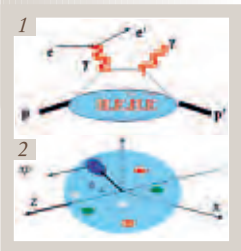
Les Distributions de Partons Généralisées (GPDs)

Michel Guidal

Les premières sections efficaces de la diffusion Compton Virtuelle sur les quarks (réaction $ep \rightarrow e\gamma$) ont été mesurées au Jefferson Laboratory (USA) par les équipes françaises (en collaboration internationale) en 2005 et 2006. Elles apportent les premières fortes contraintes sur les Distributions de Partons Généralisées qui fournissent l'image la plus complète du nucléon actuellement accessible.

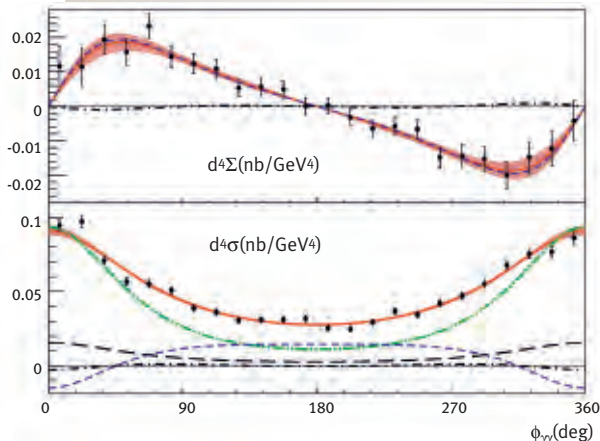
1- le diagramme de « sac à main » qui illustre la factorisation (à grand Q^2) de la réaction DVCS entre un processus « dur »/perturbatif exactement calculable en QCD (ou en QED) et la structure non-perturbative du nucléon, paramétrisée par les 4 GPDs $H, E, H_{\text{tilde}}, E_{\text{tilde}}$.

2- les GPDs contiennent l'amplitude de probabilité de trouver un quark dans le nucléon avec une fraction d'impulsion x à une distance spatiale transverse b_{perp} .



Les GPDs permettent d'étudier à un niveau jamais exploré la structure des nucléons en terme de partons. Les GPDs, dont le formalisme théorique a été introduit dans cette dernière décennie donnent la corrélation entre les distributions spatiales transverses et les distributions d'impulsion longitudinales des partons dans le nucléon, corrélations aujourd'hui totalement inconnues. Entre autres applications, il existe une règle de somme qui permet de les relier au moment angulaire total porté par les quarks, quantité à ce jour inconnue et qui contribuera à définitivement comprendre le problème du spin du nucléon. Les GPDs contiennent aussi d'autres caractéristiques de la physique du nucléon: configurations q - q bar dans le nucléon, corrélations impulsion-position polarisées, etc. Expérimentalement, les GPDs sont accessibles au moyen de réactions exclusives dites « dures », c'est-à-dire où il y a factorisation entre un pro-

La figure du haut présente la différence des sections efficaces polarisées (faisceau) en fonction de l'angle azimutal entre les plans leptonique et hadronique de la réaction $ep \rightarrow e\gamma$ mesurée par le hall A du JLab. La cinématique moyenne est $\langle x_B \rangle = 0.36$, $\langle Q^2 \rangle = 2.3 \text{ GeV}^2$ et $\langle -t \rangle = 0.28 \text{ GeV}^2$. La figure du bas montre la section efficace totale (c.à.d. non-polarisée) en fonction de ce même angle. Les courbes rouges représentent un fit aux données. La contribution du processus Bethe-Heitler -BH- (où le photon est rayonné par un des électrons et non pas par le nucléon) est représentée par la courbe verte. La différence entre les données et le BH est attribuée au DVCS dont la contribution twist-3 est estimée par la courbe tiretée-pointillée (donc très faible).



cessus élémentaire au niveau des partons, calculable en théorie des perturbations de QCD et la structure non-perturbative du nucléon, paramétrisée par les GPDs. En électroproduction, ce régime correspond à grand Q^2 . La réaction la plus simple est la diffusion Compton profondément virtuelle (DVCS pour « Deep Virtual Compton Scattering »), $ep \rightarrow e\gamma$. La figure illustre simplement ces idées.

Les physiciens français (pour l'IN2P3: du LPC Clermont-Ferrand, du LPC Grenoble et de l'IPN Orsay) sont des pionniers et jouent un rôle moteur dans ce domaine de physique auprès de l'accélérateur d'électrons ($E_e(\text{max})=6 \text{ GeV}$) du Jefferson Laboratory (JLab) aux USA. Deux expériences, dans les halls A et B du JLab, dont les Français sont porte-paroles, visant à mesurer pour la première fois au monde les sections efficaces du DVCS, ont terminé leur prise de données en 2005. Elles ont nécessité la construction de détecteurs dédiés; en particulier, pour le hall B, la construction (IPNO+SPhN Saclay), pour détecter le photon de la réaction $e p \rightarrow e' p' \gamma$, d'un calorimètre électromagnétique segmenté en ~ 400 cristaux de PbWO_4 qui permet d'obtenir de haute résolution en énergie ($\sim 4\% \sqrt{E}$), angle ($\sim 3 \text{ mrad} \sqrt{E}$) à de forts taux de comptage ($\sim \text{MHz}$). La lumière de ces cristaux est lue par des photodiodes à avalanche, ce qui fait de la collaboration du hall B la première à utiliser, dans une phase de production de physique, de tels détecteurs.

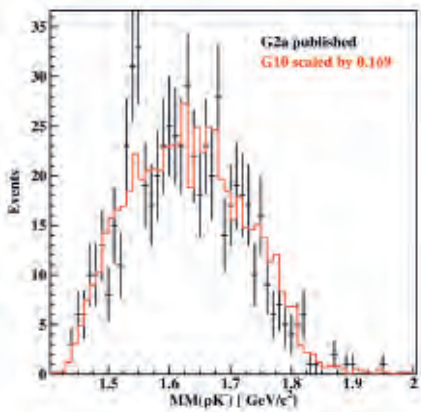
De même, dans le hall A, un calorimètre de 132 cristaux de PbF_2 et un détecteur de proton (157 scintillateurs), lus par phototube et une électronique dédiée pour éviter les empilements, ont été conçus et construits en grande partie par l'IN2P3 (LPC, LPSC + SPhN).

L'expérience du hall B est encore en cours d'analyse et les résultats du hall A ont été publiés très récemment (accepté à PRL, nucl-ex/0607029). Ils montrent en particulier pour la première fois le comportement en loi d'échelle (en Q^2) des observables mesurées, conformément à la prédiction attendue dans le régime de Bjorken, confirmant que le mécanisme du « handbag » QCD *leading-twist* (et par conséquent, les GPDs) est en effet observé aux énergies de JLab. Une mesure exploratoire du DVCS sur le neutron a permis d'établir des toutes premières contraintes sur la GPD E la plus méconnue à ce jour (thèse M. Mazouz, LPSC Grenoble, 2006).

Recherche de baryons exotiques

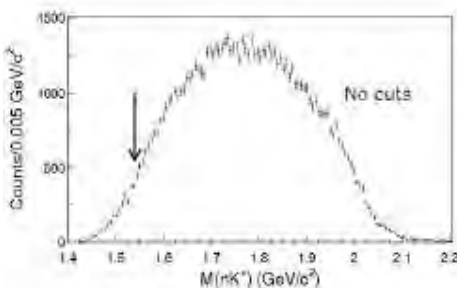
Silvia Niccolai

L'existence du baryon exotique à 5 quarks Θ^+ , observé dans douze expériences à basse statistique, est mise en forte doute par les nouveaux résultats d'une expérience dédiée récemment complétée au Jefferson Laboratory avec le détecteur Clas.



Distribution de masse invariante nK^+ , pour la réaction $\gamma d \rightarrow pK^+K^-(n)$. Les points en noir sont les premières données publiées par Clas [4]. La courbe en rouge, où on ne voit aucun pic autour de $1.54 \text{ GeV}/c^2$, représente le résultat de l'analyse de nouvelles données de Clas - G10 [5].

Distribution de masse invariante nK^+ , pour la réaction $\gamma d \rightarrow \Lambda K^+ n$. La flèche indique la valeur de masse où on s'attendrait à voir le pic du Θ^+ .



Depuis la première annonce publique de l'observation d'un nouvel état, Θ^+ , en l'année 2003 [1], l'existence de baryons exotiques, ayant des nombres quantiques requérant un contenu minimal de 5 quarks, a remué la communauté de physique hadronique. Bien que l'idée de l'existence des « pentaquarks » ait déjà été présentée au début des années soixante-dix, les prévisions spécifiques d'une masse de 1530 MeV et d'une largeur étroite (moins de 15

MeV), qui ont motivé la première mesure à LEPS/SPring-8 [1], ont été faites en 1997 par Diakonov *et al.* [2]. Dans le cadre de leur modèle du Soliton Chiral, ils ont prévu que le Θ^+ est un isosinglet d'un anti-décuplet de pentaquarks, ayant $J^{\pm 1/2}$, dont trois ont des nombres quantiques exotiques: Θ^+ (étrangeté $S=1$), Ξ^- ($S=-2$, charge $Q=-2$) et Ξ^+ ($S=-2$, $Q=+1$).

Un signal d'évidence pour le Θ^+ a été cité dans 12 publications (voir [3] pour une revue). En particulier, la première mesure exclusive du Θ^+ [4] a été effectuée par la collaboration Clas du Jefferson Laboratory (JLab), où l'IPN d'Orsay est impliqué depuis de nombreuses années. Un pic de $4.6-5.2\sigma$ à $1.547 \text{ GeV}/c^2$ a été observé dans la distribution de la masse invariante de nK^+ , dans la réaction $\gamma d \rightarrow K^+ p K^+(n)$. Cependant, la petite signification statistique du signal de Θ^+ observé --- ces résultats viennent de l'analyse d'anciennes données prises pour d'autres motivations ---, l'incompatibilité entre certaines des valeurs des masses mesurées, et, par ailleurs, les résultats négatifs rapportés par d'autres expériences à haute énergie et avec grande statistique [3], ont mis un point d'interrogation sur l'existence des pentaquarks. Une réponse définitive à cette question est fondamentale pour notre compréhension de la QCD, et donc elle est devenue centrale dans le programme expérimental de beaucoup de laboratoires. En particulier, au JLab, un vaste programme expérimental consacré à la recherche des pentaquarks a été mené. Le détec-

teur Clas a été choisi pour cela, parce que sa grande acceptance et ses possibilités de détecter des processus exclusifs avec états finaux à multi-particule avec une bonne résolution en font un outil puissant pour la spectroscopie des hadrons. Dans l'expérience G10 de Clas, effectuée pendant le printemps 2004, des photons étiquetés avec des énergies de 0.8 à 3.59 GeV interagissaient avec une cible liquide de deutérium, placée au centre du spectromètre Clas. Des données avec une statistique 10 fois plus haute que les données de Clas existantes ont été collectées. Les résultats de l'analyse de la réaction $\gamma d \rightarrow pK^+K^-(n)$ n'ont pas confirmé l'observation publiée en précédente: aucune structure étroite n'est visible dans le spectre de masse invariante nK^+ . La signification statistique du premier signal publié doit donc être interprétée comme le résultat d'une combinaison « malheureuse » d'une fluctuation statistique avec une sous-estimation du bruit de fond. La limite supérieure pour la section efficace pour la réaction $\gamma n \rightarrow \Theta^+ K^-$ a été estimée de l'ordre de 5 nb [5]. En plus du but de reproduire le résultat précédemment publié sur le canal $\gamma d \rightarrow pK^+K^-(n)$, la haute qualité et la grande statistique des données de G10 permettaient également l'analyse d'autres canaux de réaction. En particulier, à l'IPN d'Orsay, nous avons étudié la photoproduction de Θ^+ avec un hypéron Λ (voire [6] pour des prévisions théoriques). Les deux modes de décroissance du Θ^+ ($\Theta^+ \rightarrow nK^+$ et $\Theta^+ \rightarrow pK^0$) ont été étudiés. Les résultats de ces analyses ne montrent aucune structure statistiquement significative dans les spectres de masse invariante NK , pour ni l'un ni l'autre des deux modes de décroissance du Θ^+ (fig. 2, pour le mode nK^+). La limite supérieure sur la section efficace de $\gamma d \rightarrow \Lambda \Theta^+$, avec $\Theta^+ \rightarrow nK^+$, a été estimée de l'ordre de quelques nb [7].

[1] T. Nakano *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 91, 012002 (2003).
 [2] D. Diakonov, V. Petrov, M. Polyakov, *Z. Phys.* A359 (1997) pp. 305.
 [3] S. Niccolai, *Acta Physica Polonica B* Vol. 36 (2005) pp. 2179.
 [4] S. Stepanyan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 91, 252011 (2003).
 [5] B. McKinnon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 96, 212001 (2006).
 [6] V. Guzey, *Phys. Rev. C* 69, 065203 (2004).
 [7] S. Niccolai *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 97, 032001 (2006).

•• PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET HADRONIQUE

Plasma de quarks et de gluons

Expérience NA60

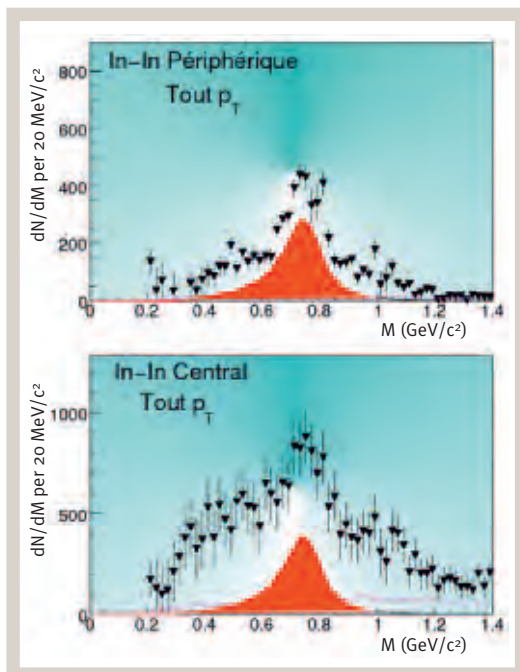
Raphaël Tieulent

L'expérience NA60 réalisée au Cern s'inscrit dans la continuité des expériences NA38 et NA50 consacrées à la recherche du plasma de quarks et de gluons. Elle étudie la production des paires de muons dans les collisions proton-noyau et noyau-noyau. L'ajout d'un télescope de pixels de silicium avant l'absorbeur hadronique a permis d'obtenir des données d'une qualité sans précédent.

Le dispositif expérimental comprend: le spectromètre à muons utilisé par NA38/NA50, un télescope à pixels disposé après la cible dans un dipôle magnétique de 2,5 T ainsi qu'un détecteur de faisceau mesurant la position transverse de la particule incidente avec une précision d'environ 20 μm . L'association des trajectoires des muons amont et aval mesurées dans le spectromètre et dans le télescope permet d'obtenir une résolution à la masse du ϕ de 23 $\text{MeV}\cdot\text{c}^{-2}$ et un rapport signal sur bruit trois fois meilleur que dans NA50. L'expérience NA60 a pris des données en proton-noyau en 2001 et 2003. L'expérience In-In à 158 $\text{GeV}/\text{nucléon}$ a eu lieu en 2004. Nous présentons dans ce rapport les résultats en collisions In-In dans le domaine des basses masses. Ceres a étudié la région des basses masses en diélectrons en collisions p-Be/Au, S-Au et Pb-Au. En ions lourds, un excès de paires d'électrons, au voisinage de la masse du ρ , a été mis en évidence, relativement à l'extrapolation des données p-A. L'étude du ρ dont la durée de vie est inférieure à celle du milieu dense créé donne des informations

sur la matière aux premiers instants de la collision. S'il y a restauration partielle de la symétrie chirale, la fonction spectrale du ρ doit être modifiée. En raison de la faible statistique des

données et de la mauvaise résolution en masse, il était difficile d'étudier dans Ceres les modifications subies par le ρ dans le milieu. La statistique importante accumulée par NA60 (supérieure d'un facteur ~ 1000 à Ceres) ainsi que la qualité des mesures permet ce type d'étude. Après avoir soustrait le fond combinatoire associé aux désintégrations des π et des K ainsi que les fausses associations de traces entre le télescope et le spectromètre à muons, le lot d'événements sélectionné est de 360 000 paires de muons. L'analyse a été réalisée en quatre tranches de centralité: périphérique, semi-périphérique, semi-centrale et centrale. Les données périphériques (figure du haut) peuvent être décrites à l'aide des sources attendues (cocktail hadronique): désintégration en muons des mésons η , ρ , ω et ϕ et du charme ouvert DD . Les données les plus centrales font apparaître un excès obtenu en soustrayant du spectre brut les contributions hadroniques standard à l'exception de la fonction spectrale du ρ . La distribution en masse de l'excès est montrée sur la figure du bas. Cette figure met en évidence l'excès associé à l'élargissement du ρ lorsque la centralité augmente, alors que la distribution reste centrée à la position nominale de la masse du ρ . L'excès atteint un facteur trois entre les collisions centrales et périphériques [2]. Dans le domaine des masses intermédiaires, NA60 montre que l'excès observé par NA50 [3] est dû à des dimuons directs (thermiques). C'est la première expérience à avoir observé ce résultat [4]. L'absorption anormale du J/ψ mise en évidence par NA50 est confirmée par NA60 en In-In [5].



Distribution expérimentale du ρ (triangles noirs), pour des collisions Périphériques (en haut) et centrales (en bas). La fonction spectrale attendue du ρ est représentée en rouge.

 <http://na60.cern.ch/www>

Dimuon and charm production in nucleus-nucleus collisions at the CERN-SPS. *European Physics Journal C*14 (2000) 443; CERN-EP-2000-012

First Measurement of the rho Spectral Function in High-Energy Nuclear Collisions, *Phys. Rev. Lett.* 96, 162302 (2006).

A first look at open charm production in Indium-Indium collisions at SPS energies. *European Physics Journal C*43 (2005) 209.

J/ψ production in Indium-Indium collisions. *European Physics Journal C*43 (2005) 167.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, LPC-Clermont, LLR.

Phenix, la suppression du J/ψ

Raphaël Granier de Cassagnac

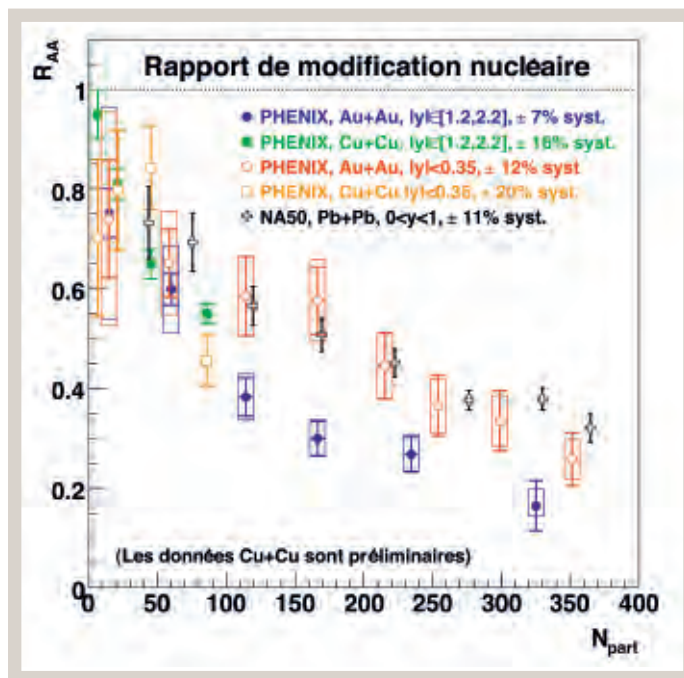
Les physiciens de Phenix observent la disparition de la particule J/ψ , dans les collisions d'ions lourds les plus violentes jamais réalisées. Il s'agit là d'une des signatures prédites de l'apparition d'un milieu dans lequel quarks et gluons sont déconfinés.

Le collisionneur RHIC est situé au Laboratoire National de Brookhaven, dans l'état de New-York. Il a démarré en 2000 et délivre depuis divers types de collisions. Les prises de données de 2004 et 2005 ont permis d'accumuler des lots conséquents de collisions or+or et cuivre+cuivre, favorisant l'observation d'événements de plus en plus rares. C'est en particulier le cas de la production du méson J/ψ .

L'expérience Phenix, à laquelle participent cinq équipes de l'IN2P3 et une du CEA/Dapnia, est particulièrement adaptée à l'observation de cette particule, au travers de ses désintégrations en deux leptons. Elle dispose en effet de détecteurs médians permettant d'identifier des électrons et de deux bras vers l'avant sensibles aux muons. L'électronique de lecture de l'un de ces deux spectromètres à muons a été produite par les équipes françaises qui en possèdent aujourd'hui l'expertise et en assurent la maintenance. La reconstruction du lot de J/ψ se désintégrant en paire de muons a été effectuée au centre de calcul de l'IN2P3 pour la prise de données de 2004 (ainsi que les précédentes).

L'analyse des collisions or+or et cuivre+cuivre montre que le méson J/ψ est supprimé, au-delà des effets nucléaires standards. Cette suppression « anormale » a déjà été observée à des énergies plus basses par l'expérience NA50 du Cern. À en croire les prédictions théoriques extrapolant ces mesures, la suppression aurait dû être plus forte au RHIC. Curieusement, il n'en est rien, les courbes de suppression étant assez similaires. Il est trop tôt pour tirer des conclusions, mais une explication possible serait que seuls les états excités des charmonia (ψ' , χ_c) fondent dans le plasma, laissant intacts les J/ψ initialement produits. Une autre explication, renforcée par le fait que la suppression observée par Phenix est d'autant plus grande que la densité d'énergie est faible (vers l'avant), résiderait dans la recombinaison de quarks charmés. L'une comme l'autre ne sont précisément possibles que si le milieu produit est déconfiné.

D'autres signatures du plasma de quarks et de gluons ont également été vues par Phenix.



L'atténuation des jets, le flot elliptique et la production de photons thermiques forment, avec la suppression des J/ψ , un faisceau de présomptions très fort qu'une matière déconfinée et interagissant fortement est produite à RHIC.

Pour mieux comprendre la suppression du J/ψ , plusieurs pistes sont actuellement suivies. L'observation de son comportement collectif (flot elliptique) nous renseignera sur l'histoire des quarks qui le composent. Cette mesure est prévue lors de la prise de données de 2007 dont la reconstruction sera assurée quasi en ligne par le centre de calcul de l'IN2P3, à la fois pour les électrons et les muons. La mesure de la production totale du charme est également très attendue et sera possible grâce à l'adjonction d'un détecteur de vertex au silicium. Une équipe de l'IN2P3 participe à cet effort en assumant la responsabilité de la conception de cartes d'électronique appelées Silicon Pixel Interface & Read-Out.

Mesure de la suppression (normalisée aux collisions $p+p$) du méson J/ψ dans les collisions or+or (nucl-ex/0611020 soumis à physical review letters) et cuivre+cuivre (données préliminaires) par l'expérience Phenix à rapidité médiane (cercles) et vers l'avant (carrés), comparée au résultat de NA50 (croix), en fonction de la centralité (nombre de nucléons participants à la collision).



LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPC Clermont, IPNO, LLR | CNRS/DSM: Dapnia, SPHN Saclay.

Star, l'expérience de l'étrangeté à RHIC

Christelle Roy

Depuis 2000, l'expérience Star a permis de collecter une pléthore de résultats nouveaux et parfois inattendus, contribuant ainsi de façon majeure à la caractérisation de la matière si particulière que les collisions à RHIC ont engendrée. L'implication de l'IN2P3 dans l'expérience Star se situe dans les activités de recherche de deux équipes avec la construction d'un détecteur de vertex et les analyses de physique sur la production d'étrangeté, secteur d'investigation spécifique à Star.

Le SSD au premier plan sur sa structure support avant d'être inséré dans Star (arrière plan).



Après du collisionneur RHIC de Brookhaven, l'expérience Star a la spécificité de posséder les détecteurs adéquats pour la mesure des hyperons. Parce qu'elle portent des quarks étranges, une production anormalement élevée de ces particules étranges est attendue avec l'augmentation de l'énergie de collision mais surtout de la taille du système, « anormalement » par rapport à ce que subirait une particule non étrange dans les mêmes conditions expérimentales. Ceci s'expliquerait par la formation, en amont, d'un plasma de quarks et de gluons, siège d'abondantes fusions de gluons qui seules permettraient une telle production de quarks étranges. À RHIC, les conditions étaient réunies, que ce soit au niveau des énergies de collision ou des détecteurs mis en œuvre, pour caractériser les mécanismes de production de l'étrangeté et mieux encore, pour espérer en déduire qu'un plasma de quarks et de gluons a bel et bien été créé.

En rejoignant la Collaboration Star dès 1998, des physiciens de l'IPHC à Strasbourg et de Subatech à Nantes en ont fait leur programme de recherche pour la dizaine d'années qui allaient suivre, proposant la réalisation d'un détecteur de capteurs silicium à micropistes (le SSD pour Silicon Strip Detector) afin d'améliorer les performances de trajectographie de Star, en particulier pour les particules à faible durée

de vie tels les hyperons. Entièrement conçu et construit dans ces deux laboratoires, le SSD fut installé dans Star de manière définitive pendant l'été 2004 (photo) et collecte depuis les données des diverses campagnes. Utilisant des technologies innovantes, en particulier pour sa connectique, ses performances en font un détecteur clé pour étudier les particules étranges et charmées comme pour les programmes de physique auprès du futur RHICII puisqu'il restera en place, moyennant une modification de cartes électroniques dont Subatech pourrait avoir la responsabilité.

Menées conjointement à l'IPHC et à Subatech, les analyses relatives aux particules étranges ont été diverses, portant sur leurs taux de production, leurs propriétés dynamiques et chimiques, leurs corrélations, leurs résonances ou encore les particules exotiques. Les informations extraites furent tout aussi diverses puisque ce sont les différentes étapes de la collision qui ont pu être étudiées. Certains de ces phénomènes avaient été observés au Cern (expériences WA97, NA57 ou NA49) et RHIC a permis de confirmer et affiner ces mesures grâce aux statistiques élevées à la disposition des physiciens. En revanche, des observations nouvelles apparurent à RHIC: les taux de production des hyperons associés à ceux des hadrons non-étranges indiquèrent que la matière nucléaire étrange créée est aussi à l'équilibre chimique dans le milieu. L'étude des particules multi-étranges révéla la pertinence de degrés de liberté partoniques pour décrire le mouvement collectif des hadrons ainsi que les mécanismes de production dans le domaine des énergies intermédiaires à savoir la formation des hadrons par coalescence de quarks.

L'étrangeté est apparue à RHIC comme une sonde extrêmement judicieuse pour les informations diverses et pertinentes qu'elle a apportée et son investigation se poursuivra auprès d'Alice pour comprendre cette fois-ci la matière créée aux énergies LHC.

 <http://www.phenix.bnl.gov/>

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**

CNRS/IN2P3: IPHC, Subatech.

L'expérience Alice

Philippe Crochet, Christian Finck

Alice se prépare à explorer l'autre côté du miroir où, dès 2008, les premières collisions entre ions lourds au LHC devraient révéler les propriétés d'un nouvel état de la matière constitué d'une soupe de quarks et de gluons à des températures colossales.

Avec une énergie par paire de nucléons de près de trente fois supérieure à celle atteinte à RHIC, le LHC va offrir, dès 2008, le saut en énergie le plus grand dans l'histoire des collisions d'ions lourds ultra-relativistes et ouvrir une nouvelle ère pour l'étude du plasma de quarks et de gluons (QGP) dans une région encore inexplorée du diagramme de phase de la matière nucléaire. Le système produit durant la collision sera caractérisé par une augmentation considérable de sa densité d'énergie, de son volume et de son temps de vie, ce qui facilitera grandement son étude expérimentale. Par ailleurs, les conditions thermodynamiques (grande température et faible potentiel chimique baryonique), pour lesquelles les théories perturbatives peuvent être appliquées, faciliteront également les comparaisons avec les calculs de chromodynamique quantique sur réseau. Enfin, un des aspects le plus novateur des collisions d'ions lourds à l'énergie

du LHC est la production massive de processus durs qui pourront être utilisés, pour la première fois, comme des sondes de grande statistique du QGP.

Alice (A Large Ion Collider Experiment) est le seul des quatre détecteurs du LHC spécialement dédié à l'étude des collisions d'ions lourds. La collaboration Alice regroupe actuellement plus de mille membres (dont une cinquantaine de physiciens et une centaine d'ITA français) venant de 90 instituts (dont sept laboratoires français) répartis dans 30 pays. Alice a la tâche particulièrement délicate de regrouper dans un unique détecteur l'ensemble des mesures effectuées au SPS par sept expériences ou au RHIC par quatre expériences. Le détecteur est donc conçu pour effectuer des mesures de précision de l'ensemble des signatures connues du QGP. En plus du programme de physique avec les ions lourds, Alice enregistrera des données en mode ions légers pour explorer une large gamme de densité d'énergie et en mode proton-proton et proton-noyau afin de fournir les références pour les collisions d'ions lourds. Le détecteur est constitué de sous-détecteurs centraux mesurant les hadrons, les électrons et les photons, ainsi que d'un spectromètre à petits angles mesurant les muons. L'ensemble de l'expérience est actuellement en phase d'installation.

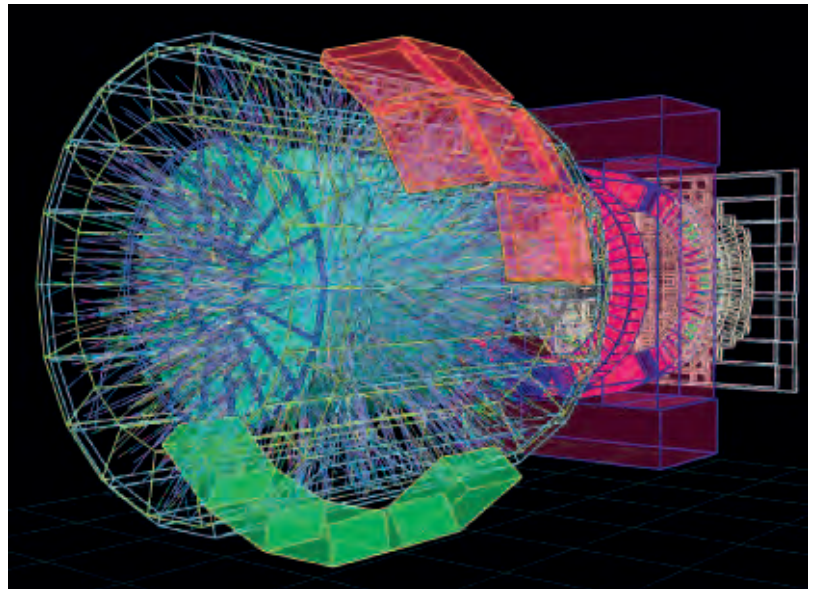
Le spectromètre à muon d'Alice avec au premier plan les chambres du système de déclenchement. ©Antonio Saba pour le Cern.



Les laboratoires français apportent une contribution importante dans plusieurs sous-détecteurs et projets d'Alice. L'IN2P3 réalise et monte les couches 5 et 6 du système de trajectographie interne de la partie centrale d'Alice. Ce détecteur, comportant 1 700 capteurs en silicium à micro pistes double-face (SSD) montés sur 72 échelles, couvre une surface de plus de 5 m² avec près de 3 millions de voies électroniques. Les laboratoires français ont réalisé avec succès 500 de ces modules, 16 de ces échelles et le système de contrôle du détecteur. Le système complet a été assemblé aux Pays-Bas et livré au Cern en décembre 2006. L'IN2P3 est également impliqué dans la réalisation du détecteur V0 et de son électronique associée. Ce détecteur à petits angles est composé de deux disques de 32 scintillateurs plastiques. Il permet de filtrer les effets du bruit de fond dans le spectromètre à muons et délivre un signal d'interaction pour les détecteurs centraux. Le disque V0C, côté spectromètre, a été installé en caverne début 2007. La contribution française la plus importante

concerne le spectromètre à muons qui constitue l'un des grands sous-systèmes d'Alice. La coordination du projet est assurée par un membre du Dapnia. Le spectromètre est composé d'un absorbeur frontal, d'un absorbeur à petits angles, d'un mur de fer, d'un dipôle, d'un système de trajectographie et d'un système de déclenchement. L'IN2P3 et le Dapnia sont impliqués dans quatre des cinq stations du système de trajectographie avec, notamment, la construction, l'intégration et l'alignement des détecteurs. La coordination de toute l'électronique associée est assurée par l'IN2P3. Le dispositif a une surface totale active de plus de 100 m² et comprend plus d'un million de voies électroniques. Les chambres sont maintenant montées sur leurs supports pour toute la station 4 et la moitié de la station 5. Les chambres des stations 1 et 2 sont assemblées et prêtes à être installées en cave. Les services de gaz, de refroidissement, de basses et hautes tensions sont en phase d'installation pour les cinq stations. Le dispositif de surveillance de positions des supports des chambres à fils a été testé sur une partie de la station 4 avec succès. Pour la partie déclencheur, l'IN2P3 est en charge de l'ensemble de l'électronique, du niveau frontal (21 000 voies) à la logique de décision. L'IN2P3 est aussi impliqué dans l'intégration des services et dans le système de contrôle des détecteurs. Toutes les chambres du déclencheur ont été installées en cave et équipées de leur électronique frontale. Les cartes d'électronique de décision sont maintenant en cours d'installation. Notons finalement que les laboratoires français assurent également la coordination de l'ensemble des logiciels en ligne et hors ligne associés au spectromètre.

La collaboration Alice poursuit aussi un effort considérable de développement d'outils d'analyse et de calcul. L'environnement de simulation, de reconstruction et d'analyse (AliRoot) a permis d'évaluer les performances attendues pour la mesure des différentes observables. Les résultats ont été récemment publiés dans les deux volumes du « Physics Performance Report » de la collaboration. Depuis 2005, les efforts sont concentrés sur la définition du format des données et sur le développement des programmes d'analyse. Ce travail est effectué au sein des quatre groupes de physique (PWG), trois d'entre eux ayant un coordonateur français. La France y est largement représentée avec des analyses orientées sur



Simulation AliRoot d'une collision Pb-Pb à l'énergie du LHC dans l'expérience Alice.
© « Alice core offline and Root team ».

la mesure i) des résonances de basse masse, des saveurs lourdes ouvertes, des quarkonia et des bosons électro-faibles dans le canal (di-)muonique (PWG3), ii) des hyperons simplement et multi-étranges (PWG2) et iii) des photons et des hadrons de grande impulsion transverse (PWG4). Ces études ont été consignées dans 11 thèses soutenues depuis 2003 et ont fait l'objet d'une trentaine de présentations dans des conférences et workshops internationaux (hors réunions de collaboration). Les données simulées sont actuellement produites sur des ressources distribuées dans le cadre du « Physics Data Challenge 2006 » (PDC06). Cette activité vise à s'assurer de la capacité à stocker, transférer, reconstruire et analyser un grand volume d'événements en prévision des premières prises de données réelles. De son démarrage (le 26 avril 2006) au début 2007, le PDC06 a permis de produire plus de 448 000 jobs pour un volume total de données dépassant 325 TB. Cinquante-sept centres de calcul dont six Tier-1 sont impliqués. La France contribue à cette production avec un Tier-1 et quatre Tier-2.

👁 Alice France : <http://alice-france.in2p3.fr/>
Alice « outreach » :
<http://alice-outreach.in2p3.fr/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION ALICE

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

Fopi et Hades : étude des effets de milieu nucléaire

Nicole Bastid, Thierry Hennino

Les expériences Fopi et Hades installées auprès du SIS du GSI-Darmstadt sont dédiées à l'étude de la matière hadronique dense et chaude formée lors de collisions d'ions lourds à des énergies de faisceau de 100A MeV à 2A GeV. Un des principaux objectifs scientifiques concerne l'étude du comportement des hadrons (baryons et mésons étranges et mésons vecteurs) dans le milieu nucléaire.

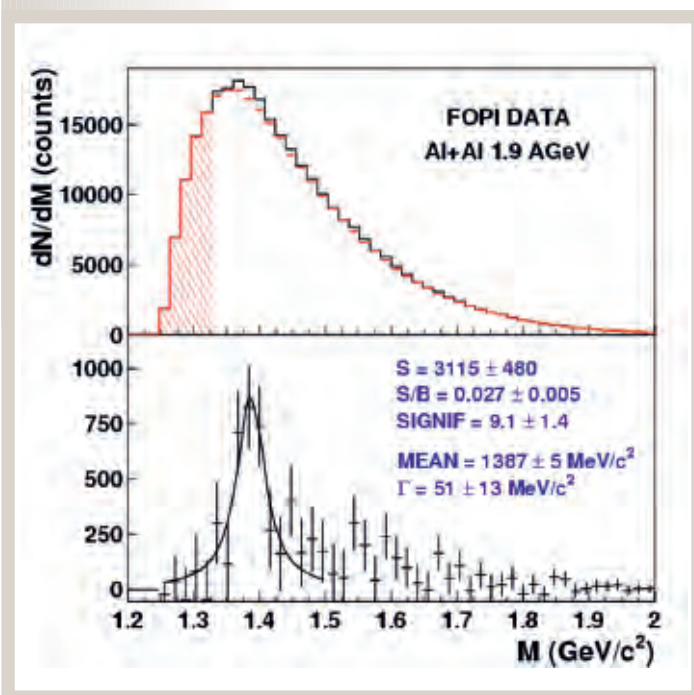
La mesure des kaons, réalisée avec Fopi, a permis d'étudier les effets de milieu nucléaire et notamment de mettre en évidence un potentiel répulsif K^+ -nucléon. Suite à de profondes modifications du dispositif, deux campagnes de prises de données à très haute statistique (Al+Al et Ni+Ni à 1,9A GeV) ont eu lieu entre 2003 et 2006 et ont fourni des résultats remarquables. La statistique collectée (plus de 300 millions d'événements pour le système Al+Al) a en particulier permis de mettre en évidence, pour la première fois, un signal de $\Sigma(1385)$ sous le seuil de création. La seule autre mesure du $\Sigma(1385)$ en mode ions lourds a été effectuée au RHIC par la collaboration Star. La mesure à SIS présente un intérêt fondamental pour l'interprétation des taux de production de K^- . En effet, les K^- sont principalement produits par réaction d'échange d'étrangeté $\pi+Y \rightarrow K^- + \text{Baryon}$ ($Y = \Lambda, \Sigma$) et leur production est ainsi intimement liée à celle des hypérons Y. Afin de compléter l'étude de la production d'étrangeté avec notamment la mesure

des K^- dans une grande acceptance, un nouveau système de temps de vol à haute granularité et haute résolution temporelle, de type « Multi-Gap Resistive Plate Chambers », est en cours d'installation. Les prises de données devraient débuter mi-2007 et se poursuivre jusqu'à fin 2009. Le LPC Clermont a la responsabilité du sous-détecteur « Mur Interne », mur de scintillateurs plastiques situé aux angles avant, et contribue aux principaux thèmes de physique développés dans la collaboration. Il participera aux prises de données avec le nouvel appareillage.

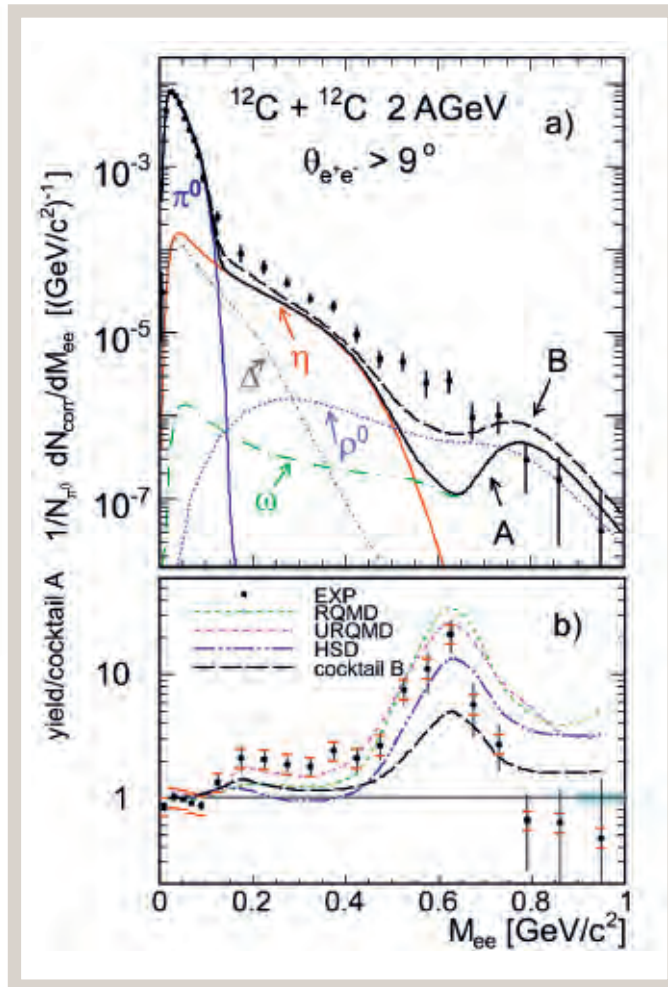
Le détecteur Hades, dédié à la mesure des paires de leptons, a pour but de mesurer la fonction spectrale des mésons vecteurs (masse, largeur) dans la matière nucléaire dense, jusqu'à $3 \rho_0$, et modérément chaude ($T < 100$ MeV). Selon certains modèles théoriques une modification de ces fonctions spectrales pourrait être le signe d'une restauration de la symétrie chirale.

Des expériences ont été réalisées en collisions C+C à 1A et 2A GeV et en Ar+KCl à 1,8A GeV. Des données ont été également prises en réaction p+p à 2,2 et 1,25 GeV et ont permis dans un premier temps de contrôler l'ensemble du détecteur, de valider les calculs d'acceptance et de déterminer pour chacun des sous-détecteurs les efficacités associées. Elles permettent aussi d'accéder directement, par l'utilisation de coupures cinématiques, à chacun des processus contribuant au spectre de dileptons et ainsi fortement contraindre les ingrédients des modèles. C'est ainsi que nous pourrions isoler la décroissance Dalitz du Δ^+ . Tandis que les données sur le système le plus lourd sont en cours d'analyse, les premiers résultats en C+C à 2A GeV, obtenus dans des conditions de résolution encore relativement modestes, permettent d'apprécier la qualité de l'ensemble expérimental. Mesuré sur cinq ordres de grandeur, le spectre expérimental, dominé par la décroissance Dalitz des mésons scalaires π^0 et η , montre déjà clairement l'importance des autres sources et notamment celles associées aux mésons vecteurs.

Distribution de masse invariante des $\Sigma(1385)$ candidats avec le bruit de fond combinatoire en rouge (haut) et distribution obtenue après soustraction du bruit de fond à la combinatoire (bas). (Collaboration Fopi)



Taux de dileptons mesuré dans l'acceptance de Hades, après correction d'efficacité. En a), le taux mesuré de dileptons est comparé à un cocktail de particules supposées décroissant librement dans le vide (c'est-à-dire sans mettre explicitement d'effets de milieu). Tandis que le cocktail A ne comprend que les dileptons associés aux particules émises au-delà du temps caractéristique de la boule de feu (π^0 , η , ω), le cocktail B prend en compte l'ensemble des contributions (π^0 , η , ω , Δ , ρ). En b) le taux expérimental, normalisé au cocktail A permet de mettre en évidence l'effet des sources promptes (Δ et ρ). Les résultats de différents calculs de transport microscopiques, dont aucun n'introduit explicitement de modifications de la réponse spectrale des mésons vecteurs, sont aussi montrés, toujours normalisés par rapport au cocktail A. (Collaboration Hades)



LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPHC (Fopi), IPNO (Hades), LPC Clermont (Fopi).

Les nombres magiques à l'épreuve du temps

Marie-Geneviève Porquet, David Verney

L'existence d'une structure en couches dans le noyau atomique, pressentie très tôt dans l'histoire de la physique nucléaire (W. Elsasser, 1934), s'est peu à peu imposée suite à l'accumulation de preuves expérimentales suffisantes pour établir l'existence de nombres magiques de nucléons. Néanmoins, basée sur une analogie formelle avec le modèle du champ moyen de la physique atomique, cette vision du noyau n'a été validée que lorsque M. Goeppert Mayer et J.H.D. Jensen (prix Nobel de 1963) eurent l'idée d'un terme de couplage entre le moment angulaire et le spin du nucléon.

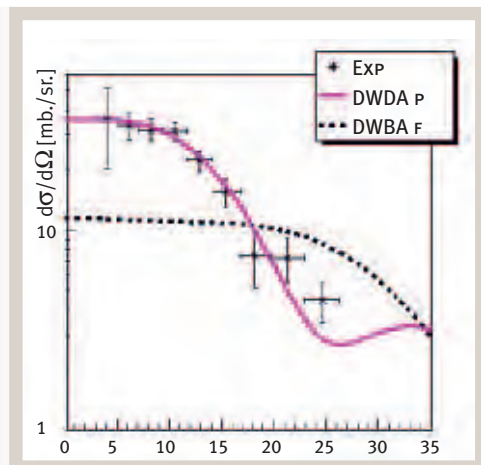
L'existence de tels nombres, marquant les fermetures des couches majeures dans le champ moyen nucléaire sphérique, validait *ipso facto* la notion même de champ moyen nucléaire, pierre angulaire de toute description microscopique de la structure nucléaire. À la lumière de cet éclairage historique on comprend aisément que la découverte du premier état excité de $^{32}\text{Mg}_{20}$ à une énergie anormalement basse étant donné son nombre magique $N=20$ de neutrons, allait solliciter un grand nombre de travaux, tant expérimentaux que théoriques. Afin d'expliquer les apparentes érosions, raffermissements, voire éclosions des nombres magiques loin de la stabilité, différents mécanismes ont été tour à tour invoqués.

Le comportement de $N=28$, premier sur la liste des nombres magiques de la séquence spin-orbite (28, 50, 82, 126), a fait l'objet de plusieurs études expérimentales ces dernières années afin de mieux comprendre ces mécanismes. Deux expériences récentes [1, 2] effectuées au Ganil ont permis de mettre en évidence une réduction importante du *gap* en énergie assurant l'effet de couches à 28 neutrons, lorsque le nombre de protons diminue. Dans la première, le

premier état excité 2^+ du $^{42}\text{Si}_{28}$ a été mesuré suite à deux fragmentations successives d'un faisceau primaire de ^{48}Ca délivré par le Ganil [1]. Dans la seconde, un faisceau radioactif de ^{46}Ar issu du dispositif Spiral a été utilisé pour étudier les états de $^{47}\text{Ar}_{29}$ par l'intermédiaire d'une réaction de transfert (d,p) [2]. Ces expériences n'ont été rendues possibles que par l'utilisation optimale de tous les dispositifs de détection mis au point au fil des années : détecteurs de localisation du faisceau, détecteurs Must, détecteurs du Château de Cristal et spectromètre Spieg. La conséquence de cette réduction de *gap* sur la structure du noyau très exotique $^{42}\text{Si}_{28}$ est impressionnante : ce noyau, à l'instar de $^{32}\text{Mg}_{20}$, possède un premier état excité à une énergie très faible, typique d'un comportement collectif, par ailleurs confirmé par des calculs théoriques élaborés. Il est clair qu'avec leurs nombres de neutrons et de protons formant des couples inhabituels, les noyaux exotiques présentent des configurations neutron-proton inédites, sensibles à certains termes de l'interaction effective nucléon-nucléon jusqu'alors négligeables : c'est la nature même de cette interaction qu'interroge donc la physique des noyaux exotiques.

La fermeture de couches $N=50$ (deuxième dans la séquence) est maintenant à l'étude [3, 4, 5] : de premiers résultats indiquent déjà une réduction du *gap* lorsque le nombre de protons baisse de 38 à 32. Sans nul doute, les expériences prévues prochainement auprès d'Alto, poursuivant celles effectuées auprès de PARRNe, devraient apporter leur moisson d'informations sur le comportement des orbites d'intérêt pour le $^{78}\text{Ni}_{50}$, avant que son étude ne puisse être entreprise avec les faisceaux de Spiral2.

Distribution angulaire du groupe de protons de plus haute énergie correspondant au peuplement de l'état fondamental de $^{47}\text{Ar}_{29}$ dans la réaction $^{46}\text{Ar}_{28}(d,p)$, le neutron étant déposé sur la couche p.



- 👁 [1] B. Bastin, S. Grévy *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 99 (2007) 022503
 [2] L. Gaudefroy, O. Sorlin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 092501
 [3] O. Perru, D. Verney *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 28 (2006) 307
 [4] D. Verney *et al.*, *Phys. Rev. C* 76 (2007) 054312
 [5] A. Prévost, M.-G. Porquet *et al.*, *Eur. Phys. J. A* 22 (2004) 391

LABORATOIRES FRANÇAIS
 IPNO, Ganil, IPHC, CSNSM.

Les vibrations géantes du noyau n'en finissent plus de se superposer !

Muriel Fallot

Les noyaux peuvent présenter des modes d'excitation extrêmes dans lesquels ils peuvent être super/hyper-déformés et tourner à très grande vitesse ou vibrer à haute fréquence. Récemment le mouvement de vibration d'amplitude la plus grande jamais observée dans les noyaux atomiques a été découvert au Ganil : un état à trois phonons construit avec des résonances géantes.

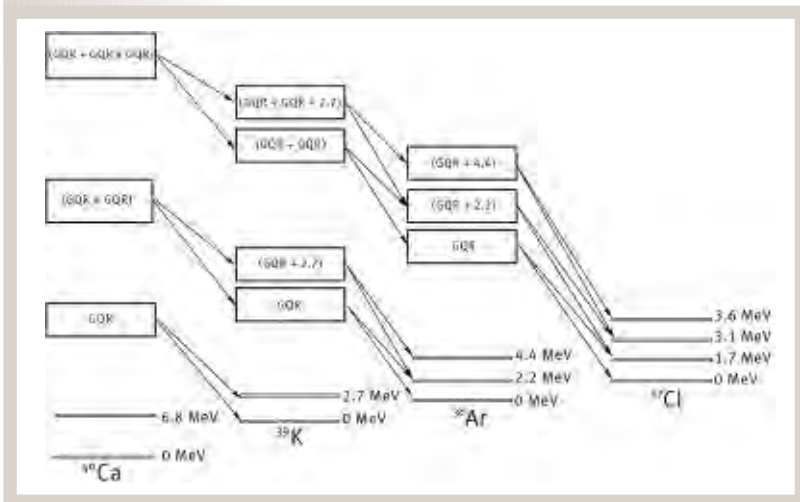
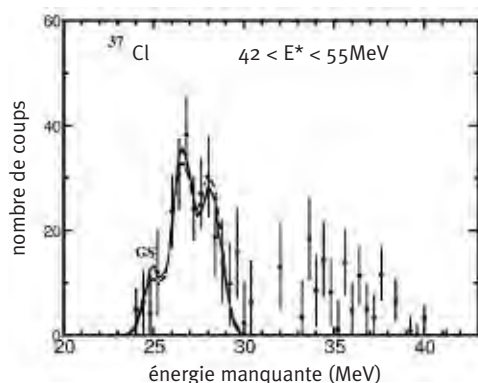
Les résonances géantes sont des vibrations collectives du noyau où une fraction importante des nucléons qui le composent oscillent de façon cohérente, ils bougent ainsi de manière organisée et périodique. Certains de ces modes sont similaires aux vibrations d'une goutte liquide. La mécanique quantique prédit que plusieurs de ces résonances géantes peuvent être excitées simultanément formant des modes appelés états multiphonons. Pour la première fois un état à trois phonons a été mis en évidence, constitué de trois résonances géantes superposées, ce qui confère à cette vibration l'amplitude la plus grande jamais observée jusqu'alors [1].

Des états à 2 phonons ont été observés il y a une dizaine d'années via différentes méthodes expé-

rimentales, en particulier au Ganil [2]. Toute la question est de savoir si ces vibrations du noyau sont harmoniques, ce qui signifierait que les nucléons s'assemblent par paires pour adopter les propriétés des bosons, ou si les interactions entre ces nucléons rendent les vibrations anharmoniques. Les sections efficaces des états à deux phonons mesurées par différentes méthodes dans de nombreux noyaux jusqu'alors ne correspondent pas à celles prédites pour un spectre harmonique. Selon les prédictions théoriques, les anharmonicités devraient augmenter avec le nombre de phonons excités [3]. L'observation d'un état à 3 phonons est donc primordiale pour expliquer l'origine de ces anharmonicités et faire progresser notre compréhension des mouvements nucléaires de grande amplitude. Ces derniers, difficiles à observer, sondent la réponse nucléaire à des conditions extrêmes et sont un outil primordial pour notre compréhension de l'interaction nucléaire.

Cette découverte a été réalisée au Ganil à l'aide d'un dispositif expérimental très sophistiqué, constitué d'un spectromètre de haute résolution (Speg) [4] couplé à un multidétecteur de particules chargées (Indra) [5] couvrant la quasi-totalité de l'espace autour de la cible. Des collisions entre un faisceau de ^{40}Ca à 50 MeV/A et une cible de ^{40}Ca ont été réalisées. C'est la décroissance particulière d'un état à trois phonons par émission de trois protons, sa décroissance directe, détectée en coïncidence avec un ^{40}Ca émergent qui a permis de signer cet état. Les propriétés de sa décroissance directe ont été étudiées et ne semblent pas correspondre à celles attendues dans le cas le plus simple d'un spectre harmonique.

Spéctre expérimental de la décroissance directe par 3 protons vers les états du ^{37}Cl d'un état à trois phonons construit avec la résonance géante quadrupolaire principalement dans le ^{40}Ca , ainsi qu'une représentation schématique de la décroissance directe de l'état à 3 phonons. Le spectre expérimental est comparé à des simulations de vibration harmonique ou anharmonique [1].



[1] M. Fallot et al., *Phys. Rev. Lett.* 97 (2006) 242502.
 [2] J. A. Scarpaci et al., *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 3766.
 [3] E. G. Lanza et al., *Phys. Rev. C* 74 (2006) 064614
 [4] L. Bianchi et al., *Nucl. Inst. Meth. A* 276 (1989) 509.
 [5] J. Pouthas et al., *Nucl. Inst. Meth. A* 357 (1995) 418.

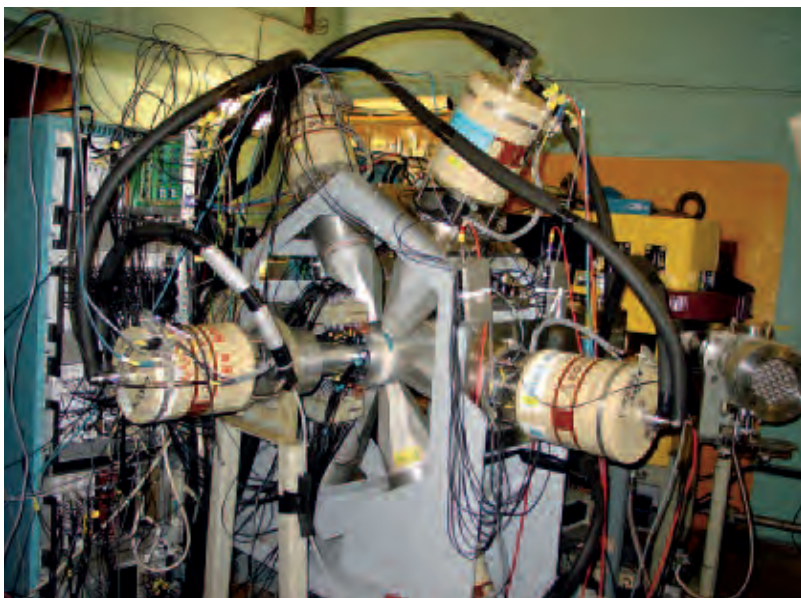
LABORATOIRES FRANÇAIS

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

Spectroscopie des noyaux lourds : une route vers les super lourds

Araceli Lopez-Martens, Olivier Dorvaux

Deux laboratoires de l'IN2P3, le CSNSM et l'IPHC, ont lancé et mis en place un projet de spectroscopie des noyaux très lourds au Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (FLNR) du Joint Institute for Nuclear Research (JINR) à Dubna.



Le dispositif expérimental Gabriela.

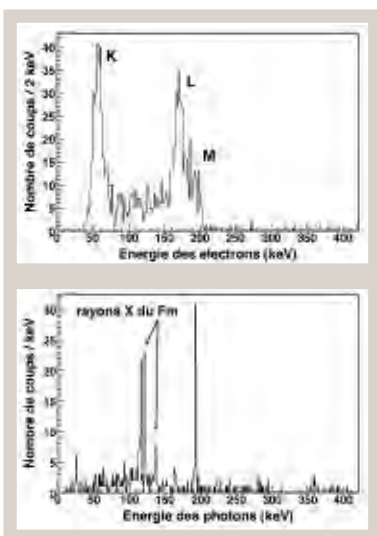
Les éléments les plus lourds sont un laboratoire unique pour étudier la structure nucléaire dans des conditions extrêmes de charge (Z) et de masse. Malheureusement, les très faibles sections efficaces de synthèse des éléments super lourds ($Z > 108$) rendent impossible l'étude directe et

détaillée de leur structure par des mesures spectroscopiques. Heureusement, des informations toutes aussi pertinentes sur les propriétés des noyaux massifs peuvent être apportées par la spectroscopie des noyaux transfermium déformés ($Z \geq 100$), pour lesquels les sections efficaces de production sont supérieures de plusieurs ordres de grandeur.

Dans ce but, une collaboration IN2P3-JINR a amorcé un projet nommé Gabriela [1], qui consiste en la détection des photons et électrons de conversion interne émis par des noyaux lourds produits dans des réactions de fusion et transportés jusqu'au plan focal du séparateur d'ions de recul Vassilissa. Ce qui rend ce projet original est l'utilisation de réactions de fusion chaude induites par des faisceaux légers très intenses ($> 6 \cdot 10^{12}$ particules/s) sur des cibles d'actinides radioactifs, uniquement disponibles à Dubna. Un ensemble nouveau de noyaux très lourds devient alors potentiellement accessible aux études spectroscopiques.

Trois campagnes de mesures ont eu lieu et ont permis d'une part d'accroître la sensibilité du dispositif expérimental et d'autre part d'obtenir des résultats nouveaux sur plusieurs noyaux comme par exemple les noyaux ^{249}Fm [2], ^{253}No [3], ^{255}No et ^{255}Lr . Après avoir récemment observé avec succès la décroissance de noyaux de ^{255}No produits avec de très faibles énergies de recul dans la réaction $^{238}\text{U}(^{22}\text{Ne}, ^5\text{n})$, Gabriela se prépare à son prochain défi : détecter et étudier les résidus d'évaporation issus de la fusion du ^{22}Ne et ^{242}Pu : ^{259}Rf ($Z=104$).

Spectre de photons γ émis instantanément par le noyau ^{251}Fm et spectre des électrons de conversion interne émis par un état isomérique du même noyau.



<http://www.csnsm.in2p3.fr/groupe/strucnuc/research/GABRIELA/intro.html>

[1] K. Hauschild *et al.*, *Nucl. Instr. Meth. A* 560 (2006) 388

[2] A. Lopez-Martens *et al.*, *Phys. Rev. C* 74 (2006) 044303

[3] A. Lopez-Martens *et al.*, *Eur. Phys. J.* A32 (2007) 245

Developments in spectroscopic studies of deformed superheavy nuclei, *Nuclear Physics News*, Vol. 14 (2004)

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CSNSM, IPHC, Ganil.

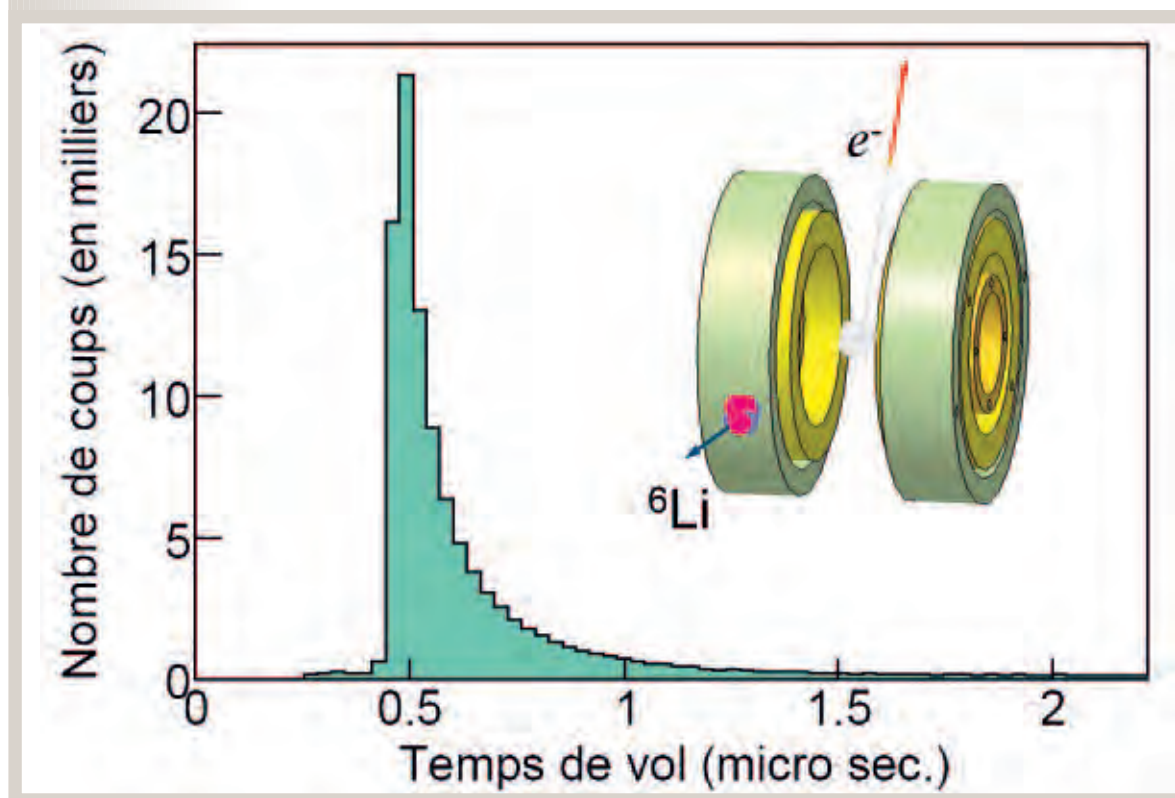
Décroissance bêta d'ions dans un piège de Paul transparent

Oscar Naviliat-Cuncic

Les outils de confinement d'atomes et d'ions ont trouvé de nombreuses applications dans leur utilisation avec des espèces radioactives. Les mesures réalisées avec des pièges se caractérisent par leur très grande précision, comme c'est le cas des mesures de masses nucléaires, des mesures du rayon de charge ou encore des mesures de corrélation en désintégration bêta, qui ont atteint des niveaux de sensibilité sans précédents.

Un piège de Paul de configuration innovante, couplé à un refroidisseur et regroupeur à radio fréquences, est actuellement opérationnel sur la ligne d'ions de basse énergie Lirat au Ganil. Le dispositif permet de piéger efficacement des ions, jusqu'aux plus légers, au moyen d'électrodes annulaires tout en permettant la détection des produits issus de leur décroissance (Figure). Le système a été construit pour mesurer la corrélation angulaire $\beta\nu$ dans la transition de Gamow-Teller du noyau ${}^6\text{He}$ afin de chercher des couplages exotiques dans l'interaction faible. Après la phase de construction et de mise en œuvre, suivie du test de principe de la méthode, plus de 10^8 ions ${}^6\text{He}^+$ ont été piégés au cours d'une semaine de mesure. Environ 10^5 coïncidences ont été détectées entre les particules émises dans la désintégration ce qui valide définitivement la sensibilité statistique du dispositif pour les futures mesures de précision. Le système peut également être utilisé avec tout noyau de relativement courte durée de vie, permettant ainsi la spectroscopie assistée par des pièges.

Spectre du temps de vol entre les ions ${}^6\text{Li}^{++}$ ($E_{\text{max}} = 1.4 \text{ keV}$) et la particule bêta, issus de la désintégration d'ions ${}^6\text{He}^+$ confinés dans le piège de Paul.



LABORATOIRES FRANÇAIS
LPC-Caen, Ganil.

Avancées dans la thermodynamique des petits systèmes

Francesca Gulminelli

Des développements théoriques récents suggèrent que les paliers de coexistence qui caractérisent les transitions de phases dans le monde macroscopique, trouvent leur origine au niveau élémentaire des très petits systèmes dans une inversion de pente des équations d'état, qui conduit à des anomalies thermodynamiques telles qu'une capacité calorifique ou une susceptibilité négative.

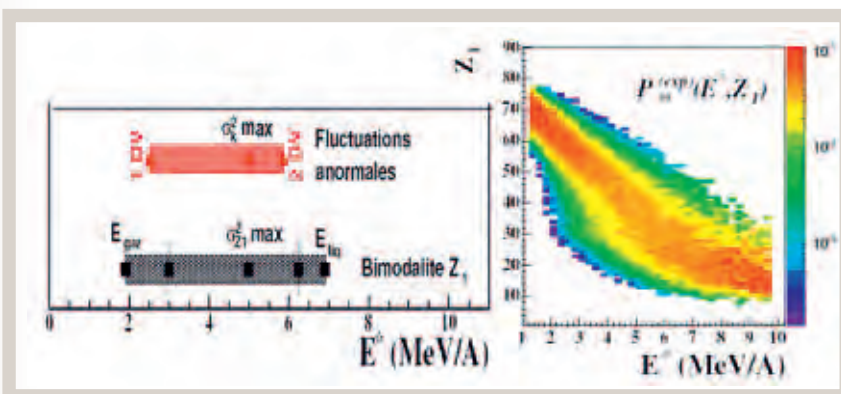
Des observables mesurables expérimentalement ont été proposées pour mettre en évidence ces anomalies, et testées sur des modèles schématiques pour lesquels la thermodynamique est connue de façon exacte [1].

La comparaison de modèles statistiques aux données expérimentales est compliquée par le fait que ces dernières sont souvent loin de l'équilibre thermodynamique. Pour aborder cette question une extension hors équilibre des ensembles de Gibbs basée sur la théorie de l'information a été récemment proposée. Cette approche fournit un pont entre modèles statistiques et

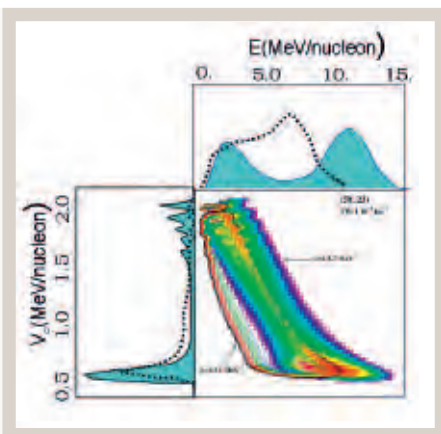
équations de transport, elle permet de définir un diagramme de phase avec des variables d'état qui évoluent au cours du temps, et en particulier de traiter les systèmes sous flot de façon thermodynamiquement consistante [2]. Ce programme a progressé de façon exemplaire au cours des dernières années grâce à l'étude de la multifragmentation. Un faisceau convergent de signaux de transition de phase a été mis en évidence [3]. Il peut à terme permettre une véritable métrologie de l'équation d'état de la matière dense et de son diagramme de phase.

Droite: distribution du plus gros fragment détecté en collisions Au+Au à 80 A.MeV par la collaboration Indra/Aladin, qui montre, une fois renormalisé pour le poids des différents dépôts d'énergie, deux pics correspondant à deux phases en coexistence.

Gauche: estimation de la chaleur latente de la transition (noir) pour le même système, en très bon accord avec l'estimation de la région spinodale (rouge) à partir de mesures de fluctuations d'énergie partielle.



Une transition de phase dans un petit système correspond à une distribution bimodale des événements dans la direction du paramètre d'ordre (ici l'énergie pour un noyau fragmenté). L'effet de l'interaction Coulombienne (courbes de niveaux et lignes tiretées) est une rotation du paramètre d'ordre: la projection le long de l'axe d'énergie ne permet plus de reconnaître les deux phases, mais la transition est toujours évidente dans la représentation bidimensionnelle.



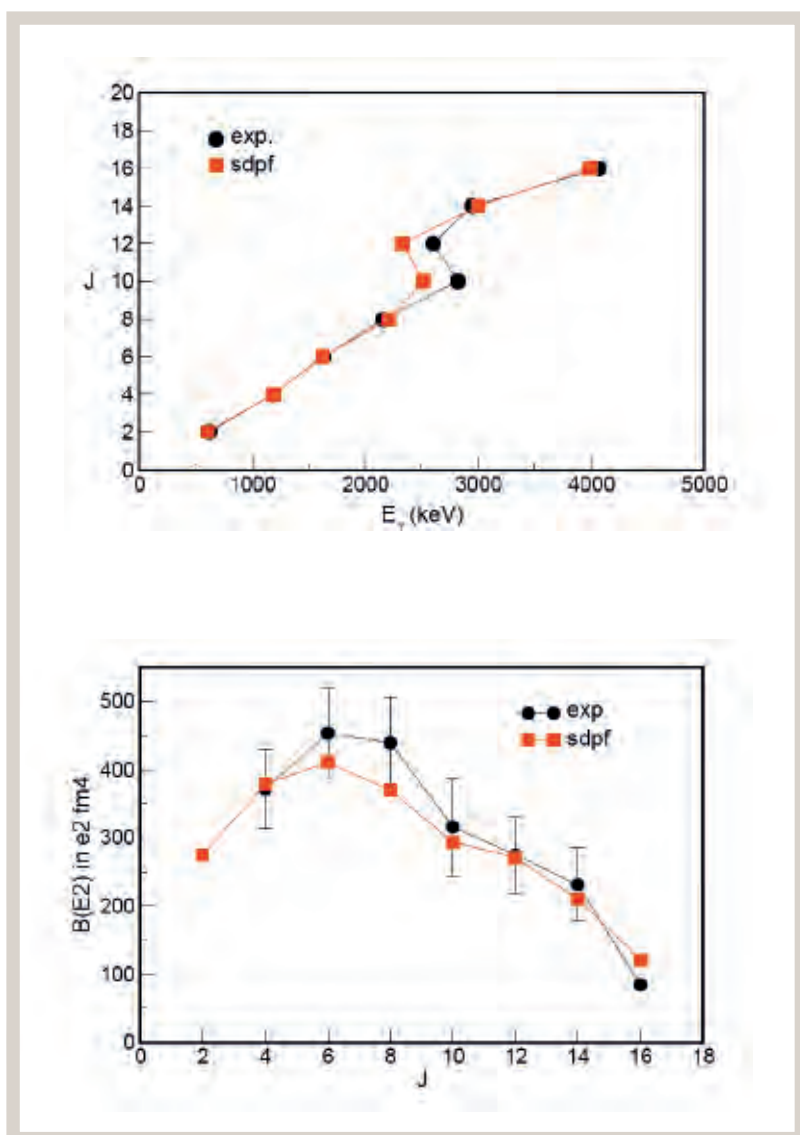
- [1] F. Gulminelli, Ph. Chomaz, A. H. Raduta, A. R. Raduta: The influence of Coulomb on the liquid gas phase transition and nuclear multifragmentation, *Phys.Rev.Lett.* 91 (2003) 202701.
 [2] Ph. Chomaz, F.Gulminelli, O.Juillet: Generalized Gibbs ensembles for time dependent processes, *Annals Phys.* 320 (2005) 135-163
 [3] *Dynamics and thermodynamics with nuclear degrees of freedom*, F. Gulminelli, W. Trautmann, S. J. Yennello, Ph. Chomaz eds, Springer (2006).

LABORATOIRES FRANÇAIS
LPC-Caen, Ganil.

Avancées dans la description microscopique de la structure d'un noyau et de ses modes de désintégration

Nadya Smirnova

Notre compréhension de la structure nucléaire a fait des progrès dans les dernières années grâce, en particulier, au développement de l'approche du modèle en couches [1].



Description de la bande superdéformée du ^{36}Ar et sa décroissance (E. Caurier, F. Nowacki, A. Poves, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 042502)

Ce dernier décrit les excitations d'un noyau en basse énergie en considérant les particules de valence au-dessus d'un cœur fermé, dans l'espace des couches de valence. L'interaction effective entre les nucléons dans le noyau dérive des potentiels nucléon-nucléon réalistes dans le vide, ce qui donne à ce modèle un caractère fondamental. Les avancées dans les techniques numériques permettent de traiter les espaces très grands et de pouvoir bien décrire les phénomènes divers de la structure nucléaire et pour de plus en plus de noyaux [1]: les excitations de particules individuelles et collectives, la superdéformation et la coexistence de formes, d'étudier l'évolution de la structure en couches dans les noyaux très riches en neutrons et d'améliorer la description des noyaux riches en protons. Les calculs *ab-initio* pour les noyaux légers – sans cœur inerte et dans l'espace contenant plusieurs couches d'oscillateur harmonique – sont devenus des calculs de référence, donnant la possibilité de tester les forces nucléaires, notamment en incorporant la force à trois corps. Les nouvelles approches ont été développées pour prendre en compte les effets du *continuum*, importants dans la description des noyaux près du seuil de séparation d'un nucléon [2]. Tous ces développements permettent l'application avancée du modèle en couches vers l'astrophysique et l'étude de l'interaction faible, au travers par exemple de la décroissance double-beta [1].

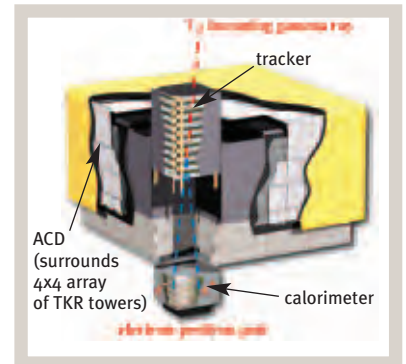
[1] E. Caurier, G. Martinez-Pinedo, F. Nowacki, A. Poves, A.P.Zuker, *Rev. Mod. Phys.* 77 (2005) 427
 [2] J. Okolowicz, M. Ploszajczak, I. Rotter, *Phys. Rep.* 374 (2003) 271

LABORATOIRES FRANÇAIS
 CNRS/IN2P3: IPHC, CENBG, IPNO |
 CNRS/CEA: Ganil.

Astronomie des rayons gamma : Glast

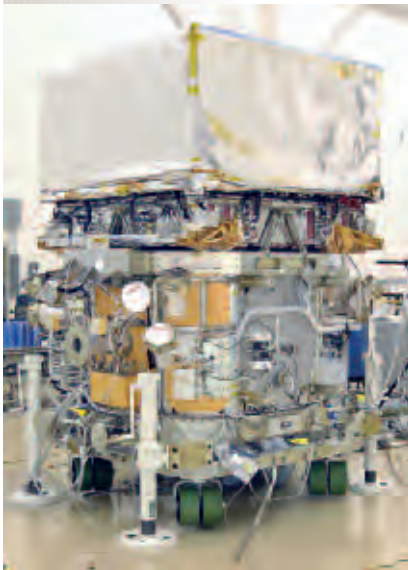
David Smith

Glast (Gamma-ray Large Area Space Telescope) est la mission phare de la Nasa pour l'astrophysique des hautes énergies. Le satellite sera lancé fin 2007, pour une durée de 5 à 10 ans. L'instrument principal, le LAT (Large Area Telescope), est dédié à l'observation du ciel gamma de 30 MeV à plus de 300 GeV. L'IN2P3 a contribué à la conception du calorimètre, la structure mécanique en fibres de carbone étant conçue et réalisée par le LLR. Les équipes du LPTA, LLR, et CENBG contribuent à la maîtrise de la mesure en énergie des photons, ainsi qu'à l'exploitation scientifique de l'instrument.



De haut en bas :

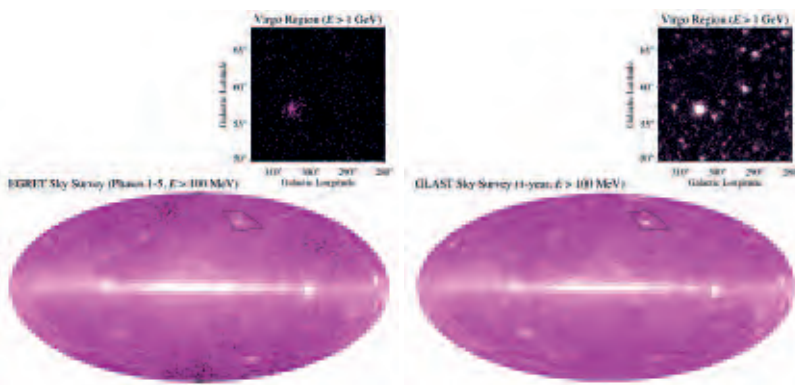
- Découpe schématique du LAT.
- Le LAT (Large Area Telescope) après intégration avec le satellite Glast (décembre 2006).
- Simulations de cartes du ciel gamma pour énergie >100 MeV après un an d'observation avec Egret et Glast.



Glast est un instrument de haute technologie. Le LAT, dont le principe de détection est basé sur la conversion en paires des photons gamma, possède une centaine de mètres carrés de micro-pistes silicium empilées. Le calorimètre est constitué de 1536 grands cristaux de CsI(Tl), pour un poids de 1,5 tonnes environ. Le LAT est réalisé et exploité par une collaboration internationale (États-Unis, France, Italie, Japon et Suède). Son champ de vue (20% du ciel à un moment donné, le ciel entier couvert toutes les 3 heures), sa résolution angulaire, et sa grande surface permettront d'augmenter de plus d'un facteur dix le nombre de sources connues. L'éventail des sujets scientifiques que Glast abordera est par conséquent très étendu : accélération de particules dans l'environnement de sources compactes (noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma, pulsars, restes de supernovae, étoiles massives), compréhension de la nature des nombreuses sources non identifiées par les expériences précédentes (dont Egret et Hess), étude des émissions gamma diffuses,

recherche indirecte de matière noire supersymétrique, étude du fond diffus infra-rouge. L'interprétation des données bénéficiera d'informations à d'autres longueurs d'ondes, et différentes campagnes d'observations conjointes ont été préparées, dont, par exemple, des études de noyaux actifs de galaxie avec les détecteurs à rayons X RXTE et Swift, ou le chronométrage de pulsars avec le radio télescope de Nançay. La forte complémentarité scientifique de Glast avec Hess s'étend à l'inter-calibration en énergie des deux expériences.

Après le suivi des performances du calorimètre pendant l'assemblage du LAT, l'IN2P3 assure une grande partie des tâches concernant la mesure de l'énergie des photons, par le développement des méthodes d'analyse, et par l'étalonnage en orbite au moyen des dépôts par ionisation des ions lourds. Afin de valider la simulation Monte-Carlo nos équipes ont engagé plusieurs campagnes sur accélérateurs (au Ganil, puis au GSI et au Cern avec un dispositif réalisé avec des modules de vol). Le CENBG monitore les horloges du satellite, pour les études de pulsars. Enfin, l'IN2P3 fournit à la collaboration des ressources informatiques du centre de calcul de Lyon pour des simulations intensives, avec un réseau informatique mis en place entre le Slac, la France et l'Italie.



 <http://glast.gsfc.nasa.gov/>
<http://www-glast.stanford.edu/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CENBG, LLR, LPTA |
 CNRS/Insu : CESR-Toulouse, SAp-Dapnia (CEA-Saclay).

CNGS et Opera

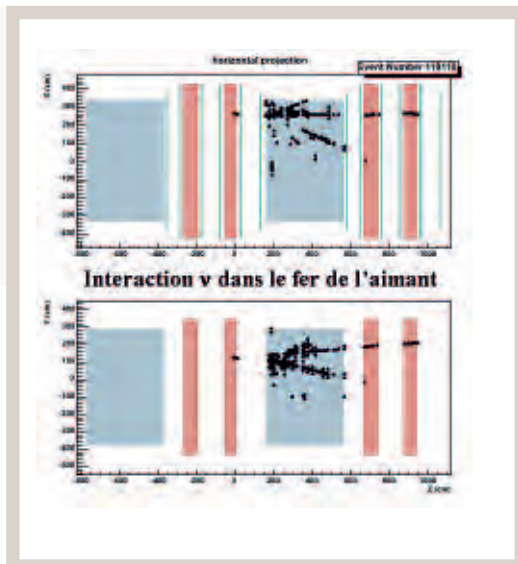
Dominique Duchesneau

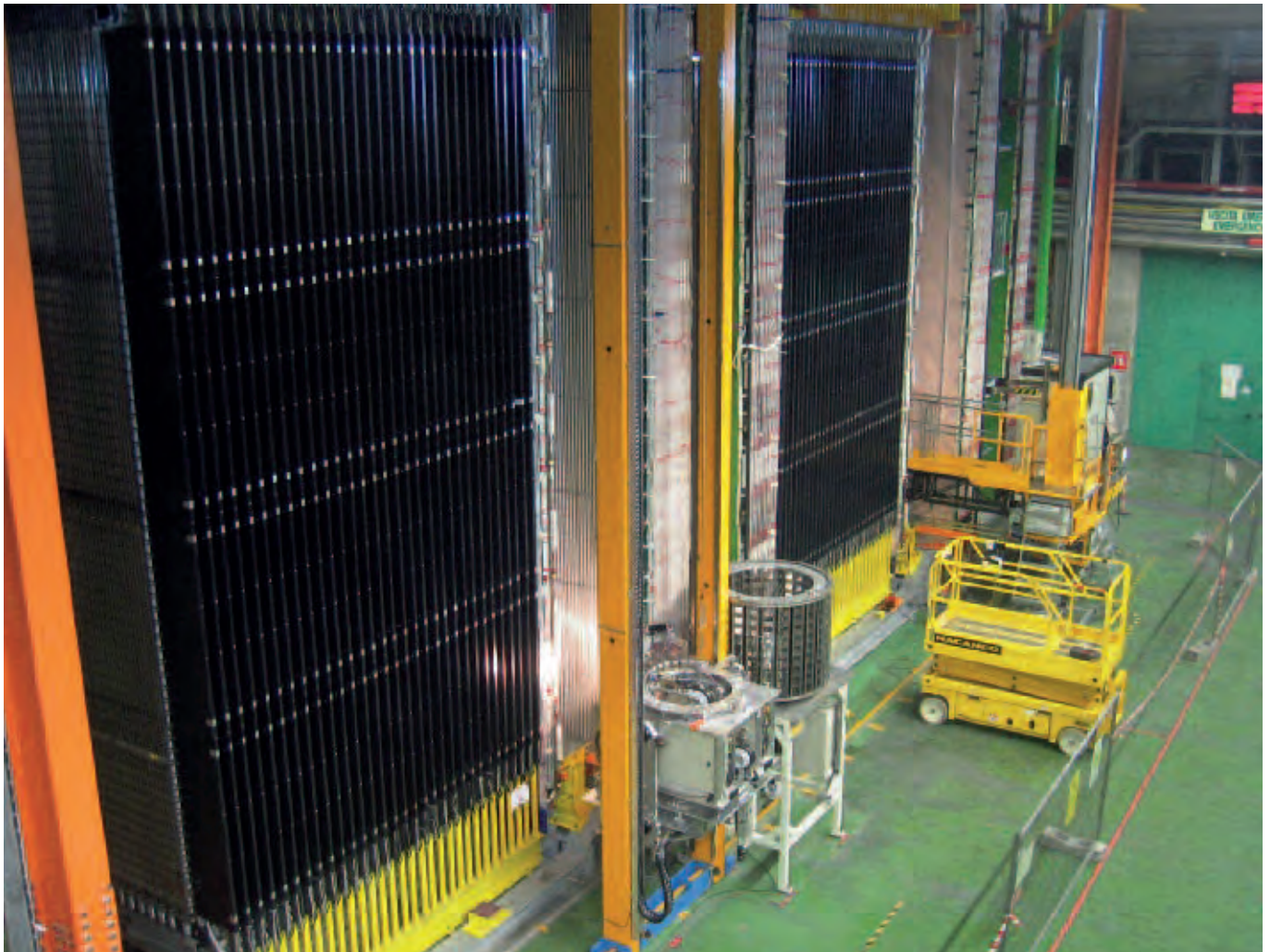
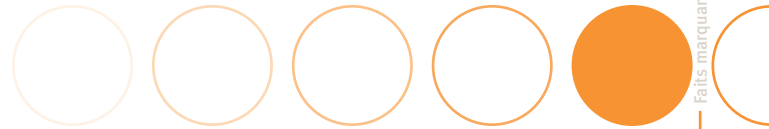
L'institut est depuis de nombreuses années fortement impliqué dans des projets de physique des neutrinos dont un volet concerne l'étude des propriétés d'oscillation des neutrinos. Le phénomène d'oscillation par lequel des neutrinos d'une certaine saveur peuvent se transformer en une autre saveur au cours de leur propagation a été mis en évidence expérimentalement en 1998 par l'expérience Super-Kamiokande avec les neutrinos issus de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère terrestre. Cette découverte a permis de lancer un vaste programme expérimental pour approfondir la compréhension de ce phénomène. Dans ce contexte, le détecteur Opera, installé dans le laboratoire souterrain du Gran Sasso en Italie, aura pour but principal de mettre en évidence pour la première fois l'apparition de neutrino de type tau dans un faisceau de neutrinos initialement de saveur mu, produit au Cern 730 km plus loin.

Le faisceau du CNGS utilise des protons de 400 GeV envoyés sur une cible de graphite. Les pions et kaons produits dans ces interactions sont ensuite sélectionnés et orientés vers un tube de désintégration de 1 km de long grâce à un système de focalisation magnétique dont une partie a été développée et fabriquée par l'IN2P3. La construction des infrastructures et l'installation des différents éléments du faisceau se sont déroulées entre 2003 et 2006. La mise en route de la ligne de faisceau a eu lieu au printemps 2006 et le premier faisceau de neutrino a été envoyé avec succès vers le Gran Sasso en août


2006. Avec près de $7,6 \cdot 10^{17}$ protons sur cible le détecteur Opera a été en mesure d'enregistrer près de 300 événements avec les détecteurs électroniques et d'en valider le fonctionnement. Son détecteur hybride allie deux concepts de détection : un trajectographe électronique à base de plans de scintillateurs couplés à un spectromètre, qui sert à déterminer la présence d'une interaction neutrino issu du faisceau et à la localiser dans le bloc cible, et un trajectographe de très haute précision utilisant des films d'émulsion mis en alternance avec des feuilles plomb dans deux cent mille blocs cibles. Les émulsions permettront de reconstruire les traces des particules chargées résultant des interactions neutrino avec une précision micrométrique, nécessaire pour signer la présence de ν_τ dans le faisceau. Ces 3 dernières années ont vu l'essentiel de la construction du détecteur avec l'installation des spectromètres, puis le montage des plans de scintillateurs et des murs devant contenir les briques cibles. La mise en route des détecteurs électroniques au printemps 2006 a permis de collecter les premières données avec des rayons cosmiques avant de détecter les premiers neutrinos du faisceau. En parallèle a eu lieu l'installation et la mise en route des systèmes manipulateurs de briques qui ont permis de procéder à un test de remplissage avec près de mille briques fin 2006. Les groupes français jouent un rôle important dans Opera. Ils ont la responsabilité de la construction, installation et mise en route du trajectographe à scintillateurs et de son électronique associée ainsi que le système d'acquisition. Ils ont en charge la conception, la réalisation et la mise en route du système des deux robots manipulateurs des briques cibles qui permettront de remplir la cible et d'aller extraire les briques contenant des interactions neutrinos. De plus les laboratoires de l'IN2P3 participent activement à la préparation de l'analyse des données avec la mise en route et l'exploitation d'un laboratoire de scanning des émulsions et le développement des logiciels de simulation et de reconstruction de l'expérience.

Vues de haut et de côté des dépôts d'énergies dans les scintillateurs électroniques laissés par les particules produites lors d'une interaction neutrino du faisceau CNGS dans le fer de l'aimant supermodule.





Vue du détecteur Opera dans le hall C du Gran Sasso prise en octobre 2006. Au premier plan: la cible du premier supermodule avec ses plans de scintillateurs ainsi qu'un des robots manipulateurs de briques avec sa station de chargement.

 <http://operaweb.web.cern.ch/operaweb/index.shtml/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, LAL, IPHC, LAPP.

La recherche d'ondes gravitationnelles : Virgo

Fabien Cavalier

Virgo, interféromètre kilométrique pour la recherche d'ondes gravitationnelles approche de sa sensibilité nominale. Durant les deux dernières années, les laboratoires de l'IN2P3 ont joué un rôle moteur dans la mise en route de l'instrument permettant d'atteindre une sensibilité intéressante pour la physique, ouvrant ainsi la porte au démarrage de la prise de données. Cette période a été aussi marquée par un renforcement des activités concernant l'analyse des données et le rapprochement entre Virgo et Ligo.

L'expérience Virgo a pour but la détection directe d'ondes gravitationnelles produites par des phénomènes astrophysiques violents tels que les supernovae, les coalescences d'étoiles à neutrons ou de trous noirs... Au-delà des tests de la Relativité Générale, leur détection ouvrira une nouvelle fenêtre astrophysique permettant de sonder le cœur de certains phénomènes violents de l'Univers qui restent inaccessibles aux ondes électromagnétiques.

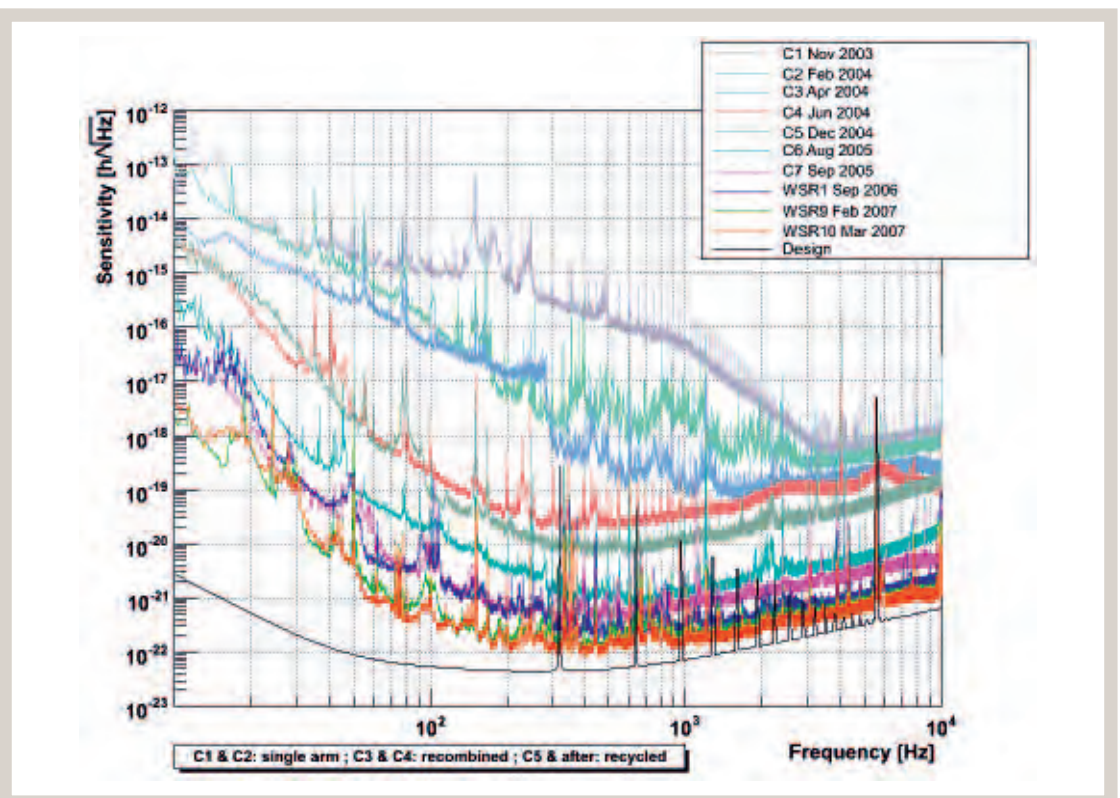
Les ondes gravitationnelles induisent d'infimes « déformations de l'espace-temps » vues comme une variation de la distance entre deux points. Virgo mesure de telles variations en utilisant les miroirs d'un interféromètre de Michelson de

3 km. Virgo est par exemple capable de détecter des ondes gravitationnelles dont l'amplitude est de l'ordre de 10^{-21} , soit un déplacement typique des miroirs de 10^{-18} 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 la fin de la construction mi 2003, l'interféromètre a vu sa sensibilité régulièrement s'améliorer en passant de configurations optiques simples – cavité Fabry-Perot unique (courbes C1 et C2) puis interféromètre recombinaison (C3 et C4) – à la configuration finale où le miroir de recyclage de puissance a été utilisé (C5 et au-delà). Depuis décembre 2004, la mise en route et l'amélioration des différents composants de l'interféromètre a permis de gagner au moins deux ordres de grandeur sur la sensibilité. En particulier, l'ensemble du système d'injection du fais-

Courbes de sensibilité de Virgo illustrant les progrès accomplis au cours du commissioning

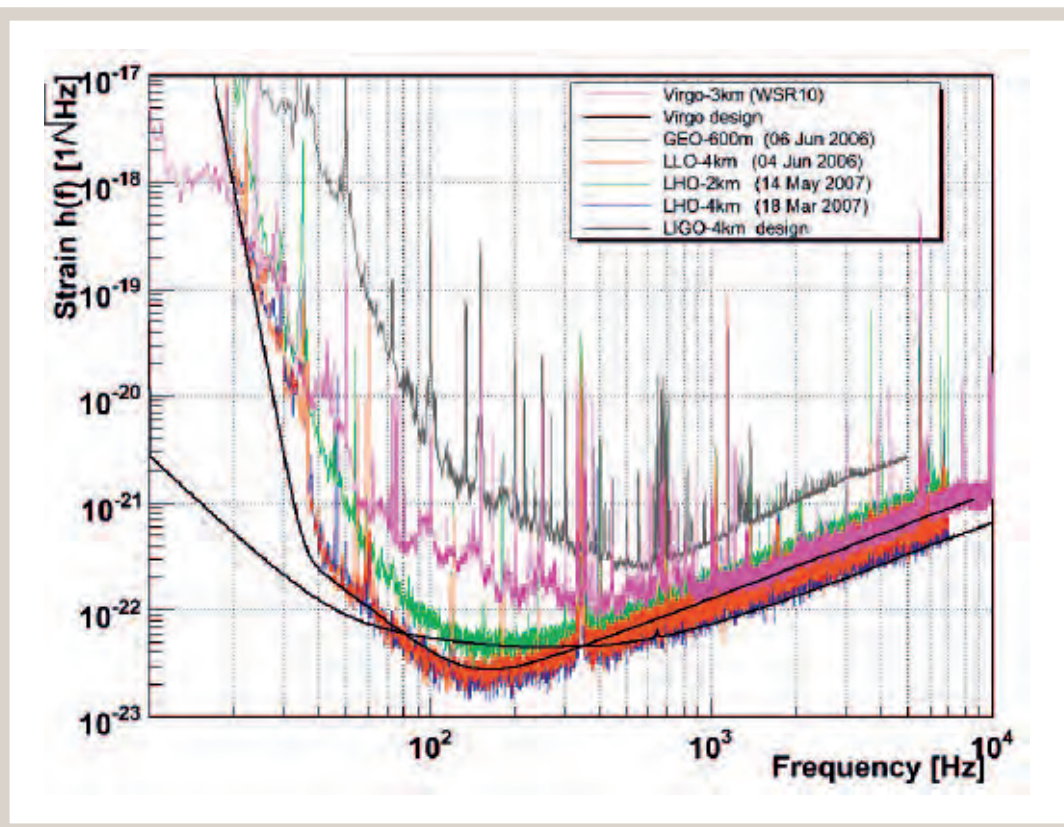


ceau laser a du être remplacé fin 2005 conduisant à un arrêt de six mois. Ce changement majeur a permis de gagner à haute fréquence et de s'approcher de la sensibilité nominale dans la région où le bruit lié à la puissance laser est dominant (au-delà de 500 Hz). Même s'il reste encore à gagner à basse fréquence, la sensibilité actuelle devient compétitive comme le montre la figure qui compare la sensibilité de Virgo à celles des détecteurs Ligo. Environ chaque mois, des prises régulières ont lieu durant certains week-ends (WSR). La première longue prise de données scientifiques sur une durée de plusieurs mois a commencé à la fin du printemps 2007. Elle se fait en coïncidence avec les détecteurs Ligo et l'accord de partage et d'exploitation commune des données a été conclu au début 2007.

Dans cette optique, les groupes de l'IN2P3 jouent un rôle majeur dans la recherche de coalescences d'étoiles binaires et celle de sources impulsives type supernovae. L'étude des données déjà acquises a permis la mise au point des algorithmes et du processus d'identification systématique des sources de bruit. Ce travail démarré dans des groupes propres à Virgo se transpose dans les différents groupes de travail communs avec Ligo.

Enfin, les équipes de l'IN2P3 participent aux améliorations de Virgo, en particulier à la préparation de Virgo+ (remise à niveau de l'électronique, amélioration du système de détection, nouveau traitement de surface des miroirs) ainsi qu'aux R&D pour Advanced Virgo.

Courbes de sensibilité de Virgo comparées à celles des autres interféromètres existants.



 <http://www.virgo.infn.it>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : LAL, LAPP, LMA |
 CNRS/Insu : Observatoire de la Côte d'Azur |
 CNRS/MPPU : ESCPI.

Le LSM, un laboratoire souterrain pour la matière noire, la masse du neutrino et la recherche d'événements rares

Paschal Coyle, Alexandre Juillard, Xavier Sarazin

Le laboratoire souterrain de Modane est une UMR CNRS/IN2P3-CEA/DSM, il est situé au centre du tunnel routier du Fréjus entre la France et l'Italie. Le personnel comprend 2 chercheurs et 8 ITA.

Le laboratoire accueille des expériences de physique fondamentale telles que Nemo3 (Neutrino Ettore Majorana Observatory) et TGV (Telescope Germanium Vertical) pour l'étude des propriétés du neutrino, Edelweiss (Expérience pour DÉtecter Les WIMPs En Site Souterrain) pour la recherche de la matière noire et SHIN (Super Heavy elements In Nature) pour la recherche de noyaux super lourds. Le laboratoire accueille également treize détecteurs de spectroscopie gamma pour des activités très variées de mesures de radiopureté des matériaux, d'études des sédiments dans les lacs alpins, de surveillance et de contrôle de la radioactivité dans l'environnement (IRSN, DASE), de datation du vin etc.

Dans la période 2004-2006, Nemo 3 a poursuivi sa prise de données et Edelweiss 2 a été installé. TGV a fini la mesure d'une source de 8 g de ^{48}Ca pour la recherche de la double désintégration bêta et va commencer la recherche de la double capture électronique du ^{106}Cd , jamais encore observé.

SHIN (Collaboration CSNSM et JINR Dubna) a été installée en 2005. Cette expérience consiste en un minerai d'osmium de 500g placé entre des compteurs neutrons ^3He pour la détection des neutrons qui seraient émis de la fission des éléments super lourds.

Le laboratoire a fourni le support pour le bon fonctionnement des treize détecteurs Germanium. Dans le cadre du programme européen Ilias, le LSM a recruté une physicienne en post-doctorat en 2004 pour le développement d'un Ge planar très bas bruit. Les études sont terminées et la commande du détecteur a été passé à l'automne 2006.

Certains gros équipements ont du être modifiés afin de pouvoir accueillir l'expérience Edelweiss. En plus de l'infrastructure pour recevoir le cryostat, la puissance électrique et la capacité de refroidissement du laboratoire ont du être augmentées. Le LSM, en collaboration avec Nemo 3 s'est doté une usine anti-radon permettant de fournir jusqu'à $150 \text{ m}^3/\text{h}$ d'air avec un taux de 10 mBq/m^3 (au lieu de 10 Bq/m^3) aux différentes expériences.

Un accord entre le JINR Dubna, le CNRS/IN2P3

et le CEA/DSM a été signé pour la création d'un LEA qui permet des échanges de personnes et l'installation de nouveaux détecteurs.

Recherche directe de matière noire dans l'expérience Edelweiss

À l'heure nouvelle de la cosmologie dite de précision, de nombreux paramètres cosmologiques sont mesurés à quelques % près. Paradoxalement, 85% du contenu en masse de l'univers est de nature exotique et nous échappe toujours ! Installée au LSM depuis 1997, l'expérience Edelweiss a pour but la détection directe de matière noire non baryonique sous forme de WIMPs (Weakly Interactive Massive Particle), dont un candidat privilégié est le Neutralino des modèles SUPERSYMÉTRIQUES.

Edelweiss utilise des bolomètres Ge à double détection ionisation-chaleur fonctionnant à 20 mK. Cette technique permet de discriminer, événement par événement, les rares reculs nucléaires, induits par la diffusion élastiques des WIMPs, des reculs électroniques provenant de la radioactivité ambiante.

Edelweiss-I a atteint en 2003 une sensibilité à des taux de reculs aussi faible que 0.1 évts/kg/jour , excluant des sections efficace supérieure à 10^{-6} pb pour $M_{\text{WIMPs}}=50 \text{ GeV}/c^2$. Cette performance a constitué la plus forte contrainte mondiale jusqu'en 2004 et permet d'exclure certains modèles Susy parmi les plus optimistes. Depuis l'expérience américaine CDMS a repris les devants.

Pour contraindre une fraction plus importante de modèles, il reste nécessaire de gagner plusieurs ordres de grandeur. Edelweiss-I a ainsi pris fin à l'été 2004 pour permettre l'installation d'une phase beaucoup plus ambitieuse, Edelweiss-II, officiellement inaugurée le 31 mars 2006. Son installation a occupé toute l'année 2005 et a impliqué un nombre important de laboratoire IN2P3, CNRS et CEA.

L'objectif est de gagner un facteur 100 en sensibilité : pour cela tout l'environnement a été revu. Le cryostat Edelweiss-II permet en effet de rece-

voir jusqu'à cent vingt détecteurs de 300g (contre 3 pour Edelweiss-I), il est entouré d'un blindage de plomb et de polyéthylène de plus de 100 tonnes, lui-même entouré d'un veto scintillateur anti-muons de 100 m² pour identifier les quelques rayons cosmiques résiduels. Enfin, cet ensemble est installé dans une salle blanche alimentée en partie en air déradonisée pour atténuer encore le fond radioactif.

L'année 2006 a été consacrée à la validation de l'ensemble de l'expérience (cryogénie, électronique, câblage, acquisition etc.) en utilisant un nombre réduit de bolomètres.

28 détecteurs, dont 4 prototypes Ge/NbSi entièrement développés par l'IN2P3 ont été installés en mars 2007 et devraient permettre à Edelweiss de reprendre la tête de la compétition.

Recherche du neutrino de Majorana et de la double désintégration bêta : l'expérience Nemo-3

Une des questions fondamentales en physique des particules concerne la nature du neutrino : le neutrino serait-il identique à son antiparticule (neutrino de Majorana) ? Cette propriété est un paramètre fondamentale dans les théories de Grande Unification ainsi que dans le modèle de Leptogénèse, modèle permettant d'expliquer la formation d'une asymétrie matière anti-matière lors des premiers instants de l'Univers. Expérimentalement, si le neutrino est de Majorana, un nouveau type de radioactivité apparaît : la double désintégration bêta sans émission de neutrino ($\beta\beta 0\nu$).

Installée au LSM, l'expérience Nemo-3 cherche à découvrir cette nouvelle radioactivité. Le détecteur est constitué de feuilles ultrafines d'isotopes émetteurs double bêta (environ 20 m²) installées au centre d'une très grande chambre à fils. L'ensemble est recouvert de deux mille scintillateurs plastiques couplés à des photomultiplicateurs pour mesurer l'énergie des électrons. Ce détecteur permet ainsi d'étudier différents isotopes (principalement 7kg de ¹⁰⁰Mo et 1kg de ⁸²Se), de reconstruire directement les deux électrons émis lors de la désintégration double bêta et d'identifier et rejeter les différents bruits de fond.

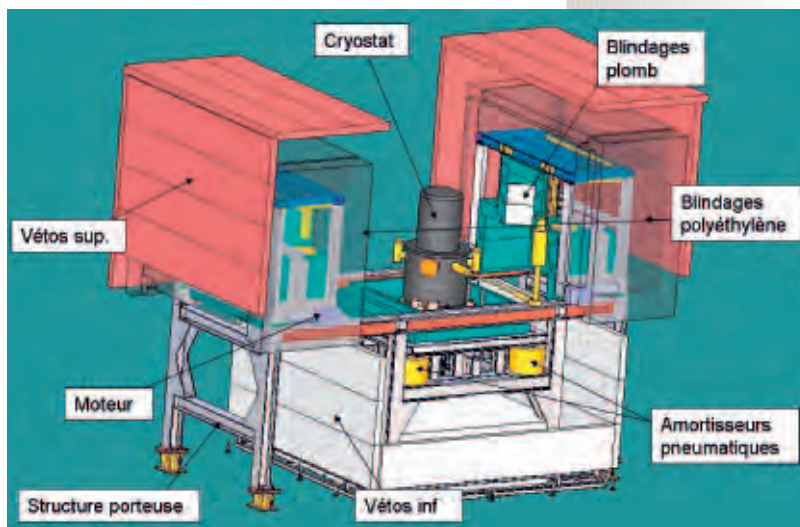
Le détecteur Nemo-3 prend des données depuis février 2003. Une première phase de prises de

données avait permis de montrer qu'une très faible diffusion dans le détecteur du radon présent dans le laboratoire venait perturber les mesures. À l'automne 2004, un dispositif permettant de purifier l'air contre le radon a été installé au LSM. Ce dispositif a permis de supprimer le bruit de fond du au radon.

Depuis décembre 2004, le détecteur prend des données sans radon en continu (avec une efficacité d'environ 80%). Le seul bruit de fond résiduel, correspondant à la double désintégration bêta standard avec émission de deux neutrinos, est de seulement 2 événements par an. Les premiers résultats présentés aux conférences de l'été 2006 indiquent qu'après 290 jours de données collectées, aucun signal de désintégration $\beta\beta 0\nu$ n'a été observé, correspondant à une limite inférieure sur la demi-vie du processus de $T_{1/2}(\beta\beta 0\nu) > 5.8 \cdot 10^{23}$ ans (90% C.L.).

Étant donné les très bons résultats de l'expérience Nemo-3, un programme R&D de trois ans a débuté en 2006 pour l'étude d'un détecteur SuperNemo pouvant mesurer 100kg d'isotopes, principalement le ¹⁵⁰Nd et le ⁸²Se. La réalisation d'un premier module (5kg d'isotopes) commencerait en 2010. SuperNemo pourrait sonder la désintégration $\beta\beta 0\nu$ avec une sensibilité de 10²⁶ années.

Schéma de l'expérience Edelweiss.



 <http://www-lsm.in2p3.fr/>
<http://edelweiss.in2p3.fr/>
<http://nemo.in2p3.fr/>

L'astronomie neutrino : Antares

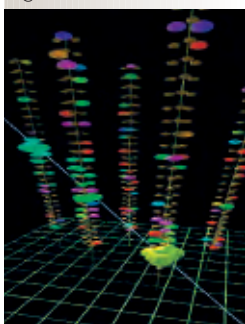
Paschal Coyle

Le projet Antares a pour but la détection des neutrinos de haute énergie provenant des sources astrophysiques. Actuellement, une moitié du détecteur est déjà immergé et des données sont prises depuis le mois de mars 2006. Le détecteur sera complet fin 2007. L'IN2P3 après avoir apporté une contribution majeure à sa réalisation, participe activement à la mise en route du détecteur ainsi qu'à la préparation de l'analyse des données.

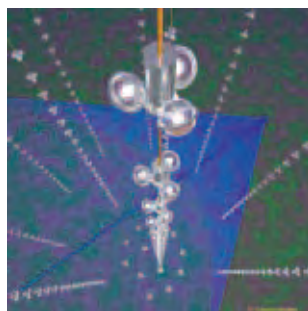
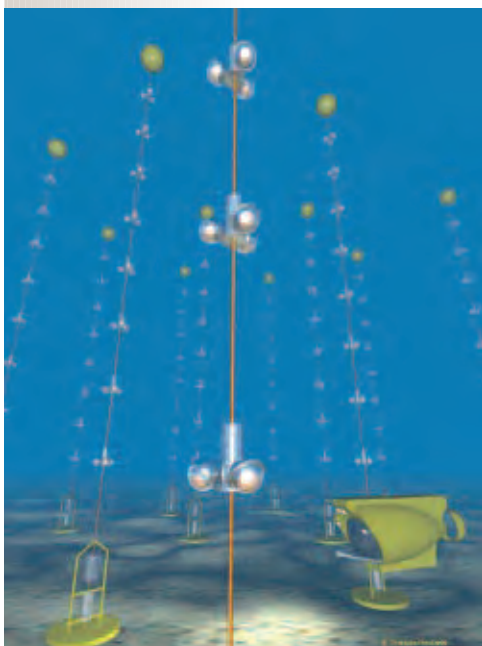
Le télescope à neutrinos Antares a pour but d'étudier les neutrinos cosmiques de haute énergie avec un réseau de photo-détecteurs installés au fond de la Méditerranée. La détection de ces neutrinos permettra de mieux comprendre les phénomènes les plus violents de l'Univers (restes des supernovae, sursauts gammas, micro-quasars, etc.) liés en partie aux observations de rayons cosmiques et des gammas de haute énergie. Antares contribuera également à la recherche de la matière noire en détectant la production de neutrinos issus de l'annihilation des WIMPs piégées gravitationnellement dans les zones denses de l'Univers.

Le détecteur est formé par une matrice tridimensionnelle de neuf cents photomultiplicateurs (PMT) groupés sur douze lignes flexibles, chacune d'elles divisée en vingt-cinq étages. Ces PMTs sont groupés par triplets avec l'électronique nécessaire à la lecture des signaux. Les lignes sont ancrées au sol à 2475m de profondeur et tendues verticalement grâce à un flotteur de tête.

Muon ascendant (neutrino candidat), reconstruit par les cinq lignes d'Antares.



Vues artistiques 3D d'Antares.
© François Montanet.



Elles sont ensuite connectées à une boîte de jonction permettant l'alimentation des lignes et l'acheminement des données jusqu'à la terre à travers un câble électro-optique de 40 km. Les données sont enregistrées à la station terrestre de La Seyne-sur-Mer. Le réseau de photomultiplicateurs a pour but de détecter la faible lumière Tcherenkov émise par les muons qui traversent le détecteur. Ces muons sont produits lors de l'interaction des neutrinos cosmiques avec l'eau ou la roche située sous le détecteur.

Les laboratoires de l'IN2P3 ont fortement contribué à la construction d'Antares en réalisant l'ensemble de la mécanique, le système d'horloge, le système à positionnement acoustique, les intégrations des lignes, l'acquisition des données ainsi que de nombreux logiciels allant de la simulation à l'analyse des données. Ils sont aussi fortement impliqués dans la mise en route et le fonctionnement d'Antares.

L'une des premières étapes dans la construction du détecteur fut l'installation, en novembre 2001, du câble électro-optique reliant le site expérimental à la côte. Une année plus tard, la boîte de jonction était connectée. Deux lignes de tests seront par la suite connectées en 2003 et ont été opérationnelles pendant quatre mois. Une mini ligne instrumentée avec des modules optiques, nommée Milom, fut connectée en avril 2005. La Milom présente la conception définitive pour l'électronique et la mécanique. Après un an et demi, la Milom continue de fonctionner, ce qui permet de vérifier la stabilité dans le temps des principaux composants du détecteur. La première ligne de détection production a été déployée en février 2006 et connectée par le sous-marin Rov Victor de l'Ifremer en mars 2006. Les premières études préliminaires sur le flux de muons descendants ont pu être entreprises. La deuxième ligne a été connectée au mois de septembre 2006. Le début de l'année 2007 a vu la connexion des lignes 3, 4 et 5. À ce rythme, le détecteur complet sera opérationnel en 2008.

 <http://antares.in2p3.fr>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : APC, CPPM, IPHC I

CNRS/Insu : COM, LAM, Géoscience Azur.

HESS, un nouveau regard sur la Galaxie

Mathieu de Naurois

Opérationnel depuis décembre 2003, Hess a ouvert une nouvelle fenêtre sur notre galaxie dans le domaine des très hautes énergies. De nombreuses sources ont été découvertes, appartenant à des catégories aussi variées que les Restes de Supernova, les Plérions, les Microquasars et les Blazars, et pour certaines totalement inconnues aux autres longueurs d'onde. Ces résultats mettent en évidence la diversité des mécanismes de production de rayons gamma dans l'Univers et soulignent l'émergence d'une nouvelle branche de l'astronomie dans laquelle Hess occupe une position pionnière.

Hess (High energy stereoscopic system) est un réseau de 4 imageurs Cherenkov, installé en Namibie et dédié à l'observation des rayonnement gamma de très haute énergie (entre quelques dizaines de GeV et une centaine de TeV). Ce réseau de troisième génération se caractérise par des miroirs de 107 m², des caméras à grand champ de vue (5 degrés) finement pixelisées et dotées d'une électronique intégrée dans la caméra et fonctionnant au GHz. La partie française de la collaboration à conçu et réalisé les quatre caméras du réseau.

Opérationnel depuis décembre 2003, le réseau à notamment fourni une carte complète des régions centrales de la Galaxie comprenant plus de 17 nouvelles sources, pratiquement toutes étendues et caractérisées par un spectre dur en énergie. Certaines sont associées à des pulsars énergétiques au cœur de nébuleuses synchrotrons (Plérions), tandis que quelques autres correspondent à des restes de supernovae en coquille. L'étude morphologique détaillée de l'une d'entre elle a permis de mettre en évidence une corrélation forte entre émission X et gamma, indiquant ainsi qu'une population unique de particules est à l'origine des deux émissions. Les modèles récents favorisent une composition hadronique de cette population, ce qui constituerait une solution au mystère centenaire de l'origine des rayons cosmiques.

Parmi les autres sources détectées par Hess, le centre galactique revêt un intérêt particulier du fait d'une émission potentiellement due à la désintégration de particules supersymétriques. Ces particules, postulées dans de nombreuses théories, seraient de bons candidats au problème de la matière noire non baryonique représentant 23% de la masse de L'Univers, mais les observations de Hess favorisent plutôt une source astrophysique conventionnelle. Dans la même région,

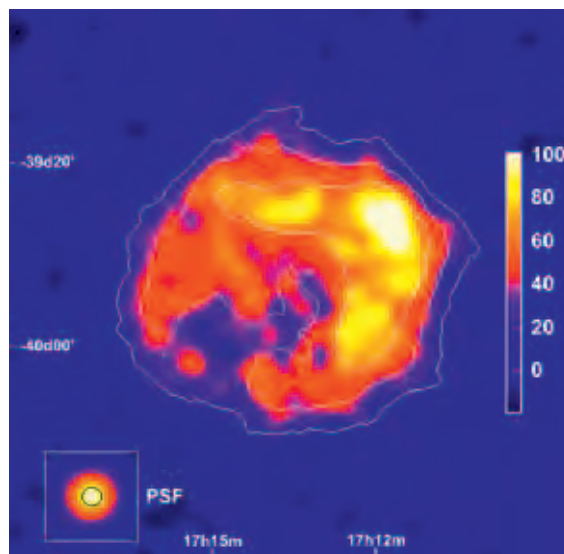


Image Gamma de Très Haute Énergie du reste de supernova RX1713.7-3946 obtenue par Hess.

Hess a mis en évidence une émission diffuse à grande échelle (200 pc) attribuée à l'interaction de rayons cosmiques avec la matière interstellaire. Ces observations indiquent que le spectre des rayons cosmiques est – probablement du fait de la proximité des sources – significativement plus dur au centre de la Galaxie qu'au voisinage de la Terre.

Dans le domaine extragalactique, les observations de Blazars lointains ont en particulier permis de conclure à une plus grande transparence de l'Univers aux rayons gamma, du fait d'une émission infrarouge plus faible que généralement attendu. Cette découverte, outre le fait qu'elle ouvre de nouvelles perspectives observationnelles, a d'importantes conséquences concernant l'époque de formation des étoiles primordiales. De nombreux résultats sur d'autres types de sources ont également été publiés au cours des dernières années. Hess a ainsi su, en quelques années, s'imposer comme une référence incontournable de l'astronomie Gamma de très haute énergie et participer pleinement à l'ouverture d'une nouvelle branche de l'astronomie.

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LLR, LPNHE, APC, LPTA |

CNRS/Insu: Observatoire de Paris, LAOG, CESR |

CEA: Dapnia.

L'Observatoire Pierre Auger inaugure une nouvelle astronomie

Etienne Parizot

L'Observatoire Pierre Auger, dont l'installation en Argentine s'achèvera dans quelques mois, vient de rendre publics ses premiers résultats majeurs sur le spectre d'énergie, la composition et la distribution angulaire des particules les plus énergétiques de l'univers connues à ce jour, pouvant dépasser les 10^{20} eV. Ils marquent l'avènement d'une astronomie fondée sur les particules chargées, ouvrant notamment la voie d'une étude multimessager des sources astrophysiques de haute énergie et des processus physiques associés.

Avec sa surface de détection de 3 000 km², l'Observatoire Pierre Auger représente une avancée majeure dans l'étude des rayons cosmiques ultra-énergétiques, dont la rareté (environ une particule par siècle et par km² au-delà de 10^{20} eV) est le principal obstacle à la compréhension de leur nature et de leur origine. Ces rayons cosmiques sont détectés de manière indirecte, par l'observation des gerbes de particules secondaires qu'ils produisent dans l'atmosphère terrestre. Un réseau de détecteurs composé de 1600 cuves d'eau à effet Cherenkov (environ 1400 sont déjà en opération) permet d'en échantillonner la densité au sol, tandis que 24 télescopes (tous opérationnels) fonctionnant principalement dans l'ultra-violet et observant l'atmosphère au-dessus du réseau peuvent détecter, par nuit noire, la lumière de fluorescence émise dans le sillage des milliards de particules constituant la gerbe.

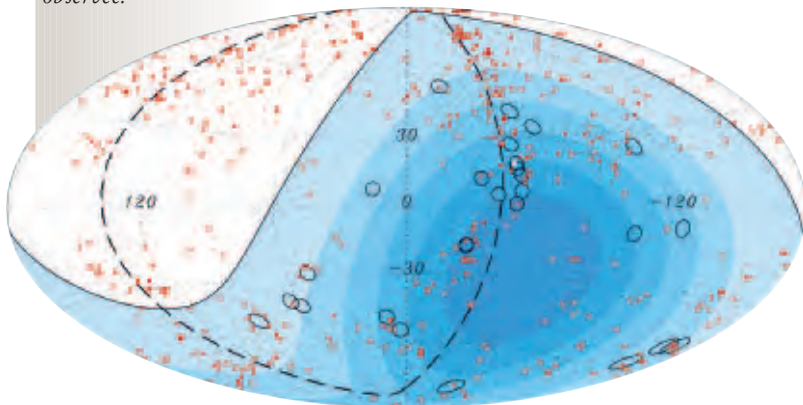
Le recours à cette technique de détection hybride permet la mise en place d'une méthode d'analyse indépendante de l'extrapolation à haute énergie des modèles hadroniques impliqués dans le développement des gerbes. La reconstruction de ces gerbes permet d'identifier l'énergie et la direction d'arrivée de la particule incidente avec une résolution satisfaisante, et de contraindre dans une

certaine mesure l'évolution avec l'énergie de la composition des rayons cosmiques ultra-énergétiques.

Les premiers résultats relatifs à ces trois observables fondamentales ont suscité l'enthousiasme d'une vaste communauté de chercheurs. D'une part, il est à présent établi que le flux des rayons cosmiques est fortement atténué aux abords de 10^{20} eV, comme il est attendu si l'on tient compte de leur interaction avec les photons du fond diffus cosmologique. Ensuite, une limite supérieure très contraignante a été placée sur la fraction de photons parmi ces particules, ce qui exclut de nombreux modèles basés sur la désintégration de particules supermassives pouvant constituer une partie de la matière noire. Dans le même temps, l'analyse des gerbes suggère la présence de noyaux parmi ces particules, ce qui aura des implications astrophysiques importantes, y compris pour la phénoménologie du rayonnement cosmique de plus basse énergie, d'origine galactique. Enfin, et c'est à ce jour le résultat le plus enthousiasmant, une corrélation significative a pu être établie entre les directions d'arrivée des rayons cosmiques les plus énergétiques et la distribution de la matière extragalactique locale (tracée notamment par les noyaux actifs de galaxie), ce qui donne une première indication précieuse sur leur origine, et garantit dans le même temps qu'une véritable astronomie est possible, même avec des particules chargées, pourvu qu'on se place à suffisamment haute énergie et qu'on accumule une statistique suffisante.

De nombreuses voies nouvelles sont désormais ouvertes pour étudier les conditions d'accélération et de propagation des rayons cosmiques ultra-énergétiques. Ces résultats rendent plus nécessaire encore la construction d'un pendant de l'Observatoire Pierre Auger dans l'hémisphère nord (« Auger Nord »), pour aborder l'étude systématique des sources les plus intenses dans l'ensemble du ciel, avec une acceptance accrue aux énergies extrêmes, et commencer à mettre en œuvre une astronomie véritablement multimessager.

Directions d'arrivée des rayons cosmiques les plus énergétiques détectés par Auger, ayant permis d'établir leur anisotropie. Une corrélation avec des sources extragalactiques relativement proches est observée.



 <http://auger.cnrs.fr>

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**

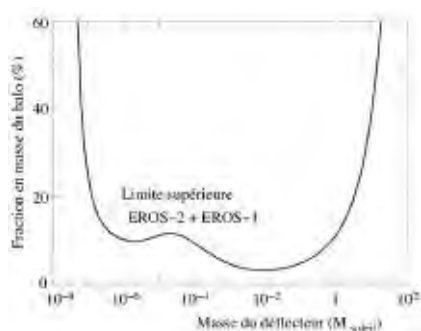
CNRS/IN2P3: IPNO, APC, LAL, LPNHE, LPSC.

Eros 2 : à la recherche d'objets massifs sombres dans la Voie Lactée

Reza Ansari

Comme toutes les galaxies spirales, la Voie lactée contient une fraction très importante (de l'ordre des 4/5^{es}) de matière invisible dont la nature est inconnue.

Le programme d'astrophysique Eros fut lancé il y a un peu plus d'une quinzaine d'années pour savoir si cette matière était composée de nucléons qui résideraient dans des « naines brunes », c'est-à-dire des étoiles de masse trop réduite pour que la fusion nucléaire se développe au point de les rendre brillantes. Une réponse claire et définitive a été apportée à cette question par les mesures d'Eros 2.



Limite supérieure de la contribution d'objets compacts massifs (« déflecteurs ») à la matière obscure de la Voie Lactée en fonction de leur masse (rapportée à celle du Soleil). Cette limite, établie à un niveau de confiance de 95%, résulte de l'ensemble des mesures faites pendant les phases 1 et 2 du programme Eros.

Bilan des observations de la collaboration Eros 2 de 1996 à 2003. D'autres observations ont été faites dans des directions très éloignées du plan Galactique pour rechercher des explosions de supernovae de type Ia et pour les caractériser.

Le premier objectif du programme Eros a donc été la mesure de la contribution de machos (Massive Astrophysical Halo Objects) à la matière dite « obscure » de notre galaxie. Le terme machos recouvre des boules de gaz de masse inférieure à ~ 0,015 masse solaire, des naines brunes dont la masse se situe entre ~ 0,015 et ~ 0,08 masse solaire et d'éventuels objets exotiques compacts, peu ou pas lumineux, sans restriction de masse, tels que des trous noirs.

Le principe de cette mesure repose sur le phénomène de microlentille gravitationnelle. Prévu en 1936 par Albert Einstein, ce phénomène consiste en un accroissement temporaire de la luminosité apparente d'une étoile lointaine lorsqu'un corps céleste massif croise la ligne de visée qui va du télescope jusqu'à cette étoile. La collaboration Eros a choisi comme étoiles lointaines « cibles » celles des deux Nuages de Magellan et elle a recherché d'éventuelles variations de leur luminosité dues aux transits de naines brunes ou autres machos.

Les observations ont été faites avec le télescope de 1 m « Marly » à l'observatoire de l'Eso situé à La Silla (Chili); commencées en 1996, elles ont été poursuivies jusqu'en février 2003. L'analyse des données est pratiquement achevée aujourd'hui.

Les observations ont été faites avec le télescope de 1 m « Marly » à l'observatoire de l'Eso situé à La Silla (Chili); commencées en 1996, elles ont été poursuivies jusqu'en février 2003. L'analyse des données est pratiquement achevée aujourd'hui.

Tout au long des sept années d'observations quasi-ininterrompues la sensibilité de cette recherche de machos s'est progressivement améliorée. Il a été possible de mieux cerner la difficile question du bruit de fond qui a pu être réduit, d'une part en poursuivant l'observation des candidats machos trouvés au début du programme et, d'autre part, en identifiant les supernovae explosant derrière les Nuages de Magellan.

À la fin des observations, 50.10⁶ courbes de lumière couvrant une période de plus de 6 ans étaient disponibles pour les Nuages de Magellan (voir tableau). Parmi elles, les 35.10⁶ les plus brillantes ont été analysées. La figure illustre les résultats obtenus. La conclusion est claire: les objets compacts invisibles de masse inférieure à 0,8 fois celle du Soleil ne représentent pas plus d'un dixième de la matière cachée de la Voie Lactée. Alors qu'une collaboration concurrente avait présenté, en 2000, des résultats favorisant une conclusion différente de celle-ci (sans doute parce que les champs visés dans cet autre programme étaient particulièrement encombrés), c'est aujourd'hui la conclusion d'Eros qui est retenue par la communauté scientifique.

La collaboration Eros 2 a également exploité l'effet de lentille gravitationnelle pour étudier la structure de la Galaxie (bulbe, disque et bras spiraux). Elle a aussi déterminé le taux d'explosion des supernovae de type Ia proches et étudié des corrélations entre leur luminosité absolue et certains de leurs caractères spectraux. Les observations de plus de cent millions d'étoiles pendant sept années ont conduit à la découverte de nombreuses étoiles variables (RR-Lyrae, Céphéides, Miras et bien d'autres!). Au total des centaines de milliers d'étoiles variables apparaissent dans les données, parmi lesquelles le nombre d'étoiles périodiques est estimé à une centaine de milliers. Ces données (images de référence, courbes de lumières) sont progressivement mises à la disposition de la communauté des astronomes sur le site <http://ledbg.in2p3.fr:8080/ledbg/index.jsp>.

DIRECTION D'OBSERVATION	COUVERTURE (degrés carrés)	ÉTOILES OBSERVÉES (millions)	MOYENNE DU NOMBRE DE MESURES
Grand Nuage de Magellan	88	45	600
Petit Nuage de Magellan	10	5	1000
Centre Galactique	120	40	700
Bras spiraux	30	15	500

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAL, LPNHE, LPSC |
CNRS/Insu: IAP, OM, OMP |
CEA/DSM: Dapnia.

Application biomédicale

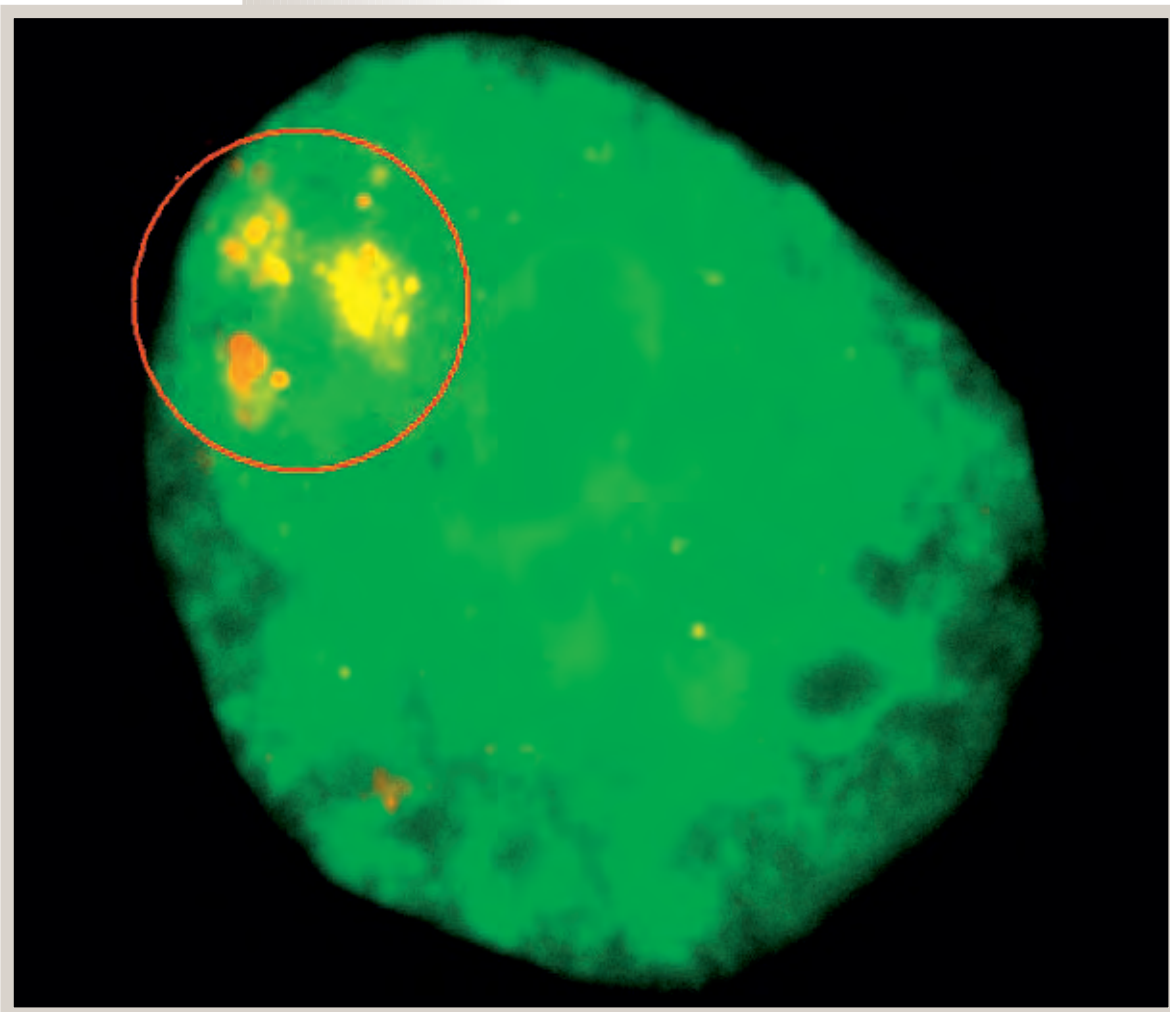
Gérard Montarou

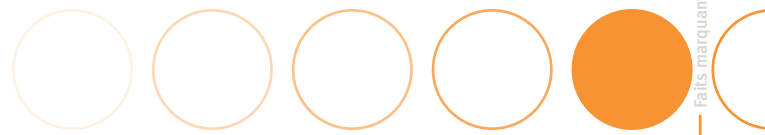
Les années 2003-2007 ont été marquées par l'apparition de structures importantes et performantes au sein des laboratoires de l'Institut dans divers thèmes à l'interface de la Physique et de la Biologie.

Dans le domaine de l'imagerie multimodale du petit animal, la plateforme μ CT/ μ TEMP/ μ TET Imabio développée à l'IPHC de Strasbourg, et la version multimodale (TEP/CT) du ClearPET au CPPM pour le petit animal, avec le développement de modules de détection X/gamma, capable de fonctionner dans un champ magnétique et permettant un couplage de l'imagerie anatomique et fonctionnelle au sein du même instrument, sont destinés à devenir des outils performants pour des études de métabolisme ou de pharmacologie.

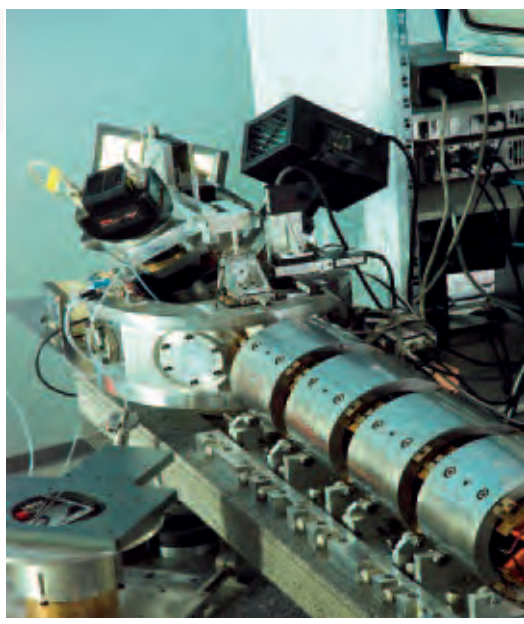
Visualisation par Immunofluorescence des distributions des cassures doubles brins après irradiation cellulaire sous microfaisceau d'ions Aifira.

Dans le domaine de l'imagerie cellulaire, des progrès spectaculaires ont été accomplis par la mise en service de la nouvelle ligne microfaisceau Aifira au CENBG de Bordeaux qui peut délivrer des ions (protons, deutons ou particules alpha) dans ce domaine en énergie de quelques MeV en ciblant spécifiquement des compartiments cellulaires dans des champs de cellules en culture. Les ions sont délivrés un par un avec une précision spatiale de quelques micromètres. L'association de cette sonde radio-toxique totalement contrôlée, aussi bien en position d'impact qu'en dose, avec la mise en évidence des cassures double-brin de l'ADN dans les cellules irradiées par des techniques performantes de marquage (immunofluorescence) est un outil majeur et unique en France pour l'étude et la compréhension des effets des rayonnements ionisants sur le vivant et notamment les mécanismes de signali-



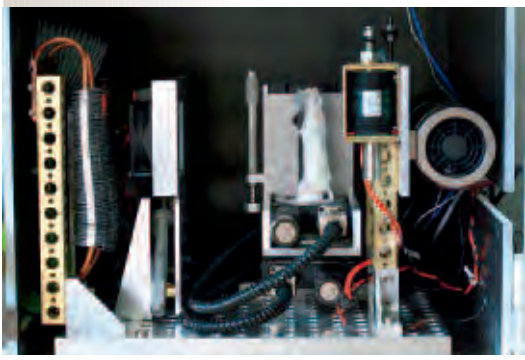


Dispositif d'irradiation cellulaire par microfaisceau sur Aifira (CENBG).



sation cellulaire qui résultent de ces irradiations. En complément à cette ligne microfaisceau, l'étude de l'action de rayonnement fortement ionisant sur la plateforme du Ganil, avec la mise en place du Laria, trouve un écho particulier avec le développement de nouveaux protocoles de radiothérapie utilisant des faisceaux d'hadrons pour le traitement d'un certain nombre de pathologies cancéreuses. À ce titre, la décision du ministère de la Santé en février 2007 de construire le centre médical de traitement par faisceau de carbone en Rhône-Alpes (Etoile) constitue indéniablement une étape importante pour le développement de cette activité au sein de l'Institut, qui peut s'appliquer également à la protonthérapie dans le cadre des centres existants (CPO Orsay, Medycic Nice).

Plateforme Pixscan du CPPM Scanner-CT optimisé pour la vitesse d'acquisition et le contraste des tissus mous pour l'imagerie du petit animal.



Dans ce contexte, l'Inca a mis en place un programme national de recherche en hadronthérapie, avec la définition d'axes de R&D impliquant l'utilisation d'outils et de méthodes familiers aux chercheurs et ingénieurs de l'Institut,

que ce soit pour un contrôle précis des faisceaux, mais également pour la mesure et le contrôle de la dose distribuée, et pour l'imagerie associée. Sous un aspect plus clinique, ces dernières années ont vu la mise au point et la validation clinique de systèmes miniaturisés pour assister le chirurgien en bloc opératoire. De telles sondes per-opératoires ont été développées essentiellement à l'IMNC d'Orsay et l'IPHC de Strasbourg. D'autres laboratoires de l'Institut se consacrent à des recherches et développements pour l'amélioration de l'imagerie TEP. Dans le domaine de la recherche en médecine nucléaire et notamment en chimie nucléaire, le projet Arronax (Accélérateur pour la Recherche en Radiochimie et Oncologie à Nantes Atlantique) dont le laboratoire Subatech de Nantes est un des acteurs principaux, consistera, lors de sa prochaine mise en service à l'automne 2008, en une plateforme importante pour la production et l'utilisation de radioisotopes innovants. La plateforme Arronax est destinée à devenir dans les années futures, un centre de recherche performant en imagerie TEP pour le diagnostic et la thérapie en cancérologie et en cardiologie.

L'utilisation de la simulation, que ce soit pour l'optimisation des systèmes d'imagerie (collaboration openGate), ou par la modélisation des effets des rayonnements dans la matière biologique (collaboration Geant4 DNA et plateforme This), a pris une importance considérable ces dernières années à l'interface de la physique et des sciences de la vie. Ce type d'activité s'est largement adossé sur les capacités du centre de calcul de l'Institut, et le déploiement de la grille de calcul dans sa version pluridisciplinaire (EGEE) fortement soutenue par la communauté européenne. Sur le plan national, la création de l'Institut Des Grilles qui est la structure du CNRS en charge de la coordination et de l'animation de l'ensemble des travaux du CNRS dans le domaine des grilles de production et des grilles de recherche, sera un de point de contact vis-à-vis des partenaires notamment européens pour tous les projets de grilles dans ces domaines.



LABORATOIRES FRANÇAIS

CNRS/IN2P3 : IMNC, CPPM, IPHC, Subatech, IPNL, LPC Clermont, LPC Caen, CENBG, LPSC.

Activités et événements marquants du musée Curie

Renaud Huynh

Le musée Curie est à la fois un lieu de mémoire et un musée d'histoire des sciences. Lieu de réflexion et de partage du savoir, le musée bénéficie d'un rayonnement international et suscite l'admiration d'un large public.

Constitué d'un espace de visite et d'un centre de ressources historiques, il propose au public de découvrir l'histoire de la radioactivité et des utilisations médicales des rayonnements dans la première moitié du XX^e siècle.

Les missions principales de l'unité sont : la conservation du patrimoine, l'accueil des publics et la diffusion de la culture scientifique et technique.

L'UMS 6425 CNRS-IN2P3/Institut Curie « Musée et archives de l'Institut du Radium, Pierre et Marie Curie, Irène et Frédéric Joliot-Curie » a été créée en 1994. Elle a été renouvelée en 2006 pour une durée de 4 ans.

Les collections

Le musée Curie conserve de nombreux documents et objets originaux : instruments scientifiques, archives, livres, journaux anciens, photographies, audiovisuels, objets insolites... Ces collections concernent principalement l'histoire des Curie, des Joliot-Curie, de l'Institut du Radium et de la Fondation Curie, et plus largement l'histoire de la radioactivité et de la cancérologie. Cet ensemble constitue un patrimoine unique, très sollicité lors d'événements scientifiques, culturels ou pour des commémorations.

Indépendamment du travail de conservation préventive des différents fonds, la conception et la réalisation d'outils de recherches documentaires est au centre de nos activités.

Un inventaire électronique des collections d'imprimés (de la fin du XIX^e siècle à aujourd'hui) a été finalisé en 2005 : au total, deux mille livres, brochures et journaux, ont été classés et répertoriés.

Les fonds photographiques (plaques de verre, négatifs, tirages originaux...), très demandés pour des expositions ou des publications, sont progressivement numérisés et intégrés à des bases de données et des catalogues électroniques afin de faciliter leur gestion.

De nombreuses demandes spécialisées sont traitées par courrier électronique et de nombreux lecteurs (historiens, chercheurs, journalistes, étudiants...) sont accueillis sur rendez-vous dans nos locaux au 70, rue Mouffetard (75005).

Les publics

Le musée Curie se situe dans l'un des bâtiments de l'Institut du Radium (aujourd'hui Institut Curie), créé en 1909. Ce pavillon abritait un laboratoire, spécialisé dans l'étude des rayonnements, dirigé par Marie Curie de 1914 à 1934. Frédéric et Irène Joliot-Curie, tous deux prix Nobel de chimie en 1935, y ont effectué une grande partie de leurs recherches scientifiques.

L'espace de visite accueille en moyenne six mille visiteurs par an (individuels et groupes), en visite libre ou guidée (français et anglais), dont un tiers de scolaires.

D'une surface totale d'environ 120 m², la capacité d'accueil du musée est limitée¹.

Pour pallier ces limites spatiales et pour diversifier les animations proposées aux publics, le musée développe des activités « hors-les-murs » (expositions, conférences promenades...) et a organisé, entre avril 2004 et décembre 2005, une vingtaine de conférences thématiques mensuelles, *les mercredis du musée Curie*.

En 2005, *Année Mondiale de la Physique*, grâce à une subvention de la DRRT-DRAC Île-de-France (appel à projets de culture scientifique et technique), deux projets ont été réalisés : restauration d'instruments anciens (pour des démonstrations pédagogiques de la « méthode Curie » pour la mesure de la radioactivité) et élaboration de deux visites contées (*Marie Curie, magicienne du radium*, tout public à partir de 6 ans, et *Chez Madame Curie à l'Institut du Radium*, à partir de 12 ans).

Enfin, dans la continuité du travail entrepris depuis 2003 pour développer l'autonomie de visite et l'interactivité, des aménagements muséographiques ont été opérés, notamment l'introduction de *bornes tactiles* dans l'espace d'exposition (cf. article sur le site <http://leden.wordpress.com/>) et d'un système directionnel de diffusion du son (douche sonore) à l'entrée du bureau de Marie Curie.

La médiation scientifique et culturelle

Conception et réalisation d'expositions, quelques réalisations récentes :

Un siècle de radiothérapie (septembre 2005) : exposition actuellement dans l'amphithéâtre de l'Espace des Sciences de Paris (ESPCI). Elle a été dupliquée sous une forme plus adaptée à l'itinérance (bâches enroulées) et a été présentée à la Bibliothèque Universitaire de Reims (Fête de la Science 2006).



Bureau de Marie Curie
© Musée Curie

¹ - en 2004, première participation aux Journées Européennes du Patrimoine (ouverture exceptionnelle le week-end avec conférences), plus de mille visiteurs se sont présentés en deux jours ! L'espace de visite était saturé.

Marie Curie, itinéraire d'une femme (exposition de photographies N&B): Sancellemoz-Plateau d'Assy (été 2004), Créasciences-Bergerac (fin 2005), Mairie des Lilas (printemps 2006), Grignan (07/2006), Mairie de Boulogne-Billancourt (09/2006), Castres (Centre et musée Jean Jaurès, 11/2006)... exposition traduite en allemand pour une itinérance en Allemagne (juillet 2004/fin 2005).

Marie Curie, a life: exposition biographique bilingue (anglais et français). Inaugurée à Boston en octobre 2006 (French-American Innovation Day), cette exposition bénéficie du soutien du ministère des Affaires étrangères. Après une itinérance aux États-Unis, l'exposition est présentée actuellement à Manchester.

Pierre Curie, l'homme, le scientifique (été 2006, centenaire de la mort de Pierre Curie): exposition réalisée en collaboration avec le Panthéon (Monum) et l'Espace des Sciences de Paris (ESPCI).

De la découverte de la radioactivité à la Fondation Curie (2004); *Dans le jardin de Marie Curie* (2005); *Irène Joliot-Curie, une scientifique du XX^e siècle* (2006): expositions temporaires de plein air sur les grilles des rues d'Ulm et Curie.

Prêts d'instruments et d'objets:

- Panthéon-Monum (*Pierre Curie, l'homme, le scientifique*, été 2006)
- CEA (Espace Zoé, Fontenay-aux-Roses): dépôt
- Nobel Museet (Stockholm et itinérance USA, Japon, Europe 2001/2006)
- Espace des sciences de Paris (ESPCI): dépôt
- Observatoire de Besançon (Fête de la Science 2005): prêt temporaire
- Musée des Arts et Métiers (*Doisneau chez les Joliot-Curie, un photographe au pays des physiciens*, juin-octobre 2005): prêt temporaire
- Université P. et M. Curie (Paris 6): *Marie Curie, première « professeure » à l'Université* centenaire du cours inaugural de Marie Curie (*envie d'aphi*, nov. 2006)

Quelques publications récentes, utilisant les fonds documentaires ou l'iconographie du musée:

Marie Curie, femme savante Sainte Vierge de la science? (F. Balibar, Découvertes Gallimard n°497, 2006)

Doisneau chez les Joliot-Curie, un photographe au pays des physiciens (catalogue d'exposition, 2005)

Pionniers de la radiothérapie (J.-P. Camilleri, J. Coursaget, EDP Sciences, 2005)

Les Curie, pionniers de l'atome (P. Radvanyi, Belin, 2005)

Histoire de la Radioactivité (R. Bimbot, Vuibert/Adapt, 2006)

Autres réalisations ou contributions

Marie et Irène Curie: création d'une adaptation théâtrale de la correspondance entre Marie Curie (interprétée par Geneviève Casile) et sa fille Irène (Isabelle Carré) pour une représentation lors du festival de la correspondance de Grignan (juillet 2006).

La « méthode Curie » pour la mesure de la radioactivité: film documentaire de 8 min réalisé en 2006 et diffusé pendant l'exposition sur Pierre Curie au Panthéon (Monum-ESPCI), ainsi qu'à la Mairie de Boulogne-Billancourt (exposition numérique *Marie Curie, femme de science*, en collaboration avec le Leden et l'Université Paris 7).

Contribution à la réalisation de plusieurs films documentaires:

Marie Curie vue par Marie-Christine Barrault (France 2, 2004); *Le plus grand Français de tous les temps – Marie Curie* (France 2/TV5 Monde, 2005); *Questions Sciences – Radioactivité* (magazine scientifique, France 5, 2006); *Lise Meitner* (2006, Rosemary Reed Prod. Ltd).

Journal de l'Institut Curie: rédaction d'articles (partie « histoire »).



PARTENAIRES PRINCIPAUX

- Association Curie et Joliot-Curie
- Institut Curie
- CNRS-IN2P3
- LEDEN (Laboratoire d'Évaluation et de Développement pour l'Édition Numérique)
- Espace des Sciences de Paris (ESPCI)
- DRRT-DRAC Ile de France
- Musée des Arts et Métiers
- Ministère des Affaires Étrangères (DGCID)
- Panthéon (MONUM)
- Mairie du V^e arrondissement
- AREVA (Festival de la correspondance, Grignan)
- EDP Sciences : colloque, exposition et publication « la radiothérapie »
- CEA (Espace Zoé, Fontenay-aux-Roses)
- Université Pierre et Marie Curie (Paris 6)