

Rapport d'activité 1998 2000

IN2P3

Institut
National
de Physique
Nucléaire
et de Physique
des Particules



Rapport d'activité 1998 2000

IN2P3

Institut
National
de Physique
Nucléaire
et de Physique
des Particules

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

● PAGE 6

AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

● PAGE 8

PARTENARIATS

● PAGE 134

PROGRAMMES ET STRUCTURES

● PAGE 144

SIGLES ET ACRONYMES

● PAGE 156

TABLE DES MATIÈRES

● PAGE 160



© CNRS/F. Jannin

Un rapport d'activité est toujours une étape qui permet d'apprécier les évolutions scientifiques des quelques dernières années.

En physique des particules, la moisson de résultats du LEP a mis en évidence une confirmation expérimentale fine du Modèle standard, théorie prédictive des interactions électrofaibles et des interactions fortes.

Par ailleurs, les études théoriques entreprises en particulier pour l'intégration des interactions gravitationnelles dans le monde quantique suggèrent que l'espace comporte plus de quatre dimensions. L'origine de la masse, l'existence d'un monde supersymétrique, l'existence de dimensions supplémentaires, nous voilà en ordre de bataille pour l'utilisation du futur accélérateur du Cern, le LHC.

Dans le domaine des neutrinos, l'observation indirecte de l'existence d'une masse pour ces particules élémentaires encore bien mystérieuses et la non-conservation du nombre leptonique ouvrent une fenêtre au-delà des théories actuelles, tant en cosmologie qu'en physique des particules.

En physique nucléaire, la connaissance de l'équation d'état de la matière a progressé: un état déconfiné de la matière - le plasma de quarks et de gluons, prédit par la théorie de la chromodynamique quantique - a été observé tandis qu'au Ganil, une transition liquide-gaz dans la matière nucléaire a été mise en évidence grâce à l'étude détaillée du processus de multifragmentation. Par ailleurs, les premières expériences ont été réalisées auprès du Thomas Jefferson National Laboratory aux États-Unis, sur la structure des hadrons et des noyaux légers.

L'accès à des conditions extrêmes de la matière nucléaire - noyaux exotiques très riches ou très pauvres en neutrons ou noyaux superdéformés en réponse à des excitations de rotation très collective du noyau - a permis de faire largement progresser la connaissance de la structure du noyau atomique. En particulier, l'exploration des noyaux à la limite de la stabilité nucléaire, comme le noyau doublement magique ^{48}Ni récemment découvert, nous éclaire sur des comportements quantiques tout à fait nouveaux: modification de la structure en couches, noyaux à halos de neutrons, molécules nucléaires... Spiral, le nouvel outil du Ganil qui produit des faisceaux d'ions exotiques et qui vient de démarrer, va permettre une exploration beaucoup plus poussée de ces états de la matière liés aussi à la cosmologie et à l'astrophysique.



Ces conditions extrêmes de la matière sont à l'origine des phénomènes les plus violents dans l'Univers. L'étude de ces phénomènes à travers les astroparticules permet de connecter physique nucléaire, physique des particules et astrophysique. L'observation récente de sources de photons gamma de très haute énergie en est un exemple. Un autre exemple, sur une tout autre question, concerne la nature de la matière noire dans l'Univers, qui pourrait bien être liée à la supersymétrie. L'étude des supernovæ lointaines pourrait bien permettre de trouver une explication commune à l'énergie du vide et à l'origine de la masse, dans un mécanisme de Higgs appliqué à l'Univers primordial.

Toute cette physique fondamentale ne peut se faire que grâce à de nouveaux outils, à des méthodes innovantes : ainsi, les deux dernières années ont été marquées par le développement d'idées nouvelles en ce qui concerne le calcul distribué, idées qui convergent vers l'utilisation intensive d'une grille de calcul. Dans le domaine technologique, les moyens mis en jeu sont importants, et les évolutions techniques ont été anticipées, nonobstant les tensions du marché du travail dans l'informatique et l'électronique.

Enfin, les compétences scientifiques et technologiques de l'Institut doivent aussi être mises au service d'autres sciences et de la société. La frontière avec la biologie s'est développée et le renforcement de ces liens doit être encore poursuivi, notamment pour l'instrumentation en imagerie médicale. Le programme interdisciplinaire sur l'aval du cycle électronucléaire, qui vise à proposer des solutions pour le devenir des déchets nucléaires, a beaucoup progressé ; pour ne citer qu'un seul exemple, le développement des simulations stochastiques de réacteurs est directement issu de la physique subatomique moderne.

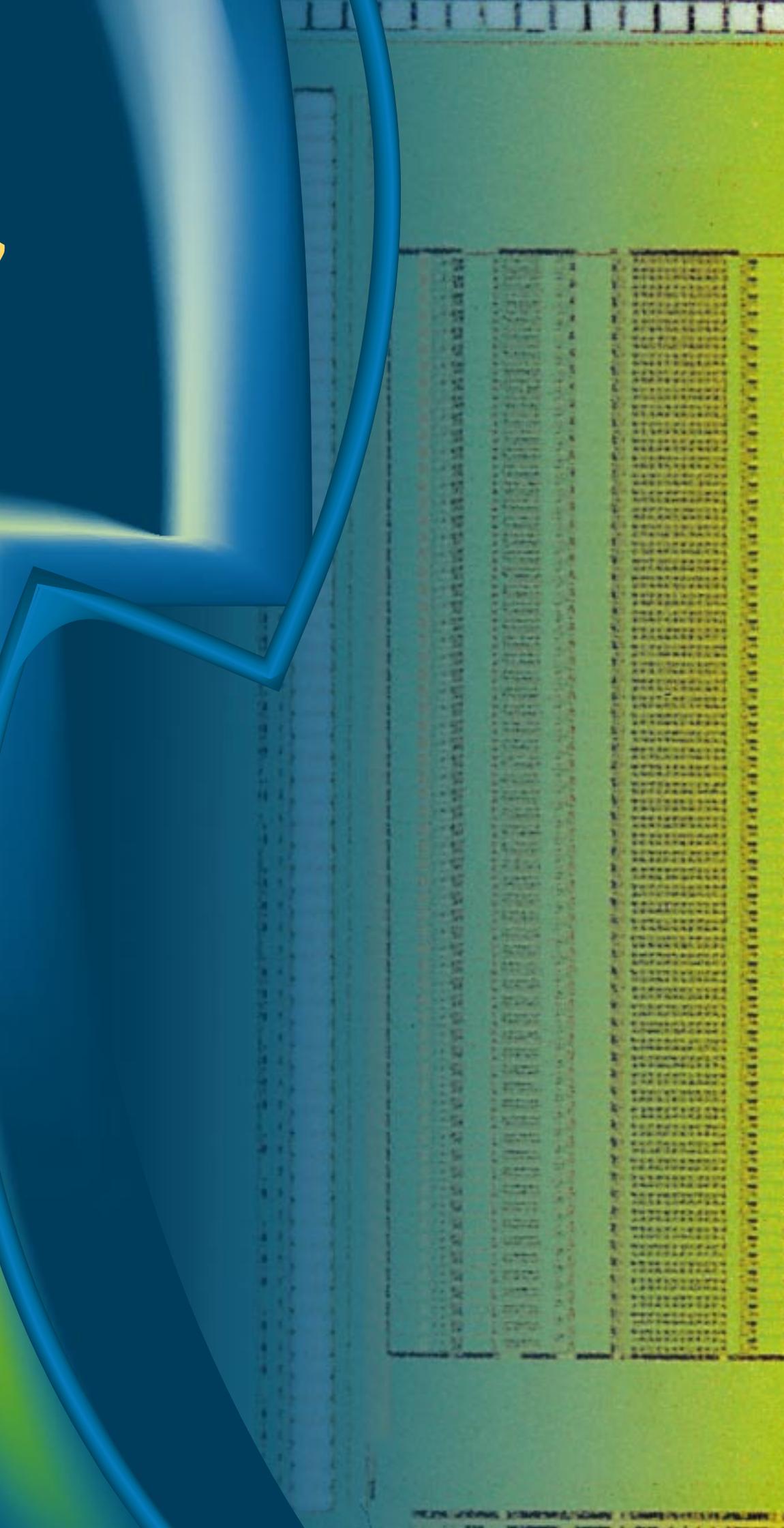
De nombreux autres développements techniques ont été réalisés dans les laboratoires de l'IN2P3, dans des domaines très variés. Une partie de ces techniques sont appliquées dans des champs scientifiques nouveaux, et parfois tout à fait étrangers aux préoccupations immédiates de l'Institut comme l'exobiologie.

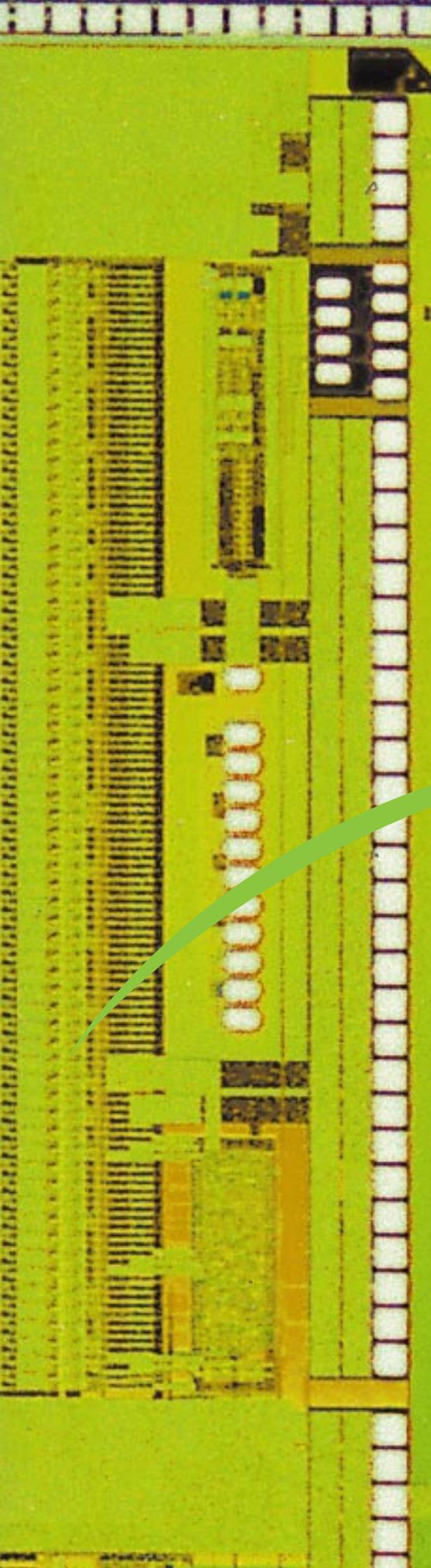
Tout le travail de l'IN2P3, qu'il se situe dans les champs scientifique, technique ou administratif, porte le témoignage du dynamisme des personnels ; la lecture de ce document, je l'espère, le montrera.

Jean-Jacques Aubert

Directeur de l'IN2P3

AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES





physique des particulespage 10

physique du nucléon et de la matière nucléaire ...page 34

astroparticules, neutrinos et cosmologiepage 56

recherches interdisciplinairespage 78

aval du cycle électronucléairepage 94

développements technologiquespage 104

transferts de technologiepage 124



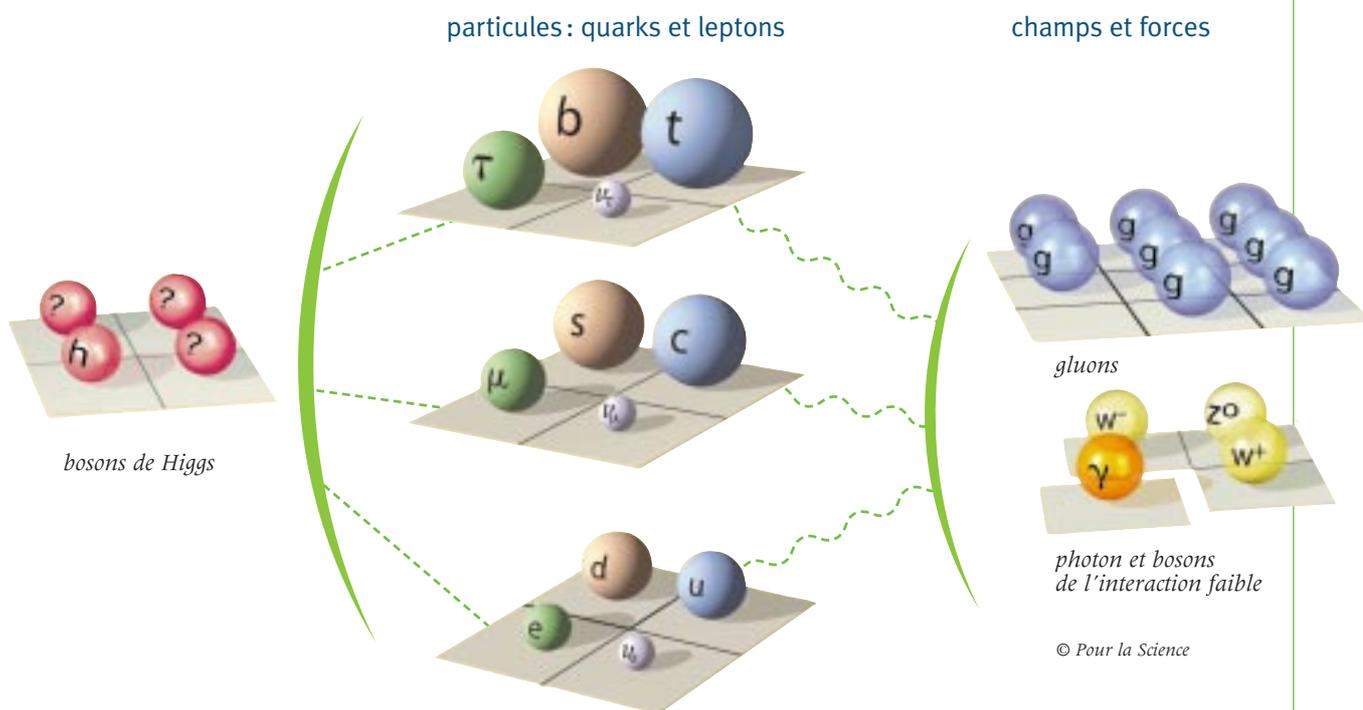


PHYSIQUE DES PARTICULES

Les deux principaux thèmes en physique des particules aujourd'hui sont liés à la compréhension de la brisure de symétries. La première symétrie concerne l'équivalence entre la force électromagnétique et la force faible, prouvée avec une très bonne précision par l'ensemble des résultats du LEP et de Hera. Toutefois, les masses des bosons qui sont les vecteurs de ces forces sont très différentes: nulle pour le photon, cette masse est de cent fois celle d'un proton pour les bosons Z et W, vecteurs de la force faible. Cette brisure de symétrie électrofaible s'explique dans le Modèle standard par l'existence d'un boson de Higgs, qui fait donc l'objet d'intenses recherches soit directes, soit indirectes, par le biais des mesures de précision. Les constructions théoriques de la physique au-delà du Modèle standard, qui tentent d'en corriger les défauts structurels, prévoient plusieurs bosons de Higgs dont le plus léger a des propriétés très voisines de celui du Modèle standard, mais également l'existence de nouvelles particules.

La deuxième symétrie est celle qui relie la matière et l'antimatière (dite CP). On sait depuis 1964 que cette symétrie est, elle aussi, brisée. La subtile différence entre les propriétés des particules et des antiparticules est indissociablement liée à la prépondérance de la matière sur l'antimatière dans l'Univers. Si le Modèle standard prévoit une telle violation, il est incapable d'expliquer le niveau de cette prépondérance. C'est pourquoi il est essentiel de mesurer de la façon la plus complète ses différentes prédictions, et c'est ce qui explique tout l'intérêt des nouvelles expériences menées dans la période 1998-2000: mesure d'un nouvel aspect de la violation de CP dans le système des kaons et premières mesures dans le système des mésons beaux.

◀ Une phase de la fabrication du calorimètre à tuiles d'Atlas au Cern.
© Cern



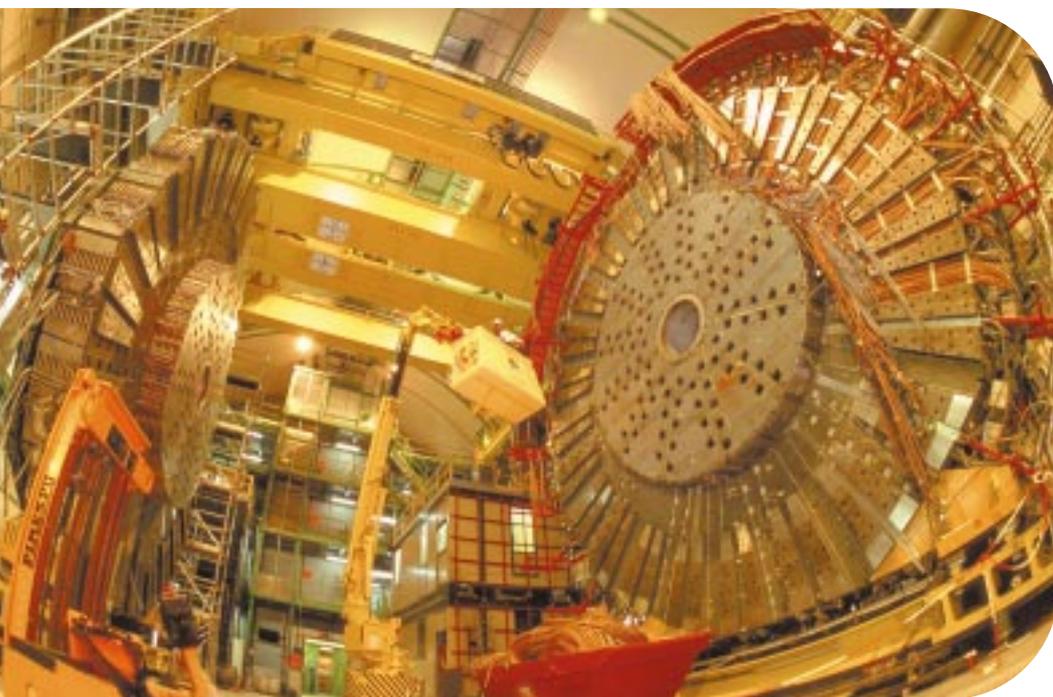
LE MODÈLE STANDARD

La physique des particules actuelle est gouvernée par un modèle théorique appelé « Modèle standard » élaboré au cours des années soixante. Selon ce modèle, les particules élémentaires qui constituent la matière sont des fermions, car de spin $1/2$. Elles sont au nombre de douze, réparties en trois familles. La première famille suffit à elle seule à la description de notre environnement. Elle est constituée de deux leptons, l'électron et le neutrino qui lui est associé, et de deux quarks u et d (up et down de charge électrique $2/3$ et $-1/3$) qui composent le proton et le neutron. Les deux

autres familles sont des répliques de la première, mais de masses plus élevées.

Les particules sont soumises à des interactions fondamentales portées par des bosons (particules de spin 1) dits bosons vecteurs qui en sont les messagers : le gluon pour l'interaction forte, le photon pour l'interaction électromagnétique et les bosons W et Z pour l'interaction faible.

L'interaction gravitationnelle propagée par le graviton est la quatrième interaction fondamentale, dont le Modèle standard ne rend pas encore compte.



*Démantèlement
de l'expérience Delphi:
Les millions de câbles
ont disparu,
l'acier est à nu!*
© CERN



LA TRAQUE DU BOSON DE HIGGS

Elle a été marquée par la montée continue en énergie et en luminosité du collisionneur LEP du Cern, lancé à la chasse du boson de Higgs. Cette particule constitue la clé de voûte du Modèle standard car elle permet de comprendre la façon dont les particules acquièrent une masse. Le talent des ingénieurs du Cern a permis au LEP de dépasser progressivement le seuil de 200 GeV pour atteindre fin 2000 l'énergie de 209 GeV, grâce à laquelle on a atteint une sensibilité de 116 GeV/c pour la recherche directe du Higgs. Une indication de signal à 115 GeV pour sa masse a été obtenue fin 2000. Malgré cela, la difficile décision d'arrêter le LEP a été prise pour ne pas retarder la construction du LHC qui permettra de lever le voile définitivement sur ce secteur. Le LEP termine ainsi sa carrière en beauté car l'ensemble des mesures de haute précision effectuées au cours de cette décennie, tant sur le pic du Z^0 de 1989 à 1995 que dans la phase à plus haute énergie, avec notamment la mesure de la masse du boson W , ont permis de montrer l'éclatant succès des prédictions du Modèle standard, vérifiées à 0,1 % près. Comme ces prédictions incluent les effets provenant de la présence d'un boson de Higgs, l'accord entre la théorie et les données constitue une preuve indirecte de son existence et permet d'en déduire en particulier une limite supérieure sur sa masse qui doit être plus petite que 200 GeV. Il devrait ainsi être accessible aux accélérateurs de plus haute énergie (Tevatron et LHC). Le flambeau de la recherche du Higgs, et plus généralement de la recherche de nouvelles particules lourdes, passe maintenant de l'autre côté de l'Atlantique et c'est vers le collisionneur proton-antiproton de Fermilab, le Tevatron, que se

Quatre détecteurs
à la recherche
de nouvelles
particules au LEP.
[page 18](#)

Mesures
électrofaibles
et masse du boson
de Higgs.
[page 20](#)

La physique
du boson W au LEP.
[page 21](#)



tourment tous les regards. L'Institut s'est impliqué dans l'expérience D0 depuis début 1998 et a participé aux profondes améliorations de ce détecteur sur toute la période 1998-2000 pour se préparer au redémarrage du Tevatron, prévu au printemps 2001. La participation de l'Institut à cette expérience est très forte puisque six laboratoires y contribuent maintenant, en raison de son double attrait: un fort potentiel de découverte dans les cinq ans à venir et un terrain incomparable d'entraînement pour le LHC. Les réalisations techniques dont l'Institut a la charge ont été fournies en temps et en heure, et c'est avec beaucoup d'impatience que l'on attend en 2001 le nouveau départ de la machine. Le calendrier du LHC, réactualisé fin 2000, prévoit un démarrage de l'accélérateur en janvier 2006 avec une prise de données pilote en avril 2006 et la première prise de données de physique d'août 2006 à février 2007. La statistique accumulée pendant cette période sera suffisante pour découvrir le boson de Higgs quelle que soit sa masse et d'éventuelles nouvelles particules, en particulier les particules supersymétriques prévues dans les modèles du même nom qui postulent une symétrie supplémentaire entre les fermions et les bosons, ou les signes liés à la présence de dimensions supplémentaires dans l'Univers. Atlas et CMS ont su, durant la période 1998-2000, faire face au passage très délicat de la préproduction à la construction industrielle, maintenant en cours. Les difficultés n'ont pas manqué, mais, grâce au travail acharné des équipes techniques et des physiciens engagés sur ces différents fronts, on peut maintenant considérer que l'essentiel de ces problèmes est résolu. Les premières productions en série d'éléments définitifs ont donc pu commencer fin 2000 pour atteindre un rythme de croisière en 2001.

Potentiel de découvertes au Tevatron sur D0.
page 27

Atlas et le boson de Higgs.
page 22

CMS: du développement à la production.
page 23

Cristaux de tungstate de plomb pour CMS produits en Russie, examinés ici par l'appareil automatique de caractérisation Accos au Cern.
© CERN

Les groupes de l'Institut engagés dans le détecteur de trajectoires de CMS ont eu à vivre des moments particulièrement éprouvants lorsque la collaboration CMS a décidé, fin 1999, de changer la technologie du détecteur au profit des détecteurs

au silicium et d'abandonner la technologie des détecteurs gazeux à micropistes (MSGC), malgré la qualité des résultats obtenus et les résultats satisfaisants des tests faisceaux qui ont permis de la qualifier définitivement. Ces groupes, qui s'étaient énormément investis dans les MSGC, se sont alors reconvertis dans la nouvelle technologie silicium, reconversion qui s'est très bien passée comme en témoignent les importantes responsabilités qui leur ont été confiées.

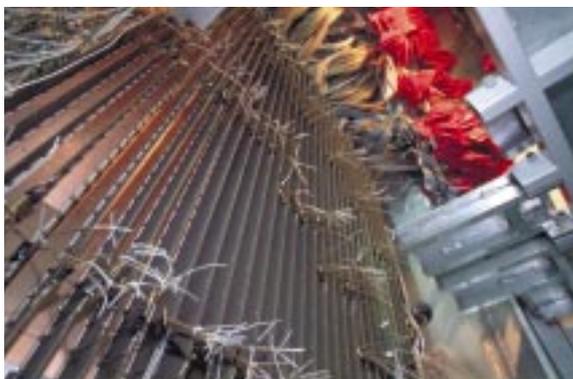


L'ÉTUDE DE LA VIOLATION DE SYMÉTRIE CP

La violation directe de CP dans le système des kaons neutres.
page 24

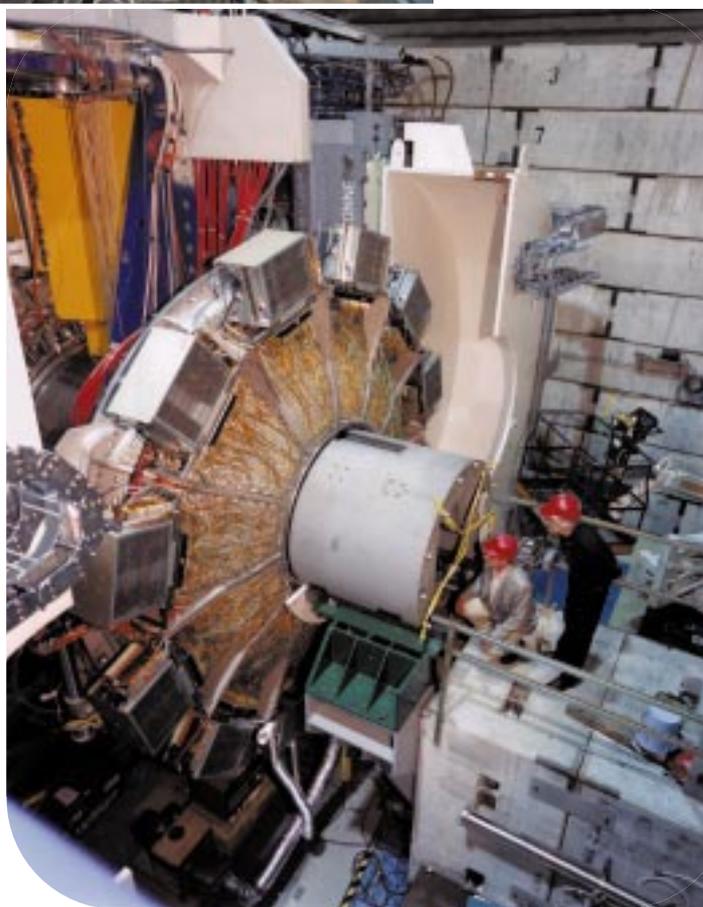
Le domaine de la violation de CP a été particulièrement riche dans la période considérée.

L'expérience NA48, qui se déroule au Cern, a apporté une réponse définitive à une question datant de plus de 35 ans: existe-t-il une violation directe de la symétrie CP? Ce mécanisme est prévu dans



Calorimètre à krypton liquide de NA48.
© CERN

le Modèle standard mais son effet est très faible, aussi il a fallu des trésors de patience et d'ingéniosité aux physiciens de NA48 pour déjouer les nombreux obstacles, et atteindre fin 2000 la précision extraordinaire de 0,025% sur le paramètre ϵ'/ϵ . Cette valeur mesurée, totalement incompatible avec 0, prouve la violation directe de CP. Il s'agit là d'un résultat très important car il permet d'exclure définitivement beaucoup de modèles théoriques qui pouvaient prétendre jusque-là expliquer la violation de CP dans le système des kaons. D'un autre côté, l'expérience BaBar, installée au Slac (Stanford Linear Accelerator Center) en Californie, a démarré véritablement en trombe: les premières collisions ont été observées fin 1998 alors que le détecteur était encore en cours d'assemblage. Un dispositif spécial de mesure des bruits de fond produits par la machine a été mis en place, ce qui a permis de mesurer l'ampleur du problème et de s'en prémunir à temps. Le détecteur a été installé



Chambre DIRC du détecteur BaBar pour l'étude de la violation de symétrie CP au Stanford linear accelerator center.
© SLAC

en mars 1999, avec une forte participation des équipes de l'Institut, après un temps de construction record, et a enregistré ses premières collisions dès le mois de mai de la même année. La machine PEP-II a ensuite atteint puis dépassé en moins d'un an ses performances nominales, ce qui a permis à l'expérience d'accumuler, jusqu'à la fin 2000, suffisamment d'événements pour établir, pour la première fois et de façon définitive, la violation de CP dans le système des mésons B. La moisson ne s'arrêtera pas en si bon chemin car les performances, elles aussi nominales, du détecteur et, en particulier, du compteur à radiation

BaBar: des premières collisions à la révélation d'une nouvelle violation de symétrie CP.
page 25

Cerenkov Dirc construit en bonne partie dans les laboratoires de l'Institut permettront de réaliser beaucoup d'autres mesures qui apporteront des contraintes à l'ensemble des prédictions théoriques dans le secteur du méson B.

Les résultats conjoints des expériences NA48 et BaBar sont, de façon peut-être paradoxale, une confirmation éclatante des prédictions du Modèle standard dans un secteur où il était *a priori* fragile puisqu'on ne parvient toujours pas à comprendre l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers à partir de ce modèle. Cela constitue donc la motivation profonde des études supplémentaires que vont entreprendre, dans les années qui viennent, BaBar et LHCb.

Cette dernière expérience, approuvée formellement en 1998, a pour but une mesure très précise de la violation de CP dans le secteur des mésons beaux (et en particulier dans celui du méson beau étrange qui n'est pas couvert par BaBar). Elle va se dérouler au LHC à partir de 2006. Les équipes de l'IN2P3, qui se sont beaucoup impliquées dans l'étude de la physique et du calorimètre électromagnétique, ont permis d'améliorer notablement la sensibilité de l'expérience aux états finals contenant des pions neutres. Les responsabilités de construction de chaque groupe ont été clairement définies et sont concentrées sur le calorimètre électromagnétique et le déclenchement de l'expérience, ce dernier étant assurément l'un des défis majeurs à résoudre, compte tenu du taux de croisement à 40 MHz et de la faible spécificité des événements dans un grand nombre de cas. Un banc de test a été construit pour sélectionner le bon type de photomultiplicateurs.

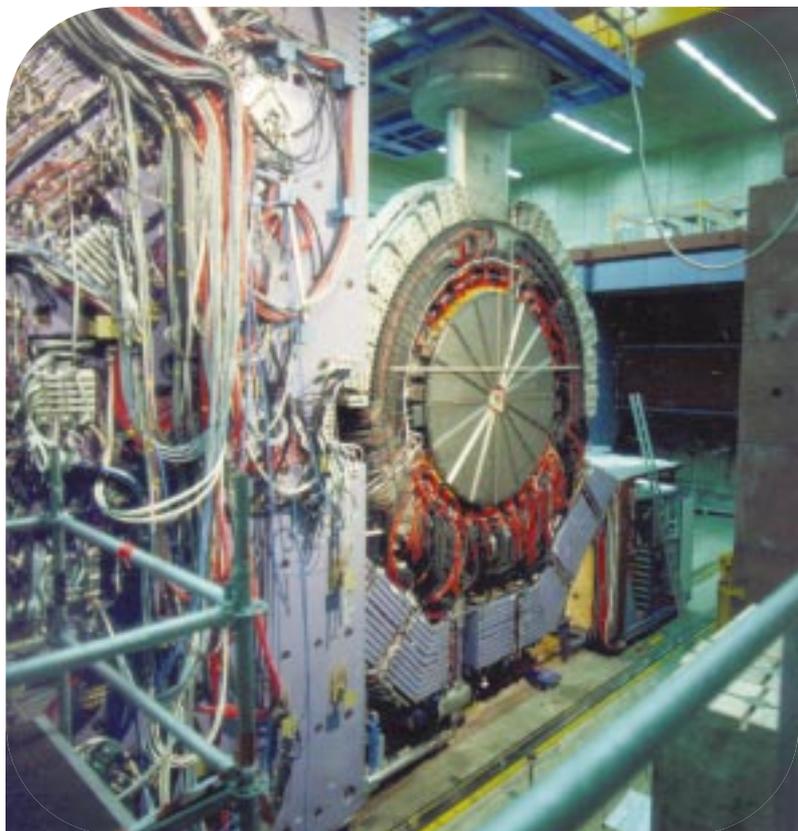
LHCb: la seconde génération des expériences de violation de symétrie CP.
page 26

Le détecteur H1 au collisionneur électron-proton Hera à Desy.
© Desy

STRUCTURE INTERNE DU PROTON ET RECHERCHE DE NOUVELLES PARTICULES

De la structure du proton aux particules et interactions au-delà du Modèle standard.
page 28

L'expérience H1, de son côté, a poursuivi avec succès l'exploration des collisions électron-proton à très haute énergie auprès de l'accélérateur Hera au laboratoire Desy de Hambourg, avec le double objectif d'étudier avec une précision de plus en plus grande la structure interne du proton et de rechercher de nouvelles particules. Sur le premier thème, de nombreux résultats importants ont été obtenus, notamment sur la composante gluonique du proton et le comportement des quarks de valence à petit x (x désigne la fraction de l'impulsion du proton transportée par les quarks). Ces résultats ont permis de démontrer la



validité de la chromodynamique quantique, théorie de l'interaction forte, dans son régime aussi bien perturbatif que non perturbatif. Du côté des nouvelles particules, H1 a observé, avec des leptons isolés à grand moment transverse, des événements étranges qui intriguent les physiciens. Une plus forte statistique est nécessaire pour pouvoir trancher et la machine se prépare donc à redémarrer en 2001 avec une haute luminosité. Ce ne sera pas la seule amélioration: les faisceaux seront également polarisés longitudinalement, ce qui permettra d'augmenter considérablement le champ des investigations de l'expérience. L'Institut contribue très significativement à cet effort en construisant un nouveau luminomètre et un nouveau polarimètre afin de pouvoir mesurer avec encore plus de précision les caractéristiques de ces nouveaux faisceaux.

PERSPECTIVES

Malgré la densité du programme en cours, il est néanmoins indispensable de réfléchir à l'avenir à long terme de la discipline. Les objectifs de ce programme à l'horizon 2010 sont doubles: d'une part, réaliser les mesures les plus précises possible de l'ensemble des propriétés (nombre quantique, modes de désintégration, couplages) de toutes les particules qui auront été découvertes au LHC - en particulier du ou des bosons de Higgs -, afin de caractériser la théorie dans laquelle elles s'inscrivent; d'autre part, explorer le domaine d'énergie au-delà du LHC. Un collisionneur électron-positon fournissant une énergie de l'ordre du TeV semble être l'outil idéal pour répondre au premier objectif, tandis que d'autres machines (collisionneurs e^+e^- ou $\mu^+\mu^-$ de 3 à 5 TeV, collisionneurs proton-proton de 100 TeV) pourraient répondre au deuxième dans un avenir plus lointain.

Cette réflexion autour du programme futur s'est articulée autour de plusieurs axes:

- participation aux groupes de travail sur la physique et le détecteur auprès d'un collisionneur e^+e^- de 1 TeV;
- efforts de R&D sur les nouvelles techniques de détection à mettre en œuvre dans ce domaine (calorimétrie à haute granularité, chambres à projection temporelle, nouveaux détecteurs de vertex);
- organisation de la réflexion dans l'ensemble de la communauté sur ce sujet, avec comme point d'orgue les journées de prospective de Verneuil, organisées conjointement avec le Dapnia du CEA en octobre 2000.

Depuis lors, ces réflexions ont permis de définir la position française sur les nouveaux projets d'accélérateurs, en prévision des différents forums internationaux prévus sur ce thème en 2001.

La supersymétrie
et les dimensions
supplémentaires.
page 30

QUATRE DÉTECTEURS À LA RECHERCHE DE NOUVELLES PARTICULES AU LEP

Durant ces quatre dernières années, l'énergie dans le centre de masse du LEP est passée de 170 GeV à 208 GeV et une luminosité totale d'un peu plus de 2,5 inverse femtobarns (fb^{-1}) a été accumulée par l'ensemble des expériences Aleph, Delphi, L3 et Opal, baptisé Adlo. Cette double performance du LEP - montée en énergie conjuguée à une haute luminosité - a permis d'atteindre des sensibilités de détection uniques pour la recherche du boson de Higgs comme pour celle des particules supersymétriques (Susy).

LE BOSON DE HIGGS

Dernière pièce manquante du Modèle standard, le boson de Higgs est introduit pour expliquer le mécanisme de brisure spontanée de la symétrie électrofaible. Au LEP, il est susceptible d'être produit en association avec le boson Z^0 . Les événements sont alors caractérisés par quatre fermions dans l'état final, deux venant du Z^0 et deux venant du boson de Higgs. Ce dernier se couplant préférentiellement aux fermions lourds, l'essentiel des événements recherchés contient une paire de quarks $b\bar{b}$ et une paire de quarks venant du Z^0 . Ce mode de désintégration, dit des « quatre

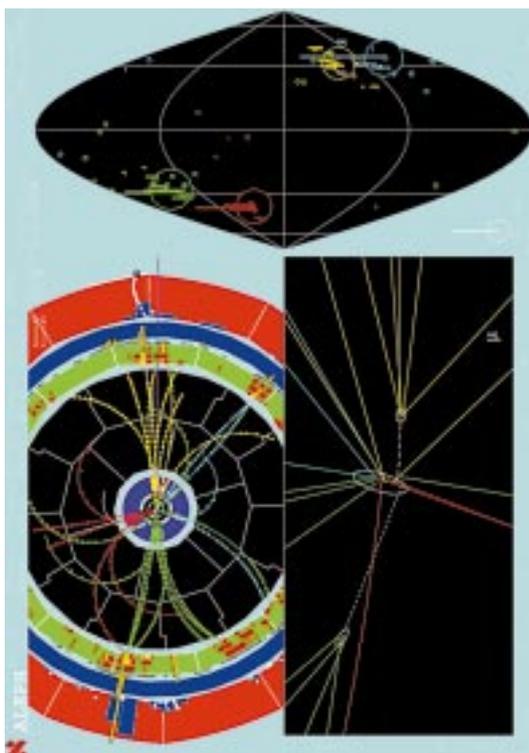
jets », est le canal phare de cette recherche. Tous les autres modes ont été bien sûr explorés pour atteindre la sensibilité de détection optimale. L'élément clé de cette recherche repose sur l'aptitude des analyses à reconnaître des quarks b , aptitude liée en particulier aux performances des détecteurs de vertex. Pour une luminosité intégrée d'environ 100 inverse picobarns (pb^{-1}), chaque expérience est arrivée à une sensibilité permettant d'atteindre un boson de Higgs de 113 GeV pour une énergie dans le centre de masse d'au moins 206 GeV.

Lors de la dernière prise de données, les physiciens du LEP ont mené une chasse palpitante: les quatre expériences ont combiné en ligne leurs données, il n'y avait donc plus qu'une seule expérience - Adlo. Cela a permis aux ingénieurs du LEP d'optimiser le fonctionnement du collisionneur - quelle énergie maximale dans le centre de masse? Pour quelle luminosité intégrée? Adlo observant une déviation de plus de deux écarts standard en octobre 2000 pour un boson de Higgs de 115 GeV (sa limite de sensibilité), le LEP a pris des données pendant un mois supplémentaire; la question de prolonger le LEP d'une année a été aussi débattue.

Les résultats des dernières combinaisons indiquent qu'un boson de Higgs plus léger que 114,1 GeV est exclu par Adlo à 95 % de degré de confiance, la limite attendue étant de 115,4 GeV. L'analyse du maximum de vraisemblance montre une préférence pour un boson de Higgs de 115,6 GeV. A cette masse, la probabilité pour que le bruit de fond produise un tel effet est de 3,4 %.

LES PARTICULES SUPERSYMÉTRIQUES

Par leur diversité et leurs potentialités, les recherches des particules Susy menées au LEP ont été très motivantes. Dans l'hypothèse de la conservation de la R-parité (1), la particule Susy la plus légère (LSP) est stable; les particules Susy, produites par paires, se désintègrent en la LSP plus leur partenaire du Modèle Standard. Le neutralino le plus léger est un candidat LSP: neutre et interagissant faiblement avec la matière, il est indétectable. Les événements Susy seront caractérisés par des paires d'objets (leptons ou jets de particules) non coplanaires, plus de l'énergie manquante emportée par la LSP. La sensibilité de détection dépend



Le candidat « quatre jets » le plus significatif sélectionné par Aleph avec une masse reconstruite de boson de Higgs de 114,3 GeV. Les deux jets associés au boson de Higgs sont deux jets- b bien étiquetés. L'événement est représenté dans la vue transverse à la ligne de faisceau, dans le plan des angles polaire et azimutal, puis dans une zone proche du point d'interaction.

de la différence de masse (ΔM) entre la particule Susy recherchée et la LSP. L'herméticité du détecteur et la bonne connaissance du bruit de fond provenant des processus du Modèle Standard ont été les atouts essentiels de ces recherches. Les paires de leptons scalaires, les quarks top ou bottom scalaires comme les paires de charginos ou de neutralinos ont été recherchées dans ce cadre.

Dans les cas optimistes, les taux de production de paires de charginos sont élevés et permettent d'atteindre des sensibilités proches de la limite cinématique. Pour cette recherche, il importe d'atteindre l'énergie maximale dans le centre de masse, ce qui a aussi influencé la stratégie de fonctionnement du LEP dans les derniers mois. Avec une luminosité intégrée de 32 pb^{-1} collectée à 207,5 GeV, aucun excès n'a été observé par ADLO et la limite inférieure obtenue sur la masse du chargino est de 103,5 GeV, dans le cas le plus favorable.

Le potentiel de découverte n'est pas toujours aussi favorable, il est alors capital d'avoir une grande statistique pour les processus de faible taux de production (leptons et quarks scalaires) ou de faible sensibilité ($\Delta M < 3 \text{ GeV}$). La recherche de production de paires de charginos avec un photon émis dans l'état initial a permis de sonder ces régions pour la première fois. Les limites absolues sur la masse du chargino sont meilleures que 85 GeV, indépendamment de ΔM .

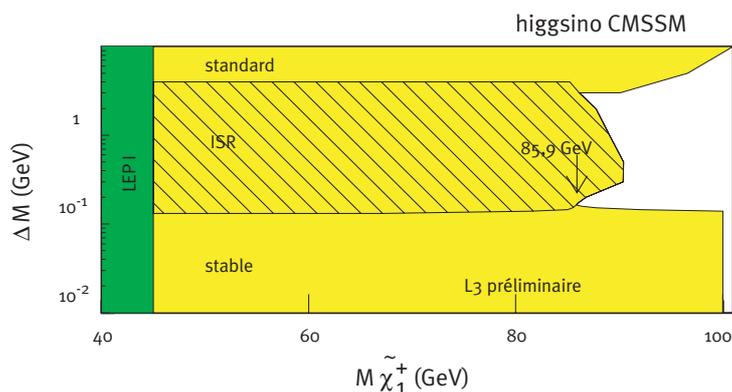
L'exploitation de tous les processus Susy accessibles au LEP a permis d'extraire une limite indirecte sur la masse de la LSP (le neutralino le plus léger) proche de 40 GeV. En incluant les contraintes apportées par les

recherches du boson de Higgs, la limite atteint 46 GeV pour certaines hypothèses.

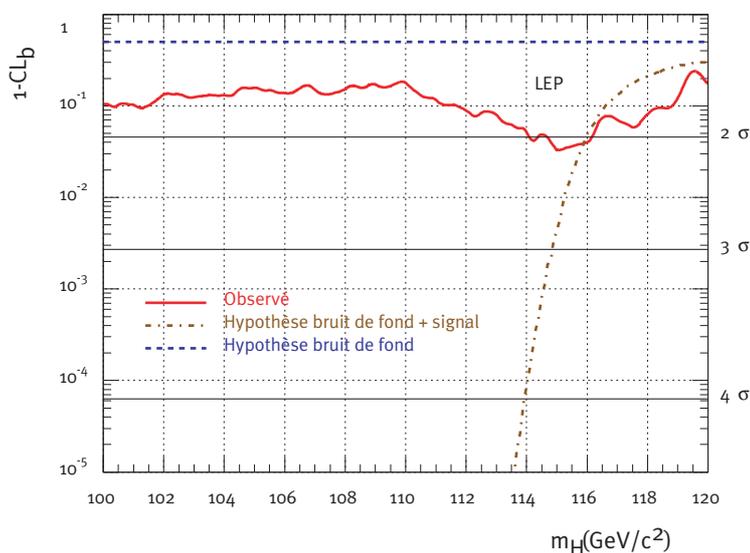
Le riche panorama de recherches, l'excellente performance des détecteurs, le fonctionnement optimal du LEP et l'exploitation des complémentarités des processus ont permis d'atteindre des résultats inégalés. Toutes ces conditions idéales et uniques pour les découvertes font bien sûr regretter l'arrêt du LEP. Il n'en reste pas moins que ces résultats et le progrès dans les interprétations ont ouvert de nouvelles perspectives de recherche auprès des futurs collisionneurs hadroniques ou e^+e^- .

(1) La R-parité vaut 1 pour les particules du Modèle standard et -1 pour leur partenaire supersymétrique.

La combinaison par L3 de la recherche des paires de charginos avec un photon émis dans l'état initial avec les recherches standard ($\Delta M > 3 \text{ GeV}$) ou celles des particules stables améliore considérablement les résultats de LEP I.



Résultat final combiné d'Adlo comparé aux hypothèses de bruit de fond uniquement (ligne tiret) ou de bruit de fond plus un signal de Higgs de 115,6 GeV (ligne tiret-pointillé). La probabilité de fluctuation du bruit de fond (1-CL) en fonction de la masse-test du boson de Higgs pour les données (ligne



POUR EN SAVOIR PLUS

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

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

<http://l3www.cern.ch/>

Higgs : <http://lephiggs.web.cern.ch/LEPHIGGS>

Susy : <http://lepussy.web.cern.ch/lepussy>

LABORATOIRES FRANÇAIS

DES COLLABORATIONS ALEPH, DELPHI ET L3

CNRS/IN2P3 : CPPM, IPN Lyon, ISN, LAL, LAPP, LPC

Clermont, LPNHE Paris 6/7, LPNHE Palaiseau, PCC.

CEA/DSM : Dapnia.

MESURES ÉLECTROFAIBLES ET MASSE DU BOSON DE HIGGS

De 1989 à 2000, les mesures de précision au LEP ont permis non seulement de conforter le cadre théorique du Modèle standard, mais aussi d'apporter des informations sur des particules qui, à ce jour, n'ont pas été observées directement. Au cours de ces dernières années, c'est principalement autour de l'étude du boson de Higgs que se sont concentrées ces mesures indirectes.

Au cours de leurs douze années d'existence, le LEP et ses quatre détecteurs ont permis d'explorer le Modèle standard de manière approfondie. Huit laboratoires de l'IN2P3 ont été impliqués dans trois de ces expériences (Alep, Delphi et L3). Un des faits marquants de ces études restera le grand pouvoir prédictif de la théorie électrofaible et sa capacité d'extraire des informations sur les propriétés de particules non directement observées ou observables, à partir des mesures de précision. Ainsi, en 1994, l'évaluation indirecte d'une masse de 179 ± 20 GeV/c² pour le quark top, confirmée peu de temps après par observation directe au Tevatron à Fermilab aux États-Unis, a définitivement conforté le cadre théorique.

Aujourd'hui, la question qui demeure encore et toujours concerne l'origine de la masse des particules. Selon le Modèle standard, le boson de Higgs en serait la clef. Cette particule interagirait avec elle-même, de telle sorte qu'un vide peuplé de Higgs en interaction serait moins « énergétique » qu'un vide... vide. Cette propriété, en brisant spontanément la symétrie à la base du modèle électrofaible, permettrait aux particules d'acquiescer une masse en fonction de leur couplage avec le Higgs.

Dix-sept paramètres dépendant eux-mêmes de nombreuses mesures ont été étudiés au LEP. L'ensemble des résultats expérimentaux du LEP, du Tevatron et du Slac a été mis en commun et analysé

afin d'en extraire des contraintes sur le Modèle standard et notamment sur la masse du Higgs. Si les combinaisons de ces mesures sont globalement en faveur d'un boson de Higgs léger d'environ 90 GeV/c², avec une limite supérieure de 196 GeV/c² à un niveau de confiance de 95 %, certaines des mesures ne sont que marginalement compatibles entre elles. En particulier, parmi les trois quantités les plus sensibles à la masse du Higgs, deux conduisent à privilégier un Higgs de masse inférieure à 50 GeV/c² (m_w et A_{LR}) et une (A_{FB}^{bb}) à un Higgs de près de 500 GeV/c². Les probabilités d'observer de telles déviations par rapport aux prédictions du Modèle standard sont de quelques pour-cent. Cette faible compatibilité ne permet cependant pas de trancher entre une fluctuation statistique et les premiers signes d'une nouvelle physique au-delà du Modèle standard.

En attendant que le LHC permette de rechercher le Higgs jusqu'à 1000 GeV/c², une diminution de près de 50 % des erreurs sur l'estimation de sa masse semble être possible grâce, en particulier, aux nouvelles mesures de la masse du boson W et du quark top prévues au cours du Run II du Tevatron. Par ailleurs, comme pour toutes les futures mesures électrofaibles, la confrontation, dans le cadre du Modèle standard, de ces nouveaux résultats avec les mesures de référence obtenues au LEP et à Slac est très attendue.

L'ensemble des mesures électro-faibles donne une valeur de 88^{+33}_{-33} comme étant la plus probable pour la masse du Higgs, valeur légèrement inférieure à celle déjà exclue par les mesures directes à LEP 2. Cette figure représente les observables en fonction de $\sin^2\theta_{eff}^{lept}$, l'angle de mélange entre les forces électro-magnétique et faible.

POUR EN SAVOIR PLUS

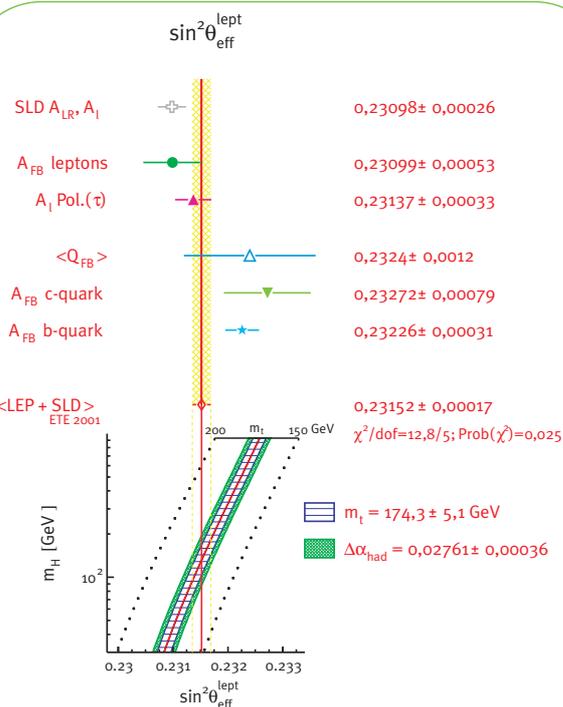
ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD, *Physics Reports*, soumis pour publication.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DES COLLABORATIONS ALEPH, DELPHI ET L3

CNRS/IN2P3 : CPPM, IPN Lyon, IReS, LAL, LAPP, LPC Clermont, LPNHE Paris 6/7, LPNHE Palaiseau, PCC.

CEA/DSM : Dapnia.



LA PHYSIQUE DU BOSON W AU LEP

Presque vingt ans après la mise en évidence directe du boson W au SPS, la physique du W, à travers les mesures de sa section efficace de production, des couplages à trois et quatre bosons et de sa masse, est devenue une physique de précision grâce aux dix mille paires de bosons W⁺W⁻ collectées au LEP2 par chacune des quatre expériences. En particulier, la précision sur la mesure de sa masse, désormais meilleure que le pour mille, permet de tester le Modèle standard et de prédire la masse du boson de Higgs.

Au LEP, les bosons W sont principalement produits par paires, chacun se désintégrant soit en paires de quark-antiquark (68%), soit en lepton-neutrino (11% par saveur). Suivant leur mode de désintégration, on distingue trois classes d'événements: le canal hadronique contenant quatre jets, le canal semi-leptonique caractérisé par deux jets, un lepton et de l'énergie manquante, et enfin le canal leptonique contenant deux leptons et de l'énergie manquante.

La section efficace totale de production est mesurée par une méthode de comptage; la précision obtenue est de 1 % à comparer avec une erreur théorique qui est passée de 2 à 0,5 % en 2000. Les sections efficaces partielles donnent accès aux différents taux de désintégrations du boson W qui sont en accord avec les prédictions théoriques.

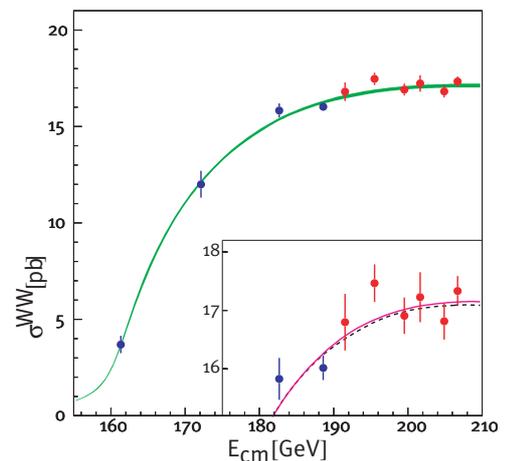
L'étude des couplages à trois bosons «WW γ et WWZ» ou quatre bosons «WWZ γ et WWZZ» a bénéficié de la montée en énergie à LEP2. En combinant la mesure de la section efficace de production de paires de W avec les distributions des variables angulaires des quatre fermions, on accède aux couplages à trois bosons qui pourraient témoigner d'une nouvelle physique à plus haute énergie si l'on atteint une sensibilité de l'ordre du pour mille. La précision actuelle atteinte au LEP sur la mesure de ces couplages est de l'ordre du pour cent. Elle surpasse les résultats obtenus au Tevatron.

La masse du Z a été calculée en analysant la forme de la résonance du Z et une précision de $2,10^{-5}$ a été atteinte au LEP1. La masse du boson W est mesurée à partir de la distribution de la masse invariante reconstituée des produits de désintégration des W. En 1996, la précision sur la masse du W était de 220 MeV, dominée

par l'erreur statistique. Cette erreur statistique est réduite actuellement à 20 MeV. L'essentiel des travaux s'est concentré sur l'estimation de l'ensemble des erreurs systématiques puis sur la réduction de ces erreurs. L'erreur systématique totale vaut actuellement 30 MeV et compte quatre composantes (1). Les dernières mesures pour les canaux semi-leptonique et hadronique sont $M_W = 80,448 \pm 0,043$ GeV et $M_W = 80,457 \pm 0,062$ GeV. Leur combinaison donne $M_W = 80,450 \pm 0,039$ GeV, en accord avec la mesure directe de Tevatron de $M_W = 80,454 \pm 0,060$ GeV, et la mesure indirecte déduite des mesures des autres paramètres du Modèle standard (α_{QED} , M_{top} et $\sin^2 \theta_W$).

Les résultats finals concernant la physique du W au LEP arriveront dans les prochains mois. Sachant que M_W sera mesurée au Run II du Tevatron avec la même précision que LEP2 mais avec des systématiques différentes, la mesure combinée sera obtenue avec une précision de 25 MeV. En améliorant la précision sur la masse du quark top au Tevatron, la mesure de la masse du W sera une contrainte importante pour la prédiction de masse du boson de Higgs. Il sera alors primordial d'affiner nos connaissances des paramètres du boson W avec la prochaine génération d'accélérateurs.

(1) Modélisation de la fragmentation: 18 MeV, énergie du faisceau: 17 MeV, effets de recombinaison de couleur ou effets de Bose-Einstein entre pions (pour les canaux hadroniques): 13 MeV, méconnaissance de la réponse du détecteur: 10 MeV.



Section efficace de production de paires de W au LEP2. Ces résultats préliminaires du LEP montrent l'accord entre l'expérience (points rouges et bleus) et différentes approches théoriques (Racoon WW, courbe verte) et - dans l'encart - (YFSWW 1.14, courbe rouge et Racoon WW, pointillés).

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/Welcome.html>

LABORATOIRES FRANÇAIS

DES COLLABORATIONS ALEPH, DELPHI ET L3

CNRS/IN2P3 : CPPM, IPN Lyon, IReS, LAL, LAPP, LPC

Clermont, LPNHE Paris 6/7, LPNHE Palaiseau, PCC.

CEA/DSM : Dapnia.

ATLAS ET LE BOSON DE HIGGS

Le détecteur Atlas se prépare à la chasse au boson de Higgs au futur LHC. Les équipes de l'IN2P3 sont fortement impliquées dans la conception et la construction de trois parties du détecteur : les calorimètres électromagnétique et hadronique, le détecteur de microvertex, en attendant les expériences qui pourraient leur permettre de déceler un boson léger.

En mai 1999, la collaboration Atlas a rassemblé, en près d'un millier de pages, une revue exhaustive du potentiel de découverte et de mesure de son détecteur. Parmi les nombreuses contributions des chercheurs de l'IN2P3 figure en bonne place la recherche d'un boson de Higgs de faible masse avec l'étude de deux voies de désintégration difficiles : $H \rightarrow \gamma\gamma$ et $H \rightarrow b\bar{b}$. Dix inverse femtobarns (fb^{-1}) suffiront pour découvrir un boson de Higgs de plus de 115 GeV en combinant les résultats de Atlas et de CMS.

L'exploitation de ces deux modes de désintégration repose sur trois composantes du détecteur dans lesquelles l'IN2P3 est fortement impliqué : les calorimètres électromagnétique et hadronique, ainsi que le détecteur de microvertex.

L'Institut contribue également au système de sélection de haut niveau des événements. Par exemple, les architectures de distribution des données et de supervision des fermes de calcul se dessinent clairement. Les nombreux développements de ces trois années se sont matérialisés dans un *Technical Proposal*. La conception se poursuit pour tirer le meilleur parti des techniques qui seront disponibles au démarrage de l'expérience.

En ce qui concerne les calorimètres, on est passé, durant ces trois dernières années, de la conception à la construction. Cinq laboratoires de l'IN2P3 sont engagés dans la construction du calorimètre électromagnétique à argon liquide. L'aboutissement majeur réside dans la réalisation en France des premiers modules du

calorimètre. L'ampleur de la tâche s'est révélée à l'échelle du défi que s'étaient lancé les chercheurs, une dizaine d'années auparavant. Ils ont été capables, dès 1999, de tester en faisceau un module de chaque type (tonneau, bouchon, prééchantillonneur). Ces tests montrent que les performances prévues par la simulation sont atteintes et satisfont au cahier des charges. Ils ont aussi permis de valider l'électronique de lecture intégrant l'amplification, le stockage analogique, la conversion numérique, ainsi que le système de contrôle-commande. Une fraction notable du calorimètre hadronique à tuiles scintillantes est déjà construite. L'IN2P3 assume une responsabilité importante dans la lecture et le contrôle de ce détecteur.

On entre également dans la phase de construction du détecteur à pixels pour le microvertex. Une longue période de développement a abouti à la conception de capteurs silicium dont le fonctionnement est garanti au-delà de 10^{15} neutrons/cm². Le premier robot de placement et de collage des modules sur leur support a été mis au point à Marseille.

L'électronique de tous les détecteurs LHC devra résister à un haut niveau de radiations. Les laboratoires de l'Institut ont mené une activité intense de conception, de tests et de mesures pour une grande variété de composants, réalisés en technologie durcie Dmill. Les résultats (tenue aux radiations, rendements, etc.) sont satisfaisants, à l'exception de l'électronique de lecture des pixels. Par sécurité, une nouvelle version sera développée en technique submicronique.

Empilage d'un module du calorimètre électromagnétique d'Atlas.
© CNRS/IN2P3
Camille Moirenc

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://atlasinfo.cern.ch>

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CPPM, ISN, LAL, LAPP,

LPNHE Paris 6/7.

CEA/DSM : Dapnia.



CMS : DU DÉVELOPPEMENT À LA PRODUCTION

De la finalisation des réflexions à la mise en route de la construction : le programme 1998-2000 des équipes impliquées dans la préparation de l'expérience CMS a été marqué par le choix final des détecteurs silicium et par les développements en matière de calcul et de simulation.

Au cours de l'année 1998, plusieurs choix définitifs ont été opérés pour le calorimètre électromagnétique : géométrie du détecteur, choix des photodétecteurs de lecture (APD), augmentation de la taille des cristaux du bouchon. Les derniers tests de prototypes à peine achevés, la réception au Cern du premier lot de cent cristaux venant de Russie a été suivie du démarrage de la production des structures mécaniques (alvéoles) pour le bouchon de CMS. L'optimisation finale des éléments de lecture s'est également achevée, tâche à laquelle les laboratoires de l'IN2P3 ont pris une part prépondérante en collaboration avec le Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas de Lisbonne et le Cern.

Durant l'année 2000, les premiers tests en faisceau d'éléments finalisés ont été réalisés et ont donné des résultats au niveau attendu. Malgré quelques retards dus à la production chinoise, 600 cristaux destinés au tonneau ont été caractérisés au Cern, tandis que la mise au point d'un ensemble représentant 400 voies de lecture définitives a été poursuivie, en vue d'un test en faisceau durant l'année 2001.

Cette même année 1998 a été entièrement consacrée à la mise au point finale des détecteurs gazeux à micropistes et de leurs variantes - chambres MSGC (*microstrip gas chambers*) équipées de préamplificateurs Gem (*gas electron multiplier*), chambres à petits gaps. En 1999, le test final des détecteurs gazeux a été mis au point : une centaine de prototypes MSGC-Gem, représentant plus de 40000 canaux de lecture ont été testés avec succès sur le faisceau à haute intensité de PSI à Villigen (Suisse). Malgré le succès éclatant de ce test, où les laboratoires de l'IN2P3 ont joué un rôle de premier plan, la collaboration CMS a décidé d'abandonner les détecteurs gazeux au profit de détecteurs au silicium.

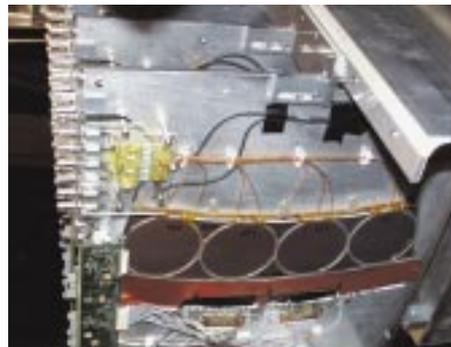
Il a donc fallu redéfinir complètement le détecteur de traces de CMS. Les équipes de l'IN2P3 y ont pris de nouvelles responsabilités : bases de données de construction, acquisition de données, tests de capteurs

silicium, connectique et tests de conditionnement, définition des hybrides de lecture. Cette transition devra être achevée au courant de l'année 2001, avec un test liant détecteurs, systèmes de lecture et de contrôle.

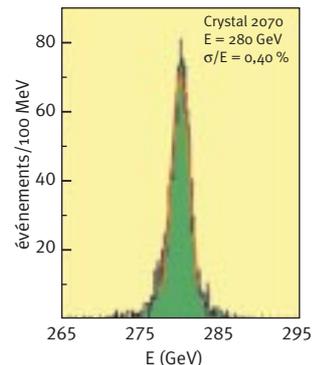
D'importants développements ont également été réalisés en simulation et en analyse. La technologie orientée objet a permis la mise en œuvre d'une production à l'échelle du million d'événements, utilisant le système Objectivity, tandis que, dans le cadre du programme Orca, les algorithmes de reconstruction de traces ont fait l'objet d'études approfondies.

L'importance des développements liés aux détecteurs ne doit pas faire oublier la contribution majeure des équipes de l'IN2P3 à la finalisation des études de physique de CMS : physique du b, violations de symétrie CP et R-parité, supersymétrie qui culmineront avec la publication du *Physics Design Report* de CMS, prévu vers la fin de l'année 2002.

Restera à construire le détecteur, à le comprendre et à être en mesure d'analyser les données expérimentales produites à partir de 2005 - 2006...



Chambres MSGC sur le banc de tests.
© CNRS/IN2P3



Résolution donnée par un prototype final du calorimètre électromagnétique de CMS.

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://cmsinfo.cern.ch>

Ecal Design Report : Cern/LHCC 97-33

Tracker Design Report : Cern/LHCC 98-6

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, IReS, GRPHE Mulhouse, LPNHE Paris 6/7, LAPP.

CEA/DSM : Dapnia.

LA VIOLATION DIRECTE DE CP DANS LE SYSTÈME DES KAONS NEUTRES

Située au Cern, auprès du SPS, l'expérience NA48 a pour but principal l'étude de la violation directe de CP dans le système des kaons neutres, qui correspond à une différence de probabilités de désintégration entre le kaon neutre et son antiparticule. Les résultats récents, combinés avec ceux des autres expériences dans le monde, vont prochainement permettre de mettre un terme à cette longue quête par une mise en évidence définitive de cette violation.

La violation de CP correspond à une différence entre les lois physiques pour la matière et l'antimatière. Cet effet a été mis en évidence au niveau microscopique pour la première fois en 1963, dans le système des kaons neutres. L'effet observé peut s'interpréter comme une asymétrie dans la composition des états physiques K_S et K_L en termes des états K^0 - \bar{K}^0 , et a reçu le nom de « violation indirecte de CP ».

Le Modèle standard prédit non seulement cet effet, mais aussi une violation dite directe de CP dans ce système. Cette nouvelle asymétrie correspond à une différence dans les probabilités de désintégration du K^0 et du \bar{K}^0 vers un état final à deux pions. La recherche de cette violation directe de CP, dont l'amplitude est caractérisée par le paramètre

ϵ'/ϵ , a ainsi occupé plusieurs générations d'expériences. Au début des années quatre-vingt-dix, l'expérience NA31 au Cern obtenait l'indication d'un effet qui n'était pas confirmé par l'expérience E731 à Fermilab. Des expériences plus précises ont alors été lancées, dont NA48 ou KTEV, l'expérience américaine.

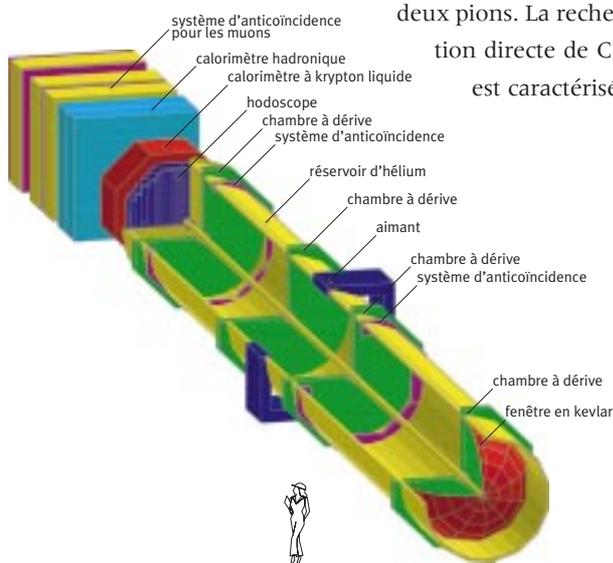
Pour mesurer le rapport ϵ'/ϵ , il faut comparer les taux de désintégration des K_S et K_L en $\pi^+\pi^-$ et $\pi^0\pi^0$. Cette mesure se ramène à un comptage des événements dans les quatre modes, si au moins deux modes sont mesurés simultanément. Pour atteindre la précision recherchée, il est impératif d'accumuler une grande statistique d'événements et d'avoir une bonne maîtrise des effets systématiques. Pour cela, l'expérience NA48 utilise des faisceaux simultanés et quasi colinéaires de K_S et K_L . La détection du mode chargé ($\pi^+\pi^-$) se fait grâce à un spectromètre comportant un aimant et quatre chambres à fils. Le mode neutre ($\pi^0\pi^0$) est reconstruit grâce à un calorimètre à krypton liquide permettant de mesurer l'énergie des photons avec une précision d'environ 1 %, avec une non-linéarité de la réponse inférieure à 0,1 %. L'identification des K_S et K_L s'effectue par la coïncidence temporelle entre le passage d'un proton vers la cible où sont créés les K_S et le temps de l'événement mesuré dans le détecteur.

Avec 0,5 million d'événements, les premières prises de données avaient permis à NA48 de publier une mesure de ϵ'/ϵ égale à $(18,5 \pm 7,3) \cdot 10^{-4}$ qui confirmait l'existence de la violation directe de CP. Durant les années 1998 et 1999, trois millions d'événements supplémentaires ont été accumulés, grâce à la bonne performance du faisceau et aux améliorations apportées au détecteur. En 2000, l'implosion du tube à vide a empêché d'augmenter la statistique.

En mai 2001, NA48 a présenté le résultat global de ses données, qui fournit la mesure la plus précise du rapport ϵ'/ϵ : $(15,3 \pm 2,6) \cdot 10^{-4}$. Combinée avec la mesure récente de KTEV ($\epsilon'/\epsilon = (20,7 \pm 2,8) \cdot 10^{-4}$) et celles de NA31 et E731, elle donne une valeur, au niveau mondial, de $\epsilon'/\epsilon = (17,2 \pm 1,8) \cdot 10^{-4}$.

L'existence de la violation directe de CP prédite par le Modèle standard est donc confirmée. Une ultime prise de données à NA48 est prévue. Avec les prochains résultats de KTEV et l'expérience Kloe à Frascati, on s'achemine vers le terme de la longue quête de la violation directe de CP par la mesure de ϵ'/ϵ à une précision attendue de 1 à $1,5 \cdot 10^{-4}$.

Le détecteur NA48.



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://na48.web.cern.ch/NA48/>

V. Fanti *et al.*, *Phys. Lett. B*, 465 (1998) 335.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAL.

CEA/DSM: Dapnia.

BaBar : DES PREMIÈRES COLLISIONS À LA RÉVÉLATION D'UNE NOUVELLE VIOLATION DE SYMÉTRIE CP

Sur le site du Stanford Linear Accelerator Center (Slac), les équipes de l'IN2P3 ont participé pendant ces trois années à la mise en service du collisionneur PEP-II, ainsi qu'à l'assemblage du détecteur BaBar. Les premiers résultats, engrangés durant l'année 2000 et le début 2001, permettent de mettre en évidence une nouvelle différence entre matière et antimatière et de mettre à l'épreuve le Modèle standard.

Le 26 mai 1999, le détecteur BaBar observait ses premières collisions, résultant du choc entre les faisceaux d'électrons et de positons fournis par l'accélérateur PEP-II. Ce succès couronnait les efforts des équipes de l'IN2P3 et du CEA qui participaient depuis cinq ans à la construction et à la mise au point du dispositif expérimental PEP-II et BaBar. Lors de la première campagne de prise de données d'octobre 1999 à octobre 2000, PEP-II a atteint la luminosité record de $3,1 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ et quelque 23 millions de paires de mésons beaux ont pu être enregistrés par BaBar.

De telles quantités de données sont nécessaires en raison des faibles probabilités de désintégration vers les modes susceptibles de révéler la violation de CP. Une des manifestations de ce phénomène a lieu grâce à la propriété qu'ont les mésons B neutres d'osciller. Considérons le cas particulier d'un état final commun aux mésons B^0 et \bar{B}^0 . Un B^0 peut alors accéder à cet état par deux processus : soit directement, soit en oscillant en son antiparticule, le \bar{B}^0 , avant de se désintégrer. Le terme d'interférence entre ces deux processus sera différent selon qu'on a initialement un B^0 ou un \bar{B}^0 , générant ainsi une asymétrie entre leurs lois de désintégration. La comparaison de ces lois permet alors d'observer la violation de CP et de mesurer son ampleur.

La description du mécanisme de violation de CP peut se résumer dans une figure appelée « triangle d'unitarité », dont les coordonnées du sommet sont ρ et η , deux paramètres du Modèle standard. Jusqu'ici, la connaissance de ces paramètres était issue de mesures telles que la fréquence d'oscillation des mésons B neutres, le couplage du boson W aux quarks u et b ou encore la violation de CP dans le système des kaons. La zone colorée sur la figure correspond à l'ensemble des solutions (ρ, η) permises par ces mesures. Les mesures

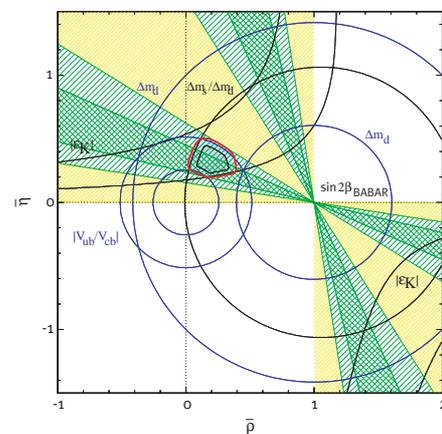
d'asymétrie $B^0-\bar{B}^0$ permettent d'estimer les trois angles α , β , et γ du triangle. La compatibilité de l'ensemble de ces mesures constitue alors un test du Modèle standard.

Dans les analyses dont les résultats ont été publiés en 2001 par l'expérience BaBar, l'asymétrie varie de façon sinusoïdale en fonction du temps de désintégration et son amplitude est mesurée par $\sin 2\beta$. Une valeur non nulle de cette asymétrie signifierait une mise en évidence de la violation de CP dans le domaine des mésons B.

En juillet 2001, à partir de l'observation de 32 millions de paires, 800 événements ont été sélectionnés et une valeur de $\sin 2\beta = 0,59 \pm 0,14 \pm 0,05$ a été annoncée, prouvant ainsi pour la première fois la violation de la symétrie CP dans le système des mésons B. La compatibilité avec les mesures précédentes, dans la limite des incertitudes actuelles, est excellente. Cette annonce a été rapidement suivie de celle de l'expérience Belle (KEK, Japon) : $\sin 2\beta = 0,99 \pm 0,14 \pm 0,06$, une valeur supérieure mais qui n'est cependant pas en désaccord avec la mesure de BaBar.

La deuxième campagne de prise de données, débutée en février 2001, doit se poursuivre jusqu'en juin 2002. On prévoit d'enregistrer plus de 70 millions de paires $B^0-\bar{B}^0$ supplémentaires et ainsi de porter l'erreur statistique de la mesure sous la barre de 0,1. Une telle précision permettra d'éprouver la cohérence de la description de la violation de CP dans le Modèle standard.

Les points (0,0), (0,1) et (ρ, η) forment le triangle d'unitarité. La zone cerclée de rouge indique les valeurs de (ρ, η) permises par les mesures indirectes et celles de la violation de CP dans le système des kaons. La zone verte hachurée représente la contrainte issue de la mesure de $\sin 2\beta$ de BaBar. La compatibilité est excellente.



POUR EN SAVOIR PLUS

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

Measurement of CP-violating asymmetries in B^0 decays to CP eigenstates, *Physics Review Letters* 86 (2001) 2515-2522

Observation of CP violation in the B^0 meson system, hep-ex/0107013, soumis pour publication.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : LAL, LAPP, LPNHE Paris 6/7, LPNHE Palaiseau.

CEA/DSM : Dapnia.

LHCb: LA SECONDE GÉNÉRATION DES EXPÉRIENCES DE VIOLATION DE SYMÉTRIE CP

L'expérience LHCb s'inscrit dans le programme de compréhension de la violation de la symétrie CP dans le système des mésons beaux. Elle représentera une expérience de seconde génération qui se déroulera à partir de 2006 auprès du LHC et apportera de nouvelles contraintes aux modèles théoriques de la physique des particules.

L'enjeu des expériences sur la violation de CP est important aussi bien en physique des particules qu'en cosmologie puisque ce phénomène pourrait expliquer les différences subtiles qui existent entre la matière et l'antimatière. C'est dans le système des mésons beaux que les études les plus approfondies peuvent être menées. LHCb sera installée auprès du futur collisionneur hadronique LHC au Cern à Genève afin de bénéficier d'une source intense du spectre complet des hadrons beaux, environ $10^{12} \text{ } b\bar{b}$ par année de fonctionnement. Cette formidable statistique, associée à un détecteur performant, permettra de préciser très fortement la représentation théorique de ce phénomène, telle qu'elle est formulée dans le cadre du Modèle standard, voire de l'invalidier. Les signes pré-

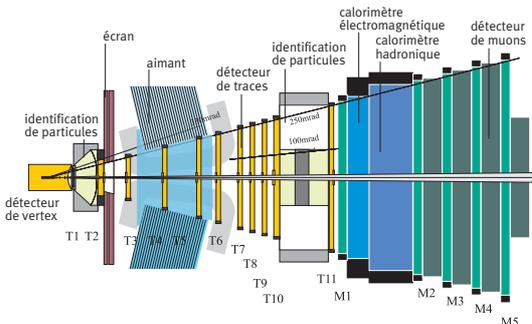
courseurs d'une nouvelle physique pourraient ainsi apparaître.

Dès 1997, trois laboratoires de l'IN2P3 ont rejoint la collaboration LHCb et participé à la proposition technique qui a permis aux comités du Cern d'approuver

cette expérience en septembre 1998. Leur participation est centrée sur le premier niveau de déclenchement, un des points clés de l'expérience. Il est basé sur la reconnaissance de particules (électrons, photons, π^0 , hadrons et muons) de grande impulsion transverse, révélant la présence d'un hadron B, et fonctionne à 40 MHz. Entièrement synchrone, il doit permettre de réduire le flux de données à 1 MHz. Seuls les détecteurs les plus rapides (calorimètres et chambres à muons) peuvent participer à cette phase. Il a ainsi fallu concevoir une électronique spécifique rapide pour le détecteur de pied de gerbes et les calorimètres électromagnétique et hadronique. Les cartes conçues permettront la lecture de ces détecteurs et comporteront une part dédiée au déclenchement. Le *Technical Design Report* (TDR) de ces calorimètres a été présenté en septembre 2000 et accepté. Pour les muons, un système permettant un déclenchement rapide a également été développé. Le critère de sélection final résulte de la combinaison de l'ensemble de ces informations et se fait dans une unité propre. La prochaine étape est l'élaboration du TDR de ce système qui doit être déposé en janvier 2002.

Le Modèle standard rend compte de la violation de CP à l'aide de la matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa du nom de ses inventeurs). L'unitarité de cette dernière implique des relations entre ses éléments, représentées graphiquement par des triangles d'unitarité dont deux sont considérés pour le système des mésons B. L'expérience LHCb déterminera l'ensemble des angles associés. Avec ces mesures, une précision bien plus grande sera obtenue. Le détecteur de vertex de grande résolution et les compteurs Cerenkov de LHCb permettant d'identifier les particules seront essentiels. Les performances attendues de LHCb pour quelques modes typiques de désintégration, après un an de données à la luminosité nominale, devraient fournir des résultats d'une telle précision que l'on peut se demander si le Modèle standard résistera à autant de contraintes. Réponse en 2006!

Schéma du détecteur LHCb.



POUR EN SAVOIR PLUS

LHCb collaboration Technical Proposal, *A Large Hadron Collider Beauty Experiment for Precision Measurements of CP Violation and Rare Decays*, Cern/LHCC 98-4.

LHCb collaboration LHCb Calorimeters, *Technical Design Report*, Cern/LHCC 2000-0036.

P. Ball et al., *B decays at the LHC*, hep-ph/0003218, Cern/LHC 2000-101.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CPPM, LAL, LPC Clermont.

Performances attendues après un an de prises de données.

Paramètre	Mode	Erreur statistique
$\sin 2\alpha$	$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	0,05
$\sin 2\beta$	$B^0 \rightarrow J/\psi K_s^0$	0,02
γ	$B^0 \rightarrow D^0 K^{*0}, \bar{D}^0 K^{*0}, D_1^0 K^{*0}$	10°
$\delta\gamma$	$B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$	0,01
$\gamma + 2\beta$	$B^0 \rightarrow D^{*+} \pi^+, D^{*+} a_1^+$	9°
$\gamma - 2\delta\gamma$	$B_s^0 \rightarrow D_s^+ K^+$	$6^\circ \text{ à } 13^\circ$
x_s	$B_s^0 \rightarrow D_s^+ \pi^+$	$x_s \Omega 55$

POTENTIEL DE DÉCOUVERTES AU TEVATRON SUR D0

Depuis fin 2000, les faisceaux de protons et d'antiprotons du Tevatron à Fermilab, à Chicago, sont à nouveau accélérés après cinq années d'un intense travail d'amélioration du collisionneur et des deux détecteurs CDF et D0.

L'IN2P3 contribue depuis fin 1997 à la préparation du Run IIa qui devrait permettre de collecter une luminosité intégrée de 2 fb^{-1} par expérience à l'horizon 2004.

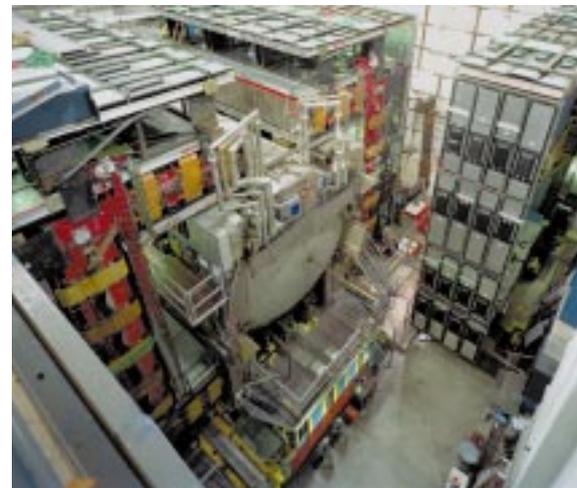
Depuis 1992, un riche programme de physique a été développé au Tevatron par les expériences CDF et D0, notamment avec la mise en évidence du quark top en 1995. Les physiciens français poursuivent ce programme dans le cadre de l'expérience D0. Les groupes de l'IN2P3 travaillent en calorimétrie (électronique de calibration en ligne, calibration à partir des données par utilisation des résonances, reconstruction des jets et de l'énergie manquante, identification de l'électron), dans la reconstruction des vertex secondaires au troisième niveau de déclenchement, dans l'étiquetage des quarks b, dans le développement du programme de simulation rapide, dans les tests de générateurs et dans la production d'événements Monte-Carlo au centre de calcul de l'Institut.

Dans le programme de physique, la recherche du boson de Higgs, dont l'intérêt est renforcé par les observations du LEP de l'existence possible d'un signal à 115 GeV, occupe une place de choix sur la liste des priorités. Si un Higgs de cette masse peut être éliminé au Run IIa, sa mise en évidence impose une luminosité intégrée supérieure à celle prévue pour cette première phase. D'ores et déjà, des améliorations sont en cours d'étude pour le Run IIb qui permettrait la découverte d'un Higgs jusqu'à une masse de 180 GeV pour une luminosité intégrée de 30 fb^{-1} . Il y a de bonnes raisons de penser que le Higgs est en fait une première fenêtre sur un nouveau domaine de physique et que le Modèle standard est une approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale - la supersymétrie - qui fait figure actuellement de « théorie standard » au-delà du Modèle standard. Le Tevatron permettra d'étendre le domaine de recherche des particules supersymétriques. Avec une luminosité de 2 fb^{-1} , D0 devrait atteindre une sensibilité en masse de 400 GeV pour le gluino et de 200 GeV pour le stop, le sbottom et le chargino.

Avec cet accroissement de luminosité, le Tevatron prendra, dans les prochaines années, la suite du LEP dans le domaine des mesures de précision du Modèle standard. La production, par interaction forte, de paires de quarks top permettra l'étude précise des propriétés de ce quark. Sa production simple par processus électrofaible devrait être observée. On attend une incertitude de 2 à 3 GeV sur la mesure de la masse du top et de 40 MeV sur celle du boson W. Si le Higgs n'est pas découvert, ces mesures

contraindront fortement sa masse. Dans le domaine de la physique de la beauté, D0 contribuera à l'étude de la violation de CP, des oscillations du B_s et à la recherche de modes rares de désintégration qui constituent des tests puissants du Modèle standard. Enfin, dans le domaine de la chromodynamique quantique, des mesures importantes seront effectuées: étude des jets à grande énergie transverse, contraintes sur les densités partoniques, étude des phénomènes diffractifs...

En attendant la mise en route du LHC, ce vaste domaine de physique va être couvert par le Tevatron, ce qui permettra, sans aucun doute, des avancées significatives dans la compréhension des interactions fondamentales et de la structure de la matière. Dès à présent, les groupes de l'IN2P3 coordonnent leurs analyses pour la recherche du Higgs et de la supersymétrie et l'étude du top et du W.



Le détecteur D0.
© Fermilab/D0

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www-do.fnal.gov>

<http://do-france.in2p3.fr/>

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CCPM, IPNL, IReS, ISN, LAL,
LPNHE Paris 6/7.

CEA/DSM : Dapnia.

DE LA STRUCTURE DU PROTON AUX PARTICULES ET INTERACTIONS AU-DELÀ DU MODÈLE STANDARD

En fonctionnement depuis dix ans, le collisionneur électron-proton Hera au Deutsches Elektronen Synchrotron de Hambourg est en cours de transformation afin d'augmenter très significativement la luminosité et de fournir des faisceaux d'électrons polarisés longitudinalement. L'expérience H1 subit d'importantes modifications pour s'adapter à cette nouvelle donne. Elle devrait être opérationnelle pour la physique dès 2002.

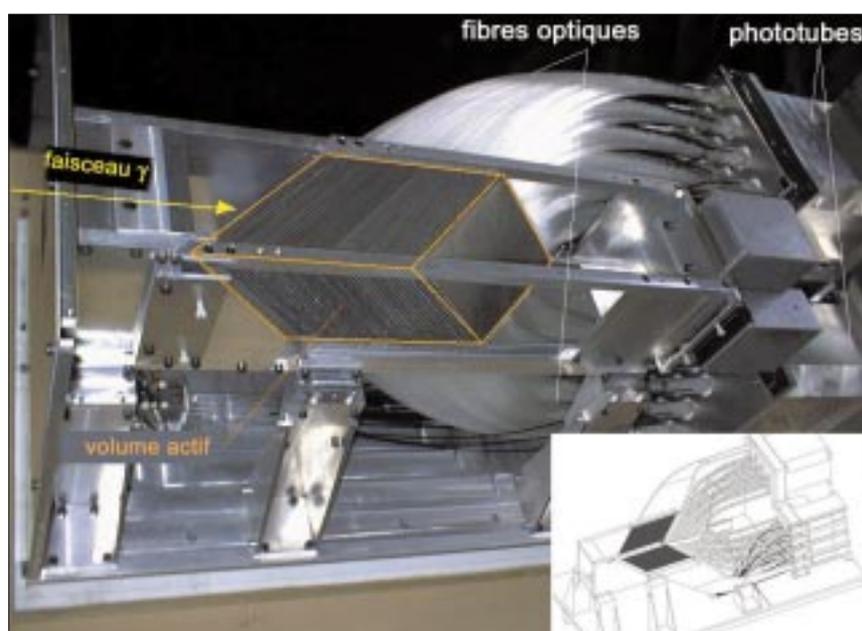
L'expérience H1 a été conçue pour une détection « universelle » des produits de collisions électron-proton ou positon-proton aux très hautes énergies fournies par le collisionneur Hera.

H1 s'était fixé d'emblée comme principaux objectifs scientifiques la mesure de la structure en quark-gluon du proton à très petite distance, la vérification des propriétés des interactions électromagnétique et faible dans des conditions où l'unification de ces interactions devient manifeste, et la recherche de nouvelles particules ou de nouvelles interactions au-delà de celles comprises dans le Modèle standard actuel. A ces sujets s'est ajoutée une étude de la transition, pour l'interaction forte, entre les domaines décrits par la chromodynamique quantique et ceux où le confinement de la charge de couleur joue un rôle essentiel. Les mesures ont notamment démontré l'existence à très petite distance d'états contenant de très hautes densités de gluons. Elles ont de plus mis en évidence une impor-

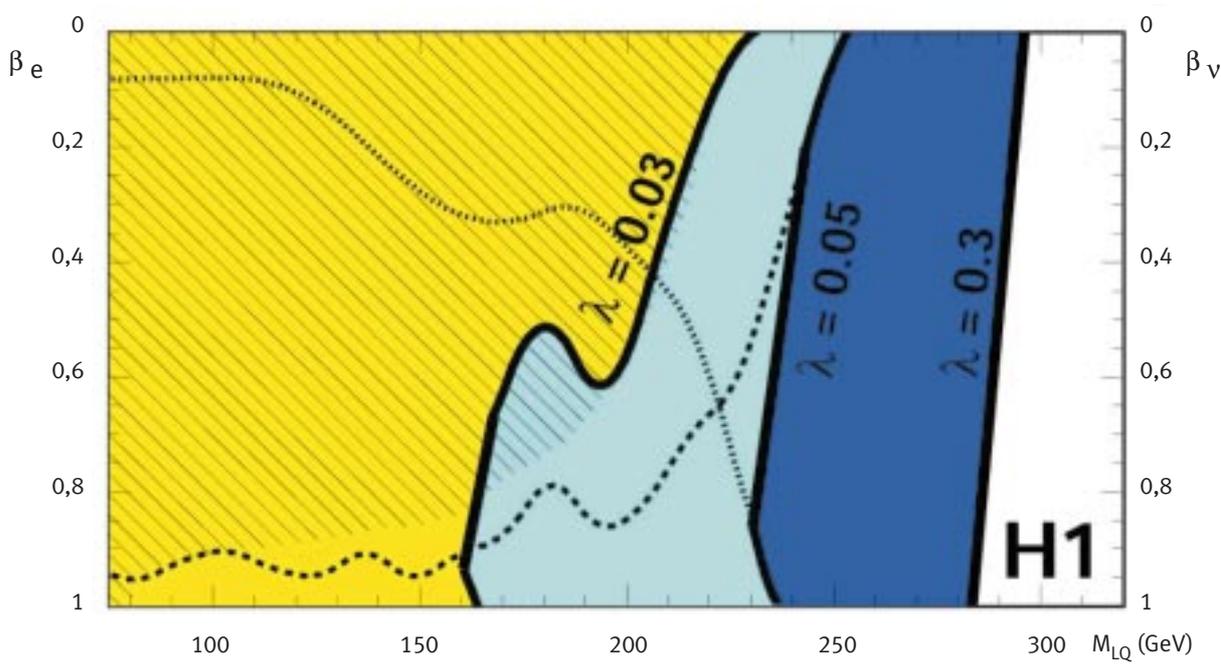
tante contribution d'événements diffractifs dans des collisions « dures » qui ont pu être interprétés en termes d'une structure en quarks-gluons de « l'objet » neutre de couleur ainsi échangé.

Le collisionneur Hera offre une sensibilité unique pour la recherche directe, jusqu'à des masses d'environ 300 GeV, de nouveaux bosons se couplant à des paires lepton-quark, comme les leptoquarks prédits, entre autres, dans des théories expliquant la symétrie entre quarks et leptons, ou les squarks, dans des versions non-minimales de la supersymétrie avec violation de la R-parité. Hera offre aussi un bon potentiel de découverte d'une nouvelle physique qui affecterait les couplages boson-fermion standard. De nouveaux courants neutres avec changement de saveur pourraient, par exemple, être mis en évidence à Hera II *via* la production simple de quarks top. Alternativement, une éventuelle structure composite des fermions standards pourrait être découverte *via* la production d'états excités. Finalement, les faisceaux d'électrons polarisés longitudinalement à Hera II permettront une recherche exhaustive de nouveaux courants vecteurs ou axiaux jusqu'à des échelles caractéristiques, pour un couplage fort, d'une dizaine de TeV.

A Hera II, l'accroissement de luminosité sera obtenu essentiellement par une diminution d'un facteur 3,5 de la section transverse de croisement des faisceaux. Cette transformation implique l'introduction, à l'intérieur du détecteur H1, d'aimants supraconducteurs



Nouveau luminomètre de H1 utilisant un calorimètre tungstène/fibres optiques basé sur une technique de lecture en lumière Cerenkov.



Leptoquark scalaire $e^- u \rightarrow LQ \rightarrow e^- X, \nu X$

DO Run I

H1 $e^- p$

Sensibilité actuelle de l'expérience H1 à Hera pour la détection de leptoquarks scalaires, comparée à celle de l'expérience DO au Tevatron (Fermilab). Une plage de découverte est accessible à Hera pour des couplages supérieurs à 0,03, ce qui correspond à une interaction jusqu'à cent fois moins forte que l'interaction électromagnétique.

qui, tout en focalisant, doivent aussi fournir une très forte courbure aux électrons pour la séparation des faisceaux. D'importantes modifications sont apportées au détecteur pour adapter la géométrie à la présence de ces aimants, ainsi qu'à une conduite de faisceau devenue elliptique pour l'évacuation de la radiation synchrotron indésirable. Par ailleurs, un système d'acquisition amélioré accélérera le traitement des données du calorimètre à argon liquide de H1 pour mieux profiter des taux accrus de collisions. De plus, un nouveau détecteur pour la mesure de luminosité a été réalisé: il s'agit d'un calorimètre formé de segments de tungstène dans lesquels sont insérés, en orientations alternées, des plans de fibres de quartz résistantes aux radiations, le tout protégé par un bouclier de béryllium refroidi. Des phototubes lus par un système d'acquisition rapide (de l'ordre du MHz) amplifient un signal induit par la lumière Cerenkov produite dans les fibres. A terme, un nouveau polarimètre utilisant une cavité de Fabry-Pérot permettra une mesure de la polarisation longitudinale des électrons de faisceau à une précision de 1 %. Enfin, une refonte majeure de la gestion des données et des outils d'analyse de H1 est en cours de réalisation dans un langage orienté objet.

POUR EN SAVOIR PLUS

H1 collaboration, *DESY preprint 01-094* (juin 2001); e-print hep-ex/ 0107038, soumis pour publication.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/ IN2P3: CPPM, LAL, LPNHE Palaiseau.

CEA/DSM: Dapnia.

LA SUPERSYMÉTRIE ET LES DIMENSIONS SUPPLÉMENTAIRES

Cadre général de la physique au-delà du Modèle standard, la supersymétrie a aussi pour ambition d'unifier les forces électrofaible et forte, et la gravité. Cette unification est réalisée dans les théories des cordes et des «branes», pour lesquelles la supersymétrie joue habituellement un rôle central, et qui mettent en jeu des espaces à plus de trois dimensions. Le GDR Supersymétrie se donne pour tâche d'en étudier divers aspects et d'envisager les tests expérimentaux qui permettraient de les vérifier.

Au sein du groupement de recherche (GDR) Supersymétrie, qui, en 2000, en était à sa quatrième année de fonctionnement, les dernières discussions ont bien sûr beaucoup tourné autour des derniers résultats du LEP, avec la perspective d'une première mise en évidence de la particule de Higgs. La présence d'un Higgs léger est en effet l'une des prédictions les plus spectaculaires des modèles supersymétriques les plus simples. Les travaux du GDR ont aussi traité de tous les aspects de la recherche directe ou indirecte de la supersymétrie. Plus qu'une théorie unique, la supersymétrie fournit un cadre général de physique au-delà du Modèle standard; ses premières manifestations peuvent se trouver dans un ensemble très vaste de données expérimentales: physique de la saveur et de la violation de la symétrie CP, mise en évidence de matière noire sous forme de Wimps, à plus longue échéance étude de l'Univers très primordial, laboratoire où ont été atteintes les ultra-hautes énergies souvent mises en jeu dans ces théories. Dans la même logique, compte tenu des nouvelles données expérimentales sur les masses et les propriétés des neutrinos, le GDR a ressenti le besoin de créer un groupe de travail spécifique sur ce thème: les modèles de masse de neutrinos font souvent intervenir une échelle de masse élevée qui aurait tendance à perturber radiativement l'échelle d'unification électrofaible en l'absence de supersymétrie.

L'un des intérêts de la supersymétrie est de permettre d'unifier dans un même cadre théorique les forces électrofaible et forte et la gravité. Cette unification est réalisée dans les théories de cordes qui sont ainsi un candidat pour une théorie quantique de la gravitation. C'est pourquoi ces théories fournissent un «laboratoire» où tester nouvelles idées et nouveaux



concepts. On sait depuis longtemps, par exemple, qu'elles mettent en jeu plus de trois dimensions spatiales: cela a réactivé la notion de dimension d'espace supplémentaire introduite dans les années vingt par Kaluza et Klein dans le cadre d'une unification de l'électromagnétisme et de la gravité. Ces dimensions se signaleraient expérimentalement par la présence de «modes d'oscillation» (dans la «cavité» formée par la ou les dimensions supplémentaires) ou modes de Kaluza-Klein qui apparaîtraient dans notre monde tridimensionnel comme de simples particules. L'énergie de ces modes, c'est-à-dire la masse de ces particules, varie comme l'inverse de la taille des dimensions supplémentaires. Le fait que de telles particules n'ont pas été observées aux énergies actuellement disponibles implique que cette taille est microscopique.

Un développement en théorie des cordes est toutefois venu bouleverser ces conclusions. On s'est aperçu en effet que dans une théorie de cordes (objets unidimensionnels) apparaissent souvent des surfaces ou «branes» (généralisant la notion de membrane ou surface bidimensionnelle) sur lesquelles les interactions peuvent être localisées. Cela ouvre donc la possibilité que les interactions non gravitationnelles soient localisées sur une surface à trois dimensions d'espace et une dimension de temps (une brane quadridimensionnelle), la gravité seule permettant d'accéder à la (aux) dimension(s) supplémentaire(s). En d'autres termes,

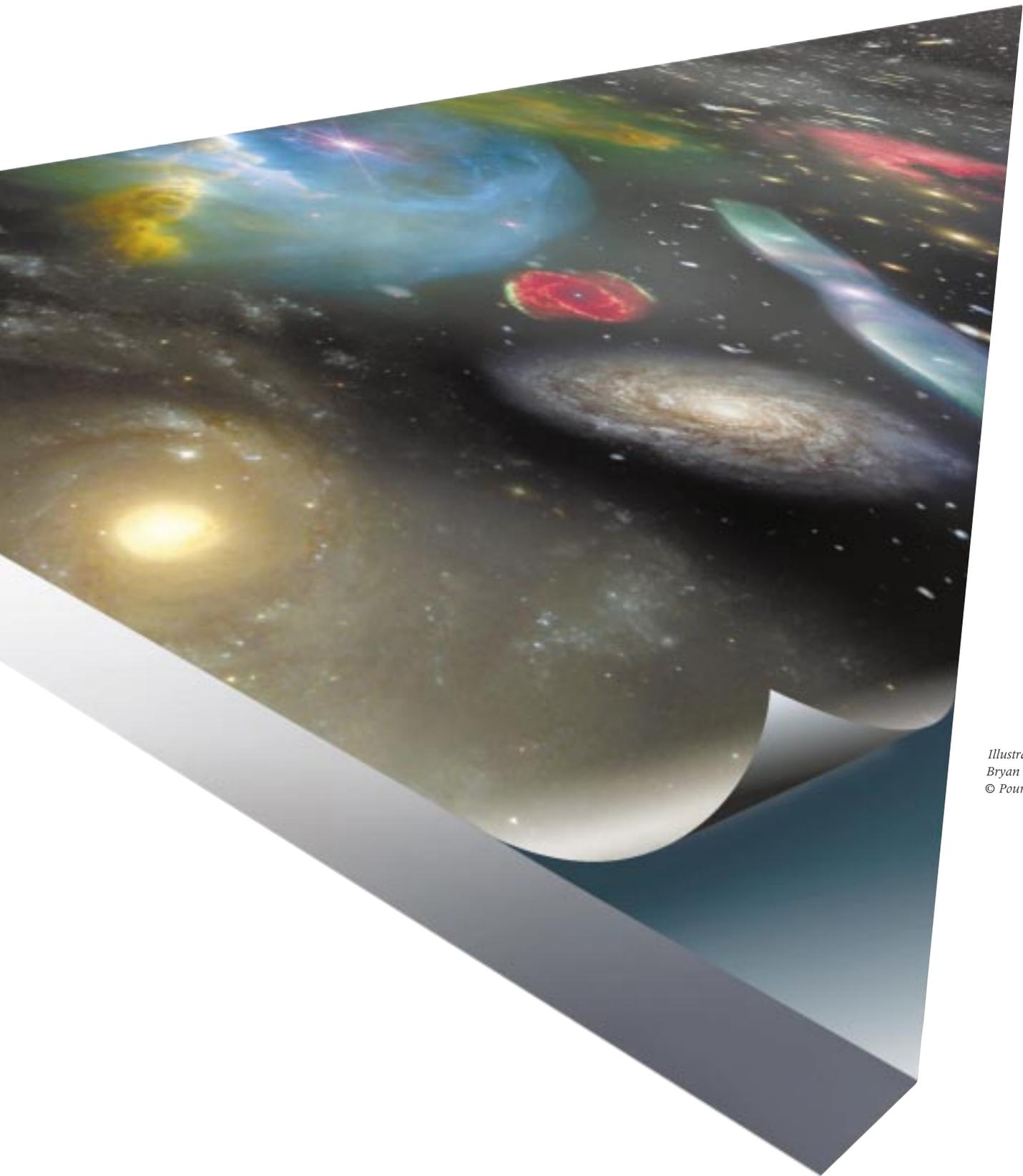


Illustration :
Bryan Christie
© Pour la Science



nous-mêmes (formés principalement de quarks, gluons et leptons), les galaxies, la lumière serions « scotchés » sur cette surface, les dimensions supplémentaires n'étant accessibles que par les gravitons responsables de l'interaction gravitationnelle. La limite sur la taille des dimensions supplémentaires est alors imposée par ce que nous savons de la force gravitationnelle, bien moins connue que les autres à courte distance. La surprise a été effectivement de constater que cela ne donnait qu'une limite à cette taille de l'ordre du millimètre. Cela a évidemment relancé l'intérêt pour les expériences testant la loi de la gravitation en-dessous du millimètre. Parallèlement, cela a ouvert la possibilité que l'échelle de masse caractéristique de la gravitation ne soit rien d'autre que l'échelle électrofaible. Le LHC serait l'instrument idéal pour tester la gravité multidimensionnelle et l'on pourrait envisager d'y produire des objets aussi incongrus en physique subatomique que des microtrous noirs!

Le GDR Supersymétrie s'est lancé, avec un certain enthousiasme, dans cette nouvelle aventure et a commencé à en étudier des aspects très divers: production de modes de Kaluza-Klein aux accélérateurs, modèles de masse pour les neutrinos, lien avec les théories de supercordes, étude de la cosmologie des dimensions supplémentaires. Il ne faut pas oublier que ces modèles tirent leur cohérence des théories de cordes pour lesquelles la supersymétrie joue habituellement un rôle central.

Depuis janvier 2001, le GDR Supersymétrie est devenu européen et regroupe des chercheurs d'une bonne demi-douzaine de pays européens. Il prévoit de continuer à développer la physique de la supersymétrie (et des dimensions supplémentaires) sur tous ses fronts et envisage des tests expérimentaux, en particulier auprès des collisionneurs du futur, qui la feraient sortir des limbes où elle semble se complaire depuis presque trois décennies.

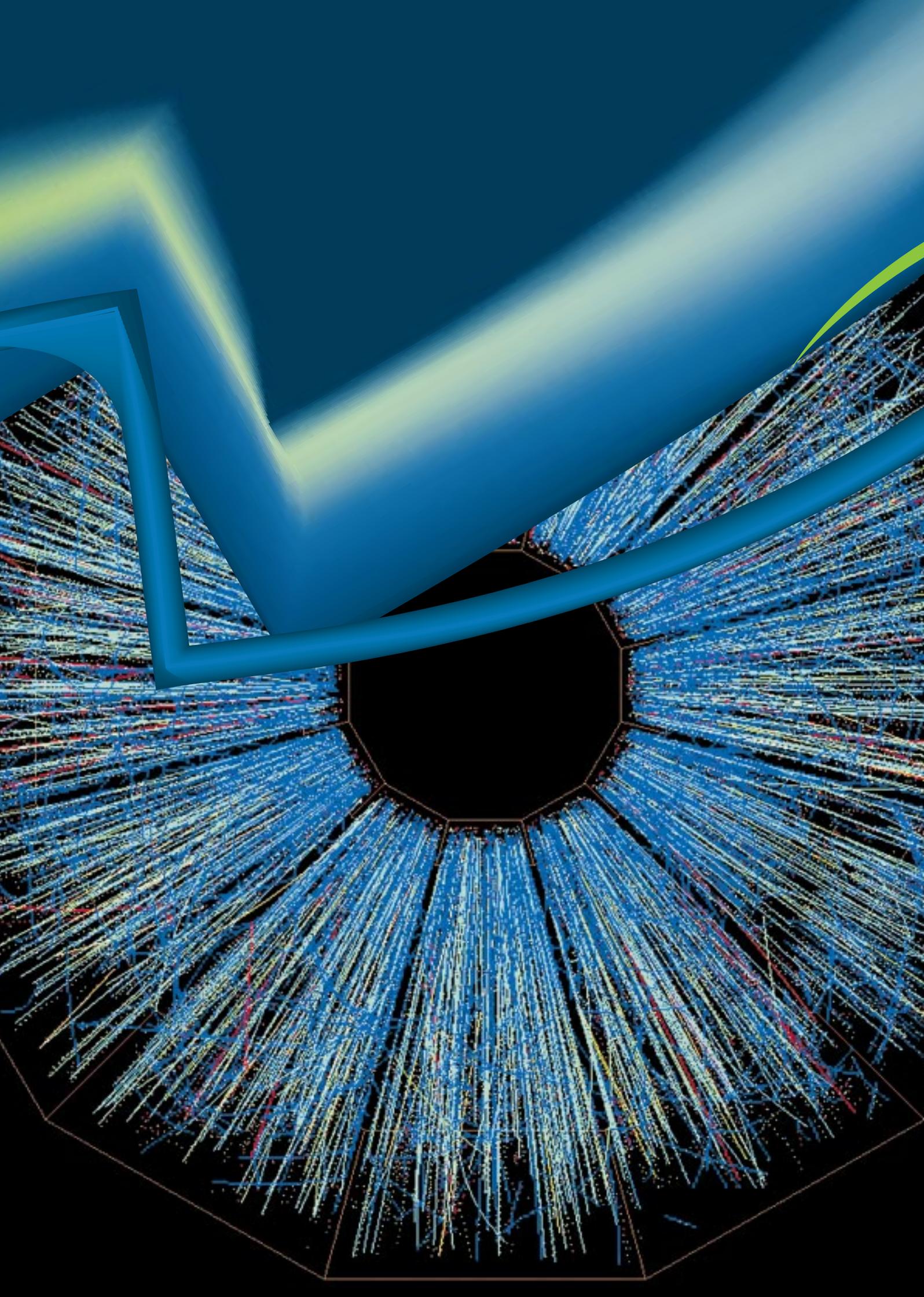
POUR EN SAVOIR PLUS

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

REMERCIEMENTS

Introduction
Guy Wormser

Sylvie Rosier-Lees
Pierre Antilogus
Stéphane Jezequel
Sylvain Tisserant
Jean-Marie Brom
Guillaume Unal
Lydia Roos
Pascal Perret
Gérard Sajot
Yves Sirois
Pierre Binetruy





PHYSIQUE DU NUCLÉON ET DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

La physique nucléaire affiche aujourd'hui une ambition scientifique qui vise à comprendre de manière globale comment se construit la matière nucléaire, depuis ses constituants fondamentaux, quarks et gluons, jusqu'aux objets quantiques composites les plus complexes, comme les noyaux superlourds formés de presque 300 nucléons. Ce passage du simple au complexe nécessite de sonder la nature du confinement des quarks et des gluons dans les nucléons et les noyaux, la structure des nucléons en quarks et en gluons, et enfin, la structure et la dynamique des noyaux.

Les propriétés de la matière nucléaire sont régies par l'interaction forte. Celle-ci est formalisée par la théorie de la chromodynamique quantique (QCD) qui décrit comment quarks et gluons, considérés comme objets fondamentaux, s'assemblent pour former des systèmes plus complexes : les hadrons (protons, neutrons, mésons...). Toutefois, il n'est pas possible de décrire directement les systèmes encore plus complexes que sont les noyaux atomiques (à l'exception peut-être des noyaux très légers) en n'utilisant que cette interaction élémentaire. Aussi l'influence du milieu nucléaire ambiant (c'est-à-dire, pour un noyau formé de A nucléons, l'influence sur l'un d'entre eux de tous les autres) est-elle généralement prise en compte en utilisant des forces effectives reproduisant ces effets de milieu. Une grande partie de notre compréhension du noyau atomique provient donc de l'expérience et en particulier, jusqu'à une période récente, de la connaissance précise des propriétés d'un nombre limité de noyaux stables. Les outils expérimentaux de ces recherches sont les accélérateurs français et étrangers, et les détecteurs développés au sein de l'institut pour la plupart dans le cadre de larges collaborations internationales.

LES PHASES DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

Aller vers des accélérateurs de particules offrant des énergies de plus en plus élevées afin d'avoir accès au plus élémentaire revient également à remonter le temps pour atteindre les premiers instants de l'Univers. Les collisions d'ions lourds à des énergies ultrarelativistes (jusqu'à 200 GeV par nucléon) permettent en effet non seulement de chauffer la matière nucléaire pour en étudier les propriétés fondamentales, mais aussi de remonter à sa genèse. Quelques microsecondes après le Big-Bang, lorsque les conditions de température et de pression le permettaient, la matière aurait été un plasma de quarks et de gluons. C'est du moins ce que prédit QCD. C'est également ce qu'ont recherché les expériences

◀ Collision de deux faisceaux d'ions or de 30 GeV dans l'expérience Star à RHIC, l'accélérateur du Brookhaven national laboratory (États-Unis).
© BNL



Le déconfinement
des quarks
et des gluons.
page 42

installées auprès des grands accélérateurs du Cern. Ayant observé la suppression anormale du méson J/Ψ interprétée comme un effet d'écrantage dans le plasma, la collaboration NA50 dans laquelle l'IN2P3 est largement impliqué a annoncé en février 2000 la mise en évidence de cette phase plasma. La poursuite de l'étude détaillée de cet état déconfiné de la matière ne pourra se faire qu'auprès d'accélérateurs pouvant fournir des énergies disponibles plus élevées comme Rhic aux États-Unis (les premières collisions ont eu lieu en 2000) et plus tard LHC au Cern (jusqu'à 2200 GeV par nucléon). La mise en service de ces machines de nouvelles générations s'accompagne de la construction de détecteurs aux performances inégalées à laquelle participe activement l'IN2P3. Il s'agit des détecteurs Star et Phenix à Rhic, et du détecteur Alice auprès du LHC qui est l'un des programmes prioritaires de l'Institut. L'effort instrumental consacré à ces expériences est à la mesure des objectifs scientifiques visés.

*Cible segmentée
de l'expérience NA50
au Cern avec de part
et d'autre le dispositif
de repérage
de la ciblette touchée.
© CNRS/IN2P3*

Lors de collisions d'ions lourds réalisées à plus basse énergie (de quelques dizaines à quelques centaines de MeV par nucléon), quarks et gluons restent confinés au sein des nucléons. Des expériences ont été réalisées dans ce domaine d'énergie avec le détecteur Indra au Ganil, qui ont apporté des résultats marquants. En particulier, des « instabilités spinodales » ont été mises en évidence dans un régime de multifragmentation. De telles instabilités se manifestent lorsque le système des deux noyaux en collision entre dans la région de coexistence des phases liquide et gazeuse du diagramme de phase. Cette région dite spinodale étant mécaniquement instable, les fluctuations de densités varient exponentiellement avec le temps conduisant à l'explosion du système en un grand nombre de fragments: c'est la multifragmentation. Les modèles présupposant une transition de phase et prenant en compte ces processus de fluctuations reproduisent de façon convaincante les données expérimentales obtenues. Des développements théoriques récents ont également permis de montrer qu'une transition de phase liquide-gaz dans un système fini peut être caractérisée de façon non ambiguë par une capacité calorifique négative. Cette approche thermodynamique, qui nécessite une bonne définition du système considéré, en particulier en termes de volume et de pression, a été appliquée aux données issues de plusieurs expériences utilisant différents appareillages: un excellent accord a été trouvé entre expérience et théorie. Elle devra être utilisée de façon

*Transition de phase
liquide-gaz de la
matière nucléaire.
page 44*



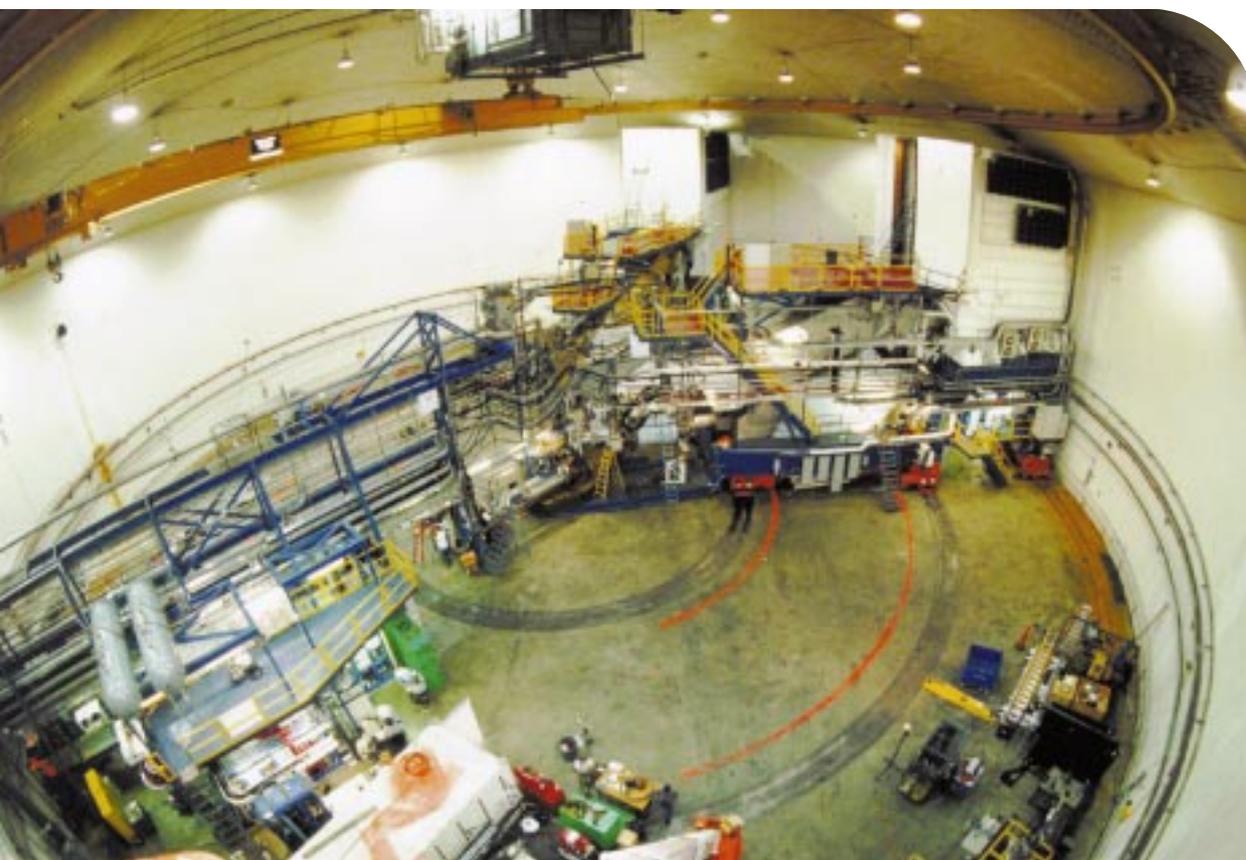
extensive avant d'être définitivement validée. En effet, des analyses théoriques alternatives, faisant appel à des méthodes plus universelles de fluctuations d'observables dans le cadre de systèmes finis et ne présupposant pas d'équilibre thermodynamique, donnent également de bons résultats. Une campagne de mesures a été récemment effectuée avec Indra à GSI qui dispose d'énergies plus élevées que Ganil. Elle permettra de tester la robustesse et la pertinence de ces nouvelles approches à ces énergies.

LA PHYSIQUE HADRONIQUE

Sur le chemin du simple au complexe, la physique hadronique vise essentiellement à comprendre la structure des nucléons et des noyaux légers, à déterminer si QCD peut rendre compte quantitativement du confinement des quarks et des gluons dans les hadrons, et enfin à examiner la modification de structure de ces hadrons à l'intérieur de la matière nucléaire.

Des avancées théoriques et l'accroissement de la puissance de calcul sur réseau permettent d'obtenir de nouvelles prédictions, basées sur QCD, pour les propriétés des hadrons. Néanmoins, des ensembles complets de mesures sont nécessaires pour progresser dans la compréhension de cette physique: un nombre important d'observables (en particulier celles faisant intervenir la polarisation des particules) doit être mesuré, afin d'isoler les contributions relatives des différents processus ou résonances, et un large domaine d'énergie doit être couvert pour observer la transition entre les degrés de liberté des hadrons et ceux des quarks.

Dans ce contexte, la diffusion d'électrons est un outil privilégié. En particulier, les faisceaux d'électrons d'énergies supérieures au GeV permettent de sonder les hadrons et les noyaux avec des résolutions inférieures aux dimensions des nucléons, tout en couvrant le seuil de production d'étrangeté. L'accélérateur Cebaf (grandes intensités, polarisations et cycles utiles) du Jefferson Laboratory (États-Unis) est l'outil de choix pour ces recherches. Des équipes de l'IN2P3 y travaillent depuis plusieurs années. Elles ont participé avec succès à la mise au point d'équipements généraux et à la réalisation de nombreuses expériences.



Hall A d'expérience
du Thomas Jefferson
National Laboratory
(TJNAF, États-Unis).
© TJNAF

Sonder nucléons et
petits noyaux au plus
près de leurs quarks.
page 45

Des résultats importants ont ainsi été obtenus concernant l'étude du nucléon et des noyaux légers. En outre, un ensemble de mesures d'asymétrie de violation de parité a été engagé en Europe et aux États-Unis pour vérifier si les propriétés fondamentales (masse, spin...) des nucléons sont bien en partie associées aux paires de quark s - antiquark s issues de la mer dans laquelle sont « plongés » leurs trois quarks (u et d) constituants, et évaluer cette contribution.

En France, avec son faisceau de photons fortement polarisé et d'énergie maximale 1,5 GeV, l'ensemble expérimental Graal situé auprès de l'anneau de l'ESRF (Grenoble) est dédié depuis fin 1996 à la mesure d'observables liées à la photo-production de mésons (π , η , K , ω) sur le proton.

L'analyse des dernières expériences réalisées à Saturne avant sa fermeture en 1997 a été menée à bien. Avec l'ensemble expérimental Spes4, le processus de pion cohérent dans les réactions d'échange de charge a pu être mis en évidence sans ambiguïté, même en ions lourds, et une étude de la résonance de Roper a été menée. Enfin, grâce au multidétecteur de grande acceptance Disto, toutes les voies de réactions induites par des protons sur l'hydrogène ont pu être simultanément identifiées jusqu'à une énergie de 3 GeV et la mesure des sections efficaces de production de mésons lourds (ω , ρ et ϕ) a été faite.

L'IN2P3 est également engagé, auprès de l'accélérateur de GSI/Darmstadt, dans le programme Hades. L'étude des modifications des propriétés des mésons (masses, largeurs) dans la matière nucléaire dense et chaude constitue en effet

À la quête
du contenu
étrange du proton.
page 48



Le détecteur de l'expérience G0 formé d'un ensemble de 128 scintillateurs plastiques répartis sur huit secteurs.
© CNRS/IN2P3



une voie d'approche possible permettant de signer une restauration de la symétrie chirale, spontanément brisée dans le vide de QCD. La mesure d'une paire de leptons semble la plus apte à mettre en évidence d'éventuels effets. Les premières expériences sont prévues pour la fin 2001.

L'avenir de ce programme de physique hadronique doit aujourd'hui être discuté en liaison avec l'avènement de nouveaux accélérateurs de plus haute énergie ou des modifications de dispositifs auprès d'accélérateurs existants de grande énergie. Le projet européen Elfe d'accélérateur d'électrons en continu a été longuement discuté au cours de ces dernières années (options au Cern puis à Desy), mais les moyens humains et financiers européens ne semblent pas suffisants pour le faire aboutir. Par ailleurs, il existe un projet de montée en énergie de Cebaf (à 12 GeV) qui impliquerait alors un engagement sur le long terme d'équipes de l'IN2P3 aux États-Unis.

LA STRUCTURE DU NOYAU ATOMIQUE

Un autre thème scientifique majeur de l'institut est l'étude de la structure du noyau atomique lui-même. La physique du noyau vise aujourd'hui à répondre à un certain nombre de grandes questions: quelles sont les limites de la stabilité nucléaire? quel est le nombre de combinaisons neutrons/protons conduisant à des noyaux liés? quels sont les éléments liés les plus lourds? comment se sont formés les éléments dans l'univers? Les outils nécessaires au développement de cette thématique sont les accélérateurs d'ions lourds comme le Ganil qui produisent des faisceaux de quelques MeV à 100 MeV/nucléon.

Notre connaissance de la structure du noyau repose essentiellement sur ce qui a pu être observé et déduit des études faites sur des noyaux stables. C'est notamment vrai pour les modèles théoriques utilisant des forces effectives, ceux-ci nécessitant la détermination expérimentale de paramètres. La seule façon de progresser véritablement dans notre connaissance aujourd'hui est par conséquent d'étudier le noyau atomique à ses limites. En explorant ces frontières, l'objectif est de scruter de façon privilégiée tel ou tel terme de l'hamiltonien nucléaire, c'est-à-dire de mettre en valeur un aspect particulier du noyau. Des termes comme le couplage spin-orbite, la force de pairing ou la masse effective, des termes faibles dans le cas des noyaux stables vis-à-vis de la décroissance bêta, peuvent être sondés de façon préférentielle lorsque le noyau est « poussé » dans ses limites. Mais quelles sont ces limites? On peut aujourd'hui distinguer schématiquement trois frontières: les limites en nombre de neutrons (N) que peut supporter un noyau de Z donné, ou encore limite en isospin (lié au rapport N/Z), les limites en charge et les limites en moment angulaire.

Les limites en nombre de neutrons (N) et de protons (Z)

Cette frontière correspond au domaine des noyaux exotiques, lequel s'étend jusqu'aux « drip-lines », ces lignes qui caractérisent la limite de cohésion des noyaux soit vers les très riches en neutrons (drip-line neutron), soit vers les très déficients en neutrons (drip-line proton). L'engagement des chercheurs de l'IN2P3 dans cette thématique s'est fait prioritairement au Ganil mais aussi à

Isolde. Des résultats marquants ont été obtenus au cours de ces dernières années, qui mettent en évidence des comportements quantiques tout à fait nouveaux du noyau. La modification de la structure en couches de noyaux exotiques, et de leurs nombres magiques, en fonction de leur degré d'exotécité a été examinée et a mis en évidence des comportements étonnants. La découverte au Ganil du nickel 48 (1999), probablement le

dernier noyau doublement magique, à la limite de stabilité en protons met à mal nombre de modèles théoriques. Les isotopes situés autour du nombre magique $N = 20$ (et en particulier le magnésium 32) sont également étudiés avec une attention particulière, certains ayant un comportement anormal (apparition d'états déformés prenant la place des états normaux sphériques). Toutes ces avancées ont largement profité de la mise en place au Ganil de techniques de mesures spectroscopiques en ligne pour les noyaux exotiques produits. L'utilisation de nouvelles méthodes d'interférométrie importées de l'astrophysique a également permis d'effectuer des mesures tout à fait originales dans la région des éléments plus légers, sur les noyaux à halo de neutrons Borroméens: de nouvelles données ont en particulier été obtenues sur l'hélium 6 et le lithium 11; d'autres structures exotiques ont également été mises en évidence, comme l'observation, pour le béryllium 12, d'une structure de type dimère formée de deux noyaux à halo d'hélium 6 liés par leur nuage de neutrons, une manifestation spectaculaire de l'existence de molécules nucléaires. Ces résultats sont à rapprocher de mesures réalisées au Vivitron sur des noyaux légers pour lesquels $N = Z$. D'autres phénomènes ont été mis en évidence à Isolde pour des noyaux plus lourds: loin de la stabilité, les isotopes du mercure présentent, par exemple, des instabilités de forme inexpliquées. Toute cette physique des noyaux exotiques va grandement bénéficier de la mise en service de Spiral.



Vue générale du hall d'Isolde. Le séparateur d'isotope en ligne est dédié à la production d'une grande variété de faisceaux d'ions radioactifs pour de nombreuses expériences.
© Cern



Un détail du cyclotron injecteur de moyenne énergie de Spiral.
© Ganil

Structure des noyaux exotiques légers riches en neutrons.
page 49

Découverte de ^{48}Ni , un nouveau noyau doublement magique.
page 50

Noyaux à halo Borroméens et autres structures exotiques.
page 51

La spectroscopie laser pour déterminer la forme des noyaux.
page 53



Les limites en charge

Cette frontière est celle des noyaux superlourds (au-delà de $Z = 105$) stabilisés quasi uniquement par des corrections de couches d'ordre microscopique. Ce thème de recherche a connu un développement important ces dernières années, en particulier avec la production de noyaux jusqu'à l'élément 114. Le Ganil s'est engagé dans cette voie: des expériences, notamment de production de Seaborgium, ont permis de valider le spectromètre Lise III comme outil de séparation des noyaux lourds formés. Ce programme peut être prometteur en particulier dans la perspective de l'utilisation à moyen terme de faisceaux radioactifs.

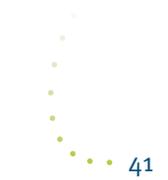
Les limites en moment angulaire et énergie d'excitation

Cette frontière concerne la cohésion des noyaux en rotation rapide. Induite par les collisions, cette rotation engendre une brisure de la symétrie sphérique du noyau. Se désexcitant par émission de particules et rayonnement gamma, celui-ci se trouve alors piégé dans des configurations très déformées et plus ou moins exotiques. Après une campagne de mesures à Legnaro (Italie), le multidétecteur Euroball a été installé auprès du Vivitron, où cette recherche s'est poursuivie. Euroball étant couplé à des détecteurs auxiliaires, des mesures plus exclusives ont pu être effectuées: détection de particules chargées, d'électrons, de noyaux de recul ou encore de neutrons. Les expériences montrent que les réponses des noyaux à ce type d'excitation de rotation très collective, qui reflètent directement leur degré de symétrie, sont extrêmement variées: noyaux à déformation ellipsoïdale, triaxiale ou encore hexadécapolaire.

La réflexion sur l'avenir des recherches en physique de basse énergie avec des faisceaux stables a commencé. Il convient en particulier de s'interroger sur la nécessité d'une machine européenne de basse énergie moderne et performante (en particulier de haute intensité).

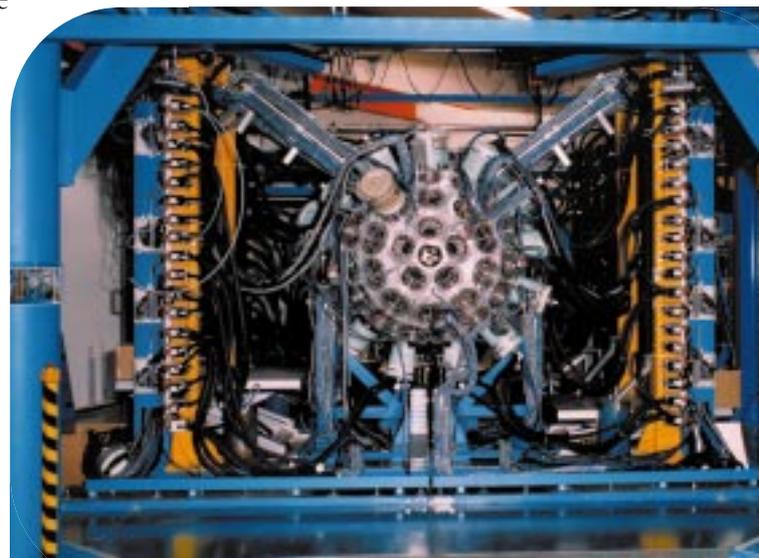
La physique du noyau dans des conditions extrêmes qui est aujourd'hui la priorité va largement bénéficier de Spiral et de la mise en service de nouveaux appareillages: détecteur de rayonnements gamma Exogam, spectromètre de large acceptation Vamos. À moyen terme, le projet ambitieux d'extension de Spiral vers les noyaux lourds devrait ouvrir de nouvelles perspectives.

À plus long terme, l'avenir de cette physique passe par la construction d'une installation de seconde génération pour la production et l'accélération d'isotopes rares. Les physiciens de l'IN2P3 participent largement aux réflexions menées dans le cadre du projet européen Eurisol et aux programmes de R&D associés.



Les rotations exotiques des noyaux. page 54

Vue de face de la structure d'Euroball, le multidétecteur de rayonnement gamma pour l'étude des noyaux superdéformés. © CNRS/IN2P3



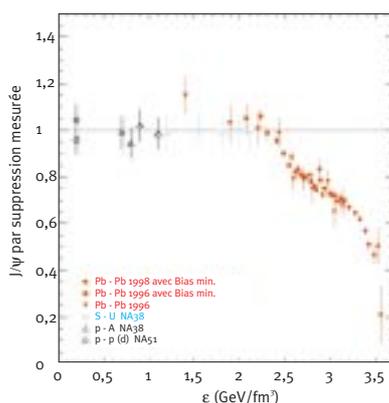
LE DÉCONFINEMENT DES QUARKS ET DES GLUONS

Prédit par la théorie mais jusque-là hypothétique, le plasma de quarks et de gluons, un état déconfiné de la matière, pourrait bien avoir été «entrevu» au Cern par l'expérience NA50. Les résultats qu'elle a obtenus sont en effet incompatibles avec une explication conventionnelle en termes de matière confinée. D'autres expériences, en cours et à venir, poursuivent la quête de ce nouvel état de la matière.

Ci-dessous de haut en bas :

Taux de production de mésons J/ψ (expériences NA38, NA51 et NA50) divisé par la suppression mesurée dans les collisions entre ions légers, en fonction de la densité d'énergie atteinte dans la collision.

Vue du calorimètre électromagnétique de l'expérience NA50.
© CNRS/IN2P3



Le plasma de quarks et de gluons (ou QGP), un état de la matière considéré comme l'ancêtre de la matière nucléaire usuelle, serait composé de quarks et de gluons évoluant librement, comme les électrons et les ions dans un plasma «classique». Les quarks ne seraient plus confinés dans les hadrons car le potentiel qui les lie s'annulerait dans des conditions extrêmes de température et de pression. La théorie des interactions fortes prédit la formation de ce plasma pour des températures supérieures à $T_c \approx 150\text{-}170$ MeV. Cet état de la matière n'existe pas dans notre Univers «froid», mais il a dû le remplir durant ses tout premiers instants, quelques microsecondes après le Big-Bang.

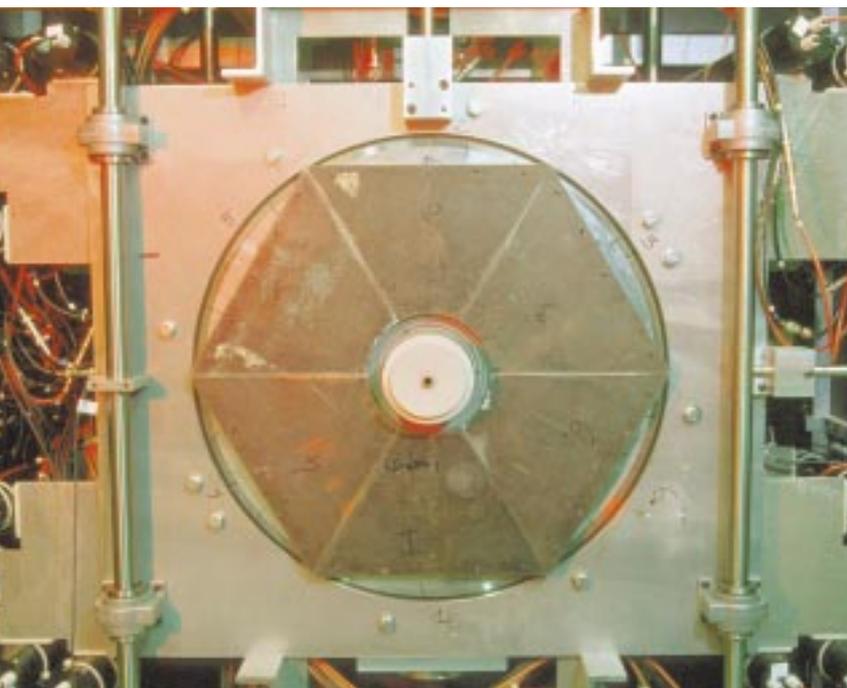
Les grands accélérateurs permettent de recréer en laboratoire les conditions de l'Univers primordial et d'étudier certaines étapes de son refroidissement. Les collisions d'ions lourds ultrarelativistes pourraient notamment permettre de produire, de manière fugitive, un QGP et d'étudier la formation de la matière hadronique.

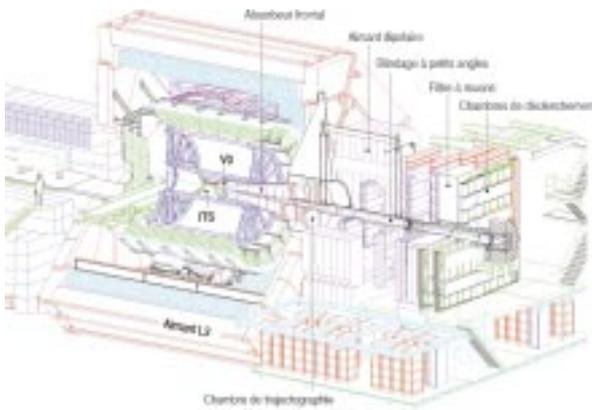
L'EXPÉRIENCE NA50

Différentes signatures de la formation de ce plasma dans les collisions noyau-noyau ont été proposées par la théorie. La «suppression» (ou réduction d'apparition) du méson J/ψ (état lié du quark charmé et de son antiquark), qui résulte de l'annulation par effet d'écran au sein du plasma de la force attirant ses quarks, est un signal parmi les moins ambigus.

L'expérience NA50 avait pour objectif d'étudier, au SPS du Cern, la suppression de J/ψ dans des interactions plomb-plomb de très haute énergie (énergie disponible pour la réaction: 17 GeV/nucléon). Elle était constituée du spectromètre à muons des expériences NA10 et NA38 afin d'identifier la paire de muons produite par la désintégration de J/ψ , d'un calorimètre électromagnétique pour échantillonner l'énergie libérée dans la collision, d'un calorimètre hadronique pour mesurer l'énergie restante après la collision et d'un détecteur de multiplicité pour mesurer le nombre de particules produites dans la collision.

Les connaissances acquises avec les expériences antérieures NA51 et NA38 avaient permis de comprendre la suppression «ordinaire» de J/ψ observée dans des collisions d'ions lourds: celle-ci correspond à une absorption de J/ψ dans la matière confinée (section efficace ~ 6 millibarns). Mais les données Pb-Pb de NA50 prises en 1995, en 1996 et en 1998 au Cern ont permis d'observer non seulement cette suppression «ordinaire» pour les collisions les plus périphériques, mais aussi l'apparition d'une suppression anormale avec un effet de seuil pour les collisions semi-périphériques, et une augmentation de cette suppression anormale pour les collisions les plus centrales. Clairement incompatibles avec toute interprétation basée sur de la matière hadronique, ces données mettent en évidence l'apparition d'un nouveau processus physique pour des densités $\approx 2\text{-}3$ GeV/fm^3 , lequel est interprété comme un effet d'«écranage» de J/ψ dans le plasma pour des températures de l'ordre de 220-230 MeV en





Les contributions de l'IN2P3 à la construction d'Alice.
© CNRS/IN2P3

accord avec la valeur prédite par les calculs théoriques ($\approx 1,3T_c$). L'allure particulière de cette suppression anormale pourrait même correspondre à un écrantage successif des charmonia χ et J/ψ dans la phase déconfinée. Quoi qu'il en soit, elle serait bien le signe d'un déconfinement des quarks.

AU-DELÀ DE NA50

Afin d'explorer plus avant la physique du QGP, l'IN2P3 s'est engagé dans trois nouveaux programmes sur Rhic à Brookhaven (Phenix et Star) et sur LHC au Cern (Alice). En service en 2000 et en 2006, ces collisionneurs offrent ou offriront des énergies disponibles jusqu'à 200 et 5 500 GeV/nucléon, ce qui devrait *a priori* faciliter l'accès à la phase plasma.

Outre la poursuite et l'approfondissement des études de l'effet d'écran sur les quarkonia dans la phase déconfinée et leur extension à la famille des Upsilon (Y), ces expériences étudieront d'autres signaux porteurs d'informations caractéristiques de la formation du plasma et de ses propriétés (durée de vie, extension...). Parmi ceux-ci, on peut citer la production de photons thermiques et de photons à grande impulsion transverse, les corrélations de particules, la production de particules (multi-)étranges, et la production de diélectrons et de dimuons autres que ceux issus des résonances de quarks lourds.

LES DÉVELOPPEMENTS INSTRUMENTAUX

L'IN2P3 concentre principalement ses efforts sur la mesure des trajectoires des particules chargées jusqu'à de faibles impulsions transverses dans Star et Alice, et sur la détection des dimuons dans Phenix et Alice. Pour cela, il développe des détecteurs à micropistes de silicium (SSD) pour Alice et Star, réalise et installe l'électronique « front-end » des chambres à fils à cathodes du bras dimuon nord de Phenix, et participe à la construction du spectromètre à dimuons d'Alice.

Les détecteurs SSD offrent une résolution de

$\sim 15/850 \mu\text{m}$ (le long des/normal aux pistes). Dans Star, une couche cylindrique de 1 m^2 de ces détecteurs (500 000 voies électroniques) est ajoutée à trois couches de détecteurs à dérive. Dans le tracker interne ITS d'Alice, deux couches cylindriques de $5,5 \text{ m}^2$ de ces détecteurs (2,7 millions de voies) viennent compléter deux couches de détecteurs pixels et deux couches de détecteurs à dérive. Ces ensembles permettront la mesure précise des vertex de collision et des vertex de désintégration de particules instables.

Le spectromètre à dimuons d'Alice est constitué, derrière un absorbeur frontal (entre 2 et 9°) et autour d'un blindage à petits angles ($< 2^\circ$), d'un aimant dipolaire et de dix plans de chambres à fils à cathodes segmentées pour la mesure des trajectoires. Ceux-ci couvrent 100 m^2 (un million de voies) et offrent des précisions supérieures à $100/800 \mu\text{m}$ (le long des/normal aux fils), conduisant à une résolution de $100 \text{ MeV}/c^2$ à la masse de la résonance Y . À l'aval d'un dernier filtre à muons, quatre plans de chambres à plaques résistives de 140 m^2 (21 000 voies) assurent le déclenchement. Enfin, un hodoscope de scintillateurs (V0) de $0,4 \text{ m}^2$ (120 voies) fixé contre la face de l'absorbeur frontal permet le rejet des événements de bruit de fond. Des efforts importants ont été et sont encore consacrés à la conception, à la réalisation et aux tests d'éléments de mécanique et d'électronique de lecture et de décision.



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://phenix-france.in2p3.fr>

<http://na50.web.cern.ch/NA50>

<http://www2.rhic.bnl.gov/html2/tour6.html>

<http://www1.cern.ch/ALICE/welcome.html>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

NA50:

CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, IPN Orsay, LAPP, LPC Clermont, LPNHE Palaiseau.

PHENIX:

CNRS/IN2P3 : LPNHE Palaiseau.
CEA/DSM : Dapnia.

ALICE ET STAR:

CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, IPN Orsay, IReS, LPC Clermont, Subatech.
CEA/DSM : Dapnia.

TRANSITION DE PHASE LIQUIDE-GAZ DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

Les collisions noyau-noyau sont un outil idéal pour accroître la connaissance des propriétés de la matière nucléaire dans des conditions extrêmes de température, de pression, voire d'asymétrie de charge (rapport neutrons/protons). Elles permettent en particulier d'induire et d'étudier les changements d'état de systèmes finis, les noyaux.

Ci-dessous à gauche : Haut : Diagramme de phases de la matière nucléaire montrant la zone spinodale (en rouge) au sein de la zone de coexistence (en orange foncé). Bas : Représentation schématique de la décomposition spinodale d'un noyau; les figures en 3D résultent d'une simulation avec un calcul de type Boltzmann-Langevin. Le temps va croissant de gauche à droite.

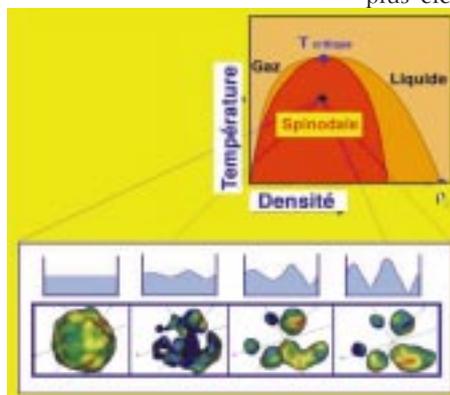
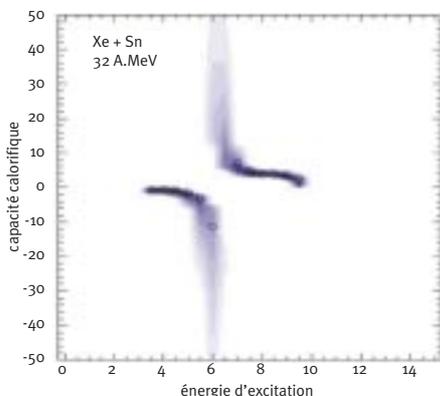
Ci-dessous à droite : Capacité calorifique en fonction de l'énergie pour des systèmes formés lors de collisions centrales entre des ions xénon à 32 MeV/nucéon et une cible d'étain.

Quand on atteint, et dépasse, des vitesses proches de la vitesse de Fermi des nucléons dans les noyaux ($\sim c/4$), les collisions noyau-noyau conduisent à la production d'un grand nombre d'éjectiles. Les détecter et les identifier avec efficacité et résolution permet de caractériser l'état final du système et de comprendre les processus qui y mènent. Les collisions à faible ou à moyen recouvrement des deux partenaires informent sur l'évolution de la viscosité de la matière nucléaire. Quant aux collisions plus frontales, où l'ensemble du système explose en de nombreux fragments (multifragmentation), elles permettent d'explorer le diagramme de

phases de la matière nucléaire. Conçu pour ce type d'études, le multidétecteur Indra a permis l'obtention de résultats originaux.

Les informations tirées des collisions frontales sont particulièrement riches et viennent à l'appui d'un des scénarios de collision envisagés théoriquement: après avoir subi une compression modérée, le système formé se dilate et entre dans la zone de coexistence du diagramme de phases, atteignant la région spinodale où la matière répond à une augmentation de pression par une diminution de densité; fortement amplifiées, les fluctuations de densité mènent alors à la fragmentation du système. Avec un grand nombre de collisions, les divers états finals explorant très largement l'espace de phase, on obtient un échantillon d'événements en équilibre statistique. Expérimentalement, et pour des collisions de 30 à 40 MeV/nucéon, le lien entre la multifragmentation et les instabilités spinodales a été révélé par une surproduction d'événements où les fragments avaient tous la même charge (il semblerait cependant que, pour des énergies de bombardement plus élevées (jusqu'à 150 MeV/nucéon), le rôle des instabilités de surface devienne plus important). De grandes fluctuations en énergie cinétique ont aussi été observées dans ces collisions au voisinage de l'énergie de Fermi qui induisent, pour le petit système considéré, une capacité calorifique négative. Ces deux observations indiquent l'existence d'une zone de coexistence de phases et montrent que le processus de multifragmentation nucléaire s'apparente à une transition de phase liquide-gaz de la matière nucléaire.

Ces résultats, bien que demandant encore à être affinés, car le problème de la sélection expérimentale des événements pris en compte est crucial, sont évidemment d'un grand intérêt pour l'étude de la matière nucléaire, mais aussi pour l'élaboration de la physique statistique des systèmes finis qui dépasse largement le cadre de la physique nucléaire. Étudier les transitions de phase dans les systèmes finis à deux composantes (protons et neutrons) que sont les noyaux, en mettant l'accent sur l'influence du rapport neutrons/protons, sera donc l'enjeu des prochaines années. Cela demandera d'améliorer les performances des systèmes de détection.



POUR EN SAVOIR PLUS

N. Le Neindre, R. Bougault *et al.* (collaboration Indra), *Comptes rendus du XXXVIII^e meeting d'hiver de physique nucléaire*, Bormio, Italie, janvier 2000, p. 404.

B. Borderie *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 86 (2001) 3252.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, IPN Orsay, LPC Caen.

CNRS/CEA: Ganil.

CEA/DSM: Dapnia.

Roumanie : NIPNE Bucarest.

Italie : Univ. di Napoli « Federico II » et INFN sezione di Napoli, Naples.

SONDER NUCLÉONS ET PETITS NOYAUX AU PLUS PRÈS DE LEURS QUARKS

La diffusion d'électrons, une sonde électromagnétique élémentaire, permet d'explorer la structure interne des hadrons jusqu'aux quarks qui y sont confinés et ainsi d'améliorer la compréhension des propriétés de l'interaction forte qui lie ces quarks entre eux. Des résultats intéressants ont été obtenus sur le proton et sur le noyau du deutérium.

L'accélérateur d'électrons (Cebaf) du Thomas Jefferson National Laboratory (TJNAF, États-Unis) est un outil privilégié d'exploration de la structure des hadrons, en particulier des nucléons et des noyaux légers. Opérationnel depuis 1997, il délivre un faisceau intense et continu dans trois halls expérimentaux simultanément, avec des énergies de 1 à 6 GeV et une forte polarisation.

La diffusion d'électrons présente le grand avantage d'être très sélective car elle permet de choisir les degrés d'impulsion, d'énergie et de polarisation transférés à la particule cible. On peut ainsi étudier un hadron soit comme un objet unique mais composite, soit comme un ensemble de quarks et de gluons. Les électrons diffusent sur les hadrons en interagissant avec leurs distributions de charge et de moment magnétique. Dans cette interaction, la valeur de la quadri-impulsion transférée Q^2 caractérise le pouvoir de résolution spatiale de la sonde. Dans le cas élastique, où le hadron reste inchangé, on mesure des grandeurs directement

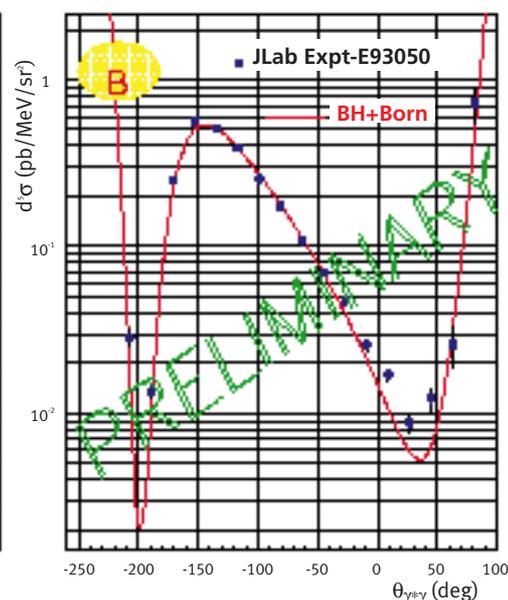
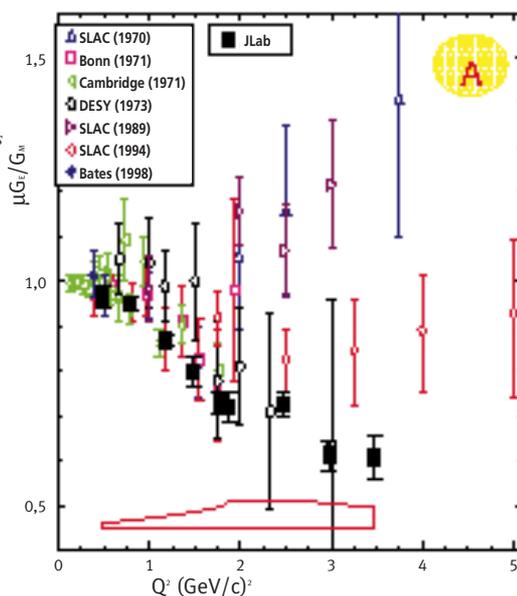
liées aux distributions de charge et de moment magnétique: les facteurs de forme électromagnétiques. Dans le cas du processus de diffusion Compton virtuelle, l'énergie transférée au hadron fait qu'il se déforme et émet un photon. Cela permet d'explorer les polarisabilités du proton, c'est-à-dire d'étudier la déformation de sa structure interne sous l'effet d'un champ électromagnétique.

LA STRUCTURE DU PROTON

La plupart des données concernant les facteurs de forme électrique (G_E) et magnétique (G_M) du proton proviennent de mesures de sections efficaces absolues de diffusion élastique d'électrons. Mais la contribution de G_E à la section efficace est cinématiquement supprimée quand l'impulsion transférée augmente, ce qui a pour conséquence un manque de précision sur la détermination de ce facteur de forme.

L'expérience du hall A du TJNAF a résolu ce problème en diffusant un faisceau d'électrons longitudinalement polarisé et en mesurant simultanément, à l'aide d'un polarimètre à plan focal, les composantes de polarisation transverse et longitudinale transférées au proton. Cette mesure donne directement accès au rapport G_E/G_M et donc à G_E , G_M étant bien connu. Les résultats de cette expérience (figure A), pour des Q^2 compris entre 0,5 et 3,5 $(\text{GeV}/c)^2$, indiquent pour la première fois, avec une précision de quelques pour cent, une dif-

A: Rapport G_E/G_M des facteurs de forme électromagnétiques du proton, mesuré au TJNAF et dans les expériences antérieures pour différentes valeurs de l'impulsion transférée.



B: Section efficace de diffusion Compton virtuelle sur le proton, mesurée pour différentes valeurs de l'angle relatif entre le photon virtuel échangé et le photon réel produit. Comparaison avec la prédiction (BH+Born) faite pour un proton supposé indéformable (en rouge).

férence significative entre les comportements de G_E et de G_M en fonction de Q^2 , et imposent de fortes contraintes aux modèles du nucléon basés sur QCD, la théorie de l'interaction forte.

La première expérience de diffusion Compton virtuelle (VCS) sur un proton a été réalisée auprès de l'accélérateur MAMI à Mayence en 1995. Elle a permis de confirmer la pertinence de la théorie des perturbations chirales et le rôle du nuage de pions virtuels entourant le nucléon.

L'expérience suivante s'est déroulée au TJNAF: là, l'énergie incidente plus élevée des électrons permet de sonder le proton à plus grand transfert (1 et 2 $(\text{GeV}/c)^2$) et donc d'envisager sa description en termes de quarks et de gluons. L'électron et le proton sortants ont été détectés dans les deux spectromètres de haute résolution du hall A et les sections efficaces absolues déterminées précisément. Des résultats préliminaires sont donnés dans la figure B. L'effet des polarisabilités est contenu dans le petit écart entre les points mesurés et la courbe continue, celle-ci ayant été entièrement calculée à partir des facteurs de forme du proton mesurés par ailleurs (figure A), d'après un modèle supposant le proton indéformable sous l'effet du champ électromagnétique. Ces polarisabilités, mesurées à grands Q^2 , sont des observables originales qui apportent des contraintes nouvelles aux modèles de structure du nucléon.

LA STRUCTURE DU NOYAU DE DEUTÉRIUM

Le deuton est un noyau atomique élémentaire composé d'un proton et d'un neutron. Du fait de son spin 1, sa structure électromagnétique est décrite par trois facteurs de forme: deux sont liés aux distributions internes de charge (composantes sphérique et quadrupolaire) et un à la distribution des moments magnétiques. Pour déterminer chacun d'eux individuellement, les mesures de sections efficaces non polarisées ne suffisent pas: une observable de polarisation doit aussi être mesurée. La plus adaptée est la polarisation tensorielle t_{20} (différence entre les nombres de deutons formés dans les états de projection de spin 0 et ± 1 au cours de la diffusion élastique électron-deuteron).

Les équipes françaises ont joué un rôle clef dans la mesure de t_{20} réalisée lors de la première « grande expérience » du TJNAF. Les impulsions transférées élevées qui ont pu être atteintes ont permis de sélectionner des

LES DISTRIBUTIONS DE PARTONS GÉNÉRALISÉES

Les distributions de partons généralisées (DPGs) sont une extension des distributions de partons « classiques » mesurées dans les expériences inclusives de diffusion profondément inélastique de leptons sur le nucléon. Les distributions de partons classiques traduisent la probabilité $q(x) = |\psi(x)|^2$ pour qu'un des quarks du nucléon porte la fraction x de l'impulsion longitudinale de celui-ci. En revanche, les DPGs, accessibles par des réactions exclusives (où tout l'état final de la réaction est connu), sont une mesure de l'interférence entre l'état où un quark porte une fraction x de l'impulsion du nucléon et celui où un quark porte une fraction $x + \xi$. Il est clair que l'information à laquelle on accède, $\psi(x)\psi(x + \xi)$, est bien plus riche; une règle de somme permet en particulier d'être sensible au moment orbital des quarks à l'intérieur du nucléon.

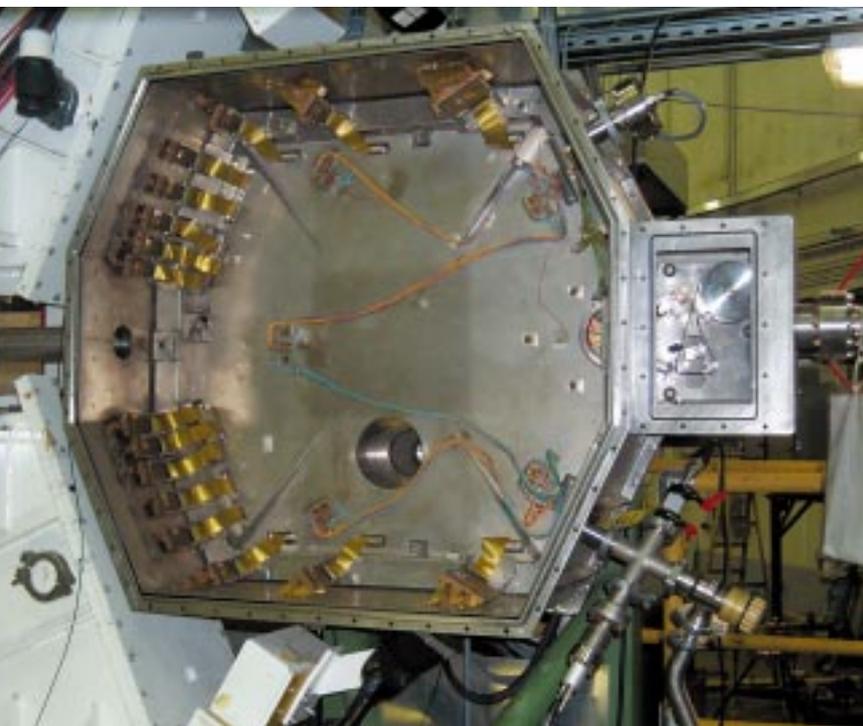
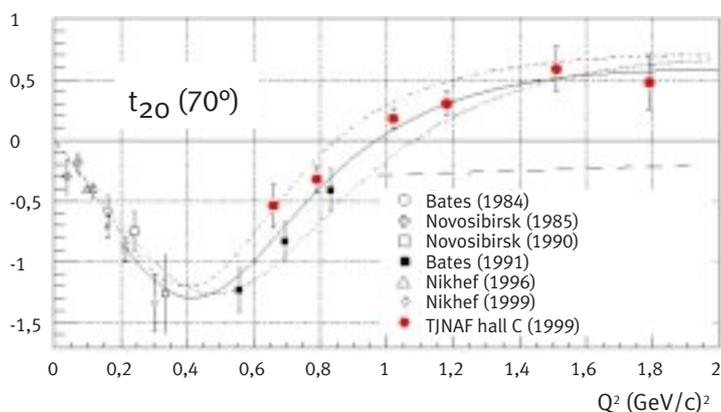
Expérimentalement, pour extraire les DPGs, il faut mesurer sur une grande plage cinématique une série d'observables de réactions exclusives à grand Q^2 . Une première génération d'expériences a été initiée au TJNAF par des porte-parole français (électroproduction exclusive de ρ , et Deep-VCS) avec des prises de données utilisant les faisceaux actuels. Ce programme constitue un des deux pôles principaux qui justifient la montée en énergie du TJNAF.

configurations où le neutron et le proton sont très proches dans le deuteron. Différents modèles récents de structure du deuteron ont pu être testés: des descriptions en termes de nucléons et de mésons (courbes rouge et noire), ou de quarks et de gluons (courbes bleues, en désaccord à ces énergies), et des descriptions relativistes (courbes vertes). Ces dernières, notamment, sont en bon accord avec les données.

LES COLLABORATIONS FRANÇAISES AU TJNAF DANS LEUR DIVERSITÉ

Les physiciens de l'IN2P3 ont participé à de nombreuses autres expériences de physique au TJNAF durant les années 1998-2000, dont celle de diffusion inélastique polarisée sur l'hélium 3. Leur contribution à l'instrumentation des halls s'est concrétisée par la mise en service d'un mesureur d'énergie de faisceau et d'un polarimètre de faisceau. D'autres appareillages et expériences sont en préparation, et le futur est ouvert quant à la participation au projet de montée en énergie de la machine à 12 GeV.

Polarisation tensorielle t_{20} du deuton en fonction de l'impulsion transférée: prédictions théoriques (courbes) et mesures réalisées au TJNAF et dans les expériences antérieures (symboles).



Intérieur du mesureur d'énergie installé dans le hall A: des détecteurs à micro-pistes de silicium

mesurent les angles des particules issues d'une diffusion élastique sur la cible interne du mesureur.
© CNRS/IN2P3

POUR EN SAVOIR PLUS

- <http://isnwww.in2p3.fr/hadrons/hadrons.html>
- <http://ipnweb.in2p3.fr/~phase/deeprho/index.html>
- <http://clrwww.in2p3.fr/sondem/welcome.html>
- <http://www.jalb.org>
- G_E/G_M : M.K. Jones *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 84 (2000) 1398.
- VCS: J. Roche *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 85 (2000) 78.
- t_{20} : D. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 84 (2000) 5053.
- DPGs: X. Ji, *J. Phys. G, Nucl. Part. Phys.*, 24 (1998) 1181.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: ISN, IPN Orsay, LPC Clermont.

CEA/DSM: Dapnia.

À LA QUÊTE DU CONTENU ÉTRANGE DU PROTON

La détermination de la contribution du quark étrange aux propriétés du proton est l'un des enjeux de la physique hadronique contemporaine. Les expériences en cours, de diffusion élastique d'électrons polarisés sur une cible d'hydrogène liquide, devraient permettre d'atteindre cet objectif à moyen terme.

à droite:
Vue d'un octant de
détection de
l'expérience G0 en
cours de construction
en France.
Les 16 ensembles
scintillateurs-guides
sont visibles avant la
fermeture du détecteur.
© CNRS/IN2P3

ci-dessous:
L'ensemble détecteur
dédié à l'expérience
PVA4 dans le hall
expérimental à Mainz.
© CNRS/IN2P3



Dans les années soixante-dix, les expériences indiquaient que le proton était formé de 3 quarks de valence: les quarks u, u et d. Plusieurs expériences ont par la suite mis en évidence que les quarks étranges (s) contribuent aussi à ses propriétés fondamentales (spin, masse...). Plus lourds que les quarks u et d, ils sont issus de la « mer » de paires quark-antiquark dans laquelle « baignent » les quarks de valence. Un programme expérimental international, dont le but est de quantifier la contribution de ces quarks aux distributions internes de charge et de courant/spin du proton, est actuellement conduit dans différents laboratoires: les expériences Happex et G0 au Jefferson Laboratory (TJNAF), Sample à MIT-Bates et PVA4 à Mainz.

Pour déterminer expérimentalement cette contribution, des expériences de diffusion élastique d'électrons polarisés longitudinalement sur une cible d'hydrogène liquide sont réalisées. Deux types d'interaction interviennent dans ces expériences: l'interaction électromagnétique

(échange de photons virtuels), qui domine, et l'interaction faible (échange de bosons Z^0). La non-conservation de la parité dans l'interaction faible au cours de ces expériences induit une asymétrie du taux de comptage en fonction de l'hélicité des électrons incidents. Cette asymétrie dépend des facteurs de forme électromagnétiques et faibles, qui décrivent les distributions de charge et de courant à l'intérieur du proton, et qui eux-mêmes dépendent des différents saveurs de quarks (u, d, s). Les facteurs de forme électromagnétiques ayant été mesurés par ailleurs, la mesure de cette asymétrie pour deux angles de diffusion permet alors d'accéder à la contribution des quarks étranges. Une difficulté de ces expériences est qu'elles nécessitent de maîtriser les erreurs systématiques et d'enregistrer de fortes statistiques du fait de la faible asymétrie escomptée (de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} selon l'impulsion transférée).



L'IN2P3 EST IMPLIQUÉ DANS DEUX EXPÉRIENCES: PVA4 ET G0

L'expérience PVA4, qui se déroule actuellement auprès de l'accélérateur Mami (Mainz, Allemagne), a pour but de déterminer une combinaison linéaire des facteurs de forme étranges du proton pour une quadri-impulsion transférée Q^2 de $0,227 \text{ (GeV/c)}^2$. Elle utilise un faisceau d'électrons polarisés de 855 MeV. Les électrons diffusés sont détectés dans un ensemble calorimétrique de 1022 détecteurs Cherenkov disposés en sept couronnes. Pour l'IN2P3, les prises de données se termineront fin 2001.

L'expérience G0, qui se déroulera entre 2002 et 2005 au Jefferson Laboratory (Newport News, États-Unis), devrait permettre la séparation des facteurs de forme étranges (électrique et magnétique) du proton à des Q^2 compris entre 0,1 et 1 (GeV/c)^2 . Le dispositif expérimental est constitué d'un aimant supraconducteur à symétrie toroïdale, d'une cible d'hydrogène liquide et d'un ensemble de 128 scintillateurs plastiques répartis sur huit secteurs. Les laboratoires français ont construit quatre des huit secteurs, ainsi que l'électronique d'acquisition associée.

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www.npl.uiuc.edu/exp/G0/G0Main.html>
<http://www.kph.uni-mainz.de/A4/Welcome.html>
K.S. Kumar et P.A. Souder, Strange quarks and parity violation, *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 45 (2000) 333-395.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPN Orsay, ISN.

STRUCTURE DES NOYAUX EXOTIQUES LÉGERS RICHES EN NEUTRONS

Les modèles actuels du noyau sont issus de décennies d'études effectuées sur des noyaux stables. Il apparaît désormais fondamental de tester leur validité pour les noyaux exotiques situés loin de la vallée de stabilité, dont les nombres magiques peuvent ne pas être les mêmes.

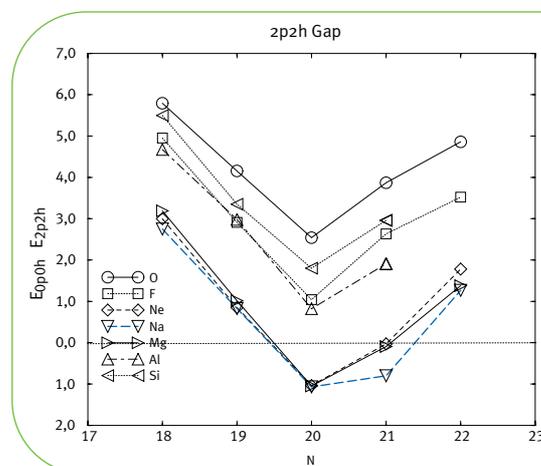
Comme en physique atomique, l'existence de nombres magiques signe la structure en couches fermées des noyaux: ceux possédant un nombre de protons (Z) ou de neutrons (N) proches de ces nombres sont sphériques, la force d'appariement γ étant prépondérante. ^{216}Th est ainsi décrit avec une très bonne approximation comme quatre paires de protons couplées à $J = 0$, à l'extérieur d'un cœur de ^{208}Pb . En revanche, l'état fondamental d'un noyau situé loin de la magie est déformé, la force quadrupolaire devenant prépondérante. La grande majorité des noyaux légers et de masse moyenne de la vallée de stabilité est sphérique, mais tous présentent des états déformés à très basse excitation. Loin de cette vallée, le résultat de la compétition peut s'inverser. Ainsi, ^{90}Zr est doublement magique (fermeture des couches $Z = 40$ et $N = 50$), alors que ^{80}Zr est déformé, la fermeture à $Z = 40$ disparaissant.

Pour sonder les fermetures de couches du côté des noyaux légers riches en neutrons, deux méthodes expérimentales ont été utilisées au Ganil: la mesure de masses, qui consiste à mesurer un temps de vol (longueur de vol ~ 100 m) et à identifier les noyaux à l'aide d'un spectromètre, et la spectroscopie γ sous faisceau, qui mesure les rayonnements émis par les noyaux recherchés autour de la cible de production. Dans le premier cas, l'énergie de liaison des deux derniers neutrons est extraite. Cette valeur reste relativement constante tant qu'une couche se remplit, puis décroît brusquement aux fermetures de couches, du fait de l'ajout de neutrons dans une couche supérieure, lesquels sont moins liés que les précédents. Dans le deuxième cas, c'est la mesure de l'énergie du premier état excité (E_{2+}) qui sonde l'effet de couche: plus E_{2+} est grand, plus la fermeture de couche est puissante.

Les deux méthodes ont montré des comportements inattendus autour de $N = 20$ pour les isotopes de Ne, Na et Mg: le niveau fondamental entre noyaux voisins change de contenu, ce qui s'explique par l'intrusion d'un niveau d'une couche supérieure qui prend la

place du niveau « normal ». Pour les isotopes de Cl, S, P et Si, un affaiblissement de la fermeture $N = 28$ a été observé. Ces comportements sont attribués à des effets de déformation et de coexistence de formes sphériques-déformées prédites dans cette région. L'observation d'un état isomérique dans ^{43}S et son interprétation en termes de coexistence de formes par un calcul de modèle en couches ont permis de confirmer cette analyse.

Il semblerait que le même type de phénomène se produise pour les noyaux avec excès de neutrons dans la région $Z = 28, N = 40$ (^{64}Cr est l'analogue de ^{32}Mg et même de ^{11}Li). Pour ceux déficitaires en neutrons autour de $Z = N = 40$, les coexistences de formes ne seraient plus sphériques-déformées mais allongées-aplaties. Les récents développements théoriques du modèle en couches et les progrès expérimentaux ont ouvert des perspectives particulièrement prometteuses pour la compréhension de la structure de noyaux qu'il est aujourd'hui possible de créer et de mesurer dans ces deux régions particulières.



Différences d'énergie entre états normaux (sphériques) et intrus (déformés) pour les isotopes d'éléments allant de l'oxygène au silicium: pour les noyaux où la différence est négative, la fermeture de couche $N = 20$ disparaît.

POUR EN SAVOIR PLUS

F. Sarazin *et al*, Shape coexistence and the $N=28$ Shell Closure far from stability, *Phys. Rev. Lett.*, 84 (2000) 5062.

M.J. Lopez-Jimenez, thèse de l'université de Caen, Ganil, 2000.

E. Caurier, F. Nowacki, A. Poves. Shell model studies of neutron-rich nuclei, *Nucl. Phys. A*693 (2001) 374.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPC Caen, IReS, IPN Orsay.

CNRS/CEA: Ganil.

CEA/DSM: Dapnia.

DÉCOUVERTE DE ^{48}Ni , UN NOUVEAU NOYAU DOUBLEMENT MAGIQUE

L'étude des propriétés de certains noyaux atomiques bien choisis permet de mettre en lumière les mécanismes fondamentaux de cohésion de ces ensembles complexes de neutrons et de protons. À cet égard, le nickel-48, vraisemblablement le dernier des noyaux atomiques doublement magiques restant à observer, est un mets de choix.

Comme les électrons dans les atomes, qui gravitent autour du noyau en se répartissant sur des niveaux quantiques d'énergie appelés couches, les nucléons, protons et neutrons, s'organisent en couches au sein du noyau. Lorsque la couche nucléaire externe contient le nombre maximal de nucléons qu'elle peut recevoir selon les lois de la mécanique quantique, le noyau voit sa cohésion accrue par rapport à celle de ses proches voisins. Découverts dans les années 1930-1940 et justifiés théoriquement en 1949 par le modèle en couches du noyau, ces nombres maximaux (2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 selon la couche

concernée) sont dits magiques. À la différence des couches atomiques remplies uniquement d'électrons, deux types de particules interviennent dans le cas des nucléons. Un noyau peut donc avoir un nombre magique de neutrons et de protons: il est alors dit doublement magique. Parmi les quelque 2800 noyaux observés à l'heure actuelle, seulement 9 possèdent cette structure doublement magique. Avec ses 28 protons et 20 neutrons, ^{48}Ni est le dixième et probablement le dernier de cette liste.

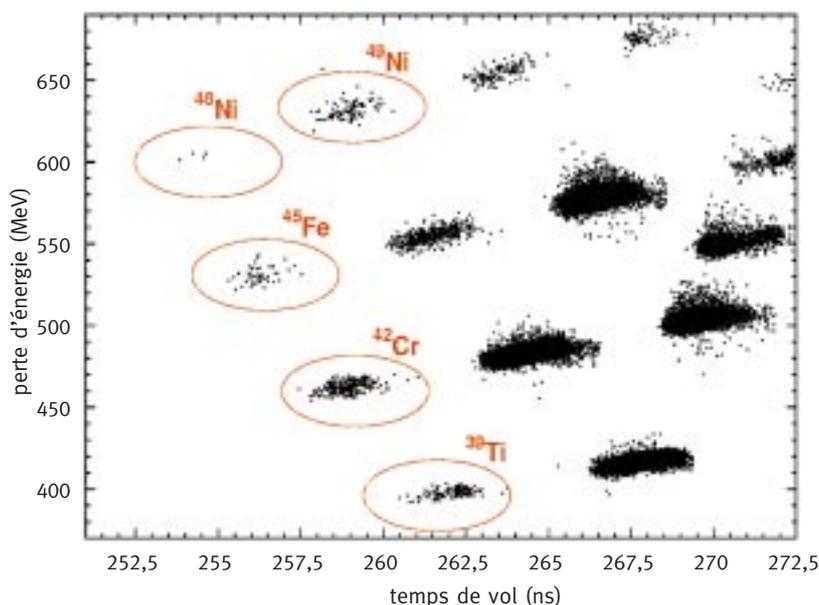
Du fait d'un trop grand déséquilibre entre leurs nombres de protons et de neutrons, certains noyaux présentent la particularité d'être à l'extrême limite d'existence pour un noyau, là où les forces de cohésion ne sont plus capables de lier ensemble tous les nucléons. Ils peuvent alors se désintégrer par émission spontanée de leurs protons et/ou neutrons excédentaires. Or, au-delà de l'importance de ^{48}Ni pour sa structure doublement magique, tous les modèles de masse nucléaire prédisent qu'il est en outre situé au-

delà de cette limite d'existence et par conséquent instable au regard de l'émission de protons, son existence ne tenant qu'à la barrière coulombienne. Un mode de décroissance possible, mais non encore observé, serait alors l'émission simultanée de deux protons, sous la forme d'un noyau ^2He .

Afin de mettre en évidence l'existence de ^{48}Ni , une expérience a été réalisée au Ganil, en septembre 1999, qui consistait à bombarder une cible de nickel naturel à l'aide d'un faisceau de ^{58}Ni d'une intensité jamais égalée (10^{12} ions/s). L'idée était de produire, par fragmentation des ions projectiles, un faisceau d'ions secondaires contenant les noyaux rares recherchés. Les fragments les plus déficitaires en neutrons du faisceau ont été sélectionnés par le dispositif Sissi/Lise3,

puis interceptés par une succession de détecteurs qui ont permis de tous les identifier sans ambiguïté. Au cours des dix jours de prise de données, quatre noyaux de ^{48}Ni ont ainsi pu être identifiés. Cette expérience a permis de déterminer une limite inférieure pour la durée de vie du ^{48}Ni d'environ 500 ns. Cela semble contredire un grand nombre de modèles théoriques qui le prédisent fortement instable, avec une durée de vie bien inférieure.

Spectre expérimental d'identification de ^{48}Ni donnant la perte d'énergie des noyaux dans un détecteur silicium en fonction de son temps de vol entre la cible de production et ce même détecteur.



POUR EN SAVOIR PLUS

B. Blank *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 84 (2000) 1116.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CENBG.

CNRS/CEA: Ganil.

Pologne: Université de Varsovie.

Roumanie: IAP Bucarest.

NOYAUX À HALO BORROMÉENS ET AUTRES STRUCTURES EXOTIQUES

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

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

Malgré la faible intensité des faisceaux (quelques centaines de noyaux par seconde), de nouveaux outils de recherche ont permis de recueillir récemment les premières informations sur les corrélations dans les noyaux à halo Borroméens connus : ${}^6\text{He}$, ${}^{11}\text{Li}$ et ${}^{14}\text{Be}$.

L'utilisation du multidétecteur de neutrons Démon comme interféromètre, par analogie avec la mesure de la taille des étoiles en astronomie, a permis d'accéder à la distance moyenne qui sépare les neutrons dans le halo : elle est de l'ordre de 6 fm pour les trois noyaux, soit plus grande que la distance n-p dans le deuton.

La configuration à trois corps de ${}^6\text{He}$ a été sondée par capture radiative d'un

proton énergétique. Le spectromètre électromagnétique Château-de-Cristal a permis de mesurer les différentes énergies du photon γ émis lors de la capture. Les résultats montrent que le proton est capturé par les différents sous-systèmes de ${}^6\text{He}$ (${}^4,5,6\text{He}$ et n) à l'exception du « di-neutron », ce qui est en accord avec les grandes distances n-n mesurées par interférométrie.

${}^{11}\text{Li}$ a aussi été étudié *via* sa décroissance β vers ${}^{11}\text{Be}^*$ suivie de l'émission de deux neutrons (${}^9\text{Be}+n+n$) à l'aide du multidétecteur de neutrons Tonnerre. L'analyse préliminaire d'interférométrie n-n semble indiquer que les neutrons quittent ${}^9\text{Be}$ simultanément, leur distance relative, inférieure à celle qu'ils ont dans le halo de ${}^{11}\text{Li}$, suggérant que c'est un neutron du halo qui se transforme en proton au cours du processus.

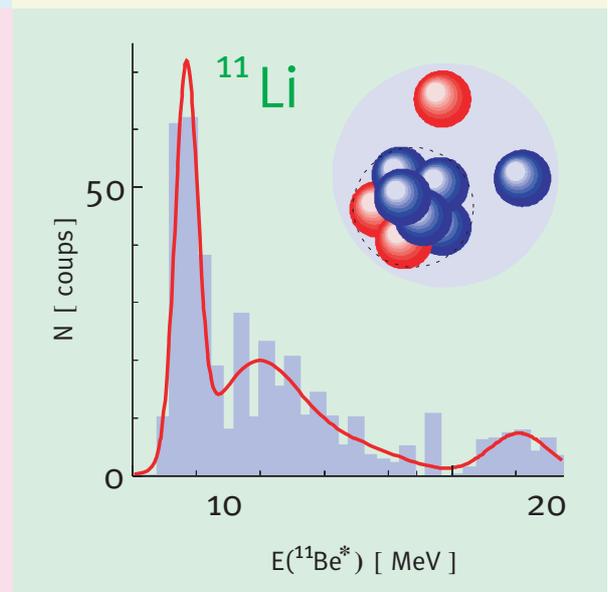
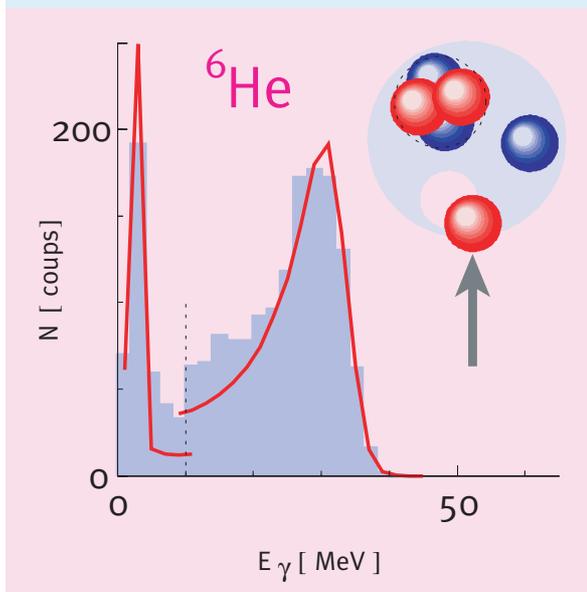
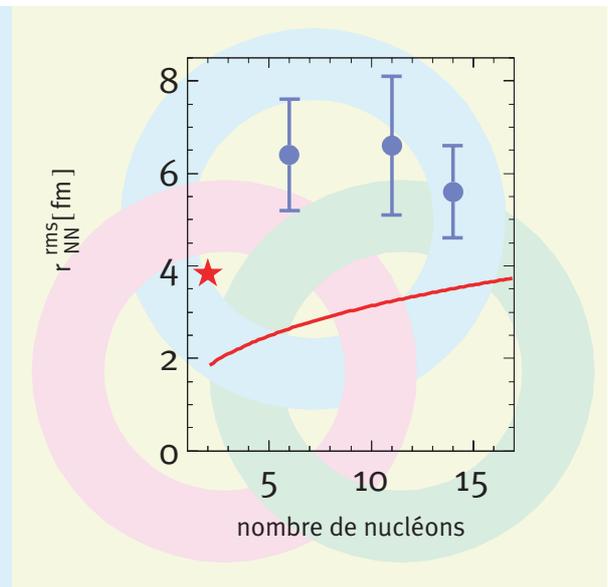
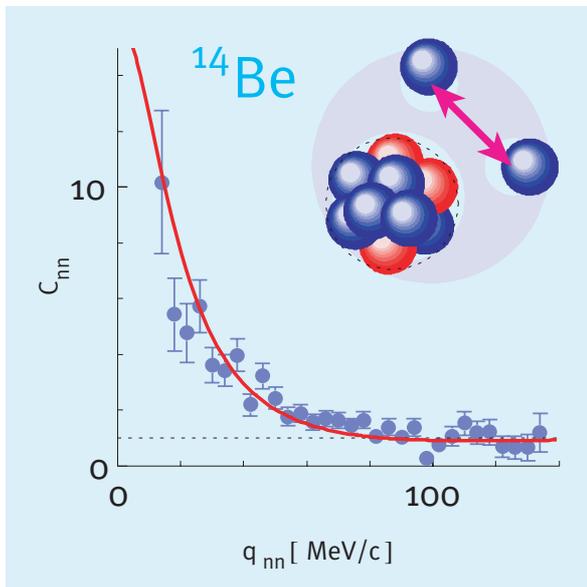
D'autres structures exotiques ont été étudiées sur des noyaux plus proches de la stabilité, mais à haute énergie d'excitation. Le résultat le plus marquant, obtenu avec le multidétecteur de particules chargées Charissa, est la découverte dans ${}^{12}\text{Be}^*$ d'états moléculaires composés de deux noyaux à halo (${}^6\text{He}$ - ${}^6\text{He}$) « tournant » l'un autour de l'autre. Les systèmes de détection utilisés et ceux en cours de développement laissent présager de nombreuses découvertes à venir.



Multidétecteur
Démon au Ganil.
© Ganil

Résultats obtenus au Ganil sur les noyaux à halo ^{14}Be (en haut à gauche): fonction de corrélation n - n en fonction du moment relatif des neutrons lors de la réaction $^{14}\text{Be} + \text{Pb}(\text{cible}) \rightarrow ^{12}\text{Be} + n + n$; on peut déduire de telles mesures les distances n - n dans le halo (en haut à droite; étoile: distance n - p dans le deuteron; ligne: distance entre deux nucléons dans le modèle de la goutte liquide).

^6He (en bas à gauche): spectre en énergie gamma lors de la réaction $^5\text{He}(p, \gamma)^6\text{Li}^*$ (3,56 MeV); on observe aussi le gamma de décroissance du ^6Li . ^{11}Li (en bas à droite): énergie d'excitation du ^{11}Be reconstituée par calorimétrie dans le processus $^{11}\text{Li} \rightarrow ^{11}\text{Be}^* \rightarrow ^9\text{Be} + n + n$.



POUR EN SAVOIR PLUS

F.M. Marqués, M. Labiche, N.A. Orr *et al.*,

Phys. Lett. B, 476 (2000) 219.

E. Sauvan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 87 (2001) 042501.

M. Freer *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 82 (1999) 1383.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPC Caen, IPN Orsay, IReS.

CNRS/CEA: Ganil.

LA SPECTROSCOPIE LASER POUR DÉTERMINER LA FORME DES NOYAUX

Loin de la stabilité, certains noyaux de masse élevée se comportent de façon curieuse: rajoutez-leur ou ôtez-leur un seul neutron et leur forme peut en être modifiée de façon importante. Comment une seule particule peut-elle avoir autant d'influence? Ce phénomène est difficilement explicable.

La forme du noyau atomique est une grandeur fondamentale car elle permet de tester et de valider les différents modèles nucléaires. À cet égard, certaines grandeurs sont importantes à déterminer: ce sont notamment le rayon de charge nucléaire et le moment quadrupolaire qui signent la forme du noyau, et le moment magnétique qui est fortement lié au degré de pureté des fonctions d'onde décrivant une configuration nucléaire donnée.

Pour extraire ces grandeurs, la physique atomique est très utile. Dans un atome, en effet, l'interaction du cortège électronique avec le noyau provoque ce qu'on appelle la structure hyperfine, tous les niveaux d'énergie atomiques se scindant en plusieurs sous-niveaux. Grâce à un faisceau laser judicieusement choisi, il est possible de sonder ces sous-niveaux, de reconstituer le spectre hyperfin et d'en extraire plusieurs paramètres d'interaction électron-noyau, chacun d'entre eux se décomposant en une partie électronique et une partie nucléaire. L'analyse de cette dernière permet d'accéder aux moments magnétique et quadrupolaire et au rayon de charge. De telles mesures sont intéressantes à effectuer sur des isotopes très exotiques, c'est-à-dire situés loin de la vallée de stabilité, car ceux-ci se comportent bizarrement: ils changent parfois radicalement de forme quand on leur enlève (ou ajoute) un seul neutron.

De nombreuses mesures ont été effectuées avec Complis (1), installé auprès du séparateur d'isotope Isolde au Cern. Les résultats obtenus sont d'une précision telle qu'ils constituent un test sévère des modèles nucléaires et en particulier de l'interaction effective nucléon-nucléon. La première région de la table de masse à avoir été étudiée est située aux alentours des masses 200, les éléments concernés étant le mercure, l'or, le platine et l'iridium. La variation de leur rayon de charge en fonction de leur nombre de neutrons a montré qu'ils présentent tous des instabilités de forme quand le nombre de neutrons s'approche du « milieu de couche » $N = 104$ (situé entre les deux couches

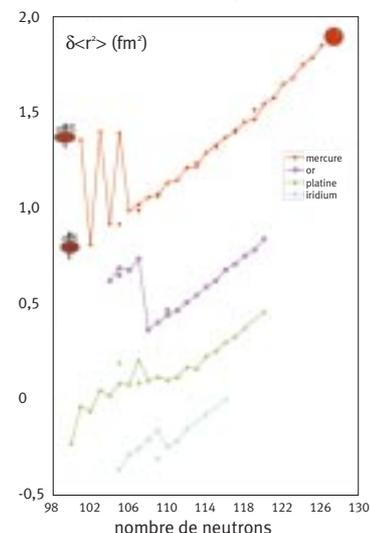
magiques $N = 82$ et $N = 126$). Ce phénomène, jusqu'à présent unique par son ampleur dans la table des isotopes, est relativement mal interprété par tous les modèles nucléaires. La raison pour laquelle le couplage d'une seule particule influence à ce point la déformation du noyau reste donc un mystère. Cela montre à l'évidence l'existence de phénomènes inexpliqués très loin de la stabilité.

La campagne actuelle de mesure de Complis a lieu dans la région des isotopes très riches en neutrons autour du noyau doublement magique $^{132}_{50}\text{Sn}_{82}$. Tous les isotopes viennent d'être mesurés jusqu'à la masse 132 et l'objectif est maintenant de franchir la couche magique $N = 82$ au-delà de laquelle les prévisions concernant les variations du rayon nucléaire diffèrent fortement selon les interactions effectives utilisées dans les modèles à champ moyen.

(1) Collaboration for spectroscopic measurements using a pulsed laser ion source.



Ligne de faisceau de l'expérience Complis.
© CNRS/IN2P3



Variation du rayon carré moyen de charge nucléaire dans la région des mercures. Les points non reliés représentent les isomères (états excités des noyaux).

POUR EN SAVOIR PLUS

F. Le Blanc, Le noyau atomique vu de l'extérieur à travers la spectroscopie laser, *Bulletin de la Société française de physique*, octobre 2000.

D. Verney, *Étude des noyaux déficients en neutrons par spectroscopie laser*, thèse de l'université de Grenoble I, IPNO-T-01-01, décembre 2000.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPN Orsay, ISN.

CNRS/SPM: LAC.

LES ROTATIONS EXOTIQUES DES NOYAUX

Grâce à des systèmes de détection de rayonnements gamma de plus en plus performants, il est aujourd'hui possible d'explorer des phénomènes nucléaires non encore observés, qu'ils soient prédits par la théorie ou au contraire inattendus. Des structures nucléaires extrêmement variées ont ainsi pu être révélées, qui sont autant de nouveaux tests pour les modèles théoriques.

Le mode de rotation qu'un noyau adopte dans certaines conditions dépend directement de sa « forme » c'est-à-dire de sa structure. Étudier les modes de rotation d'un noyau par l'intermédiaire du spectre gamma qu'il émet en se désexcitant (ses bandes rotationnelles) permet donc d'accéder à des informations essentielles sur sa structure. Aussi des études portant sur le comportement de noyaux dans des états extrêmes de moments angulaires sont-elles menées auprès du multidétecteur Euroball.

Un exemple spectaculaire est celui des bandes rotationnelles de certains noyaux « superdéformés ». Elles indiquent que, tel un ballon de rugby, ceux-ci doivent être invariants par rotation de 180° autour d'un axe perpendiculaire à leur axe de symétrie. Mais, depuis quelques années, l'étude de certaines bandes rotationnelles a permis d'avancer l'hypothèse

de l'existence pour ces noyaux d'un degré de symétrie plus élevé. À cette très grande déformation ellipsoïdale d'ordre 2, ou quadrupolaire, se superposerait une déformation d'ordre 4, ou hexadécapolaire, ce qui pose un vrai défi théorique. De telles bandes ont été observées pour quatre noyaux superdéformés de terres rares: ^{149}Gd , ^{148}Eu , ^{148}Gd et, récemment, ^{150}Tb .

D'autres noyaux superdéformés peuvent perdre leur symétrie par réflexion, en adoptant, par exemple, la forme d'une poire, une déformation octupolaire d'ordre 3. La nature des rayonnements gamma qu'ils émettent alors change. Si les corrélations octupolaires ne sont pas très fortes, cette déformation n'est pas permanente: le noyau vibre autour de sa déformation stable et il y a superposition des deux modes 2 et 3. Ce comportement a été observé pour deux noyaux superdéformés: ^{190}Hg et ^{196}Pb .

D'autres noyaux enfin peuvent perdre leur symétrie axiale et devenir triaxiaux. Une des manifestations de la triaxialité serait le mode « wobbling » dont l'analogue classique est la rotation d'une toupie asymétrique où des perturbations viennent se superposer au mouvement principal de rotation. Or ce mode se traduit par une série de bandes rotationnelles spécifiques et donne lieu à une compétition très caractéristique entre les transitions intrabandes et interbandes. Il a été identifié pour la première fois dans le noyau de ^{163}Lu .

Directement reliées aux orbitales occupées par les nucléons de valence, les déformations sont un moyen privilégié pour étudier les corrélations entre nucléons et tester ainsi les modèles théoriques. L'existence de noyaux à déformations stables encore plus exotiques est d'ores et déjà prédite mais non observée. La limite de ce qui est observable avec les détecteurs actuels et leur électronique associée est très probablement déjà atteinte. La venue de détecteurs gamma de nouvelle génération, basés sur la reconstruction des trajectoires des photons dans des détecteurs germanium segmentés, est attendue avec impatience.

Le multidétecteur Euroball III.
© CNRS/IN2P3



POUR EN SAVOIR PLUS

N. Kintz, *Étude des bifurcations $\Delta I=4$ dans les noyaux superdéformés de la région de masse $A \sim 150$* , thèse de doctorat de l'université Louis-Pasteur de Strasbourg (2000).

A. Korichi *et al.*, Linear polarization measurement of interband transitions in superdeformed ^{190}Hg : model-independent evidence for octupole vibrational structures, *Phys. Rev. Lett.*, 86 (2001) 2746.

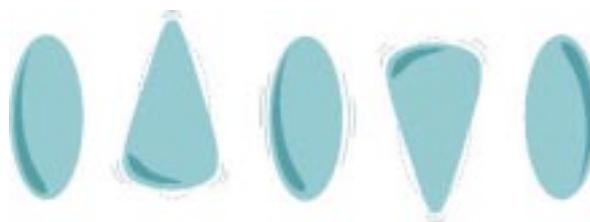
S. Ødegård *et al.*, Evidence for the wobbling mode in nuclei, *Phys. Rev. Lett.*, 86 (2001) 5866.

F. Hannachi, *Vie et mort d'un noyau superdéformé*, *Images de la Physique* (1999).

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IReS, CSNSM, IPN Lyon, IPN Orsay.

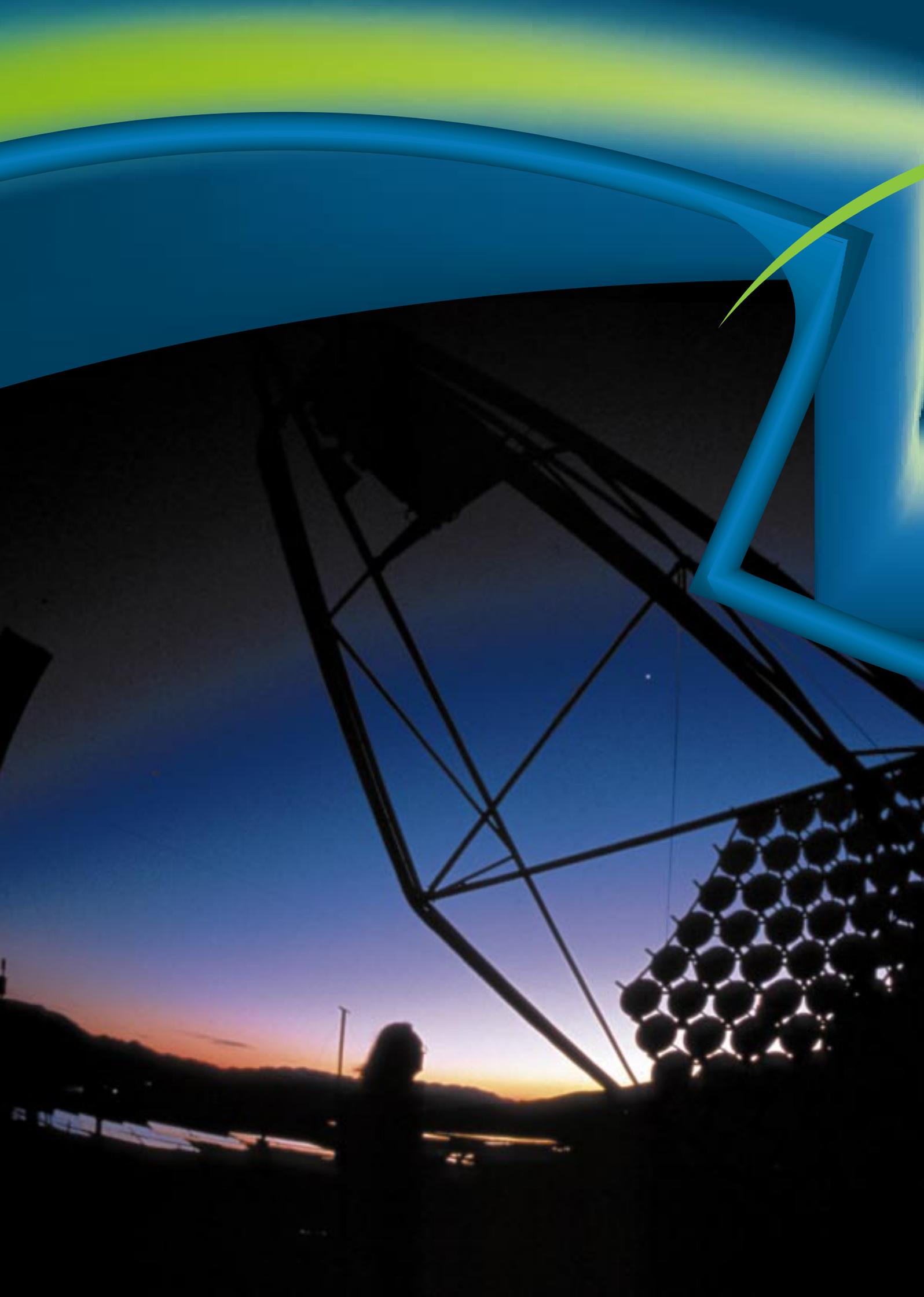
Représentation schématique de la vibration octupolaire d'un noyau superdéformé.
© CNRS/IN2P3



REMERCIEMENTS

Introduction
Daniel Guerreau

Michel Gonin
Jean-Yves Grossiord
Marie-France Rivet
Hélène Fonvieille
Michel Guidal
Gilles Quemener
Dominique Marchand
Hervé Savajols
Étienne Caurier
Bertram Blank
Miguel Marques
François Le Blanc
Araceli Lopez-Martens





ASTROPARTICULES, NEUTRINOS ET COSMOLOGIE

Depuis plusieurs années, une thématique scientifique nouvelle se développe à l'interface, d'une part, de la physique des particules et des noyaux et, d'autre part, de l'astrophysique et de la cosmologie. Elle a pris le nom d'«astroparticules». Elle utilise bien souvent des développements instrumentaux et des méthodes dont beaucoup sont issus de dispositifs utilisés auprès des accélérateurs. Elle est portée par cinq thèmes principaux.

57

LA COSMOLOGIE THÉORIQUE ET OBSERVATIONNELLE

La cosmologie s'appuie sur les théories des particules et sur les observations des distributions spatiales et temporelles des constituants de l'Univers à grande échelle: galaxies, amas de galaxies, quasars, matière noire, fond diffus cosmologique, supernovæ lointaines... Toute percée en physique des particules a donc des implications en cosmologie. En retour, toute nouvelle observation de l'Univers à grande échelle contraint les modèles cosmologiques et leurs paramètres, ce qui n'est pas sans conséquences pour la physique subatomique. Des expériences étudiant le rayonnement fossile (Archeops et Planck) et les supernovæ lointaines sont en cours. Elles devraient permettre de mesurer les paramètres cosmologiques, et d'en déduire la quantité et, potentiellement, la nature de la matière et de l'énergie noire de l'Univers. L'objet de ces observations se situe donc au cœur de la problématique de la cosmologie et de la physique des particules.

Les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique.
page 64

Pourquoi l'Univers est-il en expansion?
page 65

Deux types de recherche directe de matière noire sont également menés: la recherche d'objets sombres compacts (entre 10^{-7} et 1 masse solaire) et la recherche de particules de matière noire.

L'expérience Eros de recherche d'objets sombres (CEA, CNRS) a détecté pour la première fois au monde, en même temps que l'expérience américaine Macho, des effets de microlentilles gravitationnelles induits par des objets sombres dans le halo de notre galaxie.

Elle a été aussi la première à montrer que de tels objets ne pouvaient représenter que 30 % au plus du halo de matière noire de notre galaxie. Ce résultat exclut donc la possibilité que ce halo soit constitué d'objets stellaires conventionnels. Comme il est aussi exclu que ce soit du gaz, ces observations conduisent à penser que ce halo est constitué de matière non ordinaire, vraisemblablement de particules élémentaires interagissant faiblement, les Wimps, dont la particule supersymétrique la plus légère, la seule qui soit stable d'après les théo-



Dernier réglage sur la nacelle Archeops, dans son hangar avant le lancement.
© Archeops

◀ L'expérience CAT sur le site de Thémis dans les Pyrénées-Orientales.
© CNRS/Syigma, Frédéric Pitchal



Ci-dessus :
Bolomètre à double
détection
(chaleur/ionisation)
de l'expérience
Edelweiss de détection
directe des WIMPs,
particules massives
interagissant
faiblement avec
la matière.
© CNRS/IN2P3



Ci-contre :
Fibres scintillantes
du banc cosmique
de l'expérience AMS.
Ce banc permet de
détecter le passage
des rayons cosmiques
et de mesurer leur
trajectoire.
© CNRS/IN2P3

De la masse
manquante
de l'Univers.
page 68

ries, constitue le candidat le plus naturel.

Piégées dans le champ de notre galaxie, les Wimps entreraient très rarement en collision avec les noyaux de la matière, à raison de quelques collisions par an et par kilogramme de matière. Plusieurs laboratoires du CEA et du CNRS ont construit l'expérience Edelweiss dans le laboratoire souterrain de Modane, afin d'identifier les collisions de Wimps avec la matière au moyen de détecteurs cryogéniques (bolomètres) à très bas seuil et bruit, et protégés de toute radioactivité et rayonnement. Edelweiss est l'un des détecteurs de Wimps les plus sensibles au monde.

LES PHÉNOMÈNES À HAUTE ÉNERGIE DANS L'UNIVERS

Il existe dans l'Univers des objets au sein desquels règnent des conditions extrêmes, inaccessibles en laboratoire. Ils émettent des rayonnements de haute énergie et contribuent à l'accélération des particules. Comprendre ces objets et ces mécanismes d'accélération est donc d'un grand intérêt à la fois pour les physiciens et pour les astrophysiciens. Leur observation repose en partie sur des techniques issues de la physique des particules et sur des techniques spatiales.

L'expérience internationale AMS d'étude des rayons cosmiques à des énergies intermédiaires (du GeV au TeV) a été embarquée sur la navette spatiale Discovery. Des résultats surprenants ont été obtenus dont l'interprétation est toujours en cours. Elle sera bientôt envoyée sur la station spatiale internationale d'où elle devrait ramener des données nouvelles.

Les rayons
cosmiques d'énergies
extrêmes.
page 70

Sonder le contenu
du rayonnement
cosmique de haute
énergie.
page 69

Le projet Auger de détection des rayons cosmiques d'énergie extrême (supérieure à 10^{19} eV) est également mené dans le cadre d'une collaboration interna-

Livraison des cuves sur le site de l'Observatoire Auger. Chaque cuve est remplie de 12 tonnes d'eau et équipée entre autres de 3 photomultiplicateurs pour détecter la lumière Cherenkov émise lorsque les rayons cosmiques traversent l'eau.
©Auger



Équipée de 600 photomultiplicateurs, chacun pourvu d'un concentrateur de lumière, la caméra de l'expérience Cat fonctionne sans interruption depuis 1996.
© CNRS/IN2P3



tionale. L'existence de ces rayons cosmiques extrêmement énergétiques est un mystère à ce jour. En effet, ceux-ci ne devraient pas parvenir jusqu'à nous du fait de leur interaction avec le fond diffus de photons qui remplit l'Univers. Mille six cents détecteurs Cherenkov seront déployés sur 3 000 km² de pampa argentine. Le détecteur complet devrait être achevé fin 2003.

Avec de telles études, on peut espérer que la compréhension du spectre et de la composition du rayonnement cosmique permettra à terme aux scientifiques de se servir de l'Univers comme d'un laboratoire et d'accéder ainsi à une nouvelle gamme d'énergie. En outre, l'existence de rayons cosmiques à des énergies aussi élevées ouvrira peut-être la voie à des découvertes fondamentales pour la physique. Par exemple, si l'expérience AMS découvrait l'existence d'antinoyaux, notre approche de l'antimatière pourrait en être bouleversée.

DE NOUVELLES FENÊTRES SUR L'UNIVERS

Avec les rayons gamma de hautes énergies, les neutrinos, et les ondes gravitationnelles, le domaine des astroparticules ouvre de nouvelles fenêtres sur l'Univers. Pour la première fois, la lumière n'est plus le seul messager des objets de l'Univers: c'est le début d'une astronomie multilongueurs d'onde et multimessagers. Le croisement des observations de ces différentes astronomies va permettre d'appréhender les phénomènes cosmiques de haute énergie et les événements violents qui en sont la source.

Le rayonnement gamma de très haute énergie.
page 71

Les expériences Cat et Celeste sont destinées à l'observation des rayons gamma de très haute énergie (30 GeV à 20 TeV). Elles utilisent les installations de l'ancienne centrale solaire d'EDF, sur le site de Thémis dans les Pyrénées, pour détecter la lumière créée dans leur sillage par les gerbes de particules issues de l'interaction des rayons gamma avec l'atmosphère. Elles ont déjà pu observer des restes de supernovæ et des noyaux actifs de galaxie dans des gammes de longueurs d'ondes (d'énergie) jamais atteintes auparavant.

Le détecteur franco-allemand Hess situé en Namibie est lui aussi destiné à détecter les gamma de haute énergie (de l'ordre de 100 GeV) provenant de sources



*Immersion du lest de la ligne prototype du projet Antares, première ligne (été 1998).
© Antares*

violentes de l'Univers. Avec ses miroirs et ses caméras de photomultiplicateurs inspirés des développements réalisés avec Cat et Celeste, il sera plus performant que ces deux expériences et observera l'Univers austral, une région de l'espace qu'elles ne regardent pas. Il devrait être opérationnel vers 2003-2004.

Les neutrinos,
messagers
du cosmos.
page 73

Antares est un projet international qui vise à utiliser le fond de la mer Méditerranée pour l'astronomie des neutrinos. Son objectif est de détecter les neutrinos cosmiques grâce à la lumière émise par les muons produits au fond de la mer lors des interactions des neutrinos. La faisabilité du déploiement de photodétecteurs, en mer profonde au large de Toulon, ayant été démontrée, Antares peut désormais entrer en phase de réalisation. Un millier de photomultiplicateurs seront déployés sur une surface d'un dixième de kilomètre carré, tournés vers le bas de manière à détecter les neutrinos ayant traversé la Terre et qui interagissent en dessous des détecteurs en produisant des muons ascendants. Cette astronomie vise elle aussi à étudier les phénomènes violents de l'Univers. L'Ifremer et le CEA sont associés à ce projet, ainsi que cinq pays européens.

À la recherche
des ondes
gravitationnelles.
page 74

De même, le projet franco-italien Virgo, près de Pise, de détection des ondes gravitationnelles produites par des phénomènes violents de l'Univers, approche de la mise en route de sa partie centrale. Sa construction doit s'achever en 2003.



*Montage et alignement des miroirs du banc de détection de Virgo.
© CNRS/IN2P3*



L'ÉTUDE DES NEUTRINOS

À ce jour, les neutrinos restent des particules dont toutes les propriétés n'ont pas encore été révélées. Or, leurs masses étant très petites par rapport à celles des autres particules élémentaires, leurs propriétés pourraient relever d'une physique dont les distances caractéristiques seraient beaucoup plus petites que celles sondées jusqu'ici avec les accélérateurs. Toute avancée dans la connaissance de ces propriétés aura donc des conséquences fondamentales, non seulement pour la physique des particules mais aussi pour la compréhension de l'Univers.

L'étude des propriétés des neutrinos s'effectue en utilisant des accélérateurs, des réacteurs, le rayonnement cosmique, les neutrinos solaires et les neutrinos de supernovæ. En particulier, l'expérience conduite par des groupes de l'IN2P3 auprès du réacteur de Chooz a apporté des résultats sur les oscillations des neutrinos qui ont constitué l'un des faits les plus marquants, ces dernières années, de la physique des particules: elle a d'ailleurs donné l'un des deux papiers les plus cités dans ce domaine. D'autres expériences sont en cours: l'expérience Munu mesure le moment magnétique du neutrino, l'expérience Nemo de Fréjus étudie les relations entre neutrinos et antineutrinos, tandis que l'expérience Opera en Italie recevra, en provenance du Cern, un faisceau de neutrinos qui lui permettra d'étudier les relations entre deux espèces de neutrinos. Petit à petit, les propriétés des neutrinos devraient être révélées.

De l'oscillation
et des masses
des neutrinos.
page 75

61



*Expérience de détection
des oscillations des
neutrinos à Chooz:
la pose d'une plate-
forme en fond de cuve.
© CNRS/IN2P3*

L'ASTROPHYSIQUE NUCLÉAIRE

L'astrophysique nucléaire a été à l'origine de la compréhension des phénomènes énergétiques stellaires (fusion thermonucléaire, novæ, supernovæ). L'observation de plus en plus fine des mécanismes de nucléosynthèse primordiale et stellaire et leur interprétation à partir des sections efficaces correspondantes nécessitent une coopération étroite entre astrophysiciens et physiciens nucléaires. La compréhension et la connaissance des noyaux exotiques (à Ganil notamment) permettent déjà de mieux appréhender la physique de la nucléosynthèse dans les novæ et les supernovæ. En retour, l'observation des raies gamma en provenance de l'Univers (projet Integral) permettra de tester ces modèles physiques. Certains développements de ce thème sont aussi très liés à la problématique des neutrinos solaires, ainsi qu'à celle de la matière noire.

UN DOMAINE SCIENTIFIQUE EN PLEIN DÉVELOPPEMENT



Le futur des astroparticules s'annonce prometteur : c'est un domaine qui explore une « terra incognita », touche à travers la cosmologie aux théories de grande unification et atteint des énergies inaccessibles en laboratoire grâce aux rayons cosmiques. Auger pourrait s'engager prochainement dans la construction d'un site hémisphère nord qui pourrait se situer soit aux États-Unis, soit en Europe. Cette activité pourrait être amplifiée par l'observation des grandes gerbes cosmiques dans l'atmosphère depuis la station spatiale internationale (projet Euso). Antares équipe actuellement un trentième de kilomètre cube sous la mer, mais elle pourrait déboucher sur une collaboration plus large permettant d'instrumenter un kilomètre cube d'eau profonde. À la lumière des résultats qui seront obtenus par le projet Hess, l'astronomie gamma de haute énergie connaîtra sans doute des développements : multiplication du nombre de télescopes au sol ou expérimentation dans l'espace. Enfin, Virgo devrait atteindre une meilleure sensibilité que celle des expériences précédentes et s'élargir à une plus grande européenne. Quant aux neutrinos et à l'astrophysique nucléaire, ce sont des programmes florissants.

Seize photo-multiplicateurs de l'expérience Hess. La camera de Hess en comprendra 960 au total et sera installée au foyer d'un télescope.
© CNRS/IN2P3



Au niveau français, ce développement associe non seulement des expérimentateurs de l'IN2P3 (physiciens des particules et physiciens nucléaires), mais aussi des expérimentateurs du Dapnia (CEA) (astrophysiciens et physiciens des particules) et de l'Insu, ainsi que des théoriciens du département SPM (CNRS) et du Dapnia (CEA). Ces rapprochements interdisciplinaires et interorganismes ont conduit à la création du Programme national de cosmologie, du Groupement de recherches phénomènes cosmiques de haute énergie et du Programme interdisciplinaire astroparticules du CNRS.

Les physiciens travaillant dans ce domaine se tournent de plus en plus vers l'expérimentation dans l'espace. Ainsi, la cosmologie (fond diffus, supernovæ), l'étude du rayonnement cosmique (les gamma de haute énergie, les antiparticules, les rayons cosmiques de la plus haute énergie), l'astronomie neutrino et, plus tard, l'astronomie des ondes gravitationnelles font ou feront appel à des missions spatiales. Ce domaine va donc s'appuyer de plus en plus sur les décisions et les moyens du CNES dont l'IN2P3 deviendra ainsi un nouveau partenaire pour les missions spatiales concernant la physique fondamentale.

Avec l'Italie, le Royaume-Uni, l'Allemagne et la Hollande, des démarches ont démarré pour européaniser ce domaine. En effet, une bonne partie des activités n'étant du ressort ni du Cern, ni de l'ESA, ni de l'ESO, une coordination au niveau européen devient nécessaire.

Une telle coordination est envisagée en liaison avec la Fondation européenne de la science. Elle aura pour but de développer des stratégies à long terme pour les projets européens en astroparticules, de faciliter la coopération et les collaborations, de mettre en place un système d'évaluation par les pairs et un système de suivi de projet, d'organiser la prise de décisions à l'échelle européenne et, enfin, de développer des liens avec le Cern, l'ESA et l'ESO. Cette coordination a déjà pris le nom d'Appec (Astroparticle Physics European Coordination).

LES ANISOTROPIES DU FOND DE RAYONNEMENT COSMOLOGIQUE

Émis 300 000 ans après le Big-Bang, le fond de rayonnement cosmologique véhicule une image de l'Univers tel qu'il était il y a 10 à 15 milliards d'années. La mesure précise de ses anisotropies spatiales de température apportera des informations cruciales sur la physique de l'Univers primordial et sur les paramètres cosmologiques qui ont régi son évolution jusqu'à nos jours.

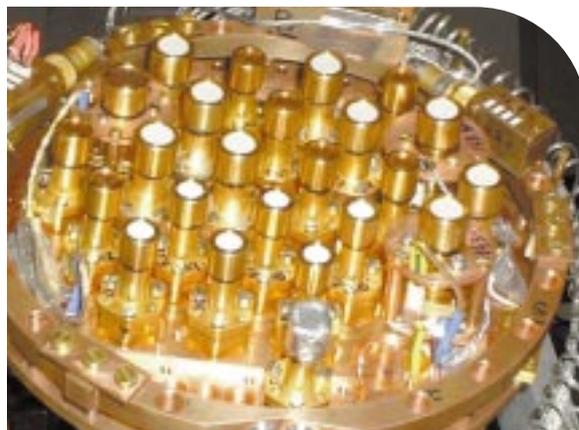
Dans la majorité des scénarios cosmologiques, l'expansion initiale et accélérée de l'Univers (inflation) a généré des fluctuations de densité qui sont à l'origine des anisotropies de température du fond de rayonnement cosmologique. Ces anisotropies dépendent des fluctuations initiales mais aussi des paramètres cosmologiques qui ont déterminé la façon dont ces fluctuations ont évolué. Leur mesure permet en particulier de comprendre la formation des amas de galaxies observables aujourd'hui et de mesurer les paramètres cosmologiques fondamentaux de l'Univers (densité, courbure, âge...). Cependant, l'obtention d'une précision suffisante requiert des détecteurs extrêmement sensibles embarqués à bord de ballons stratosphériques ou de satellites pour s'affranchir des effets de l'atmosphère.

Une mission spatiale dédiée à ces observations, la mission Map, a été lancée par la Nasa le 31 juin 2001. Une autre mission encore plus performante, Planck, pilotée par l'ESA, sera lancée en 2007. Elle permettra de déterminer les principaux paramètres cosmologiques avec une précision de l'ordre du pour cent, et de vérifier les résultats obtenus par l'observation de supernovæ lointaines qui indiquent que l'expansion de l'Univers est en phase d'accélération. Les équipes de l'IN2P3 participent à la pré-

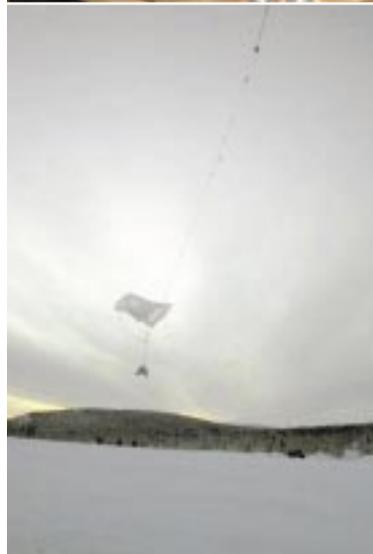
paration (électronique de bord et cryogénie) et à l'éta-lonnage de l'instrument haute-fréquence (HFI) de Planck, ainsi qu'à la préparation du traitement des données. L'analyse des données de telles expériences est complexe, car à l'émission due aux fluctuations de température du fond cosmologique se superposent des émissions parasites d'origine astrophysique, ainsi que divers effets d'origine instrumentale.

En parallèle, l'IN2P3 participe à la mission Archeops, un ballon capable de cartographier 25 % du ciel et utilisant des bolomètres très sensibles comparables à ceux prévus pour Planck. Le premier vol technique (juillet 1999, base de Trapani, Sicile) a permis de tester l'utilisation de bolomètres refroidis à 100 mK sur une expérience embarquée. Un premier vol scientifique de huit heures a eu lieu en janvier 2001 depuis la base suédoise de Kiruna où le ballon a été lancé par le Cnes. Les résultats de l'analyse de ces données permettront notamment de contraindre les anisotropies spatiales de température du fond de rayonnement cosmologique aux grandes échelles angulaires (sensibles à la physique de l'Univers primordial) pour lesquelles la grande couverture du ciel obtenue avec Archeops est essentielle.

Planck : vue d'artiste.
© CNRS/IN2P3



Le plan focal
d'Archeops : filtres.
© Archeops



Le lancement
d'Archeops à Kiruna :
c'est parti!
© Archeops

POUR EN SAVOIR PLUS

Benoit *et al.*, à paraître dans *Astroparticle Physics*.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : PCC, LAL, ISN, CSNSM

(Archeops uniquement).

CNRS/Insu : LAOG (Archeops uniquement), OMS,

CESR, IAS, IAP.

CNRS/SPM : CRTBT.

CEA/DSM : Dapnia.

POURQUOI L'UNIVERS EST-IL EN EXPANSION ?

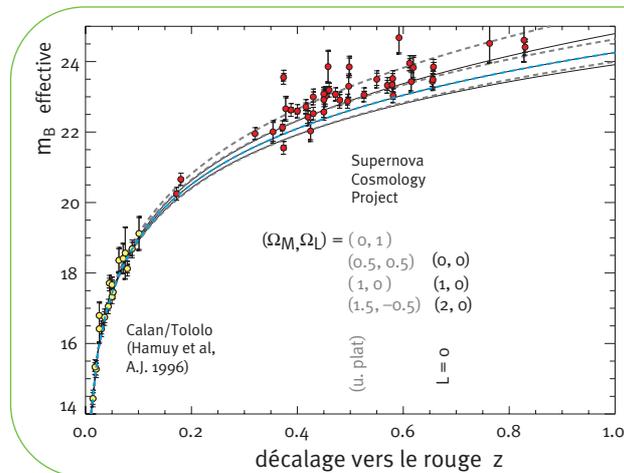
Dans les modèles cosmologiques, l'effet de la constante cosmologique est de contrebalancer la gravitation qui tend à ralentir l'expansion initiale de l'Univers. L'observation récente que l'Univers est en phase d'expansion accélérée accrédite donc l'idée d'une constante cosmologique positive. Mais ce qui est réellement à l'origine de cette expansion reste en fait mystérieux. En déterminer la nature et en faire une mesure précise sont des enjeux majeurs de la physique fondamentale.

L'IN2P3 participe, au sein de la collaboration internationale Supernova Cosmology Project (SCP), à une expérience de mesure de la densité de masse de l'Univers (Ω_M) et de la densité de constante cosmologique (Ω_Λ) à l'aide de supernovæ de type Ia, encore appelées « SNe Ia ». Classique, la méthode consiste à comparer le flux lumineux de ces SNe à leur luminosité intrinsèque afin d'en déduire leur distance qui est fonction de leur décalage (z) vers le rouge, de Ω_M et de Ω_Λ .

L'intérêt de ces SNe Ia est qu'elles sont les plus lumineuses des supernovæ, et qu'elles peuvent donc être détectées à des distances suffisamment grandes (grands z) pour que les effets de Ω_M et Ω_Λ soient sensibles. Elles constituent aussi une classe très homogène d'objets astrophysiques dont la luminosité est pratiquement constante d'une SNe Ia à une autre. De plus, des techniques récentes permettent de les intercaler, rendant possible leur utilisation pour des mesures cosmologiques.

Avec l'équipe de Cambridge du SCP, sur le télescope Isaac Newton aux Canaries, une douzaine de SNe Ia a été détectée (1999) entre $z = 0,15$ et $z = 0,45$ dont cinq ($z \sim 0,2$) ont été suivies pendant deux mois. Ces détections permettront d'obtenir une première mesure du taux de SNe Ia à $z = 0,2-0,3$. De plus, l'analyse des cinq SNe Ia à $z \sim 0,2$ (où le diagramme de Hubble ne comporte aujourd'hui qu'une seule SNe Ia) permettra de contraindre plus avant la mesure des paramètres cosmologiques.

Par ailleurs, une recherche de SNe Ia à grand z a été mise en place sur le télescope Canada-France-Hawaii (CFHT). Un suivi des SNe détectées avec le télescope Keck (Hawaii) par le groupe de Berkeley a été effectué (1998), au cours duquel une SNe Ia à $z = 1,2$ a été détectée, la première au-delà de $z = 1$. Ce résultat a confirmé la faisabilité d'une recherche à ces z , indis-



*Diagramme de Hubble
Ce diagramme donne la magnitude apparente de supernovæ de type Ia en fonction de leur décalage vers le rouge, pour différentes*

valeurs des paramètres cosmologiques. Sont notamment reportées les observations récentes réalisées par le Supernova Cosmology Project de 42 SNe Ia situées à grand décalage vers le rouge.

pensable pour obtenir une mesure indépendante, et pas simplement une combinaison linéaire, de Ω_M et Ω_Λ . Au cours de la première recherche de SNe Ia à $z \sim 1$ (1999), cinq ont été identifiées avec Keck dont deux à $z \sim 1$. L'une d'elles a été suivie sur le VLT au Chili. Cette campagne a permis de tester avec succès un nouveau logiciel de détection plus performant développé à l'IN2P3. Une première mesure des taux de SNe Ia à $z \sim 1$ pourrait être obtenue avec ces données dont l'analyse est en cours, et une SNe Ia très distante ajoutée au diagramme de Hubble. En 2000, une SNe Ia plus proche ($z \sim 0,55$) a été découverte, mais détectée très tôt, quelques jours seulement après son explosion, elle a bénéficié d'un suivi exceptionnel (Keck, VLT et télescope spatial Hubble).

Enfin, une campagne de recherche de SNe Ia proches ($z \sim 0,1$) (1999), pilotée par le groupe de Berkeley et à laquelle participait la collaboration Éros, a permis d'en détecter une vingtaine et de les suivre. L'objectif était d'étudier en détail ces SNe Ia et leur environnement astrophysique afin de mieux comprendre les incertitudes systématiques sur la mesure des paramètres cosmologiques. L'analyse de ces données est en cours.

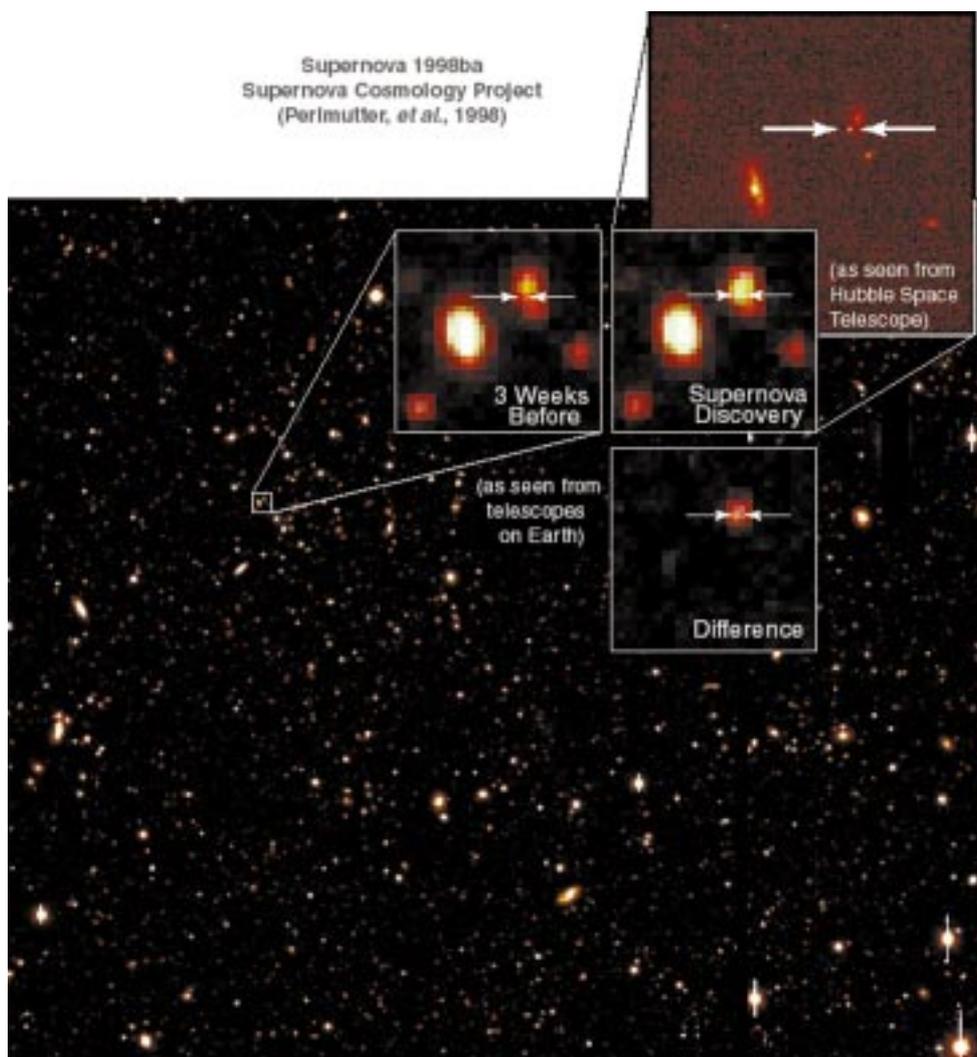
Mais une compréhension détaillée de ces événements nécessitant la mise en place de moyens d'obser-

vation dédiés, afin d'augmenter la statistique et les précisions d'un facteur ~ 10 , l'IN2P3 participe également, dans le cadre du projet Supernova Factory, à la construction et à l'exploitation d'un spectromètre intégral de champ (SNIFS) qui devrait être opérationnel à la fin de 2002.

L'approche géométrique poursuivie dans ces expériences est la plus à même de donner une mesure très précise de Ω_m et Ω_Λ , à condition de valider l'utilisation des SNe Ia et d'augmenter la précision des mesures. Avec la caméra Megacam qui équipera le CFHT à partir de l'été 2002, il sera possible de détecter et de suivre plusieurs centaines de supernovæ lointaines ($0,3 < z < 1,0$) par an. Cela permettra de mesurer les paramètres cosmologiques avec une précision statistique de $\sim 5\%$, et d'obtenir une première mesure du paramètre de l'équation d'état du fluide cosmique, appelé encore « énergie noire », responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Mais identifier véritablement la nature de cette mystérieuse composante et mesurer très précisément les paramètres cosmologiques nécessitera de collecter plusieurs milliers de supernovæ de $z \sim 0,1$ à $z \sim 2$. Pour cela, il faudra aller dans l'espace. Un projet, le Supernova Acceleration Probe (SNAP), est à l'étude. L'IN2P3 participe aux études préalables. En outre, des discussions sont en cours avec le Cnes pour mettre en place une participation française élargie à ce projet de satellite dont le lancement est annoncé pour 2008.

Image de la découverte de SN1998ba.



CONSTANTE COSMOLOGIQUE ET «QUINTESSENCE»

Les observations cosmologiques actuelles tendent à indiquer que notre univers rentre dans une phase d'accélération, ce qui correspond dans le modèle FRW (modèle du Big-Bang) à une domination par une composante de pression négative. Cette dernière peut être identifiée à une constante cosmologique, mais avec le problème que la valeur requise pour cette constante ($\sim (10^{-3}\text{eV})^4$) est très différente de la valeur attendue ($\sim (10^{28}\text{eV})^4$) dans le cadre de la physique des particules, où elle correspond à l'énergie du vide. Auparavant, un problème similaire se posait du fait que cette constante cosmologique était supposée nulle. Aujourd'hui, c'est sa petite valeur non nulle qu'il faut expliquer.

Pour cela, une autre approche de la physique des particules consiste à supposer résolu le problème de cette constante dans sa vieille forme, et à attribuer l'accélération observée à un nouveau type d'énergie. Parmi ces modèles, il y a ceux dits de quintessence, dans lesquels l'énergie considérée est celle associée à un champ scalaire évoluant dans son potentiel. L'énergie au minimum du potentiel est nulle, mais la dynamique d'évolution du champ peut être telle qu'une énergie reste «bloquée», le champ se

comportant comme un fluide de pression négative pouvant se mettre à dominer à un moment donné de l'évolution de l'Univers correspondant à notre époque. Mais qu'en est-il des potentiels et des conditions initiales de ce champ? Doivent-ils être choisis de manière très spécifique ou sont-ils naturels? Il a été montré que pour certaines classes de potentiels, par ailleurs bien motivées dans leur forme par des modèles considérés sérieusement en physique des particules comme la physique réelle au-delà du Modèle standard, le comportement requis est peu sensible aux conditions initiales. Mais un problème dit de «coïncidence» demeure: pourquoi cette phase de domination commencerait-elle maintenant? Cette question est semblable au problème de la constante cosmologique: pourquoi l'échelle d'énergie caractéristique de ce modèle devrait-elle correspondre à l'énergie de l'Univers actuel? Même dans les modèles qui résolvent le problème des conditions initiales, cette dernière question subsiste, leur potentiel contenant d'une façon ou d'une autre une échelle d'énergie caractéristique mise «à la main». Du point de vue des observations, une question importante demeure également: comment observer la différence entre ces derniers modèles et une constante

cosmologique «toute simple»? Des études montrent que leurs empreintes ne diffèrent que légèrement, mais à un niveau que l'on peut espérer atteindre dans les années qui viennent dans les observations à la fois de l'Univers homogène (dans des modifications du modèle FRW repérables surtout dans des observations de supernovæ) et de l'Univers dishomogène (dans les modifications des fluctuations du fond cosmique et, plus indirectement, de la distribution de matière à grande échelle).



POUR EN SAVOIR PLUS

S. Perlmutter *et al.*, Measurement of Ω_M and Ω_Λ from 42 supernovæ, *Apl.*, 517 (1999) 565.

Pierre Binetruy, Cosmological constant versus quintessence, *Int. J. Theor. Phys.*, 39 (2000) 1859-1875 (hep-ph/0005037).

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPNHE Paris, IPN Lyon.

CNRS/SPM: Laboratoire de physique théorique.

CEA/DSM: Dapnia et Service de physique théorique.

CNRS/INSU: LAEC, IAS, CRA, IAP.

DE LA MASSE MANQUANTE DE L'UNIVERS

Depuis les années trente, les physiciens se heurtent à une énigme surprenante : étoiles et gaz interstellaires semblent ne former qu'une faible partie (~ 10 %) de la masse des galaxies et la matière ordinaire ne contribue que pour environ 4 % à la densité d'énergie de l'Univers. Mais quelle est donc cette matière invisible, qui n'émet ni n'absorbe de lumière ?

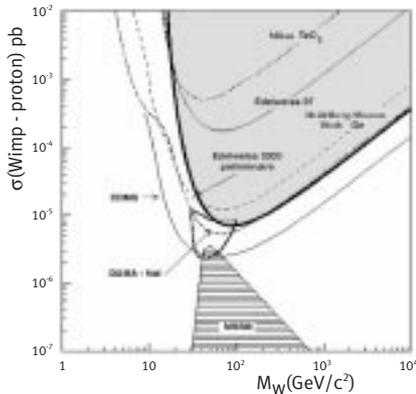


Diagramme d'exclusion représentant la section efficace de collision Wimp-proton en picobarns en fonction de la masse supposée du Wimp. Les limites expérimentales d'Edelweiss peuvent être comparées avec celles d'autres expériences.

La masse manquante de l'Univers pourrait être due à l'existence d'un nouveau type de particules, lourdes, stables et interagissant très faiblement avec la matière : les Wimps. Les théories supersymétriques prévoient d'ailleurs l'existence d'un bon candidat Wimp : le neutralino. Piégés dans le

champ de notre galaxie, ces Wimps entreraient très rarement en collision avec les noyaux de la matière (quelques collisions par année et par kilogramme de matière). L'IN2P3 participe au projet Edelweiss qui a pour but la détection directe des Wimps au moyen de détecteurs cryogéniques appelés « bolomètres ».

Chaque détecteur est un monocristal de germanium ultrapur porté à ~ 20 mK. En raison du faible taux d'interaction des Wimps, ces détecteurs doivent être placés dans un environnement protégé des rayons cosmiques et de très faible fond radioactif. Ils sont donc actuellement installés au Laboratoire souterrain de Modane au milieu du tunnel du Fréjus, sous une protection rocheuse de 1700 m qui permet d'atténuer le flux des muons cosmiques d'un facteur supérieur à un million. Ils sont également entourés de plomb et de paraffine pour être protégés des radioactivités gamma et neutron.

Mais le fond radioactif résiduel restant trop impor-

tant, une technique électronique de discrimination entre les gamma et les Wimps a dû être mise en œuvre. Lorsqu'un Wimp interagit, il fait en effet reculer un noyau du cristal tout en produisant des paires électron-trou (signal d'ionisation) et une élévation de température (signal de chaleur). En mesurant ces deux signaux, il est possible d'en déduire si c'est un Wimp ou un gamma qui a interagi.

Les premiers résultats obtenus permettent de conclure qu'aucun Wimp n'a interagi dans le détecteur pendant la durée de l'expérience (équivalente à 3,8 kg.j), et d'en déduire une valeur maximale de la section efficace d'interaction d'un Wimp avec le détecteur en fonction de la masse supposée du Wimp (courbe en gras du diagramme d'exclusion). Le contour fermé de ce diagramme correspond à la zone où l'expérience sino-italienne Dama pense avoir trouvé quelques Wimps, une conclusion en désaccord avec les résultats de l'expérience américaine CDMS qui excluent une large fraction de cette zone. Avec une augmentation du temps de comptage, Edelweiss devrait pouvoir très prochainement départager ces deux équipes.

L'installation actuelle permet de travailler avec un maximum de trois détecteurs de 320 g de germanium. Pour augmenter les statistiques de comptage et atteindre ainsi la zone hachurée où les modèles supersymétriques (MSSM) prévoient la présence de Wimps, il est nécessaire d'augmenter la masse totale des détecteurs. Ce sera le but de l'expérience Edelweiss II : avec une centaine de détecteurs de 320 g, ses résultats et ceux d'autres équipes dans le monde traquant les Wimps par des techniques différentes devraient permettre d'apporter des éléments de réponse sur la nature de la matière cachée.

POUR EN SAVOIR PLUS

A. Benoit *et al.*, Astro-ph/0106094, sous presse.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

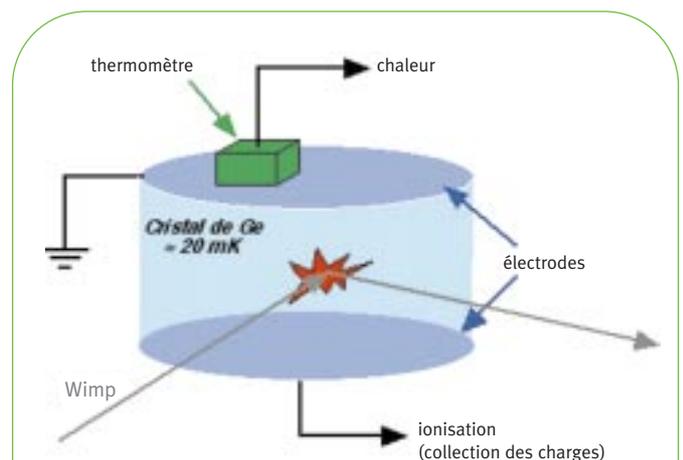
CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, CSNSM.

CRNS/Insu : IAP.

CNRS/SPM : CRTBT.

CEA/DSM : Dapnia, Drecam.

Le détecteur de Wimps.



SONDER LE CONTENU DU RAYONNEMENT COSMIQUE DE HAUTE ÉNERGIE

Suite à un premier vol test en 1998, une expérience de mesure du rayonnement cosmique sera envoyée en 2003 sur la station orbitale internationale ISS. Elle devrait apporter une contribution fondamentale aux questions relatives à l'existence d'antimatière et de matière noire non baryonique dans l'Univers, et aux mécanismes d'accélération et de propagation des rayons cosmiques.

L'objectif de l'expérience AMS est d'étudier depuis l'espace le rayonnement cosmique de haute énergie (du GeV au TeV) à l'aide d'un spectromètre magnétique de grande acceptance (0,82 m²sr) qui mesurera avec une précision sans précédent les spectres de ses divers constituants: électrons, positons, protons, antiprotons, noyaux et, éventuellement, noyaux d'antimatière.

La première expérience AMS01 a effectué, en juin 1998, un vol d'essai de onze jours à bord de la navette spatiale Discovery. Les éléments principaux du détecteur étaient le spectromètre magnétique à aimant permanent et à trajectomètre au silicium, le système de déclenchement et de mesure du temps de vol à scintillateurs, un compteur «veto» et un compteur Cherenkov à seuil à radiateur aérogel pour séparer les p(anti-p) des e⁺(e⁻) jusqu'à 3 GeV/c. Dans cette expérience, l'IN2P3 a assuré la conception et la réalisation de l'électronique et pris en charge la mécanique et le montage du compteur Cherenkov. Ce vol précurseur a permis de tester le fonctionnement de l'expérience dans l'environnement spatial et de collecter les premiers résultats de physique: elle a porté la limite du rapport antihélium/hélium à $\approx 10^{-6}$, et montré l'existence d'un anneau de particules secondaires (protons, électrons, 3 à 4 fois plus de positons que d'électrons, noyaux d'hélium 3) spiralant dans le champ magnétique terrestre autour de l'équateur.

La deuxième expérience AMS02, qui sera envoyée sur la station orbitale ISS en 2003 pour trois à cinq ans, utilisera un aimant supraconducteur complété de nouveaux sous-détecteurs. L'IN2P3 prépare le détecteur Rich (conception, électronique, étude du radiateur), le calorimètre électromagnétique (conception, électronique, mécanique d'équipement, assemblage) et la physique associée. AMS02 permettra de détecter d'éventuelles distorsions dans les spectres, qui pourraient être dues à l'annihilation de neutralinos, les plus

légères des particules supersymétriques prévues par le modèle supersymétrique minimal (MSSM), et candidates potentielles à la masse manquante de l'Univers. Si AMS02 identifiait ne serait-ce qu'un seul noyau d'antimatière, ce serait une découverte car l'apparente absence d'antimatière dans l'Univers implique une violation du nombre baryonique (jamais observée) et une forte violation de CP (incompatible avec le Modèle standard et avec MSSM). Sinon, elle aura porté la limite du rapport antimatière/matière à 10^{-9} , au lieu de 10^{-6} . Elle mesurera également les flux des noyaux légers, en identifiant leurs isotopes jusqu'à la masse de l'oxygène, la mesure précise des rapports D/p, He³/He⁴, Li⁶/Li⁷, Be¹⁰/Be⁹ étant essentielle pour comprendre de nombreux phénomènes de propagation des rayons cosmiques (vent galactique, confinement...) et contraindre les modèles. Enfin, elle mesurera aussi les rayons gamma de haute énergie (~1 à 300 GeV) en couvrant un domaine encore inexploré par les expériences dédiées (satellisées et terrestres).

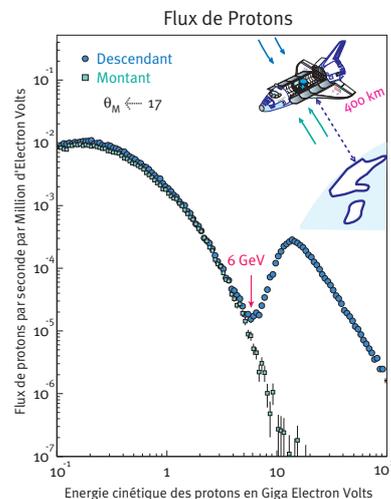


Le détecteur AMS01 à bord de la navette spatiale Discovery en juin 1998 (photographie prise de la station orbitale MIR).



69

Flux relatif de protons mesuré par AMS01 dans la région de l'équateur. Le champ magnétique terrestre dévie les particules chargées, empêchant celles d'énergie trop faible d'approcher de la Terre (< 10 GeV pour les protons à l'équateur magnétique). AMS01 a observé pour la première fois des flux de particules d'énergie plus faible, ici des protons (sens montant et descendant): ce sont des particules secondaires, issues de l'interaction des rayons cosmiques énergétiques avec l'atmosphère.



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://ams.cern.ch/AMS>

<http://wwwlapp.in2p3.fr/ams>

<http://isnwww.in2p3.fr/ams/ams.html>

D. Barancourt, The AMS-01 Aerogel Threshold Cherenkov counter, *Nucl. Instr. and Math in Physics Research A*, 465 (2001) 306-317.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAPP, ISN.

LES RAYONS COSMIQUES D'ÉNERGIES EXTRÊMES

Les accélérateurs des rayons cosmiques d'énergie allant jusqu'à 10^{25} eV sont aujourd'hui connus (champs magnétiques solaires, supernovæ). Mais en ce qui concerne les rayons cosmiques d'énergie extrême, on est encore dans l'expectative. On leur attribue généralement une origine extragalactique qui pourrait même remonter aux tout débuts de l'Univers.

De gauche à droite:

Installation d'une cuve Cherenkov sur le site.
© CNRS/IN2P3

Le premier bâtiment des télescopes de fluorescence (site de Los Leones).
© CNRS/IN2P3



De nombreuses questions demeurent au sujet des rayons cosmiques d'énergies extrêmes (10^{20} eV ou plus) auxquelles l'expérience Auger va tenter de répondre. De quoi sont-ils faits: de protons, de noyaux, de photons, qui ne peuvent venir que de notre amas local de galaxies? de neutrinos, d'objets encore inconnus d'origine plus lointaine? D'où viennent-ils: de sources ponctuelles ou diffuses, corrélées à notre Galaxie ou à des sites astrophysiques violents comme les noyaux actifs de galaxies? de sources ponctuelles dans le temps ou

durables? de reliques du Big-Bang? Quel est l'effet des déviations magnétiques sur leur parcours?

Auger étudiera ces rayons cosmiques depuis le sol en détectant les gerbes de particules qu'ils produisent en interagissant avec l'atmosphère. À terme, pour observer l'ensemble du ciel, elle comprendra deux réseaux identiques de détecteurs: chacun sera situé dans un hémisphère et constitué de 1600 cuves Cherenkov chargées de détecter les gerbes, et réparties sur 3000 km², et de capteurs de la fluorescence émise lors de l'interaction de ces gerbes avec l'atmosphère.

Entre 1997 et 2000, l'expérience Auger est passée de l'état de projet à la construction de son site sud, en Argentine. Un premier réseau prototype de 40 cuves Cherenkov et de deux éléments de télescope pour la fluorescence devrait être prêt en 2001.

Une étape importante pour toute la collaboration a été franchie quand le CNRS a décidé, en 1999, d'y impliquer quatre de ses départements. Les scientifiques français apportent désormais des contributions variées et importantes à la construction de l'observatoire: électronique et monitoring pour le réseau au sol, réseau de télécommunications, système de synchronisation par GPS, acquisition locale des cuves, acquisition centrale et déclenchement global, centre européen de distribution et traitement de données (au CCIN2P3 de Lyon), logiciels de simulation et de reconstruction des gerbes atmosphériques. Ils sont également actifs dans l'exploration de plusieurs thèmes de physique: propagation des rayons cosmiques, corrélation des objets astrophysiques aux observations, et caractérisation des composantes « exotiques » (photons et neutrinos) qui seraient la signature d'un mécanisme « top-down » de production des rayons à partir d'hypothétiques objets ultra-massifs.

Les techniques seront validées avec le réseau prototype (notamment la reconstruction hybride et la calibration croisée du réseau et des télescopes de fluorescence), avec quelques centaines de gerbes par an au voisinage du seuil de détection (10^{19} eV). Le site devrait ensuite être complété en trois ans et commencé à apporter des réponses décisives aux questions restées en suspens depuis des années, aucune de celles avancées jusqu'à présent n'expliquant les observations actuelles de façon complètement convaincante. À n'en pas douter, une nouvelle page de la physique et/ou de l'astrophysique va s'ouvrir...

POUR EN SAVOIR PLUS

X. Bertou, M. Boratav, A. Letessier-Selvon, Physics of extremely high energy cosmic rays, *Int. Journal of Mod. Physics, A*15 (2000) 2181.

X. Bertou, P. Billoir, S. Dagoret-Campagne, LPM effect and pair production in the geomagnetic field: a signature of ultra-high energy photons in the Pierre Auger Observatory, *Astro. Phys.* 14 (2000) 121.

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LPNHE Paris, PCC, LAL (depuis 1999), IPN Orsay (depuis 2000).

CNRS/Insu: LAOB, IAP.

CNRS/SPM: DARC.

CNRS/STIC: Laboratoire traitement et communication de l'information.

LE RAYONNEMENT GAMMA DE TRÈS HAUTE ÉNERGIE

Les installations de l'ancienne centrale solaire Thémis sont aujourd'hui mises à profit pour observer depuis le sol le rayonnement gamma de haute énergie en provenance du cosmos. Une large plage d'énergie est désormais accessible qui va permettre de recueillir des informations importantes sur les phénomènes les plus violents de l'Univers.

Les rayons gamma de très haute énergie permettent d'étudier les lieux privilégiés d'accélération de particules, au voisinage des objets de notre galaxie (pulsars, trous noirs stellaires et restes de supernovæ) ou au sein des noyaux actifs des radiogalaxies. Ce sont également des messagers de l'histoire des galaxies car ils permettent de sonder en infrarouge l'espace intergalactique. Ils pourraient même servir de traceurs de matière sombre *via* l'observation des gamma d'annihilation des particules supersymétriques.

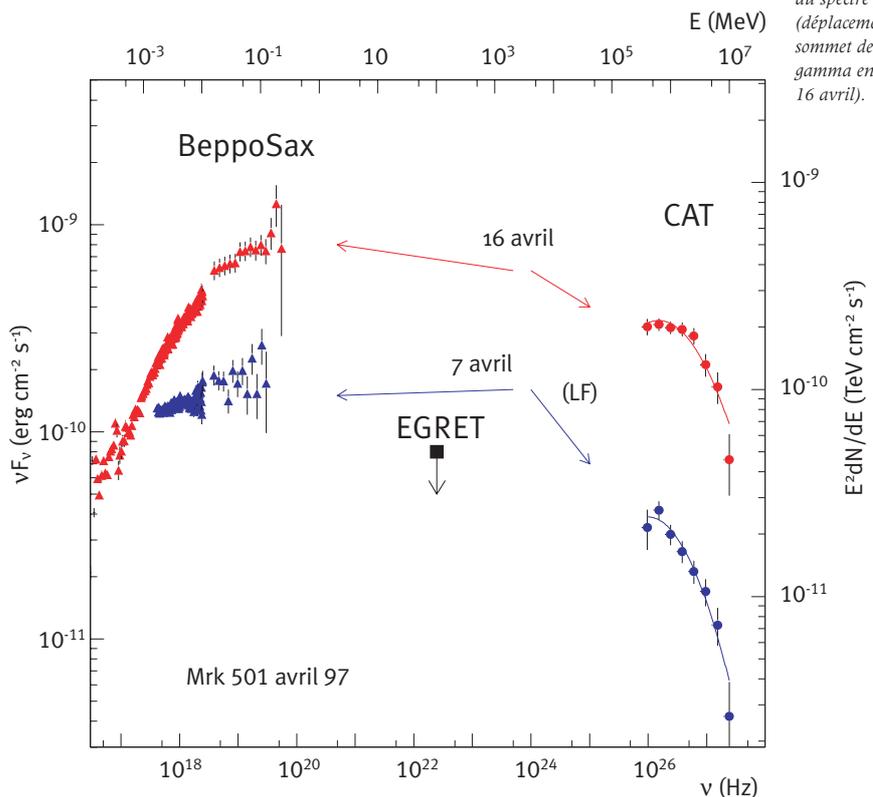
Les rayons gamma n'arrivent pas jusqu'au sol. Mais en interagissant avec l'atmosphère, ils produisent en cascade des paires électron-positon qui voyagent en émettant de la lumière Cherenkov. Ces flashes lumineux peuvent alors être détectés par des miroirs paraboliques qui les concentrent sur des amplificateurs de lumière.

Les activités de l'IN2P3 ont démarré à la fin des années quatre-vingt sur le site de l'ancienne centrale solaire Thémis (Pyrénées-Orientales). Plusieurs expériences se sont succédé afin d'abaisser le seuil de détection des rayons gamma. Après Thémistocle (seuil à 2 TeV), le télescope Cat est entré en fonctionnement en septembre 1996. Aussitôt, la détection de la nébuleuse du Crabe a confirmé le niveau de performance attendu: avec un seuil à 250 GeV et une sensibilité de 5 écarts standard en une heure, Cat égalait en performance le télescope pionnier de Whipple (Arizona), avec une surface de miroir quatre fois plus petite mais une caméra rapide et à pixels très fins. Les mesures spectrales précises effectuées lors des éruptions en 1997 du noyau actif de galaxie Markarian-501 (Mkn-501) ont permis

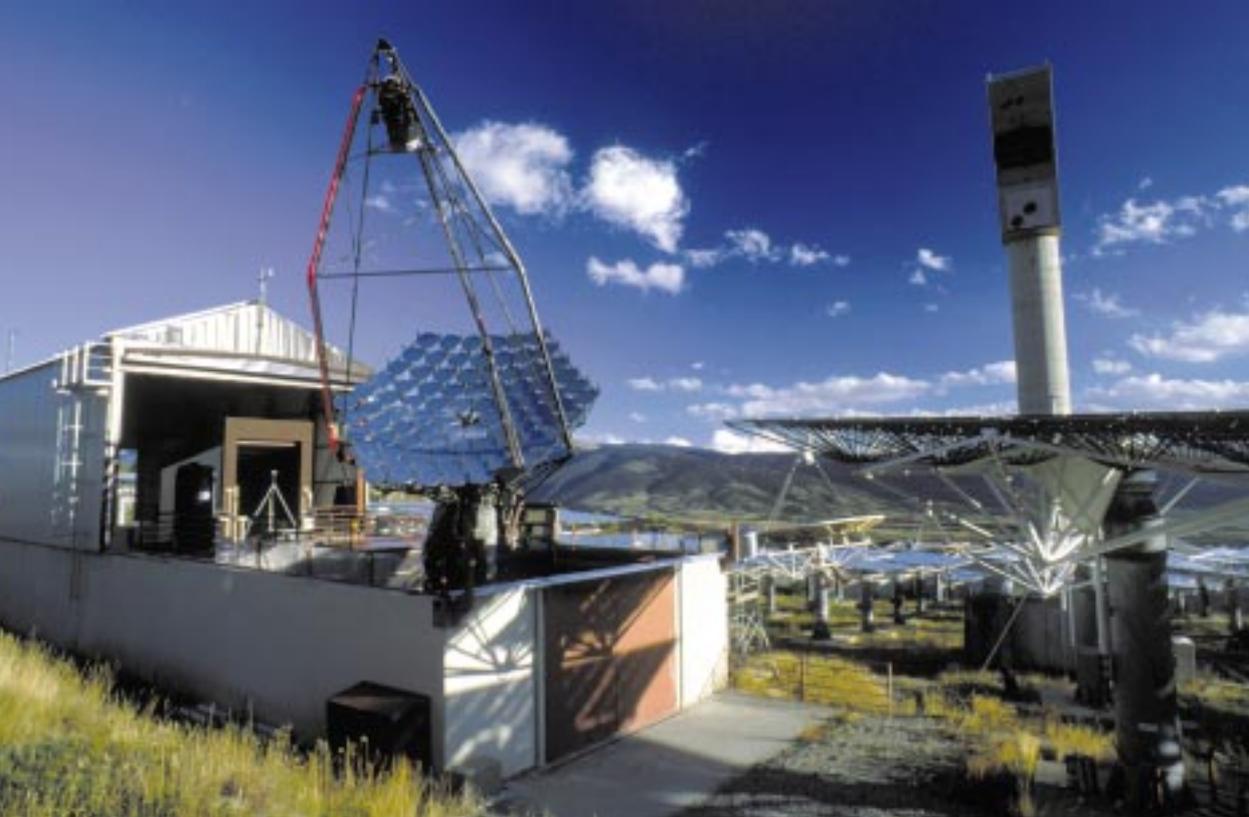
de mettre en évidence, pour la première fois, une corrélation entre l'intensité et la dureté de l'émission au TeV de ce type de source, et d'apporter ainsi des contraintes supplémentaires aux modèles d'émission. En 2000, les mesures de la variabilité extrêmement rapide d'un autre noyau actif, Mkn-421, ont enrichi la moisson de données de Cat.

L'expérience suivante, Celeste (1), doit explorer la fenêtre 30-250 GeV restée vierge car inaccessible par satellites. Une forte indication de la faisabilité de la méthode a été obtenue en 1998. En mars 2000, l'exploitation de 40 héliostats de la centrale, chaque miroir renvoyant la lumière vers le haut de la tour de Thémis sur une optique secondaire chargée de la concentrer sur 40 convertisseurs analogique-numérique ultra-rapides (2), a débouché sur deux premières mondiales: la détection au-delà de 50 GeV de la nébuleuse du Crabe et de Mkn-421. Après une année de fonctionnement, les données de Celeste commencent déjà à contraindre les modèles d'émission des pulsars.

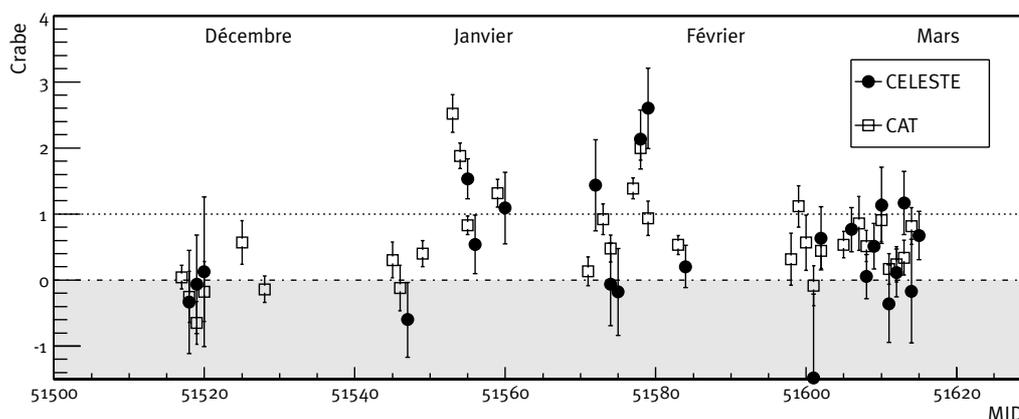
Le site de Thémis est devenu un observatoire gamma unique au monde couvrant la large gamme d'énergie allant de 30 GeV à 20 TeV. D'ici à quelques années,



Mise en évidence de la corrélation en rayons gamma (CAT) et X (BeppoSAX) lors des éruptions du noyau actif de Galaxie Mkn-501, les 7 et 16 avril 1997. Cat a pu mettre en évidence, pour la première fois, une corrélation entre l'intensité et la dureté du spectre gamma (déplacement du sommet de la bosse gamma entre le 7 et le 16 avril).



Site de l'ancienne centrale solaire Thémis dans les Pyrénées-Orientales: au premier plan, le télescope Cat et son hangar; au deuxième plan, la tour de l'ancienne centrale où est logée l'optique secondaire de Celeste et les héliostats de Celeste.
© CNRS/IN2P3
Olivier Blaise



Mesures simultanées de l'activité de Mkn-421 (flux normalisé à celui du Crabe) par Cat et Celeste entre décembre 1999 et mars 2000. L'accord entre

les deux courbes de lumière a permis de franchir une étape importante dans la mise au point de Celeste.

POUR EN SAVOIR PLUS

A. Djannati-Ataï *et al.*, *Astronomy & Astrophysics*, 350 (1999) 17-24.

D.A. Smith *et al.*, *Nucl. Phys.*, 80B (2000) 163-172.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CAT:

CNRS/IN2P3: LPNHE Palaiseau, LPNHE Paris, PCC, CENBG (1995-1998).

CNRS/Insu: CESR.

CEA/DSM: Dapnia.

Université Perpignan: Groupe de physique fondamentale.

Tchéquie: Nuclear Center, Charles University, Prague.

CELESTE:

CNRS/IN2P3: CENBG, LPNHE Palaiseau, LAL (jusqu'en 2000), PCC, GAM (depuis 2000).

CNRS/Insu: CESR.

Université de Perpignan: Groupe de physique fondamentale.

Tchéquie: Nuclear Center, Charles University, Prague.

avec le satellite Glast et le réseau de télescopes Hess construit en Namibie, les équipes disposeront d'outils puissants et complémentaires (entre champ de vue et sensibilité), et d'une couverture continue du spectre énergétique du rayonnement gamma.

(1) *Éric Paré*, chercheur au LPNHE Ecole polytechnique, disparu lors d'un tragique accident de la route le 18 juillet 1998, a joué un rôle majeur dans ce programme de recherche.

(2) Convertisseurs Flash à 1 GHz, développés en collaboration avec une PME de Toulon (ETEP), l'utilisation de cette technologie en astronomie gamma étant également une première mondiale.

LES NEUTRINOS, MESSAGERS DU COSMOS

Détectés seulement depuis une trentaine d'années, les neutrinos sont aujourd'hui au centre d'expériences importantes. Interagissant peu avec la matière, ils offrent notamment la possibilité d'explorer l'Univers très lointain. Un grand détecteur sous-marin de neutrinos cosmologiques, utilisant l'eau comme milieu de protection et de détection, et dont la faisabilité a été démontrée, est en cours de réalisation.

Les neutrinos de haute énergie, dont les sources ponctuelles ou diffuses peuvent être d'origine atmosphérique, galactique ou extragalactique, constituent aujourd'hui pour l'astrophysique une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers qui vient compléter celle déjà couverte par les photons et les particules chargées. La détection de neutrinos provenant d'objets compacts devrait, en particulier, permettre de mieux comprendre la dynamique interne de ces objets et les mécanismes d'accélération qui s'y déroulent, et peut-être d'expliquer l'origine des rayons cosmiques les plus énergétiques. La détection de neutrinos énergétiques en provenance du centre du Soleil ou du centre de la Terre signerait également l'existence probable des neutralinos, ces particules encore hypothétiques qui sont d'excellentes candidates pour expliquer la masse manquante de l'Univers.

Lors de leur parcours dans l'Univers, les neutrinos ne sont pas déviés par les champs magnétiques, contrairement aux particules chargées, et ils n'interagissent pas avec la matière, contrairement aux photons. Ils permettent donc de pointer directement vers leur source et d'explorer l'Univers à des distances cosmologiques. En revanche, ils sont difficilement détectables.

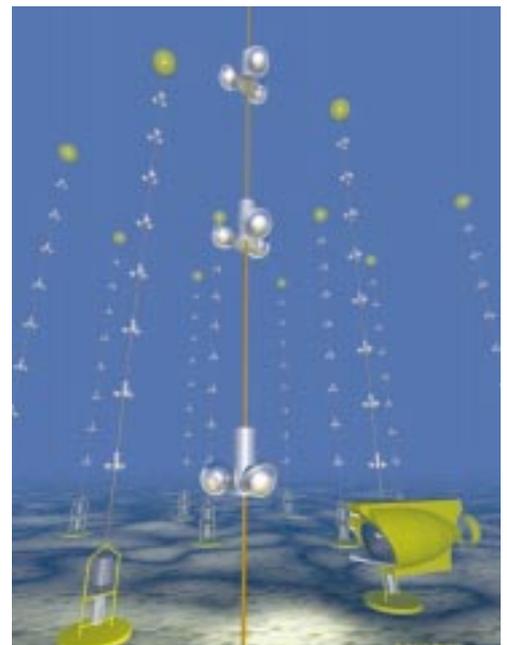
Le projet Antares de construction d'un télescope à neutrinos au fond de la Méditerranée a été initié en 1996. Son principe de fonctionnement repose sur la détection, par un réseau de photomultiplicateurs (PMs), du rayonnement dit Cherenkov produit dans l'eau, lors de leur interaction avec la matière, par les muons issus de l'interaction des neutrinos avec la matière. Pour réduire le bruit de fond résultant de l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère, ces PMs doivent être placés le plus profondément possible et orientés de manière à détecter principalement la lumière des muons ascendants issus de neutrinos ayant traversé la Terre.

Une connaissance parfaite des conditions environnementales étant nécessaire, un important programme de recherche et développement a été conduit pour l'évaluation des sites potentiels. Plus de vingt déploiements et récupérations de lignes instrumentées ont été effectués pour mesurer la transparence de l'eau, le bruit de fond optique, les salissures, etc. Cette période de R&D a culminé en 1999 avec le déploiement de la « ligne démonstrateur » et l'enregistrement de données produites par des muons descendants. Elle a permis de valider le principe de construction de ce télescope et le choix du site, à 40 km au large de Toulon et à 2500 m de profondeur.

Ce détecteur, d'une surface effective de 0,1 km² suffisante pour commencer l'astronomie neutrino, est en cours de construction: il sera constitué d'un réseau d'environ 1 000 PMs répartis sur dix lignes de détection de 300 m de haut, espacées de 60 m et connectées à la station à terre de La Seyne-sur-Mer par un câble électro-optique pour l'envoi des données. Le premier secteur sera déployé en juin 2002 et le détecteur devrait être complet fin 2004. Ce sera le premier pas vers un nouveau et encore plus grand détecteur.

Vue d'artiste de l'ensemble du détecteur Antares.
© Antares

73



POUR EN SAVOIR PLUS

Antares Collaboration, *A deep sea telescope for high energy neutrinos*, astro-ph/9907432

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CPPM, IReS.

CNRS/Insu : COM, LAM.

CEA/DSM : Dapnia.

Université de Haute-Alsace : Groupe de recherches en physique des hautes énergies (GRPHE).

Ifremer : Centres de Toulon et de Brest.

À LA RECHERCHE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Les ondes gravitationnelles sont des perturbations du champ gravitationnel qui se propagent à la vitesse de la lumière en n'étant arrêtées ni par les étoiles, ni par la matière interstellaire. Jusqu'à présent, seule une preuve indirecte de leur existence a été obtenue. Leur observation, outre de confirmer leur présence, pourrait apporter des informations nouvelles sur l'Univers.



Vue aérienne du site Virgo à Cascina en janvier 2001 : le bâtiment central, le tunnel de 144 m abritant le mode-cleaner (qui permet d'éliminer les imperfections du faisceau laser), et les deux bras perpendiculaires de 3 km de long (le bras nord est entièrement fini alors que la construction du bras ouest est en cours avec les premiers éléments de couverture).
© CNRS/IN2P3

L'expérience Virgo a pour but la détection directe des ondes gravitationnelles émises par des événements astrophysiques cataclysmiques (supernovæ, collisions violentes, fusion de systèmes binaires de grande masse...) qui sont les seules à être assez puissantes pour être détectées. Ces ondes déforment l'espace-temps lors de leur passage, une onde d'amplitude h modifiant la distance L entre deux masses libres de $\Delta L \approx 1/2 hL$. Les détecteurs utilisés pour les observer sont donc des interféromètres. Mais les prédictions théoriques conduisant à des amplitudes h de l'ordre de 10^{-21} , seuls les interféromètres kilométriques en cours de construction pourront atteindre les sensibilités requises. Virgo est l'un d'eux : c'est un interféromètre de Michelson avec recyclage de puissance, dont les deux bras de 3 km sont des cavités optiques résonantes Fabry-Pérot qui permettent d'obtenir un chemin optique de l'ordre de 150 km pour le faisceau laser.

La construction de Virgo est en cours et s'achèvera en 2003.

Au cours des quatre dernières années, les laboratoires de l'IN2P3 ont fortement contribué à l'installation du CITE, la partie centrale de Virgo. Ils ont réalisé le traitement de surface des miroirs provisoires qui ont été installés sur le site, le contrôle-commande du vide et de la source laser, et le contrôle longitudinal et angulaire des miroirs. Ils ont participé à l'installation des réseaux et à la mise en place des outils généraux pour le contrôle software de l'expérience. Ils ont réalisé les enceintes à vide abritant les miroirs et le système de détection. Responsables du système d'acquisition des données, ils ont aussi produit de nombreuses cartes d'électronique.

Parallèlement à cette activité sur le site, ils ont coordonné, à la Cnim (Toulon), la production des 400 modules des tubes à vide des deux bras dont l'installation a commencé : la moitié du premier bras est déjà en place. Ils ont mis en place la gestion des « triggers online » et la calibration. Le robot automatique chargé du traitement de surface des miroirs définitifs de Virgo a été réceptionné, leur fabrication est en cours. D'autre part, les laboratoires se sont fortement engagés dans la préparation à l'analyse des données en provenance de sources impulsives de type supernova, de coalescences d'étoiles binaires ou de pulsars.

Les années à venir seront encore bien occupées : tests (1) sur le CITE de l'ensemble des composants de Virgo pendant dix-huit mois environ (source laser, suspensions, détection, acquisition des données, contrôle longitudinal et angulaire des miroirs, vide, surveillance de l'environnement), construction des derniers tunnels et installation des tubes à vide, mise en place des miroirs définitifs et mise en route de l'interféromètre complet en 2003. Il ne restera plus alors qu'à espérer le passage des ondes gravitationnelles...

POUR EN SAVOIR PLUS

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

Virgo Collaboration, The Virgo interferometer for gravitational wave detection, *Nucl. Phys. B (proc. Suppl.)*, 54 (1997) 167-175.

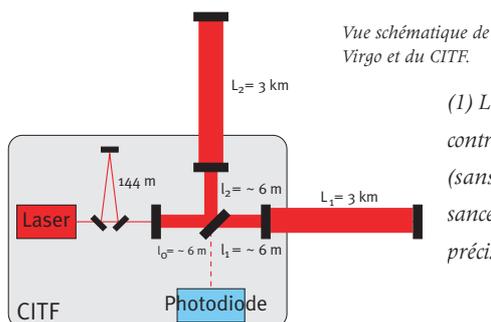
LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : LAL, LAPP, IPN Lyon.

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

CNRS/SPM : Spectroscopie en lumière polarisée.



Vue schématique de Virgo et du CITE.

(1) Le 1^{er} juin 2001, le premier contrôle longitudinal du CITE (sans le recyclage de puissance) a été réalisé avec une précision de 10^{-10} m.

DE L'OSCILLATION ET DES MASSES DES NEUTRINOS

De charge nulle et uniquement sensible à l'interaction faible, le neutrino est l'une des plus mystérieuses particules élémentaires. Les physiciens se sont notamment demandé pendant longtemps s'il avait une masse. Il a d'ailleurs été jusqu'à récemment l'un des meilleurs candidats pour expliquer la masse manquante de l'Univers. Qu'en est-il aujourd'hui ?

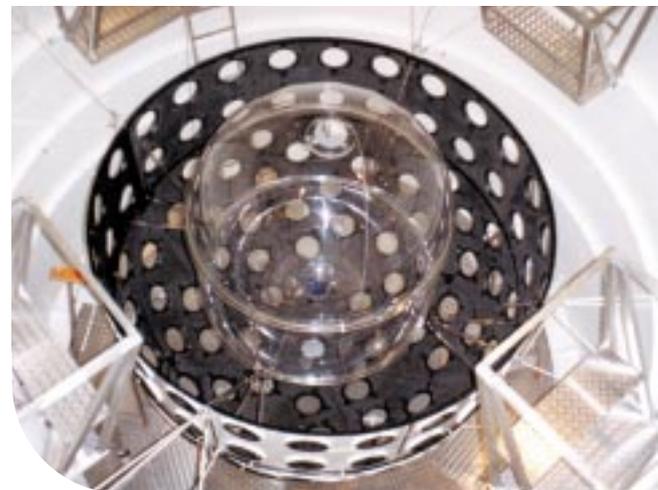
La méthode la plus sensible pour accéder à l'évaluation et à la hiérarchie des masses des trois saveurs des neutrinos consiste à rechercher leurs « oscillations ». En effet, si les neutrinos sont massifs, leurs états propres de saveur (ν_e , ν_μ , ν_τ) sont une combinaison linéaire (matrice de mélange) de leurs états propres de masse. Or, étant de masses différentes, ces derniers se propagent à des vitesses différentes. Leurs abondances relatives vont donc changer pendant le voyage du neutrino et, par conséquent, celles des états propres de saveur aussi. Un ν_e émis par une source pourra donc apparaître sous forme de ν_μ à une certaine distance. Le calcul montre que ce phénomène est cyclique et que pour tester des différences de masse de plus en plus petites, il faut placer les détecteurs à des distances de plus en plus grandes de la source et utiliser des neutrinos de faible énergie.

Au début des années quatre-vingt-dix, deux observations expérimentales (déficit en neutrinos solaires et rapport anormal ν_e/ν_μ des neutrinos atmosphériques) indiquaient que les masses des neutrinos devaient être faibles (de 10^{-1} à 10^{-5} eV). Or l'accès aux faibles masses avec une source de neutrinos bien contrôlée (2 %) était possible, grâce aux centrales nucléaires qui produisent des sources très intenses de neutrinos de basse énergie. En 1993, deux équipes de l'IN2P3 ont donc proposé une expérience auprès de la centrale de Chooz (Ardennes), les qualités exceptionnelles du lieu permettant d'installer, à 1 km de deux réacteurs de puissance, un détecteur massif dans un site souterrain bien protégé du bruit de fond créé par le rayonnement cosmique. Avec l'appui technique et financier d'EDF, cette expérience démontrait dès 1997 que, dans le domaine de masse allant de 10^{-1} à 10^{-2} eV, l'amplitude d'une oscillation d'un ν_e vers tout autre type de neutrino était inférieure à 10 %. La contrainte apportée par ce résultat sur l'élément de matrice associé au ν_e était importante; la publication préliminaire de Chooz

(1998) fait d'ailleurs partie des *top cited papers*. Quant à améliorer la connaissance de cet élément de matrice, cela reste l'un des challenges des expériences futures. L'année suivante, l'expérience SuperKamiokande au Japon confirmait ce résultat et apportait la démonstration expérimentale que le ν_μ se transformait en ν_τ . Le neutrino avait une masse: un pas immense venait d'être franchi, qui a été confirmé pour les neutrinos solaires par le résultat de Sudbury, Canada (2001).

Un programme ambitieux se dessine aujourd'hui avec notamment l'expérience Opera à laquelle participe l'IN2P3: en plaçant des détecteurs au Gran Sasso (Italie) à 750 km d'une source de ν_μ d'accélérateur du Cern, elle souhaite confirmer le résultat de SuperKamiokande en détectant les ν_τ produits par oscillation. À plus longue échéance, en utilisant des faisceaux intenses de neutrinos produits dans un anneau de stockage de muons et des détecteurs situés à des milliers de kilomètres, il sera possible d'étudier les oscillations entre tous les types de neutrinos et de mesurer tous les paramètres de masse et de mélange.

*Vue du détecteur de Chooz pendant le montage: l'ampoule acrylique contiendra 5 m³ de scintillateur au gadolinium servant de cible pour les neutrinos, la structure légère en ABS thermo-formé supporte les photomultiplicateurs et l'ensemble est immergé dans 140 m³ de scintillateur liquide contenu dans la cuve en acier.
© CNRS/IN2P3
Laurence Médard*



POUR EN SAVOIR PLUS

M. Appolonio *et al.*, Limits on neutrino oscillations from the Chooz experiment, *Phys. Lett. B*, 466 (1999) 415-430.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LAPP, PCC.

Russie: Institut Kurchatov, Moscou.

Italie: INFN, Pisa et Trieste.

USA: Universités de Drexel (Philadelphie), du Nouveau-Mexique (Albuquerque) et de Californie (Irvine).

LES RAYONS GAMMA POUR COMPRENDRE LES NOVÆ

Pour comprendre les phénomènes qui se déroulent au cœur des novæ, des études sont menées afin de simuler au plus près les processus d'hydrodynamique et de nucléosynthèse dont elles sont le siège, et de déterminer ainsi le spectre de leurs émissions gamma. Ces prédictions devront ensuite être confrontées aux détections de raies gamma que de nouveaux satellites permettront bientôt d'effectuer.

Les novæ sont le résultat d'une explosion thermonucléaire se produisant à la surface d'une naine blanche dans un système d'étoiles binaires en interaction. Cette combustion explosive de l'hydrogène s'accompagne d'une série de réactions de nucléosynthèse produisant des noyaux radioactifs dont certains sont émetteurs de rayonnement gamma. Ces événements sont beaucoup moins violents que les supernovæ, mais leur fréquence élevée (quelques dizaines par an dans la Galaxie) en fait des objectifs de choix pour l'astronomie gamma.

Une telle émission n'a encore pas été observée, mais une nouvelle génération de satellites (Integral, le Cube

Compton...) pourrait y parvenir, grâce à une meilleure sensibilité ou à un plus grand champ. La détection, en provenance d'une nova proche (quelques kiloparsecs (1)), de raies gamma nucléaires prédites, comme les émissions à 1,275 MeV (^{22}Na), ≤ 511 keV (^{18}F) et 478 keV (^7Be), devrait alors permettre de progresser dans la modélisation des

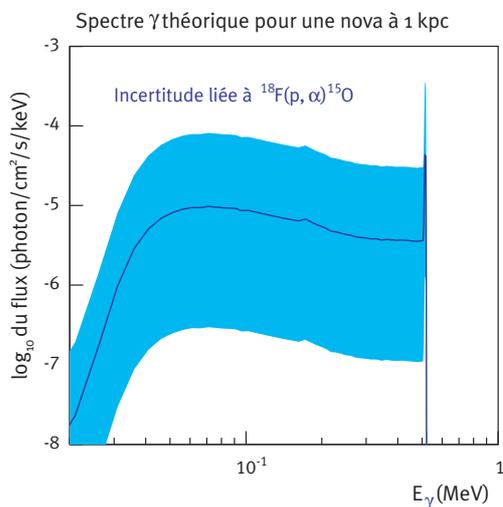
processus thermodynamiques, hydrodynamiques et nucléaires dont les novæ sont le siège.

Néanmoins, si la connaissance de certaines vitesses de réactions thermonucléaires ne progresse pas, l'interprétation de ces observations futures restera limitée. Un programme d'identification puis d'étude théorique et expérimentale des réactions nucléaires critiques a donc été engagé. Il a été possible de simuler l'hydrodynamique de l'explosion, de la coupler à la nucléosynthèse et de calculer les spectres d'émission gamma correspondants. Cependant, la nucléosynthèse fait intervenir de nombreuses réactions de capture de proton sur des noyaux de courte durée de vie (quelques secondes ou minutes) dont les sections efficaces sont très mal connues à cause de difficultés expérimentales évidentes (cibles) : ces incertitudes et leur influence sur le flux gamma ont donc dû être quantifiées. Cela a permis de déterminer les réactions nucléaires cruciales pour lesquelles ces incertitudes conduisent à des variations significatives du flux gamma : ce sont, par exemple, $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$, $^{21}\text{Na}(p,\gamma)^{22}\text{Mg}$ et $^{25}\text{Al}(p,\gamma)^{26}\text{Si}$ qui sont directement impliquées dans la formation ou destruction de ^{18}F , ^{22}Na et ^{26}Al (un autre émetteur gamma), mais dont les sections efficaces ne sont pas mieux connues qu'à quelques ordres de grandeur près. Des calculs de modèle en couches ont donc été effectués qui ont permis, par exemple, de préciser le taux de la réaction $^{21}\text{Na}(p,\gamma)^{22}\text{Mg}$. Cette approche théorique n'a malheureusement pas pu être appliquée, la réaction $^{18}\text{F}(p,\alpha)^{15}\text{O}$, dont la méconnaissance du taux se traduit par plus de deux ordres de grandeur d'incertitude sur le flux gamma à basse énergie, provenant de l'annihilation des positons de décroissance de ^{18}F . Pour réduire cette incertitude, une mesure par réaction de transfert avec un faisceau radioactif de ^{18}F a été effectuée auprès du cyclotron de Louvain-la-Neuve; elle est en cours d'analyse.

L'IN2P3 est impliqué dans ces expériences depuis les mesures de sections efficaces jusqu'aux observations (Integral), en passant par les calculs théoriques nucléaires ou de modélisation astrophysique.

(1) 1 parsec = 3,26 années-lumière.

Simulation du flux gamma de basse énergie émis par une nova à 1 kiloparsec et incertitude nucléaire associée (surface colorée).



POUR EN SAVOIR PLUS

A. Coc, M. Hernanz, J. José et J.-P. Thibaud, *Astronomy and Astrophysics*, 357 (2000) 561-571, astro-ph/0003166.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : CSNSM.

Espagne : Institut d'études spatiales de Catalogne (IEEC) et Université polytechnique de Catalogne, Barcelone.

REMERCIEMENTS

Introduction
Michel Spiro

Jacques Delabrouille
Reynald Pain
Michael Joyce
Martine Stern
Roman Kossakowski
Pierre Billoir
Arache Djannati
Paschal Coyle
Fabien Cavalier
Yves Declais
Alain Coc





RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES

L'IN2P3 travaille en interaction avec la plupart des départements scientifiques, soit au niveau de thématiques fondamentales soit au niveau de l'instrumentation. Des collaborations anciennes sont établies avec le département des Sciences physiques et mathématiques en physique théorique, physique atomique et physique des matériaux. Avec le département des Sciences chimiques, les liens sont quasi historiques avec la chimie nucléaire, mais de nouvelles thématiques, concernant notamment le traitement des déchets nucléaires, ont redonné vigueur à la coopération. L'apport de la physique de l'infiniment petit à celle de l'infiniment grand s'est révélé plus récemment et a contribué à ce que des chercheurs de l'Institut et des Sciences de l'Univers nouent des liens solides dans des expériences en astrophysique et cosmologie. Enfin, très récemment, les développements importants dans le domaine du traitement de l'information permettent d'envisager des coopérations étroites avec le nouveau département des Sciences et technologies de l'information et de la communication.

Certains de ces thèmes - aval du cycle électronucléaire, expériences d'astroparticules, grille de calcul - sont abordés ailleurs dans ce rapport. Nous mettons donc ici l'accent sur des recherches qui offrent d'autres ouvertures vers les sciences du vivant, la physique et la chimie, les sciences de la Terre.

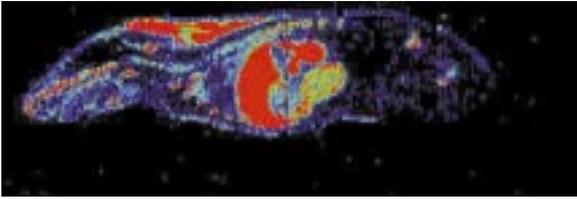
◀ En janvier 2000, à environ 2 km de la station italienne Concordia en Antarctique, deux membres de l'équipe ont réussi à extraire des échantillons de neige de strates annuelles bien datées. A l'horizon, on distingue les bâtiments de la station Concordia. © CNRS/IN2P3

L'INTERFACE AVEC LA BIOLOGIE ET LA MÉDECINE

Ce qui caractérise les groupes de l'IN2P3 qui ont acquis une forte visibilité en biologie et en médecine est leur volonté de mettre leur expérience en physique corpusculaire au service de la réalisation d'instruments ou de méthodes utiles, voire indispensables, à la compréhension des mécanismes biologiques, ainsi qu'à l'exploration de nouvelles voies diagnostiques et thérapeutiques. Pour ce faire, ces groupes ont choisi une approche originale : en acquérant des connaissances en biologie, ils ont manifesté leur volonté de trouver un langage commun avec les biologistes avec lesquels ils collaborent.

La microsonde nucléaire du Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan.
© CNRS/IN2P3

Autoradiographie de rat (14C).



L'imagerie gamma de haute-résolution pour la cancérologie.
page 84

C'est dans ce cadre que se situent les deux articles qui suivent : développement d'imageurs à l'IPN d'Orsay et utilisation de la microsonde nucléaire de Bordeaux pour la radiobiologie à l'échelle cellulaire.

En médecine, l'utilisation d'accélérateurs pour le traitement des cancers par protonthérapie est déjà ancienne. L'expertise de l'IN2P3 dans le domaine des accélérateurs est mise à profit dans les projets d'accélérateurs d'ions lourds (carbone en particulier) pour les applications en hadronthérapie.

L'irradiation par microfaisceau pour la radiobiologie à l'échelle cellulaire.
page 86

Au-delà de ces recherches pionnières, les dernières années ont vu un foisonnement d'initiatives, liées notamment aux développements instrumentaux pour le LHC et aux encouragements multiples à la pluridisciplinarité et à la valorisation. La R&D pour le LHC a engendré plusieurs avancées technologiques qui trouvent un champ d'application dans l'imagerie médicale. Un excellent exemple est l'activité sur les détecteurs à pixels du Centre de physique des particules de Marseille. Les détecteurs développés à partir de cette technologie apportent un progrès remarquable par rapport aux caméras CCD tant sur la dynamique, multipliée par un facteur de plus d'un million, que sur la vitesse d'enregistrement des images, de l'ordre d'un millième de seconde. Les premières applications envisagées concernent la cristallographie des protéines et un scanner-X associé à un tomographe à émission de positons (TEP) pour petit animal.

D'autres équipes de l'IN2P3 sont impliquées dans ce secteur : l'IReS pour l'utilisation de détecteurs de pixels en microbiologie, l'ISN pour la faisabilité d'un TEP à argon liquide, le LPC Clermont-Ferrand pour des gamma-caméras équipées de photomultiplicateurs.

Génome humain - le projet de séquençage de l'ADN humain - n'a pu être réalisé que grâce au développement d'instruments de séquençage automatique à haut débit. Un groupe de l'IPN d'Orsay a contribué à un projet européen de séquenceur multicapillaire en collaboration avec d'autres physiciens, des chimistes et des biologistes. Au LAL, un imageur rapide pour l'électrophorèse a été mis au point. Ces travaux ont débouché sur des dépôts de brevets.

La génomique entre maintenant dans l'ère du postséquençage. L'interprétation des séquences est le prochain défi à relever, car il reste à comprendre comment s'organisent et fonctionnent ensemble les quelques dizaines de milliers de protéines codées par les gènes humains. Pour cela, de nouveaux moyens expérimentaux et informatiques sont nécessaires, qui réclameront encore des recherches interdisciplinaires avec la biologie. Une première expérience originale dans cette direction a vu le jour entre le LPC Clermont-Ferrand et le

Laboratoire de biologie des protistes de l'université Blaise-Pascal: durant toute l'année 2000, une équipe de biologistes a été hébergée au LPC et a utilisé des ressources informatiques dédiées au séquençage et à l'annotation d'un génome complet de trois millions de bases. Cette collaboration, élargie au Laboratoire d'informatique et de modélisation des systèmes, est à l'origine d'un concept innovant de plate-forme bio-informatique dans le cadre du projet Datagrid de grille de calcul de la Communauté européenne.

Il est important que se développent des initiatives de création d'environnements pluridisciplinaires où se côtoient physiciens et biologistes. Dans ce sens, le programme CNRS d'imagerie du petit animal, en cours de gestation, constituera une véritable avancée. La bio-informatique, la simulation et la modélisation constituent également des domaines où les laboratoires et les réseaux de l'IN2P3 pourraient apporter une aide efficace dans la dissémination des ressources et des compétences en France.



LES INTERACTIONS ION-MATIÈRE

L'expression « interactions ion-matière » recouvre les interactions avec un gaz, un plasma, un solide; elles ont été développées dans les laboratoires de l'IN2P3 grâce à l'utilisation de faisceaux très variés allant des ions légers tels que l'hélium, le lithium, jusqu'aux agrégats très lourds (Au_n) comportant un grand nombre d'atomes constituants. Les études, souvent très fondamentales, entrent dans le cadre d'objectifs ciblés tels que fusion inertielle, transformation structurale, effets d'irradiation liés au stockage de déchets radioactifs... et sont aussi la source d'applications originales.

Dans le système projectile-cible en interaction, les recherches portent sur le devenir du projectile traversant la matière, sur les perturbations transitoires induites dans le matériau, sur les effets dynamiques de dissipation d'énergie et sur les états finals du projectile et des matériaux.

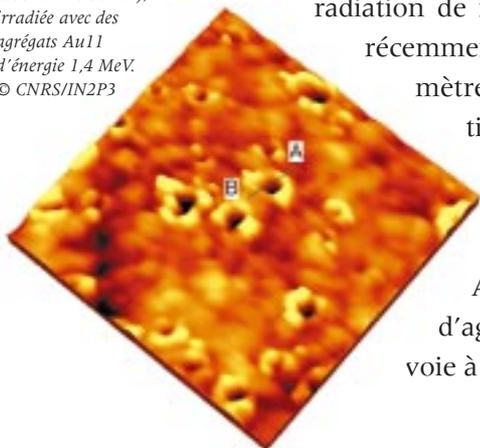
La germination et la croissance d'agrégats de métal pur, obtenues au cours d'irradiations de verres contenant un oxyde métallique, ont pu être contrôlées par la quantité d'énergie déposée dans ces verres. L'analyse fine des conditions d'ir-

radiation de multicouches minces particulières par des ions légers a récemment permis des études de magnétisme au niveau du nano-

mètre, qui ouvrent des perspectives intéressantes d'applications à l'enregistrement magnétique de haute densité. Les collisions en impact unique entre des agrégats de carbone et des atomes d'hélium ont mis en évidence une forme inconnue de projectiles agrégats C_n .

Au cours de ces toutes dernières années, l'accélération d'agrégats massifs Au_n , avec n dépassant 100, a ouvert la voie à un nouveau type de collisions particule-solide. Les expé-

*Vue en perspective obtenue en microscopie à force atomique d'une surface d'or (500 nm x 500 nm), irradiée avec des agrégats Au₁₁ d'énergie 1,4 MeV.
© CNRS/IN2P3*



Enregistrement magnétique haute densité: dessiner avec des ions.
page 87

Des agrégats d'or pour l'étude du dépôt d'énergie dans les solides.
page 88

riences, réalisées à l'IPN d'Orsay et à l'IPN de Lyon, concernent l'impact simultané, à grande vitesse, d'un nombre élevé d'atomes sur une faible surface; cet impact engendre des dépôts d'énergie considérables qui, confinés dans un faible volume, provoquent l'émission d'une quantité de matière importante. Il en résulte une émission ionique résonante inattendue qui sera exploitée pour l'identification de molécules biologiques en milieu solide et/ou liquide. L'ensemble des thèmes abordés révèle une dynamique forte de ce vaste domaine au sein de l'IN2P3. La conception de nouvelles sources d'ions, l'adaptation d'accélérateurs à la production de projectiles exotiques et l'originalité des recherches témoignent de cette dynamique.



L'INTERFACE AVEC LES SCIENCES CHIMIQUES

Les propriétés radioactives de certains éléments chimiques sont à la base des liens qui unissent l'IN2P3 au département des Sciences chimiques. En effet, que l'on soit chimiste ou physicien, l'étude des éléments radioactifs nécessite souvent les mêmes matériels (scintillateur liquide, chaîne de détection...) et le développement de techniques d'origine nucléaire. Plusieurs laboratoires de l'IN2P3 sont donc impliqués dans des recherches à caractère fondamental ou plus appliqué sur les radioéléments.

A Nantes, avec le groupe Smart, et à Strasbourg, avec le groupe Ramses, l'IN2P3 a soutenu la mise en place de centres de surveillance des pollutions radioactives de l'environnement. Des traces de Tchernobyl encore présentes sur le sol français à la collaboration avec la CEI, ces groupes sont déjà reconnus, ou en passe de l'être, comme des laboratoires d'analyse indépendants, fiables et efficaces, au niveau international. Cet aspect, sans doute un peu méconnu, de la recherche à l'IN2P3 dépasse largement le cadre strict de la « science pure » pour rejoindre les préoccupations du grand public et renforcer la réputation d'ouverture et de transparence de l'Institut.

A Orsay, à Lyon, à Nantes et à Strasbourg, l'IN2P3 dispose également de groupes de radiochimistes qui étudient les questions relatives à l'aval du cycle du combustible nucléaire, en s'intéressant plus spécialement aux aspects fondamentaux. Quelle est la chimie des radioéléments en solution? Comment se comportent-ils à l'interface avec des matériaux mimant au mieux les barrières ouvragées prévues pour le stockage? Comment décrire l'évolution de matériaux irradiés sur des temps géologiques? Telles sont quelques-unes des questions étudiées, entre recherche appliquée et recherche fondamentale.

*Analyse d'échantillon par spectrométrie gamma et dans le service de métrologie et d'analyse de la radioactivité et des éléments traces (Smart).
© CNRS/IN2P3
Laurence Médard*

La mesure des faibles radioactivités.
page 130



Éléments
superlourds :
une chimie atome
par atome.
page 89

Les sujets de chimie à l'IN2P3 ne se limitent pas aux questions directement liées au nucléaire. Dans ce panorama des recherches, relevant du département des Sciences chimiques mais effectuées à l'IN2P3, il était impensable de ne pas mettre également l'accent sur les thèmes qui illustrent la fascination commune des chercheurs de ces deux entités pour l'infiniment peu et l'infiniment court. C'est ainsi que la production, dans les accélérateurs d'ions lourds, d'éléments superlourds ($Z \geq 104$) avec des taux de production extrêmement faibles (un seul atome à la fois!) a permis aux chimistes et aux physiciens de se pencher ensemble sur le comportement de ces atomes si rares: outre leurs propriétés nucléaires étonnantes, ils possèdent des propriétés chimiques inédites, largement dépendantes des effets relativistes de leur cortège électronique. Il est donc naturel que chimistes et physiciens traquent ensemble ces atomes si étranges. De même, lorsque les chimistes sondent la matière aux temps ultracourts auxquels se déroulent les tout premiers actes d'une réaction chimique, l'IN2P3 apporte sa compétence dans la maîtrise des impulsions ultracourtes produites par des accélérateurs, ainsi que de l'appareillage complexe qui permet la synchronisation et le suivi temporel de ces impulsions.

Elyse: un
accélérateur au
service de la science
«aux temps ultra-
courts».
page 90



L'INTERFACE AVEC LES SCIENCES DE LA TERRE

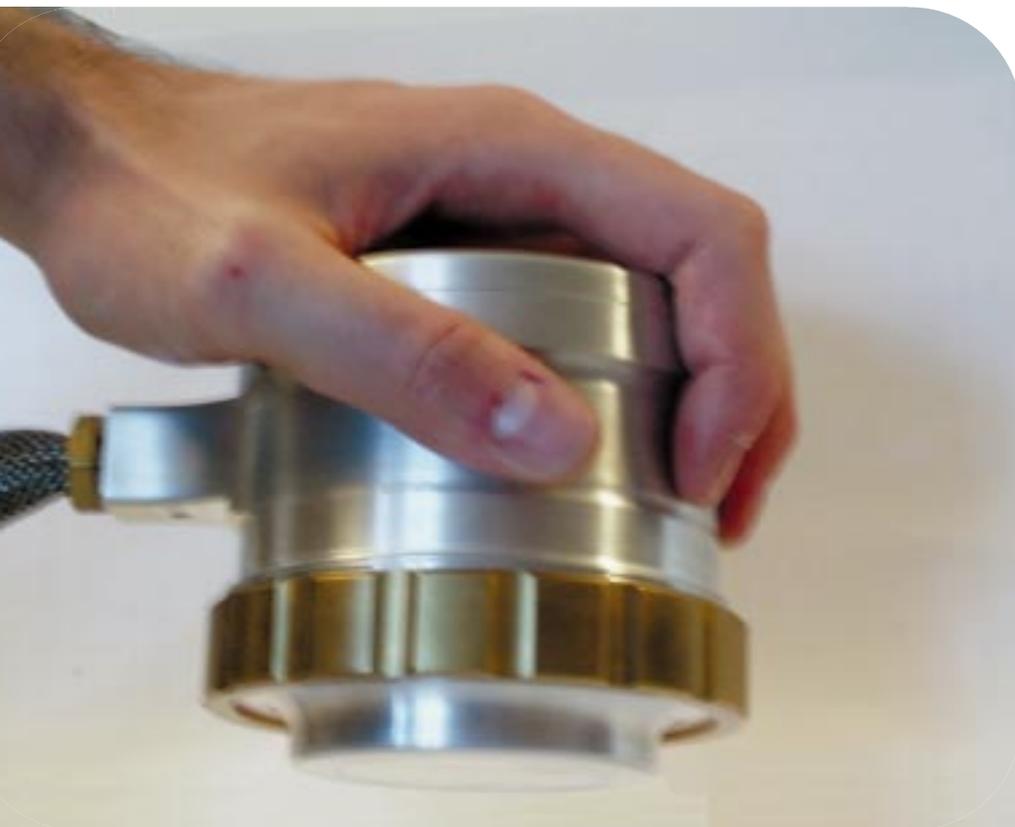
Micrométéorites
et exobiologie.
page 91

Deux équipes de l'IN2P3 sont impliquées dans l'étude de micrométéorites collectées dans les régions polaires arctique et antarctique et dans l'analyse d'échantillons par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA). Un aspect des études sur les micrométéorites est résumé dans la partie «Micrométéorites et exobiologie». L'équipe de SMA travaille auprès du Tandetron de Gif-sur-Yvette. Grâce à sa nouvelle ligne d'ions lourds, cet accélérateur permet d'utiliser l' ^{129}I comme traceur océanique (European Sub-Polar Ocean Program) et comme traceur de l'environnement pour l'étude de l'impact de l'accident de Tchernobyl et des activités nucléaires de l'ex-Union soviétique. Au-delà de leur intérêt pour l'étude de l'irradiation des micrométéorites dans le système solaire, les mesures de l'isotope cosmogénique ^{10}Be au Tandetron permettent, grâce aux analyses des carottages polaires Grip, Vostok et, dans l'avenir, Epica, d'obtenir des informations sur les variations du rayonnement cosmique primaire, du cycle solaire ou encore du champ magnétique terrestre. La mesure de production *in situ* d'isotopes cosmogéniques permet aussi d'étudier la chronologie des variations climatiques (par exemple dans l'Himalaya). Instrument de recherche, le Tandetron est en constante évolution; l'amélioration des techniques existantes sur l' ^{129}I et le développement de nouvelles techniques pour le ^{36}Cl et le ^{41}Ca ouvrent de nombreuses perspectives de recherches interdisciplinaires, notamment pour l'analyse d'échantillons en relation avec l'aval du cycle électronucléaire ou encore la datation des sédiments marins et des coraux.

L'IMAGERIE GAMMA DE HAUTE RÉOLUTION POUR LA CANCÉROLOGIE

L'efficacité du traitement chirurgical du cancer, qui est actuellement le protocole thérapeutique le plus largement utilisé pour les tumeurs solides, impose une localisation précise et une ablation complète des lésions tumorales. Pour guider le geste du chirurgien, et s'assurer que tous les tissus cancéreux ont été retirés, des chercheurs de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay ont mis au point une gamma-caméra miniaturisée haute résolution, baptisée POCI (Per-Operative Compact Imager), capable de localiser en temps réel et au contact de la plaie opératoire, les traceurs radioactifs spécifiques des régions pathogènes recherchées.

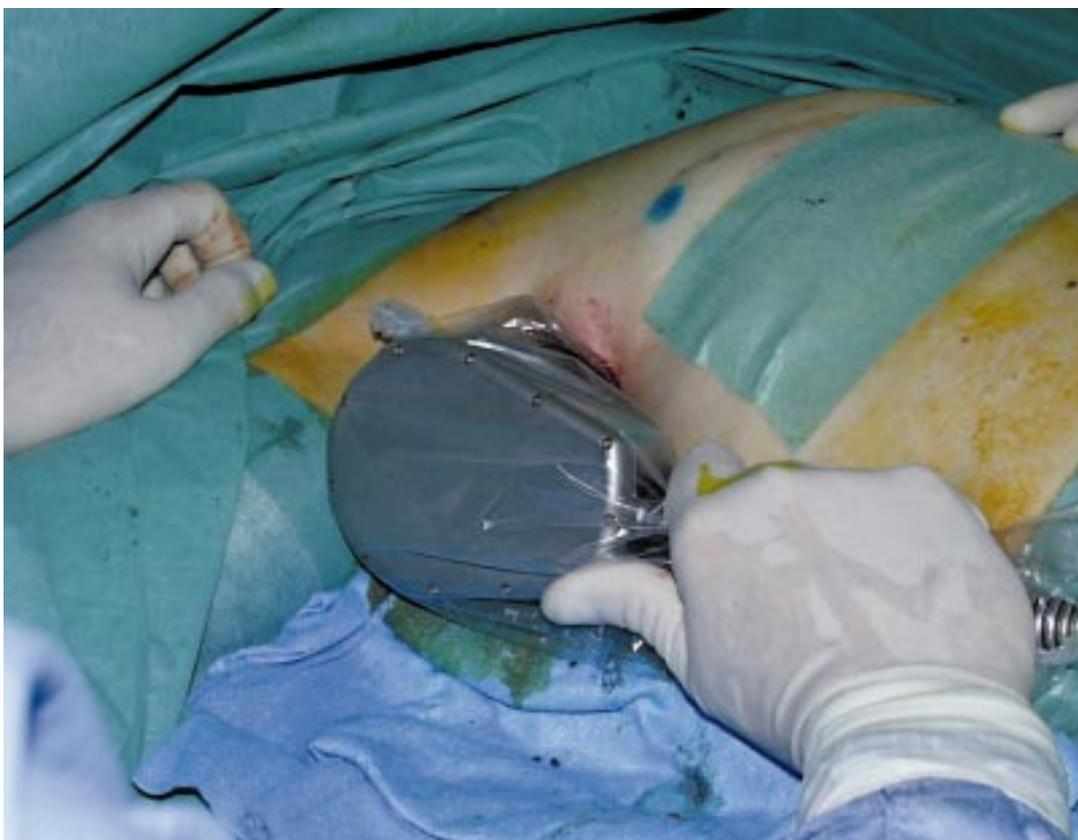
*L'imageur
peropératoire haute
résolution POCI:
seconde version grand
champ.
© CNRS/IN2P3*



L'introduction en bloc opératoire de systèmes de détection nucléaire miniaturisés, associés à un marquage radioactif des tumeurs, offre au chirurgien une assistance par radioguidage en temps réel et lui permet de s'assurer de l'ablation totale des tissus cancéreux. C'est pour renforcer l'efficacité de cette méthode que l'équipe Interface physique-biologie, à Orsay, a engagé, dès 1996, le développement de la gamma-caméra haute résolution POCI.

Pour répondre aux contraintes imposées par la technique de détection peropératoire (encombrement réduit, résolution spatiale élevée pour localiser de petites lésions tumorales), la caméra POCI utilise un système de détection original comportant un tube intensificateur d'image lu par une photodiode à localisation bidimensionnelle. Couplé à une tête de détection gamma, cet ensemble très compact permet d'accéder à des performances très supérieures à celles des gamma-caméras cliniques utilisées dans les services de médecine nucléaire. Ainsi, la résolution spatiale de cette sonde est comprise entre 1 et 2 mm alors qu'elle est généralement supérieure à 5 mm pour les caméras à grand champ. Le premier prototype de l'imageur

POCI, qui offrait un champ de vision de 24 mm de diamètre, a été évalué dès 1999 au niveau clinique, en collaboration avec l'Institut Gustave-Roussy de Villejuif, pour détecter le premier relais ganglionnaire lymphatique (ganglion sentinelle) drainant les mélanomes cutanés ou les tumeurs du sein. Au cours de cette évaluation sur dix cas, il a été démontré que la caméra permettait une localisation aisée et précise du ganglion sentinelle avant mais également pendant l'intervention chirurgicale. Pour renforcer l'efficacité de cette méthode, une nouvelle version pré-industrielle de la caméra POCI, proposant un champ de vision élargi de 60 mm de diamètre, est actuellement en cours d'évaluation clinique. L'objectif est de dresser, avec cette seconde version et dans la perspective d'une homologation, un bilan du protocole du ganglion sentinelle assisté par radio-imagerie peropératoire et



fondé sur l'examen d'une cohorte de 100 patients.

Au-delà du radioguidage clinique, qui devrait se poursuivre dans le domaine des tumeurs endocrines ou des cancers thyroïdiens, la caméra haute résolution POCI ouvre également de nouvelles perspectives de recherches pour les études biologiques *in vivo* sur les modèles animaux, thème qui fait aujourd'hui partie des priorités scientifiques du CNRS. Associé aux autres méthodologies expérimentales *in vivo* dédiées au petit animal développées dans le groupe d'Orsay, l'imageur POCI doit permettre d'accéder à une semi-quantification de la biodistribution et de la cinétique d'espèces chimiques radiomarquées. Dans le domaine de la cancérologie, ces études ont notamment un rôle majeur dans le développement de nouveaux agents pharmacologiques pour la mise au point de thérapies ou l'établissement de protocoles de diagnostic. Couplées à la modélisation physique de systèmes complexes, ces études ouvrent également la voie à la compréhension des différents mécanismes biologiques impliqués dans le développement des pathologies cancéreuses.

Utilisation du premier prototype de POCI pendant une intervention chirurgicale pour la détection du ganglion sentinelle. Ici, la patiente est atteinte d'un cancer du sein et présente un ganglion sentinelle dans la région axillaire.
© CNRS/IN2P3

POUR EN SAVOIR PLUS

L. Ménard, Y. Charon, M. Solal, M. Ricard, P. Lanièce, R. Mastrippolito, *et al.*, Performance characterization and first clinical evaluation of an intra-operative compact imager, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1999, NS46(6), 2068-2074.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Orsay.

Institut Gustave-Roussy.

L'IRRADIATION PAR MICROFAISCEAU POUR LA RADIOBIOLOGIE À L'ÉCHELLE CELLULAIRE

Comprendre comment agissent les particules chargées de basse énergie sur la matière vivante, notamment lors de l'exposition à de très faibles doses, reste un enjeu majeur. L'utilisation d'un microfaisceau d'ions, auprès de l'accélérateur électrostatique de Bordeaux, offre un moyen privilégié d'examiner les comportements à l'échelle de la cellule individuelle.

L'interaction de particules chargées de basse énergie avec le milieu vivant joue un rôle prépondérant dans de nombreux domaines: exposition aux rayonnements naturels (radon), exposition professionnelle, cancérogenèse, thérapie anticancéreuse par particules chargées, comme la protonthérapie.

Une nouvelle approche expérimentale consiste à utiliser un microfaisceau d'ions pour irradier sélectivement, en mode ion par ion, des constituants cellulaires critiques tels que le noyau. En effet, lors d'expositions à de faibles doses, la probabilité pour qu'une cellule soit traversée par plus d'une particule est extrêmement faible. Ces conditions sont très difficiles à reproduire *in vitro* par irradiation aléatoire sur des lignées cellulaires. Les inévitables impacts multiples, la variété de cibles intracellulaires touchées (noyau ou cytoplasme), les effets indirects induits par les impacts sur les cellules voisines ou simplement extracellulaires sont autant de phénomènes qui compliquent sérieusement l'interprétation des données.

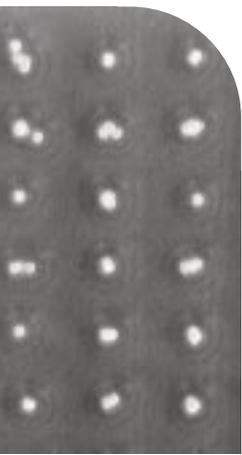
L'utilisation d'un microfaisceau pour une irradiation ciblée, cellule par cellule et contrôlée ion par ion, est la seule méthode permettant de contrôler le nombre exact de particules délivrées par cellule (jusqu'à un

ion/cellule), de prédéterminer le point d'impact avec une précision de l'ordre du micron et d'irradier certaines cellules tout en vérifiant la réponse de cellules voisines.

Une telle ligne d'irradiation est en cours de développement auprès de l'accélérateur électrostatique du CENBG. Le faisceau, extrait à l'air, permet l'irradiation de cellules adhérentes en monocouche dans leur milieu de culture. Le nombre exact de particules ionisantes devant traverser chaque cellule est prédéterminé avec une fréquence maximale d'irradiation qui pourra atteindre 10 cellules par seconde. L'irradiation est pratiquée sous contrôle par microscopie de fluorescence afin de cibler le noyau et le cytoplasme.

Parmi les nombreux domaines d'applications, citons:

- l'inactivation cellulaire aux très faibles doses (évaluation de risques domestiques, exposition au radon...);
- les effets de la géométrie de l'irradiation: sensibilité des différents composants cellulaires (noyaux et/ou cibles extranucléaires); aide au développement de modèles pour l'étude des mécanismes de formation des dommages de l'ADN; effet d'impacts extracellulaires sur le taux de survie cellulaire;
- l'étude de mécanismes cellulaires fondamentaux: cancérogenèse (mutation, transformation d'oncogènes...); communication intercellulaire; modulation de l'expression de certains gènes par irradiation à faible dose.



Test de résolution en faisceau extrait à l'air: gravure sur un détecteur solide de traces (CR39) sous l'impact de particules alpha de 2 MeV (4 ions par position visée, 30 µm entre deux positions).

POUR EN SAVOIR PLUS

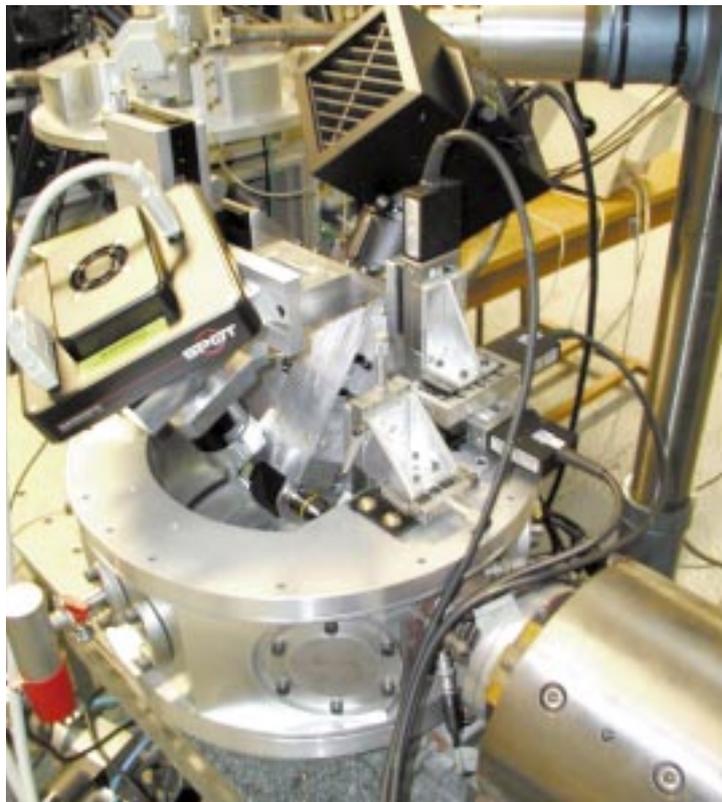
Ph. Moretto, C. Michelet, A. Balana, Ph. Barberet, W. Przybylowicz, J.-P. Slabbert, *et al.*, Development of a single ion irradiation system at CENBG for applications in radiation biology, *Nucl. Instr. Meth B* (à paraître en 2001).

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

Materials Research Group, National Accelerator Center, Faure, South Africa.

DSV/CEA: Laboratoire de radiotoxicologie,

Bruyères-le-Châtel.



Vue de l'étage d'irradiation.
© CNRS/IIN2P3

ENREGISTREMENT MAGNÉTIQUE HAUTE DENSITÉ: DESSINER AVEC DES IONS

La densité d'information des supports d'enregistrement magnétique croît de 60 % par an. La limite des techniques actuelles (10 gigabits/cm² environ) sera atteinte vers 2005. Ce cap sera toutefois difficilement franchissable du fait des limitations des technologies existantes. Une nouvelle méthode, qui utilise notamment une technique d'irradiation par un faisceau d'ions, à travers un masque approprié, permet d'ores et déjà de s'affranchir de ces limites, en laboratoire.

Un « bit » d'enregistrement fonctionne par retournement de l'aimantation dans un élément de volume du matériau magnétique sensible; aux densités très élevées, donc aux tailles très faibles, on approche la limite de stabilité thermique des bits dans les supports actuels (de type granulaire). On peut stabiliser des bits de taille inférieure à 100 nm par gravure de plots indépendants (lithographie), avec une précision de quelques nanomètres. Mais cette technique atteint ses limites lorsqu'il s'agit de graver des objets dont la taille est de l'ordre du nanomètre, sans défaut de structure, avec une parfaite reproductibilité des propriétés magnétiques d'un point à un autre de la surface d'enregistrement. Une équipe du CSNSM, en collaboration avec d'autres laboratoires d'Orsay et de Bagneux, a proposé une technique d'irradiation par faisceaux d'ions à basse énergie (quelques dizaines de keV) qui permet de résoudre cette difficulté, tout en ouvrant la voie à de nouvelles études de nanomagnétisme.

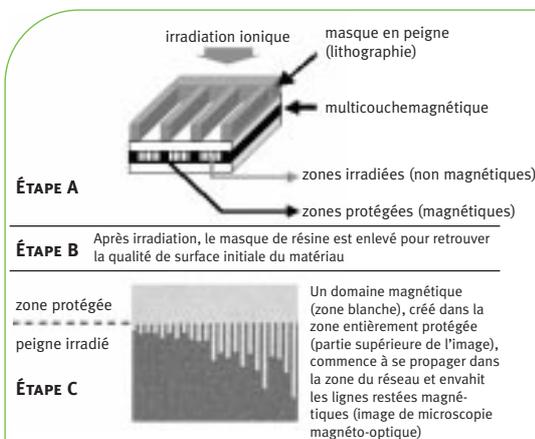
Les performances d'un support d'enregistrement sont liées à la structure du matériau magnétique dont on retourne l'aimantation. La variation conjointe du taux et de la température d'irradiation permet de jouer sur la structure de ce matériau et donc sur ces performances. Deux possibilités ont été exploitées. La première consiste à utiliser des empilements multicouches de films ultraminces (quelques plans atomiques), dont les propriétés peuvent être ajustées en jouant sur la constitution des interfaces et les épaisseurs des couches individuelles. L'irradiation à température ambiante avec des ions légers (He) introduit aux interfaces entre ces films un désordre parfaitement contrôlé, qui induit à son tour un changement du champ magnétique nécessaire pour retourner l'aimantation. Il ne reste plus qu'à « dessiner » les frontières des plots magné-

tiques, avec la résolution ultime des techniques de masquage habituelles dans la fabrication des microcircuits semi-conducteurs.

La deuxième approche utilise l'irradiation pour mettre en ordre un alliage (ici FePt stœchiométrique) dont les propriétés magnétiques diffèrent fortement selon qu'il est ou non ordonné. L'irradiation par les ions He est effectuée à environ 250-300 °C, combinant les déplacements atomiques de faible amplitude dus aux collisions avec une mobilité thermique suffisante pour favoriser la mise en ordre locale. Il en résulte une anisotropie magnétique très élevée, facile à détecter. Par opposition aux techniques de microfabrication habituelles (lithographie, gravure), cette « gravure magnétique par irradiation » ne modifie ni la planéité de la surface, ni ses propriétés optiques. Cela est crucial pour l'enregistrement magnétique (1).

Enfin, cette méthode permet de réaliser des nanostructures magnétiques pour l'étude fondamentale du magnétisme.

(1) La tête de lecture d'un disque dur « vole » à une vitesse de plusieurs mètres par seconde, à moins de 30 nm au-dessus du disque.



POUR EN SAVOIR PLUS

C. Chappert, H. Bernas, J. Ferré, V. Kottler, J.-P. Jamet, Y. Chen, *et al.*, Planar patterned magnetic media obtained by ion irradiation, *Science* 280 (1998) 1919.

D. Ravelosona, H. Bernas, C. Chappert, V. Mathet, Chemical order induced by ion irradiation in FePt(001) films, *Appl. Phys. Lett.* 76 (2000) 236.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CSNSM.

CNRS/SPM: LPS, LPN.

CNRS/STIC: IEF.

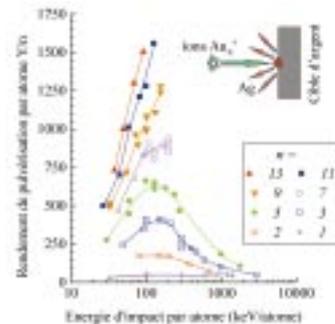
DES AGRÉGATS D'OR POUR L'ÉTUDE DU DÉPÔT D'ÉNERGIE DANS LES SOLIDES

Pour comprendre les mécanismes de dépôt d'énergie sur des surfaces et étudier les phénomènes de transfert d'énergie dans la matière, les agrégats - molécules constituées de plusieurs atomes - sont un outil extrêmement utile. Ils constituent en effet le seul moyen de bombarder simultanément avec plusieurs atomes une très petite surface de quelques dixièmes de nanomètres carrés. Des défauts dans le solide et des cratères géants de plusieurs dizaines de nanomètres ont déjà été observés, ainsi que d'autres effets caractéristiques comme l'amplification non linéaire des émissions secondaires.

Lorsqu'un solide est bombardé par un faisceau incident d'agrégats, il émet à son tour des particules neutres ou ionisées. Afin de mieux comprendre le rôle du régime de collisions, élastique ou inélastique, et les processus de transfert de la grande densité d'énergie (environ 100 keV/nm), l'étude a tout d'abord porté sur l'émission ionique, avec des énergies d'impact de quelques keV jusqu'à une dizaine de MeV, couvrant tout le domaine des collisions élastiques.

L'émission de neutres - atomes ou groupes d'atomes - appelée « pulvérisation » est cependant majoritaire parmi les émissions secondaires puisque le rapport ions/neutres est d'environ 1/10 000. Une expérience simple a été mise en place avec un dispositif conçu autour d'une « micro-

balance à quartz » : une cible métallique est préalablement déposée par évaporation sous vide sur la surface du quartz piézo-électrique et la diminution de sa masse est mesurée pendant son irradiation par le faisceau d'agrégats. L'accélérateur Van de Graaf de 2,5 MV de l'IPN de Lyon, équipé d'une source d'agrégats construite à l'IPN d'Orsay,



Rendements de pulvérisation d'argent, divisés par le nombre n de constituants des projectiles Au_n, et en fonction de l'énergie par atome de ces agrégats.

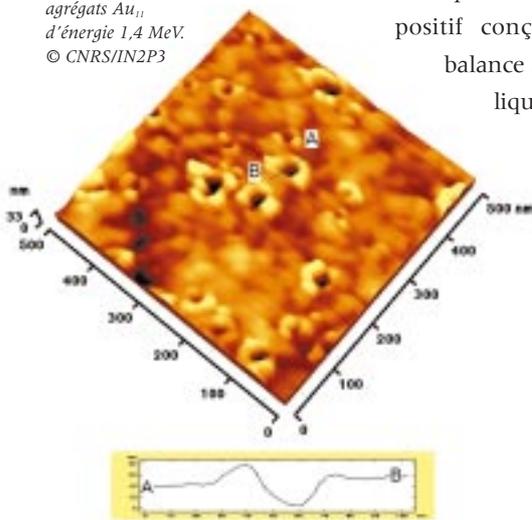
l'accélérateur Aramis du CSNSM et le Tandem d'Orsay avec sa source d'agrégats d'or Orion ont fourni les faisceaux.

Les rendements de pulvérisation par atome (Y : rapport entre le nombre d'atomes émis par pulvérisation et le nombre d'agrégats frappant la surface) croissent très rapidement avec le nombre n de constituants des agrégats : avec le carré de n à partir de n = 3. Une valeur spectaculaire de Y - presque 20000 - est atteinte avec Au₁₃ (13 atomes d'or), représentant 2.10⁶ unités de masse atomique. Une importante déformation de la surface est observée, avec la forme d'un cratère, entouré d'un bourrelet. Le maximum de la pulvérisation se situe vers 130 keV/atome, alors que les mesures d'émission ionique secondaire menées en parallèle présentent un maximum vers 40 keV/atome. Ce décalage en vitesse présente un intérêt évident pour des applications analytiques : l'émission ionique est maximale alors que l'endommagement ne l'est pas.

Ces expériences de pulvérisation, relativement simples à mettre en œuvre, montrent aussi que la quantité d'énergie emportée lors de l'éjection de tels volumes n'est pas négligeable devant celle déposée par l'agrégat : elle peut en représenter jusqu'à 1 dixième. L'extrapolation des résultats expérimentaux conduit à supposer qu'une saturation apparaîtrait avec Au₄₀ à 5 MeV, qui pulvériserait environ 2.10⁵ atomes. Une telle quantité de matière est-elle constituée d'atomes isolés ou de « gros morceaux de matière » ? Toute l'énergie du projectile peut-elle être transférée dans la matière éjectée ? Ces questions restent encore à explorer.

Ces études, notamment les taux d'émission ionique, peuvent être mises à profit pour l'analyse de molécules d'intérêt biologique déposées en phase solide ou liquide sur des supports avec, pour objectif, l'amélioration de la sensibilité du dosage de molécules dans des fluides biologiques. Une collaboration pluridisciplinaire regroupant physiciens, chimistes, biochimistes et médecins est entamée sur ce thème.

Vue en perspective obtenue en microscopie à force atomique d'une surface d'or (500 nm x 500 nm), irradiée avec des agrégats Au₁₁ d'énergie 1,4 MeV. © CNRS/IN2P3



POUR EN SAVOIR PLUS

- H.H. Andersen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 80 (1998) 5433.
- A. Brunelle *et al.*, *Phys. Rev. A* 63 (2001) 22902.

ÉLÉMENTS SUPERLOURDS : UNE CHIMIE ATOME PAR ATOME

Les propriétés chimiques des éléments superlourds, dont le comportement peut être différent de leurs homologues d'une même colonne de la classification périodique, sont étudiées par chromatographie d'échange d'ions en continu grâce au système Rachel. L'évaluation de ces propriétés se fait à partir des variations du partage de l'élément entre deux phases. Lorsqu'il y a une concentration si faible d'éléments qu'on en arrive à l'échelle de l'atome, c'est à la probabilité de présence d'un atome dans l'une ou l'autre phase que donne accès la technique chromatographique.

Le comportement chimique des éléments superlourds ne peut pas être directement extrapolé à partir de celui de leurs homologues plus légers, situés dans une même colonne de la classification périodique. L'existence d'effets relativistes, d'autant plus marqués que le noyau est lourd, serait en effet à l'origine de déviations dans la périodicité des propriétés chimiques des éléments. La possibilité d'apporter la preuve expérimentale de l'existence de ces effets constitue l'enjeu majeur de l'étude du comportement chimique des éléments superlourds.

Le très faible taux de production de ces éléments (quelques nanobarns), allié aux très courtes périodes radioactives des isotopes synthétisés, place les radiochimistes dans des conditions extrêmes: il leur impose de travailler avec un atome à la fois. L'étude expérimentale des propriétés chimiques de tels éléments nécessite le développement d'appareillages spécifiques, proches des lieux de production (accélérateurs d'ions lourds). Ainsi, depuis quelques années, des chercheurs de l'IPNO étudient le comportement chimique des éléments rutherfordium (Rf, Z = 104) et dubnium (Db, Z = 105), en solution aqueuse complexante, à l'aide du système Rachel, implanté auprès de l'accélérateur Tandem 15 MV d'Orsay. Ce dispositif permet de séparer en continu, par chromatographie d'échange d'ions, les transactinides des actinides de transfert produits simultanément ; il permet également de collecter les descendants de plus longue durée de vie de l'élément superlourd étudié. Ces descendants sont ensuite identifiés par une technique de spectrométrie α couvrant l'ensemble de l'angle solide.

Après avoir testé avec succès le fonctionnement de Rachel à l'aide d'isotopes d'éléments de courte période

ayant un comportement proche de celui des transactinides, plusieurs dizaines d'atomes descendant du ^{261}Rf , puis du ^{262}Db ont pu être isolés en milieu fluorhydrique. Enfin, des données quantitatives permettant de caractériser le comportement de ces éléments dans un mélange acide chlorhydrique/acide fluorhydrique ont pu être obtenues. Ces études se poursuivent actuellement avec d'autres milieux complexants.

Qu'en est-il de la validité des données recueillies à l'échelle de l'atome?

A l'échelle des traces (10^{10} à 10^4 entités par cm^3) - domaine classique de la radiochimie -, les propriétés chimiques peuvent en effet être établies par l'étude des variations du partage de l'élément entre deux phases en fonction des paramètres physico-chimiques classiques - pH, température, concentration des macro-composants - et permettent ainsi d'accéder à des données thermodynamiques comme les constantes de complexation. Lorsque le nombre d'atomes diminue, la loi d'action de masse relative à l'équilibre chimique mis en jeu doit être formulée à l'aide de concentrations moyennes; enfin, à l'échelle de l'atome, c'est la probabilité de présence de l'atome dans une phase ou dans l'autre au moment de la séparation qui intervient. La technique chromatographique, par l'intermédiaire du coefficient de partage (relié à la loi d'action de masse), donne directement accès à la probabilité de présence de l'élément dans la phase mobile, c'est-à-dire dans la solution aqueuse complexante dans le cas des expériences réalisées avec le système Rachel.



Système chromatographique du dispositif Rachel.
© CNRS/IN2P3

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Orsay.

Université de Nice.

ELYSE : UN ACCÉLÉRATEUR AU SERVICE DE LA SCIENCE « AUX TEMPS ULTRACOURTS »



Vue d'ensemble
de l'accélérateur Elyse.
© CNRS

Elyse est un centre de cinétique rapide né de la volonté de physico-chimistes, de biophysiciens et de physiciens du CNRS et de l'université Paris XI de mettre en commun compétences, ressources humaines et équipements scientifiques pour l'étude des réactions chimiques et biochimiques élémentaires. Une équipe du Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL) d'Orsay a pris en charge l'étude et la réalisation de l'accélérateur.

En chimie et biochimie aux temps très courts, la technique dite de « pompe-sonde » consiste à utiliser deux impulsions parfaitement synchronisées. La première (impulsion « pompe ») initie la réaction que l'on cherche à étudier et définit le « temps zéro » de la réaction. La seconde impulsion (« sonde »), qui suit la première, interagit avec le système excité. Le signal qui en résulte, mesuré en fonction du décalage temporel entre les deux impulsions, donne des informations sur le chemin de réaction suivi par le système dans l'intervalle. En multipliant ces mesures, on visualise le film de la réaction. En général, on utilise deux impulsions de même nature : des photons issus de la même source laser. La grande originalité d'Elyse provient du fait que les expériences « pompe-sonde » sont

réalisées grâce à une source d'électrons synchronisée avec la source de photons. Ainsi, les réactions peuvent être initiées par des impulsions ultracourtes d'électrons (radiolyse) ou de photons (photolyse). Ces expériences sont complémentaires car l'énergie n'est pas déposée de la même façon dans la matière et les espèces réactives produites sont souvent différentes.

La construction de cet équipement, unique en Europe, mettant à la disposition des chercheurs français et européens un laser et un accélérateur d'électrons photodéclenché par le laser délivrant des impulsions très brèves, a été menée à bien grâce à la collaboration avec une équipe du Laboratoire de l'accélérateur linéaire qui a conçu et réalisé la machine.

Le principe en est le suivant : un laser fournit une impulsion de durée très brève qui frappe une cathode recouverte d'un dépôt photo-émissif qui émet une impulsion d'électrons dont l'intensité et la durée dépendent de l'énergie et de la durée de l'impulsion du laser. Cette photocathode étant judicieusement placée dans une cavité radiofréquence (appelée « canon ») recevant une puissance HF très grande, les électrons émis sont accélérés par le fort champ électrique créé dans le canon, puis traversent une section accélératrice qui permet de régler l'énergie finale des électrons. Le faisceau d'électrons ainsi obtenu est ensuite transporté par des éléments magnétiques dans un vide très poussé (environ 10^{-9} mbar) vers une des zones expérimentales. Bien entendu, ce faisceau sera synchrone à la picoseconde (ps) près du faisceau laser dont il est issu.

Le choix d'une photocathode en tellure de césium (Cs_2Te), caractérisée par un bon rendement quantique ($>10^{-2}$) pour un faisceau laser de longueur d'onde 266 nm, conditionne le choix du laser. Cette photocathode qui a une durée de vie supérieure à un mois peut fournir des impulsions d'électrons d'une durée inférieure à 5 ps avec une charge électrique élevée (jusqu'à 10 nC) lorsqu'elle reçoit le faisceau d'un laser saphir dopé au titane délivrant des impulsions d'une durée de quelques picosecondes, d'énergie inférieure à 50 μJ , stables en phase et en amplitude.

Le Centre de cinétique rapide de l'université Paris XI, où cet instrument sera installé, permettra des expériences dans des domaines très divers - réactions en milieu liquide, agrégats, études dynamiques de réactivité en phase condensée et en milieu biologique... Il devrait être opérationnel à la fin de l'année 2001.

POUR EN SAVOIR PLUS

J.-C. Bourdon *et al.*, *A high charge photoinjector for the pulsed radiolysis facility - Elyse*, Proceedings of the 19th International Linac Conference, Chicago, 1998, p. 645-647.

MICROMÉTÉORITES ET EXOBIOLOGIE

Les micrométéorites sont-elles intervenues dans la synthèse des molécules prébiotiques? Un oxyde de fer hydraté contenu dans ces météorites, à côté d'éléments biogéniques importants, possède des propriétés qui pourraient lui permettre de jouer le rôle de catalyseur de synthèse des protéines: c'est ce que viennent de montrer les chercheurs du groupe d'astrophysique du solide du CSNSM, en collaboration avec des biologistes d'Orsay.

On suppose généralement qu'une chimie organique faisant intervenir des surfaces minérales a joué un rôle majeur dans la formation des molécules organiques nécessaires à l'apparition de la vie sur la jeune Terre. Les micrométéorites contemporaines, qui dominent largement l'apport de matière extraterrestre sur Terre et qui sont collectées en Antarctique (cf. p. 78), sont constituées d'un matériau hydraté-carboné primitif, riche en espèces volatiles et en molécules organiques, et contenant d'innombrables surfaces minérales. Après avoir appris à utiliser leurs caractéristiques pour remonter à celles du flux énorme de micrométéorites «juvéniles» capturées par la jeune Terre pendant la période de bombardement intense, antérieure à environ 3,9 milliards d'années, on a découvert que ces micrométéorites sont intervenues dans la synthèse des molécules prébiotiques.

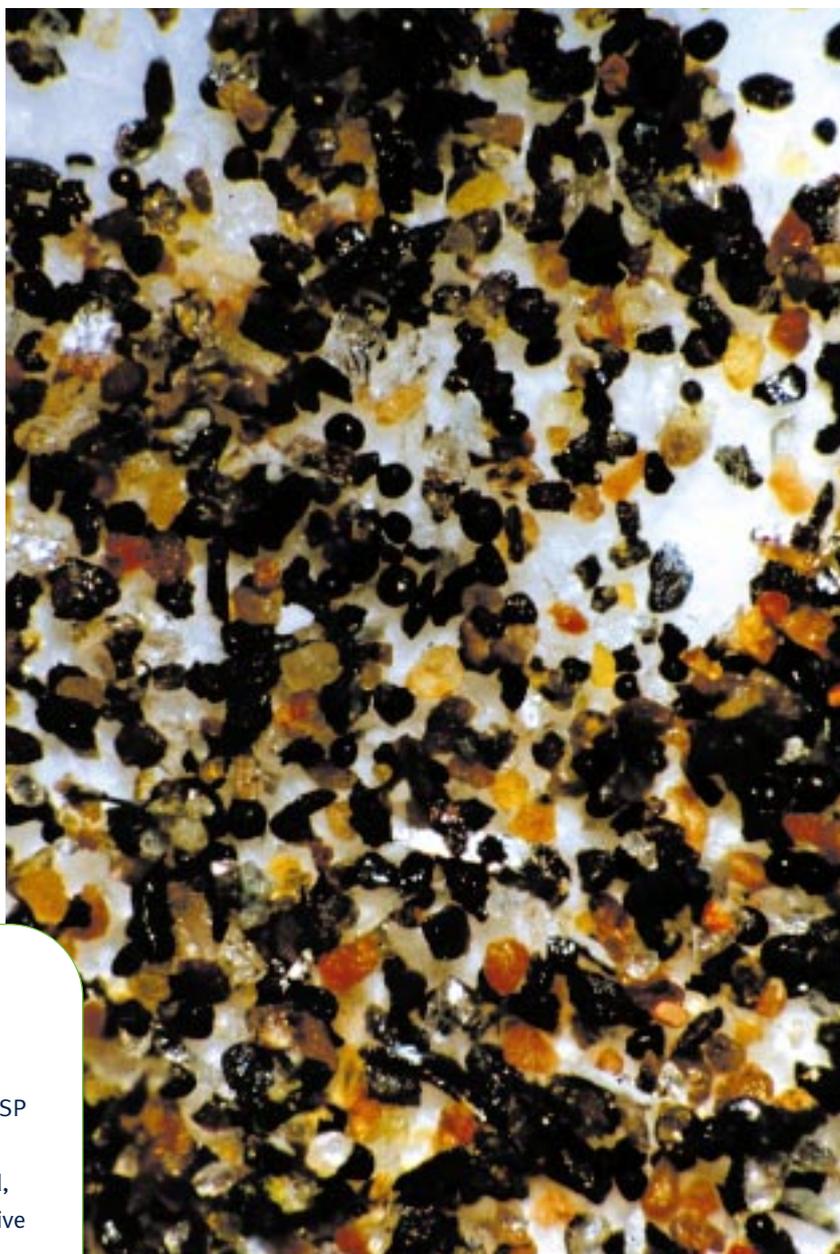
Elles auraient pu fonctionner (entre environ 4,2 et 3,9 milliards d'années) individuellement comme de minuscules réacteurs chimiques équipés de tous les composants nécessaires pour fabriquer de telles molécules, dès qu'ils sont en contact avec l'eau. L'un de ces composants est un oxyde de fer hydraté, la ferrihydrite ($5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), où sont concentrés tous les éléments biogéniques importants (C, H, O, S, P, N). En collaboration avec un chercheur du laboratoire Transports et signalisation cellulaires de l'université Paris XI, l'équipe du CSNSM vient de montrer que cet oxyde possède des propriétés devant favoriser l'une des réactions chimiques les plus importantes pour l'origine de la vie, la synthèse des protéines. Ce minéral se comporte simultanément comme un adsorbant sélectif d'acides aminés protéiques présents uniquement dans les cellules vivantes et comme un catalyseur de polymérisation de ces acides en petites protéines.

Environ 50 % des micrométéorites subissent un fort échauffement très bref lors de leur entrée atmosphé-

rique, qui provoque un dégazage d'espèces volatiles. Pendant le pic du bombardement intense, ce dégazage a joué un rôle majeur dans la formation des océans et de l'atmosphère de la jeune Terre. Cette atmosphère «micrométéoritique» était initialement composée d'un mélange prédominant d'eau, d'azote, de CO_2 , de SO_2 , contenant probablement des composés volatils du phosphore, et de l'oxygène et de l'hydrogène naissants. Ce mélange était simultanément traversé par les nombreuses traînées «persistantes» produites par les plus grosses micrométéorites, où se déroulait une chimie des phénomènes luminescents, induite par l'excitation de molécules ou d'ions. Est-il possible que des molécules organiques aient été synthétisées dans cette atmosphère réactive, puis dissoutes dans l'eau pour former un nouveau type de soupe prébiotique d'où les micrométéorites plus tardives auraient pu extraire des molécules importantes pour leur fonctionnement en réacteurs chimiques? Pour tenter de répondre à ces questions, l'équipe va utiliser la chambre à réaction construite par R. Navarro-Gonzales de l'Université de Mexico pour simuler cette nouvelle chimie atmosphérique.

En janvier 2000, à environ 2 km de la station italienne Concordia en Antarctique, l'équipe a réussi à extraire des échantillons de neige de strates annuelles bien datées.
© CNRS/IN2P3





POUR EN SAVOIR PLUS

M. Maurette, M. Gounelle, J. Duprat, C. Engrand, G. Matrajt (2000), The early micrometeorite accretion scenario and the origin of the Earth's hydrosphere. In: *A New Area in Bioastronomy*, ASP Conf. Series 213, 257-277.

M. Maurette, G. Matrajt, M. Gounelle, C. Engrand, J. Duprat (2001), La matière extraterrestre primitive et les mystères de nos origines. In: *Éléments d'exobiologie I: l'environnement de la Terre primitive et l'origine de la vie*, Eds M. Gargaud et D. Despois, Presse universitaires de Bordeaux, sous presse.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/SDU: CRPG, Laboratoire Cassini, Eau-sol-terre, LAMAP.

CNRS/SC: CBM.

Naturhistorisches Museum, Vienne.

Université libre de Bruxelles.

États-Unis: Nescort in Exobiology, La Jolla,

MVA Inc. Atlanta, Brookhaven National Laboratory,

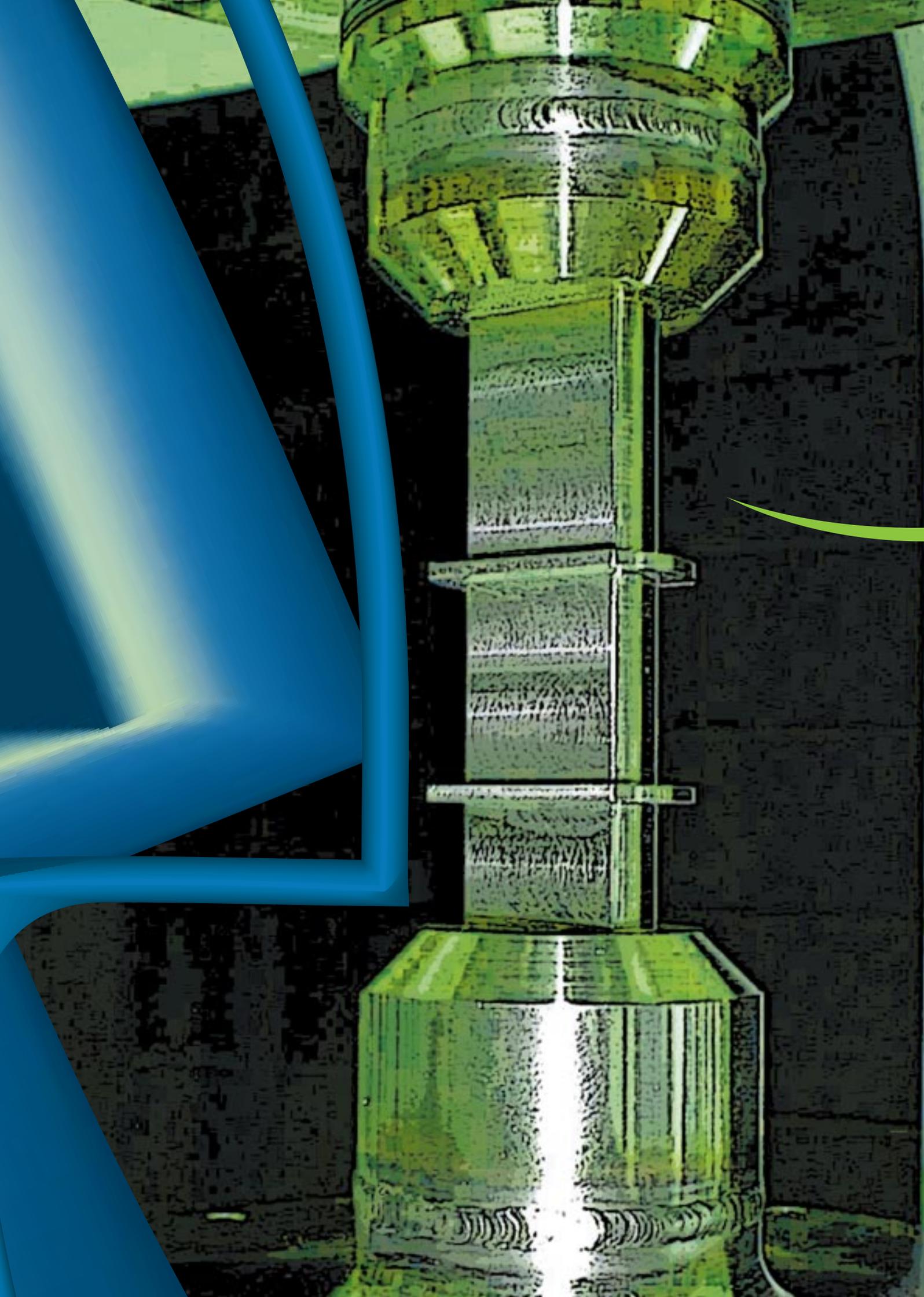
Université de Stanford.

Observation au microscope optique à faible grossissement de la fraction de taille 50 à 100 μ du sable glaciaire recueilli dans les glaces bleues de cap Prudhomme en Antarctique.

REMERCIEMENTS

Introduction
Vincent Breton
Yvon Le Beyec
Isabelle Billard
Françoise Yiou
Grant Raisbeck

Laurent Ménard
Philippe Moretto
Harry Bernas
Alain Brunelle
Claire Le Naour
Didier Trubert
Jean-Claude Bourdon
Michel Maurette





AVAL DU CYCLE ÉLECTRONUCLÉAIRE

Les travaux sur l'aval du cycle électronucléaire constituent un des grands axes des recherches menées à l'IN2P3, au sein du programme interdisciplinaire Pace. Ils s'insèrent dans les trois axes de recherche définis par la loi du 30 décembre 1991 et sont menés en collaboration avec le CEA, EDF, Framatome, l'Andra...

95

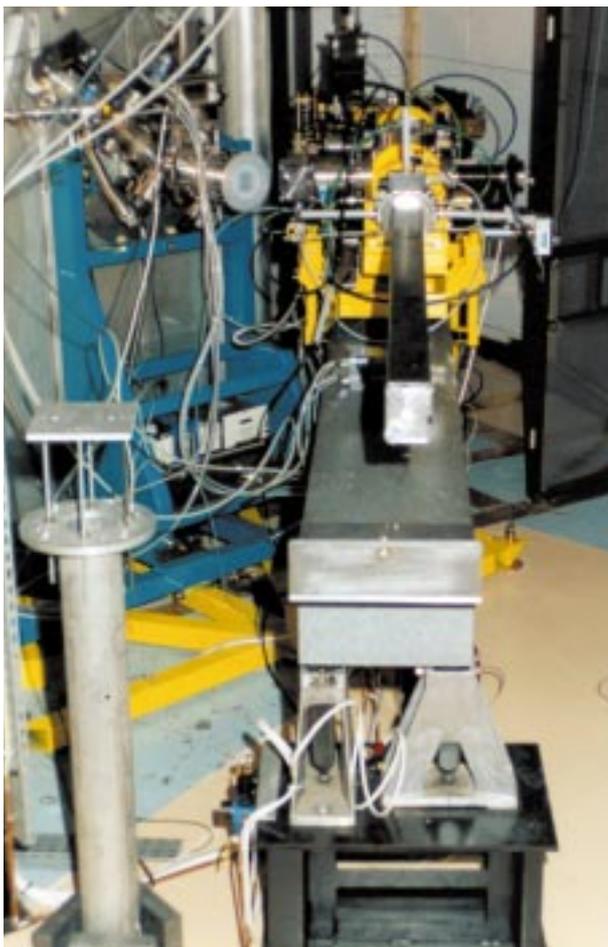
LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE

Dans ce domaine, les travaux suivent essentiellement cinq directions:

- **L'acquisition de données nucléaires nécessaires aux études de transmutation.** Des mesures de sections efficaces de production de produits de spallation, dont la connaissance est essentielle pour prévoir la tenue des matériaux de structure dans un réacteur hybride, sont menées à Darmstadt sur le FRS du GSI. Des mesures de sections efficaces de réactions induites par des neutrons à des énergies pouvant atteindre 200 MeV ont lieu à Louvain-la-Neuve, à Uppsala et à Groningen, auxquelles s'ajoutent quelques mesures réalisées à Bordeaux ou au Tandem d'Orsay. Obtenue à l'automne 2000, la mise en route au Cern du dispositif n-tof (une source de neutrons particulièrement intense et efficace) devrait accélérer la collecte de ces données.
- **L'étude des conditions de réalisation d'une véritable cible de spallation en métal liquide.** Cet objectif est celui de la collaboration Megapie. Le dispositif expérimental Lisor (une boucle de plomb dans laquelle des échantillons en contact avec du plomb peuvent être irradiés) a été réalisé à Subatech. Les premières expériences, attendues pour l'hiver 2001-2002, seront déterminantes pour la sûreté de l'expérience. La collaboration a récemment été rejointe par les États-Unis et le Japon.

◀ *Détail de Lisor: le tube d'échantillon en T91 (acier spécial) soumis à l'irradiation.*
© CNRS/IN2P3

Mieux connaître les réactions nucléaires induites par des nucléons.
page 98



*Vue de face
de l'accélérateur
Génepi.
© CNRS/IN2P3
Jean Larruat*



Un programme
dédié à l'étude
des réacteurs
sous-critiques.
page 99

- **L'apprentissage de la maîtrise des réacteurs sous-critiques.** Cela constitue le but de l'expérience Muse. Le générateur Génepi, la source de neutrons pour la maquette du réacteur Masurca, a été construit à l'ISN. Les premiers essais, en particulier les mesures de comportement du milieu sous-critique au cours du temps, ont eu lieu en 2001. Cette expérience a non seulement attiré un grand nombre d'équipes collaboratrices, mais elle a également reçu le soutien du programme Euratom de l'Union européenne. De nouveaux projets apparaissent pour poursuivre ces études.
- **Les développements en direction d'un accélérateur intense de protons.** L'accélérateur Iphi doit fournir des protons d'énergie approchant le GeV, avec un courant atteignant quelques dizaines de milliampères. Les propriétés du faisceau (≈ 100 mA) fourni par l'injecteur Silhi ont été étudiées et c'est maintenant la réalisation d'un quadropôle radiofréquence (RFQ), le second élément particulièrement délicat de l'accélérateur, qui est en vue.
- **Le développement de compétences en physique des réacteurs.** De nouveaux travaux apparaissent qui portent sur des scénarios de comportement de réacteurs hybrides et, plus généralement, sur l'étude et l'évaluation de différentes filières, dont celles basées sur l'utilisation du thorium, dans la situation très particulière du parc français.

Vue générale de l'aire expérimentale et de quelques détecteurs du dispositif n-tof, avec, au premier plan, une partie de la chambre dans laquelle sont installés

quelques détecteurs PPAC (Parallel Plate Avalanche Chambers) conçus pour la détection de produits de fission.
© Cern



LA RADIOCHIMIE ET LA CHIMIE DES SOLIDES

Des travaux de radiochimie et de chimie des solides sont également menés, qui bénéficient des facilités d'irradiation ou d'implantation fournies par les petits accélérateurs encore présents à l'IN2P3.

Le GDR Practis s'attache à étudier le comportement des radionucléides en solution (séparation en phase liquide) ou en phase ignée (méthodes pyrométallurgiques). Il s'intéresse également au comportement de ces radionucléides aux interfaces. Un exemple particulièrement illustratif de ces travaux concerne l'étude de l'interface avec une phase argileuse. L'utilisation du rayonnement synchrotron pour déterminer la structure des complexes qui se forment aux interfaces s'est révélée particulièrement efficace. Ces études sont très importantes pour les géologues du GDR Forpro qui préparent dès maintenant leur implantation au laboratoire souterrain de Bure creusé dans les argiles du Bassin parisien.

Le GDR Nomade est tout entier consacré à la chimie du solide. Les irradiations par faisceaux d'ions de l'oxyde d'uranium et de sa gaine offrent une voie d'étude possible de cet oxyde et de sa gaine comme matrice de confinement des combustibles usés. Dans le même esprit, des travaux sont menés pour concevoir et tester des cibles de transmutation où les déchets pourraient être introduits en réacteur. Ici encore, les instruments d'irradiation et d'implantation de l'IN2P3 fournissent un support expérimental indispensable.

Au fur et à mesure que l'acquisition de données nucléaires avancera, on peut prévoir que la physique nucléaire s'intéressera davantage aux systèmes et à leurs grands sous-ensembles : cibles de spallation, milieux sous-critiques, scénarios d'évolution du parc, sels fondus, filière thorium et, bien entendu, accélérateurs de puissance. En chimie du solide, le travail sur les matrices de conditionnement, auquel devraient s'ajouter des études sur la tenue des matériaux et des combustibles (haute température), est loin d'être terminé.

Rétention des radionucléides par les argiles.
page 100

L'oxyde d'uranium comme matrice de confinement des déchets radioactifs.
page 101

MIEUX CONNAÎTRE LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES INDUITES PAR DES NUCLÉONS

Un vaste programme d'étude des réactions nucléaires induites par des neutrons ou des protons est en cours. Son objectif est de réaliser une base de données de sections efficaces utile aux recherches sur la transmutation des déchets et sur les nouvelles filières nucléaires. De nombreuses expériences ont déjà été réalisées avec le plomb.

Le programme européen Hindas (High and Intermediate Energy Nuclear Data for Accelerator Driven Systems) vise à améliorer la compréhension des réactions nucléaires induites par des particules d'énergie allant de 20 à 2000 MeV. Il réunit des physiciens issus de douze laboratoires européens, dont une part de l'activité est centrée sur la problématique du retraitement des déchets nucléaires. Les expérimentateurs apportent leur savoir-faire quant à la mesure des

sections efficaces doublement différentielles des réactions étudiées. Les théoriciens utilisent ces mesures pour valider ou améliorer leurs modélisations.



Vue du dispositif expérimental utilisé à Louvain-la-Neuve.
© CNRS/IN2P3

POUR EN SAVOIR PLUS

J. Klug *et al.*, A facility for elastic neutron scattering studies in the 50 – 130 MeV range, *Nuclear Instrument Method*, à paraître.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : Subatech, LPC Caen, IReS.

CEA/DAM : Bruyères-le Châtel.

Belgique : Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve ; Université libre de Belgique, Bruxelles.

Suède : The Svedberg Laboratory, Uppsala.

Pays-Bas : KVI, Groningen.

Le bombardement d'un élément cible par des nucléons d'énergie donnée peut produire diverses réactions :

- production d'une particule chargée légère (p , d , t , ${}^3\text{He}$, ${}^4\text{He}$) et de neutrons : (p, xlcp), (p, xn), (n, xlcp) et (n, xn), (lcp pour *light charged particles*) ;
- diffusion élastique (n, n) ;
- production de résidus radioactifs : (p, A) et (n, A).

Point clef du projet, la diversité des systèmes étudiés (cibles, particules incidentes et émises) permet de tester efficacement les modèles et les codes de calcul.

Commencé avec le plomb, ce travail se poursuit avec le fer et l'uranium. Initiée par des physiciens de l'IN2P3, la collaboration s'est élargie et les mesures se déroulent aujourd'hui sur les trois sites européens possédant les faisceaux adéquats : Cyclone à Louvain-la-Neuve (Belgique), Agor à Groningen (Pays-Bas) et TSL (The Svedberg Laboratory) à Uppsala (Suède). Les moyens de détection sont soit ceux disponibles sur les sites, à la réalisation desquels les physiciens de l'IN2P3 ont contribué, soit ceux développés spécifiquement à l'IN2P3 pour ce programme, et dont une partie du financement provient de Gedéon/Pace. Les six télescopes NE102-CsI de Louvain-la-Neuve ont permis d'étudier la réaction $\text{Pb}(n, \text{xlcp})$ à 62,7 MeV. À Uppsala, les expériences utilisent deux dispositifs complémentaires : Medley, un ensemble de télescopes triples Si-Si-CsI, et Scandal, une détection de nucléons diffusés. Pour les expériences faites en faisceau de protons (Louvain et Groningen), Subatech s'est équipé de huit télescopes triples Si-Si-CsI et le LPC-Caen de cinq détecteurs de neutrons (scintillateur NE213).

L'analyse des expériences réalisées avec le plomb est bien avancée. Des résultats expérimentaux quasi définitifs sont aujourd'hui disponibles pour ${}^{208}\text{Pb}(n, \text{xlcp})$ à 62,7 MeV, ${}^{208}\text{Pb}(p, \text{xlcp})$ et ${}^{208}\text{Pb}(p, \text{xn})$ à 62,9 MeV, et ${}^{208}\text{Pb}(n, \text{xlcp})$ à 100 MeV. Il reste à utiliser le continuum des neutrons dans la mesure à 62,7 MeV.

La comparaison préliminaire de ces données avec les prédictions de différents codes de calcul donne des résultats inattendus : aucun d'eux ne prédit correctement la distribution angulaire des neutrons ou protons émis, et les divergences sont encore plus grandes pour les deutons, tritons et alpha...

Aujourd'hui, l'un des objectifs majeurs de ce programme est d'étendre les bases de données de sections efficaces pour les neutrons et les protons à 150-200 MeV.

UN PROGRAMME DÉDIÉ À L'ÉTUDE DES RÉACTEURS SOUS-CRITIQUES

Vue éclatée du réacteur modulaire Masurca couplé au générateur de neutrons pulsé intense Génépi. Les neutrons sont créés au centre du réacteur dans une zone tampon en plomb.
© CEA

Les réacteurs sous-critiques, au sein desquels les réactions nucléaires doivent être entretenues par un apport constant de neutrons, pourraient avoir des applications importantes : ils pourraient en effet ouvrir la voie à une nouvelle filière de réacteurs, plus sûre et basée sur le cycle du thorium, ou encore à l'incinération de certains déchets produits par les réacteurs actuels. Comprendre leur fonctionnement est donc d'un intérêt majeur.

L'expérience Muse du groupement de recherche Gedéon (1) recouvre un programme expérimental devant se réaliser sur une période de trois ans, de 1999 à 2002. Son objectif est de caractériser expérimentalement les propriétés neutroniques d'un réacteur sous-critique couplé à une source externe de neutrons.

Génépi, un générateur de neutrons pulsés de forte intensité (50 mA crête, largeur d'impulsion de 0,7 μ s) produisant des neutrons par réaction $d + d$ ou $d + t$, a été conçu, réalisé et caractérisé à l'IN2P3 de juin 1997 à décembre 1999. Dans le même temps, l'ensemble des adaptations du réacteur Masurca (Cadarache) et de son infrastructure a été étudié et préparé, notamment au niveau du dossier de sûreté, dans la mesure où la configuration de référence du réacteur a dû être modifiée pour permettre son couplage au générateur. Au premier semestre 2000, le générateur Génépi a été transporté et réassemblé à Cadarache, dans le respect des contraintes liées à l'environnement d'un réacteur. Dès juillet 2000, il était de nouveau opérationnel, son faisceau accéléré ayant ses performances nominales. La première étape concrète de ce programme était ainsi franchie avec succès.

La période de septembre 2000 à janvier 2001 a été consacrée aux opérations de déchargement et de rechargement des assemblages combustibles, une opération lourde qui incluait l'aménagement d'un tunnel traversant les éléments combustibles pour introduire le faisceau de deutons au centre du réacteur. Dès février 2001, les premiers neutrons étaient produits au cœur du réacteur, la source de neutrons était calibrée et le système de monitoring qualifié. Enfin, en avril 2001, la première mesure de la réponse temporelle du réacteur à une brève impulsion de neutrons était réalisée. Elle est en cours d'analyse.

Pour l'avenir (2001-2002), le programme expérimental prévoit une étude en configuration critique et des études en configurations sous-critiques pour des coefficients k de multiplication allant de 0,995 à 0,95 avec différents types de caloporteur (Na, He, Pb). Dans chaque cas, la distribution spatiale et énergétique du flux neutronique sera déterminée, de même que les caractéristiques cinétiques associées. Outre une compréhension détaillée des particularités spécifiques à la neutronique des réacteurs sous-critiques, l'objectif est de pouvoir évaluer à tout instant le niveau de sous-criticité du réacteur en fonctionnement à partir d'une mesure de son comportement transitoire suite à une variation rapide d'intensité de la source de neutrons.

Une grande étape a été franchie avec le démarrage de ce premier programme expérimental dédié à l'étude des réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateurs, réacteurs caractérisés par un fonctionnement très sûr même en l'absence de neutrons retardés, ce qui permet notamment d'envisager leur utilisation pour une incinération efficace des actinides mineurs produits par la filière REP actuelle.

(1) Gedéon regroupe le CEA, EDF, le CNRS et Framatome.



POUR EN SAVOIR PLUS

R. Soule et al., *The Muse Experiments for Sub-critical Neutronics Validation*, 6th OECD/NEA Information Exchange Meeting, Madrid Dec. 2000.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : ISN.

CEA/DEN : Laboratoires de Cadarache.

avec le soutien d'EDF et de Framatome.

RÉTENTION DES RADIONUCLÉIDES PAR LES ARGILES

En cas de stockage profond des déchets nucléaires, une incertitude demeure quant à la migration des radionucléides à travers la géosphère. Leur rétention par les argiles fait donc l'objet d'études poussées. Divers mécanismes d'adsorption ont été mis en évidence et la structure des complexes ainsi formés a été établie pour plusieurs radionucléides et argiles.

L'une des options possibles pour la gestion des déchets radioactifs à vie longue est le stockage en site géologique profond, lequel procure une barrière naturelle de confinement aux radionucléides.

Néanmoins, sur un très long terme, se pose la question de la rétention/migration des radionucléides qui auraient quitté leur colis. Des études ont donc été lancées qui visent à étudier cette migration au sein d'argiles, celles-ci faisant partie des milieux géologiques naturels possédant de bonnes qualités de rétention; en outre, la bentonite est pour l'instant le matériau le plus efficace susceptible d'être utilisé comme barrière ouvragée autour des colis de déchets.

À l'IN2P3, les travaux por-

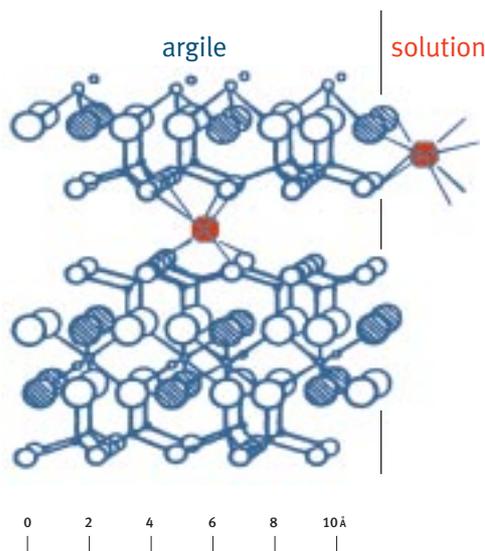
tent principalement sur les aspects thermodynamiques et structuraux de l'adsorption des radionucléides sur des minéraux argileux en milieu aqueux, celle-ci constituant le processus principal de rétention géochimique de ces éléments.

Formées de nombreuses phases solides, les argiles sont des substrats particulièrement complexes. Dans un premier temps, les études sont donc réalisées sur des phases unitaires représentatives des argiles, les résultats obtenus étant ensuite utilisés pour rendre compte des phénomènes observés sur les solides naturels. La rétention de radionucléides comme Tc, U, Np, Pu, et Cm a ainsi été étudiée sur toute une gamme de milieux adsorbants, allant du substrat le plus simple (oxyde monocristallin) aux argiles les plus complexes (kaolinite, montmorillonite, bentonite) en passant par des solides synthétiques monophasés (phosphates, oxydes et silicates).

L'étude de l'interaction « solution aqueuse – argile » a permis de mettre en évidence la présence, à la surface de l'argile, de charges susceptibles d'interagir avec les ions présents dans la solution et de conduire à la formation de complexes. Les données expérimentales recueillies (taux de rétention en fonction des paramètres du milieu: pH, concentration des ions en solution, présence d'oxygène ou de CO₂), ainsi que la détermination, à l'échelle moléculaire, de la structure de ces complexes ont permis de définir sans ambiguïté les réactions chimiques et les mécanismes mis en jeu. Il peut y avoir création de liaisons covalentes avec les groupements surfaciques des argiles et formation de complexes de surface, ou échange d'ions à l'intérieur des feuillets constitutifs de ces minéraux et formation de complexes interfoliaires. Pour le curium trivalent (Cm³⁺), par exemple, qui interagit fortement avec l'argile, les deux mécanismes existent; en outre, des réactions de précipitation à la surface des argiles ont également été mises en évidence.

La simulation de l'ensemble des résultats, par des modèles géochimiques et des calculs *ab initio* de chimie quantique et de dynamique moléculaire, est en cours. Elle permettra de déterminer, avec précision, les constantes thermodynamiques correspondantes. Indispensables à la prédiction du comportement à long terme des radionucléides dans ces milieux, celles-ci seront alors très utiles à l'Andra qui poursuit des études dans ce sens.

Adsorption d'ions métalliques, à la surface d'une argile et dans l'espace interfoliaire.



POUR EN SAVOIR PLUS

R. Drot, E. Simoni, J.J. Ehrhardt, *Colloid Interface Sci.*, 1998, 205, 410.

M. Del Nero, S. Salah, T. Miura, A. Clement, F. Gauthier-Lafaye, *Radiochimica Acta*, 1999, 87, 135.
A.C. Texier, Y. Andrès, P. Le Cloirec, *Water Sci. Technol.*, 2000, 42 (5-6), 91.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPN Orsay, IReS, Subatech.

Mexique: Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Toluca.

Chine: Laboratoire de radiochimie,

Lanzhou université.

L'OXYDE D'URANIUM COMME MATRICE DE CONFINEMENT DES DÉCHETS RADIOACTIFS

Dans l'attente d'une solution future pour le devenir à long terme des déchets nucléaires, les combustibles usés des centrales pourraient être entreposés en l'état, en surface ou subsurface. Les conditions thermodynamiques admissibles pour un tel entreposage sont étudiées avec des cristaux d'oxyde d'uranium modifiés par bombardement ionique, afin de reproduire les propriétés des combustibles usés.

L'option adoptée en France consiste à ne pas considérer les matières nucléaires valorisables de l'aval du cycle comme des déchets. Dans l'attente d'une solution définitive, l'entreposage de longue durée des combustibles usés non retraités est donc envisagé, qui pourrait utiliser le combustible usé lui-même comme matrice de confinement des déchets de haute activité produits en son sein lors de son séjour en réacteur. Après une période de refroidissement en piscine, les assemblages combustibles seraient entreposés à sec, en conteneur métallique et sous atmosphère inerte d'hélium. Cette solution présente l'avantage de permettre un entreposage à température relativement élevée (jusqu'à ~ 400 °C), tout en limitant l'oxydation des

structures de l'assemblage et des crayons combustibles.

Le combustible utilisé demeure cependant particulièrement vulnérable à la suroxydation, en cas de présence d'air et d'humidité dans l'atmosphère d'inertage ou lors d'une rupture accidentelle d'étanchéité de la gaine d'un crayon, le stade ultime de l'oxydation conduisant à la pulvérisation des pastilles et au relâchement des radionucléides. La durabilité à long terme du combustible usé dépend donc fortement des conditions thermodynamiques de son entreposage, dont la définition constitue un axe de recherche essentiel développé à l'IN2P3.

Il est très délicat de travailler avec le combustible usé lui-même, qui est fortement radioactif. En outre, il ne peut être assimilé à de l'oxyde d'uranium pur car, au cours de son séjour dans le réacteur nucléaire, il a subi une intense irradiation qui a altéré sa microstructure et modifié sa composition chimique (il contient notamment une quantité importante de produits de fission), deux caractéristiques qui modifient son comportement à l'oxydation. *A contrario*, l'utilisation des techniques de faisceaux d'ions développées auprès de petits accélérateurs de l'Institut comme Aramis permet, *via* un

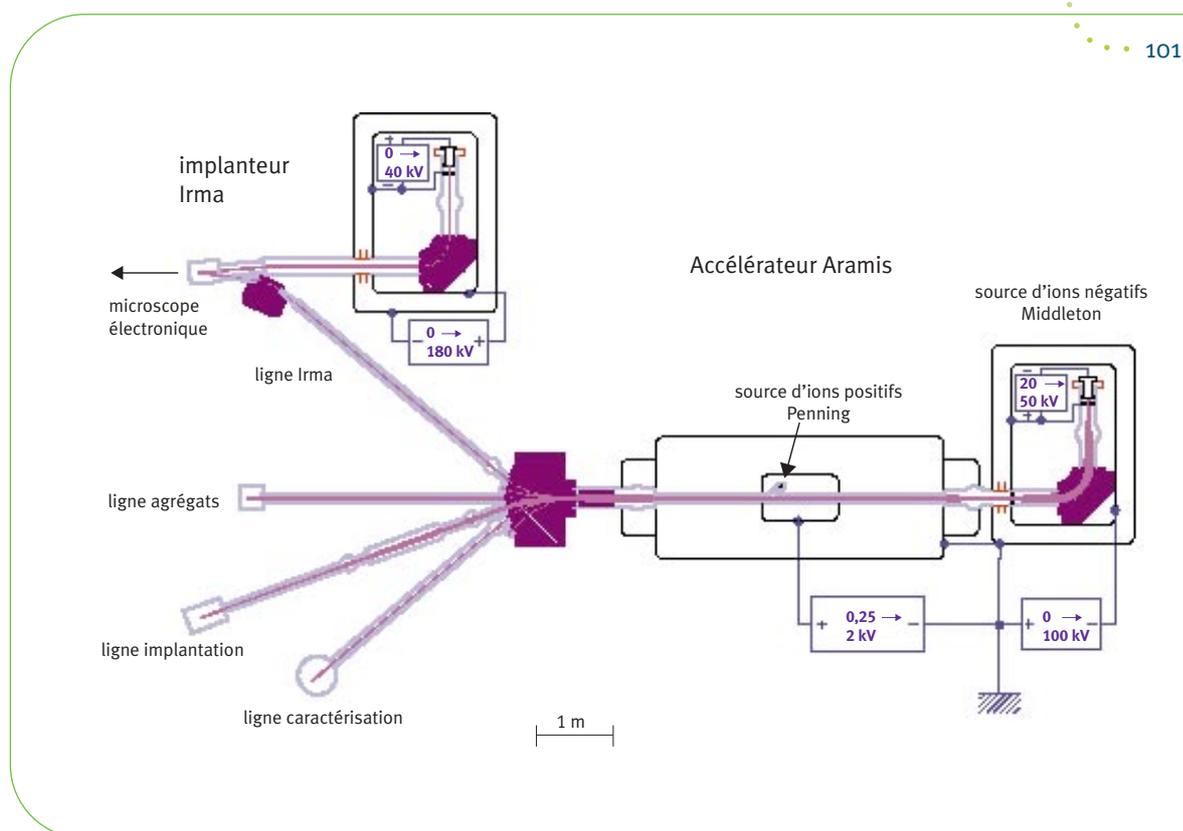
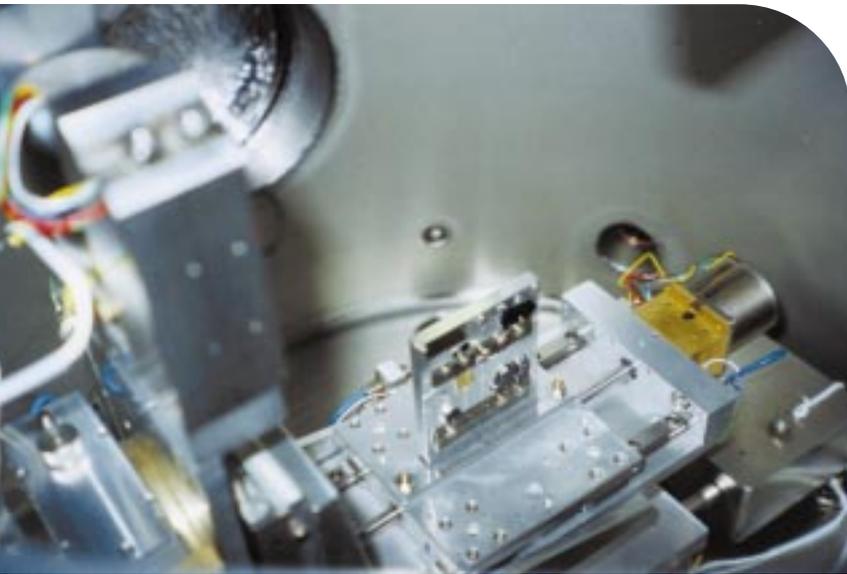


Schéma de principe de l'accélérateur Aramis.



Porte-échantillon goniométrique situé à l'extrémité de la ligne de faisceau dite de « caractérisation » de l'accélérateur Aramis.
© CNRS/IN2P3

POUR EN SAVOIR PLUS

F. Garrido, C. Choffel, L. Thomé, J.-C. Dran, L. Nowicki, A. Turos, *et al.*, A channeling investigation of the structural modifications in uranium dioxide submitted to swift-ion irradiation and aqueous corrosion, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 136-138 (1998) 465-470.

J.-M. Gras, F. Garrido, C. Choffel, *Oxydation de UO₂ - Conséquences sur l'endommagement des crayons combustibles en entreposage à sec - Études bibliographiques*, Rapport EDF-DER HT-40/98/005/A (1998) 49 pages.

F. Garrido, J.-M. Gras, L. Thomé, J. Berthon, S. Klauwünzer, *Low-Temperature Air Oxidation of Uranium Dioxide Single Crystals*, Comptes rendus de l'International Conference on Environmental Management (Bruges, Belgique, 2001).

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CSNSM.

EDF: Direction études de matériaux, Moret-sur-Loing.

Allemagne: Hahn-Meitner Institut, Berlin.

Pologne: Institut Soltan pour les études nucléaires, Varsovie.

bombardement ionique externe de cristaux de UO₂, de reproduire, en l'absence de toute radioactivité effective, les caractéristiques physico-chimiques des combustibles irradiés à différents taux de combustion. Le choix de la nature et de l'énergie du faisceau permet de se placer dans des conditions soit d'irradiation pure, pour simuler l'endommagement de la structure dû aux heurts des fragments de fission, soit de dopage pur, pour simuler les modifications chimiques du combustible, voire de mélanger ces deux contributions. Les cristaux de UO₂ ainsi modifiés sont ensuite soumis à des tests d'oxydation sous différentes conditions thermodynamiques, à des températures (comprises entre 100 et 400 °C) et à des pressions partielles d'oxygène réalistes pour un site d'entreposage en situation standard ou critique, afin de déterminer les lois cinétiques et les mécanismes réactionnels qui régissent la stabilité du combustible sur des durées séculaires. Des premiers résultats ont déjà été obtenus.



Vue des différentes lignes de faisceaux de l'accélérateur Aramis.
© CNRS/IN2P3



REMERCIEMENTS

Introduction
Hubert Doubre

Jean-François Lecolley
Jean-Marie Loiseaux
Éric Simoni
Frederico Garrido





◀ Le résonateur
du cyclotron injecteur
de moyenne énergie
de Spiral.
© M. Desauvay/Ganil

DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

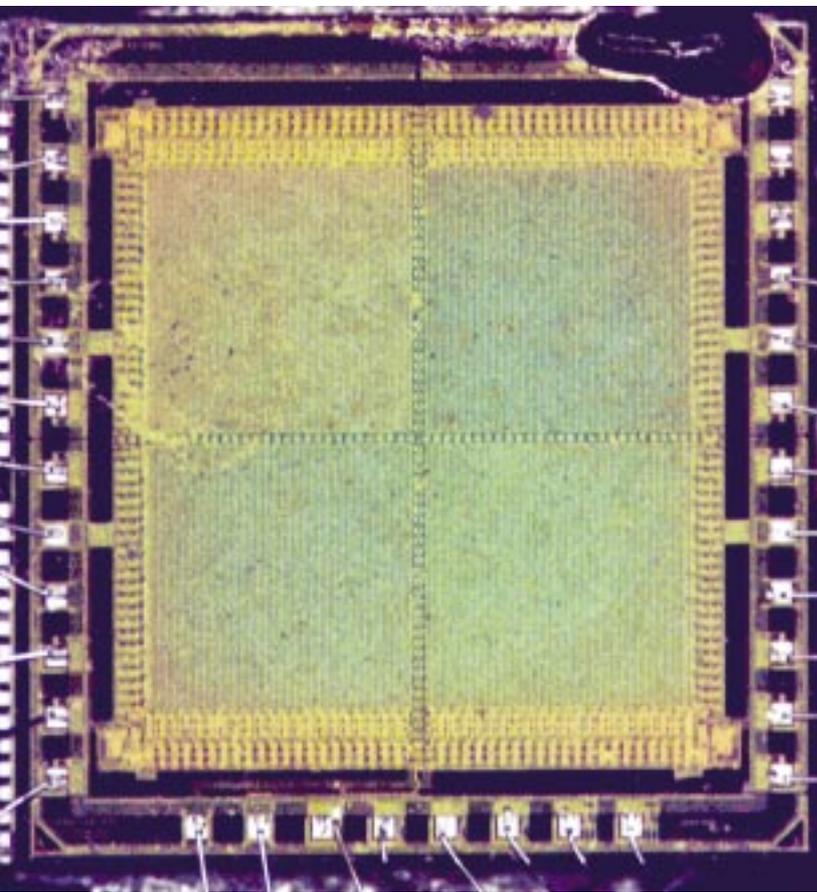


105

Les domaines d'activité technologiques de l'IN2P3 sont essentiellement de deux sortes: les accélérateurs et les détecteurs de particules; les développements technologiques sont donc tous reliés à ces deux types d'instruments. Ceux-ci requièrent une palette de technologies et de compétences extrêmement diversifiée, à un niveau rarement rencontré ailleurs, comme les articles de ce chapitre le montrent bien.

Par ailleurs, l'Institut comprend dix-huit laboratoires dans lesquels, si on fait une exception pour le Centre de calcul, le modèle d'organisation retenu est celui d'une ingénierie distribuée. Cela signifie que l'on doit trouver partout toutes les technologies, et donc, bien évidemment, toutes les compétences nécessaires aux physiciens des laboratoires. Ce modèle, qui ne s'applique pas aux technologies lourdes, est d'un équilibre délicat et fait donc l'objet d'une attention particulière de la direction technique. Il a permis, en particulier, de créer de véritables communautés de compétences au sein de l'Institut.

Les réalisations présentées dans ce rapport d'activité illustrent clairement, et la diversité des technologies mises en œuvre, et le niveau élevé auquel elles se placent.



Le circuit intégré Mimosal pour de nouveaux détecteurs.
© CNRS/IN2P3

L'ÉLECTRONIQUE

En dix ans, l'électronique a subi une profonde mutation. L'Institut a su, pendant cette période, mettre en place les structures et les outils nécessaires pour s'y adapter, en s'appuyant sur des électroniciens compétents et motivés. Il a ainsi gardé sa place dans le groupe de tête des laboratoires de recherche dans cette discipline technologique. Cependant, si les performances des circuits « classiques » conçus à l'IN2P3, aussi bien en analogique qu'en numérique, sont du meilleur niveau, c'est dans le domaine des circuits intégrés « full-custom » analogiques que le chemin parcouru est le plus remarquable. Ce rapport présente deux circuits: Alice 128C prévu pour Star et HAL25 prévu pour Alice. Ce dernier circuit est une extrapolation du premier dans la technologie très moderne des circuits intégrés durcis aux radiations. Il est réalisé avec une technologie IBM 0,25 μ tout à fait récente. Il faut noter cependant que les efforts dans le domaine des circuits intégrés ne doivent pas occulter ceux qui sont faits dans l'électronique plus classique, tout aussi nécessaire à l'Institut.

Des circuits intégrés pour les expériences Alice et Star.
page 115



Injecteur de protons de haute intensité.
© CNRS/IN2P3

Premier module
du LHC avec
quatre cavités
supraconductrices.
© Cern



LES ACCÉLÉRATEURS

Une bonne partie des développements technologiques autour des équipements a été le fait des avancées dans le domaine des accélérateurs. Dans ce dernier, il a toujours fallu faire appel aux industriels pour s'assurer de la sûreté de fonctionnement indispensable. Cela a impliqué une culture de rigueur dans la qualité et la conduite des projets, qui, maintenant, se retrouve aussi bien dans la construction des détecteurs de particules.

Les articles de ce rapport d'activité font donc une bonne place à Spiral dont les premiers faisceaux ont été obtenus avec les performances requises, même si, pour des raisons administratives, ceux-ci ne sont pas encore des faisceaux radioactifs. De même la collaboration de l'Institut avec le Cern est évoquée à travers la participation à la construction du LHC, notamment à la définition des cryostats des sections droites courtes et à leur assemblage, ainsi qu'au calibrage des 8000 thermomètres cryogéniques de la machine. Cette dernière activité a conduit à mettre en place des procédures qualité qui sont seules à même d'assurer que les performances de ces thermomètres correspondent bien aux normes spécifiées.

L'IN2P3 ne saurait rester absent de la R&D dans le domaine des accélérateurs du futur. A ce titre, deux voies ont été retenues :

- les machines à fort courant de protons, dont Iphi est l'injecteur, sont indispensables pour des applications telles que la transmutation des déchets nucléaires. L'injecteur est également nécessaire pour les collisionneurs de muons;
- les collisionneurs linéaires, domaine où l'IN2P3 souhaite être présent dans les deux technologies en compétition. L'une est la supraconductivité des cavités hyperfréquence pour Tesla, machine complexe et extrêmement novatrice, pour laquelle un ambitieux programme d'industrialisation de coupleurs de puissance débute; l'autre, à température ordinaire, est, *a priori*, plus classique, mais fait appel au concept d'accélérateur à deux faisceaux. Ces deux types d'accélérateurs montrent assez bien que c'est en portant la technologie à ses limites extrêmes qu'on pense aujourd'hui pouvoir réaliser les augmentations d'énergie des machines futures. Pour aller au-delà de ces énergies, une percée fondamentale devient maintenant la condition primordiale.

Spiral; le nouvel
accélérateur de
faisceaux radioactifs.
page 110



107

Des accélérateurs
de faisceaux intenses
de protons.
page 113

La contribution
de la France à la
construction du LHC.
page 112

Les collisionneurs
électron-positon
du futur.
page 114



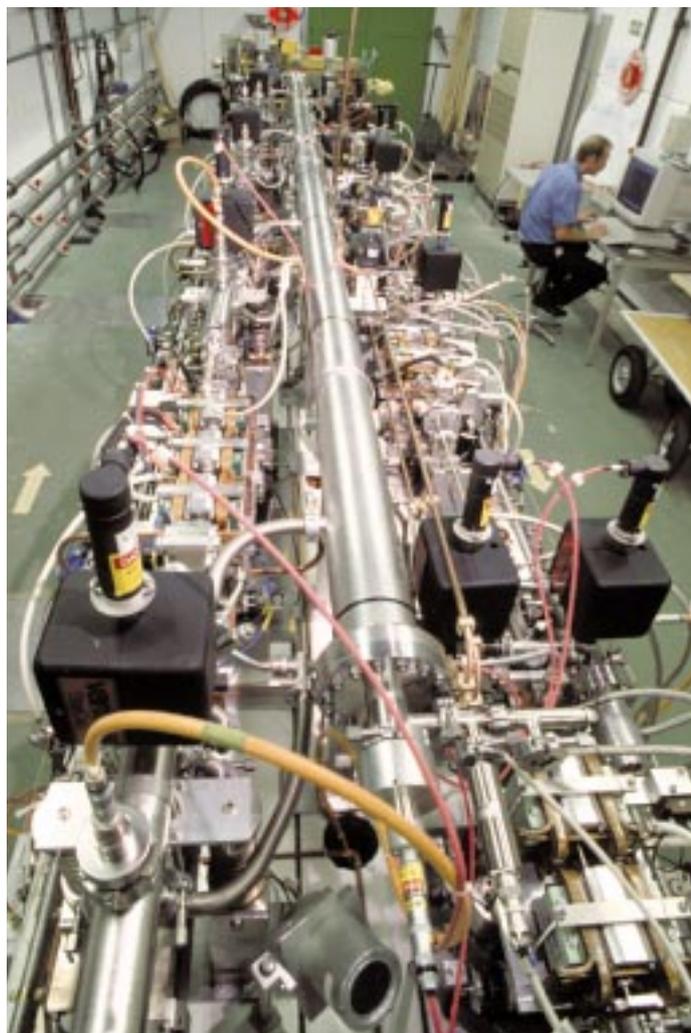
LES DÉTECTEURS

Ce chapitre s'intéresse plus particulièrement aux capteurs, dont l'assemblage par milliers d'unités, sinon par centaines de milliers, forme le détecteur lui-même. Les articles présentent des capteurs à la pointe du progrès technologique comme les bolomètres qui peuvent équiper aussi bien une expérience comme Edelweiss qu'un instrument embarqué comme Planck. Très peu de spécialistes au monde possèdent les compétences en cryogénie et en science des matériaux nécessaires à la réalisation de ces détecteurs. Le capteur Cmos, qui constitue une nouvelle génération de détecteurs semi-conducteurs, est issu directement des compétences développées à l'Institut sur les circuits intégrés; enfin, l'article sur les miroirs de Virgo montre qu'un laboratoire peut arriver à un niveau de perfection supérieur à ce que le monde industriel est capable d'offrir, afin de répondre aux exigences des physiciens. La qualité quasi parfaite de ces miroirs est en effet indispensable aux performances de l'interféromètre.

De nouveaux capteurs thermométriques ultrasensibles pour les bolomètres.
page 116

Les miroirs de Virgo.
page 118

Une nouvelle génération de détecteurs semi-conducteurs.
page 117



*Machine test pour Clic, projet de collisionneur linéaire d'électrons au Cern.
© Cern*



L'INFORMATIQUE

Dans ce domaine aussi, les progrès ont été très importants au cours des dix dernières années, surtout en ce qui concerne les matériels et les réseaux. La multiplication des systèmes d'exploitation a cependant conduit à une hétérogénéité qui constitue un risque pour l'avenir. Les capacités de plus en plus grandes de calcul et de stockage ont rendu possibles l'acquisition et la réduction en ligne d'un flot de données de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ce qu'il était dans les expériences LEP. De même, le traitement des données va nécessiter des puissances de calcul et de stockage dont nous avons aujourd'hui une idée de l'importance. Le traitement de ces volumes de données ne se pose pas actuellement, mais on peut imaginer, avec une bonne probabilité, qu'il faudra l'envisager au démarrage des expériences LHC. Ce seront des fermes de calcul à base de PC qui seront utilisées, un système dont on a pu expérimenter, au cours de ces dernières années, qu'il était approprié au modèle de calcul de la discipline.

Deux articles illustrent les problèmes posés et les solutions envisagées:

- les systèmes d'acquisition de données au LHC, avec tous les problèmes posés par les filtrages en ligne, nécessaires pour passer des 40 téra-octets d'événements bruts produits par seconde aux 100 méga-octets par seconde d'événements reconstruits qui mériteront d'être enregistrés, soit un rapport de réduction de l'ordre d'un million;
- le projet Datagrid dont le but principal est d'assurer une meilleure cohérence dans l'utilisation des ressources informatiques des grandes expériences. Pour les physiciens, cela devrait se traduire par une plus grande transparence et une certaine indépendance quant aux centres assurant le calcul et le stockage des données. Ce projet, rendu possible par les progrès extraordinaires de la vitesse des réseaux, va cependant nécessiter une organisation différente et une interconnexion des centres de calcul actuels.

Les systèmes
d'acquisition
de données au LHC.
page 119

Datagrid, projet
européen de grille
de calcul.
page 120

109

LE MANAGEMENT ET LA QUALITÉ

C'est la première fois que ces thèmes apparaissent dans un rapport d'activité au titre des développements technologiques. L'IN2P3 a fait un grand effort dans ce domaine au cours des trois dernières années. Les expériences auxquelles collabore l'Institut font de plus en plus appel à ces notions, en particulier dans le domaine des astroparticules avec les expériences embarquées. L'IN2P3 a donc mis en place des outils de compréhension des normes accessibles à tous à partir du Web, des formations sur ces sujets, et il a lancé dernièrement un groupe de travail pour une gestion des documents techniques (GDT) propre à l'Institut. Ces concepts, qui ont prouvé leur utilité, commencent maintenant à être appliqués couramment à l'Institut.

Le management
de projet.
page 122

SPIRAL : LE NOUVEL ACCÉLÉRATEUR DE FAISCEAUX RADIOACTIFS

Spiral, Système de production d'ions radioactifs et d'accélération en ligne, sera le premier cyclotron à accélérer des ions radioactifs dans une gamme d'énergie s'étendant de 1,7 à 25 MeV/nucléon. Sa construction a commencé à Ganil début 1994 et, le 22 décembre 1997, Spiral accélérera son premier faisceau d'ions stables. Les années 1998 à 2000 ont été consacrées aux tests de validation du cyclotron sur l'ensemble de la gamme d'énergie.

Le principe de l'accélérateur Spiral consiste à collecter et à ioniser les atomes radioactifs produits par interaction du faisceau primaire du Ganil sur une cible épaisse, puis à les identifier et, enfin, à les accélérer et à les trier avec un cyclotron avant de les distribuer vers les salles d'expériences. Cette installation se caractérise par plusieurs innovations technologiques.

- L'ensemble cible-source pour la production des ions radioactifs.

Un intense programme de R&D a permis de définir une cible capable de supporter un faisceau d'ions lourds de 6 KW. Un nouveau modèle de source d'ions de type ECR à aimants permanents (Nanogan III) a été conçu et étudié sur le banc de test Sira. Des taux excellents de production ont été obtenus avec cet ensemble et de nouveaux ensembles spécifiquement adaptés à la production d'éléments tels que l'hélium ou le lithium ont été développés.

- La station d'identification des ions.

Les faisceaux d'ions lourds permettent de produire simultanément une grande variété d'éléments exotiques. Certains d'entre eux, non désirés, peuvent être produits avec des intensités de plusieurs ordres de grandeur supérieurs. Une station d'identification permet d'identifier et de quantifier les éléments produits, mais surtout d'optimiser le réglage du système de production pour l'élément désiré. Une première sélection des ions est faite avec un spectromètre avant injection dans le cyclotron; le cyclotron est ensuite utilisé comme séparateur de masse avec un pouvoir de séparation de 2500.

- Les diagnostics de faisceaux.

Les faisceaux exotiques intéressants étant généralement d'intensité très faible, l'ensemble lignes de faisceau-cyclotron est d'abord préréglé avec un

faisceau stable. Des diagnostics pour mesurer des intensités de quelques particules par seconde ont été développés pour le réglage et la conduite des faisceaux radioactifs.

- Le cyclotron compact à injection axiale Cime.

Pour couvrir la grande gamme d'énergie, il fonctionne sur quatre modes d'harmonique haute fréquence avec deux géométries centrales différentes: l'une avec un inflecteur spiral et un rayon d'injection de 45 mm pour la gamme de 1,7 à 6 MeV/nucléon, l'autre avec un inflecteur de type Müller et un rayon d'injection de 34 mm pour la gamme de 5 à 25 MeV/nucléon.

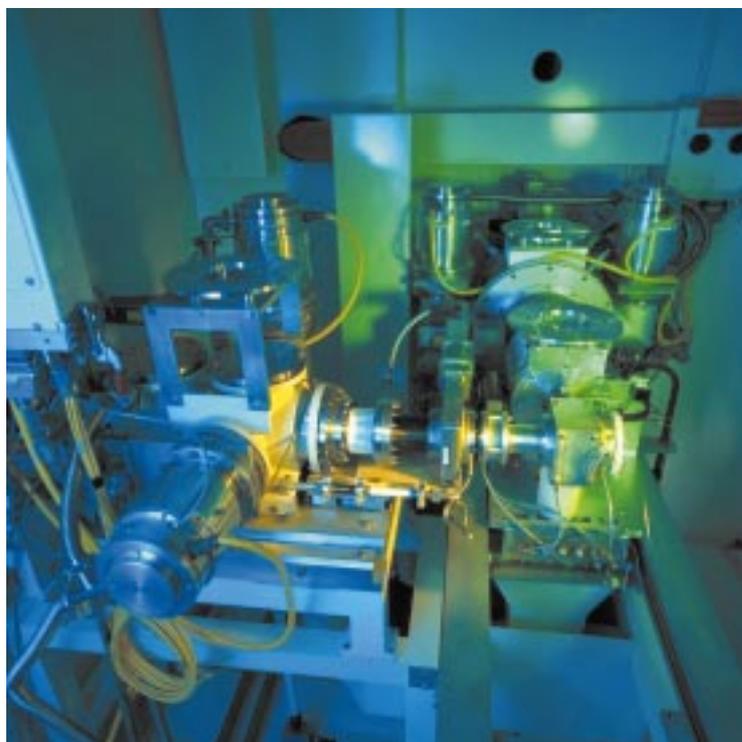
Les tests de validation du cyclotron en ions stables jusqu'à une énergie de 10 MeV/nucléon ont commencé en avril 1998, après l'accord de la Direction de la sûreté et des installations nucléaires (DSIN), car l'installation Spiral est située dans l'enceinte du Ganil qui est une installation nucléaire de base (INB). Cette autorisation a été accordée en attendant celle d'envoyer le faisceau du Ganil sur la cible de Spiral et d'accélérer des ions radioactifs.

Les essais ont eu pour finalité de valider les paramètres de réglage déduits des programmes de simulation. La grande surprise a été que le faisceau accéléré «disparaissait» quelques centimètres avant l'extraction du cyclotron. L'origine de ce problème n'ayant pu être immédiatement identifiée, une forte correction magnétique a été appliquée pour extraire le faisceau du cyclotron.

Au cours de l'année 1998, les essais ont permis d'ajuster les valeurs de réglage pour la gamme de fonctionnement de 5 à 10 MeV/nucléon. L'arrêt d'hiver du Ganil a été consacré à l'installation de la ligne de faisceau reliant le cyclotron Cime aux aires expérimentales du Ganil et à des mesures magnétiques complémentaires pour la recherche du défaut.

Au printemps 1999, la DSIN a exigé une enquête publique préalable à l'autorisation de démarrage de Spiral. Une nouvelle autorisation d'essais en faisceaux stables sur toute la gamme d'énergie a donc été demandée et accordée. Des mesures précises du centrage des trajectoires au cours de l'accélération et des simulations sur ordinateur ont montré que le problème lié à l'extraction des faisceaux ne pouvait être que magnétique. Les essais ont permis d'atteindre une transmission totale de 50 % depuis la source jusqu'à la

*L'ensemble
cible-source
de production de
noyaux exotiques
à Spiral.*
© M. Desaunay Ganil



sortie du cyclotron. Pendant le même temps, le taux de production a été multiplié par cinq et un ensemble cible-source a été conçu pour la production d'ions monochargés de lithium.

Au printemps 2000, le système pour le fonctionnement de 1,7 à 6 MeV/nucléon a été installé avec d'excellents résultats. L'origine du défaut d'extraction a enfin pu être déterminée: il s'agissait d'un pincement dissymétrique des pôles sous l'effet de la pression atmosphérique à cause d'une dissymétrie de la chambre à vide. Des entretoises installées dans l'entrefer ont permis d'y pallier et, depuis, le faisceau est extrait avec une très faible correction.

Un essai à l'énergie maximale de 25 MeV/nucléon a permis de contrôler les protections radiologiques. D'autres tests ont été effectués: pouvoir de séparation du cyclotron et identification de faisceaux au moyen des détecteurs de faible intensité, mise au point de la manutention de l'ensemble cible-source, validation des ensembles avant montage. Une cible spécialement conçue pour la production des isotopes d'hélium 6 et 8 a été testée sur SIRa.

A la fin de l'année 2000, toute la gamme de fonctionnement de Spiral avait été explorée avec succès et l'ion de préréglage du premier faisceau radioactif accéléré.

Les conclusions favorables de l'enquête publique et les compléments récemment fournis au rapport de sûreté ont abouti à l'autorisation d'exploitation de Spiral à l'été 2001 (1).

(1) La signature du décret de mise en service par les ministères concernés a permis de délivrer l'autorisation d'exploitation de Spiral le 8 août 2001. Le premier faisceau d'ions exotiques a été accéléré avec succès le 23 septembre 2001.

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www.ganil.fr/spiral>

A. C. Villari and the Spiral group, The accelerated Isol technique and the Spiral project, *Ganil Report S 01 01*.

D. Bibet and the Spiral group, Production and post acceleration scheme for Spiral, *Ganil Report S 01 03*.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPN Orsay, ISN, LPC Caen, Subatech.

CNRS: Service des prototypes.

CNRS/CEA: Saturne, Ciril.

CEA/DSM: Dapnia.

CEA/DAM: Bruyères-le-Châtel.

LA CONTRIBUTION DE LA FRANCE À LA CONSTRUCTION DU LHC

Dans le cadre de la contribution exceptionnelle de la France à la construction de l'accélérateur LHC, le CNRS et le CEA se partagent les quatre accords techniques proposés par le Cern. La division Accélérateurs de l'IPN Orsay est responsable des deux accords CNRS.

à droite ci-dessus :
Thermomètres
cryogéniques LHC
installés dans le bloc
d'étalonnage.
© CNRS/IN2P3

Suite à l'accord tripartite signé en 1994 entre le Cern, le CNRS et le CEA, la France s'est engagée à apporter une contribution exceptionnelle à la construction du LHC. L'IN2P3 fournit, pour sa part, une contribution en personnel, estimée à environ 100 hommes-ans.

Le premier accord concerne l'étude et le suivi de la fabrication et du montage des cryostats pour les sections droites courtes (SSS pour *short straight sections*), le CEA/Dapnia étant chargé de l'étude et du suivi des masses froides intégrant les différentes bobines supra-

conductrices. Les huit arcs formant l'anneau du LHC contiennent 360 sections droites courtes (SSS-Arcs) dédiées à la focalisation des faisceaux, qui est réalisée par un quadrupôle supraconducteur à haut gradient et double ouverture, et deux paires d'aimants supraconducteurs de correction. L'ensemble de la masse froide fonctionne dans l'hélium superfluide à 1,9 K. A ces sections s'ajoutent 64 sections pour la suppression de la dispersion et 46 sections d'adaptation, destinées à réaliser l'accord entre le faisceau qui arrive et celui qui sort, et placées à proximité des zones de collision. Les prototypes ont été étudiés, construits et testés avec succès, avec des performances dépassant les conditions nominales d'utilisation. Les gradients nominaux de 223 Tesla/m à l'énergie de 7 TeV ont été largement dépassés. Le lancement en fabrication de série des SSS-Arcs a été décidé fin 2000, ce qui a conduit à une phase très active de préparation des dossiers, des consultations et du choix des industriels chargés des réalisations.

Le second accord concerne l'étude et l'étalonnage des thermomètres cryogéniques du LHC. Après une phase expérimentale intense consacrée à l'étude des effets de l'irradiation par neutrons des capteurs industriels, une station d'étalonnage a été conçue, construite et installée à Orsay. Environ 5000 thermomètres sont nécessaires pour mesurer et contrôler tous les éléments supraconducteurs. L'étalonnage s'effectue dans une gamme de température très large (de 1,8 K à 300 K) avec une grande précision (± 10 mK). La production en série a commencé fin 2000, et l'objectif est de fournir 150 thermomètres étalonnés par mois, après qu'ils auront subi toutes les procédures de contrôle, de cycle thermique et d'étalonnage, sous vide et dans l'hélium liquide. Pour assurer le suivi des procédures et garantir les performances, un plan d'assurance qualité a été mis en place à l'IPN d'Orsay. Tous les résultats des contrôles et des mesures sont stockés en ligne dans une base de données Oracle, spécialement développée dans le cadre de cette collaboration.



Prototype de sections
droites courtes en cours
de montage.
© Cern

DES ACCÉLÉRATEURS DE FAISCEAUX INTENSES DE PROTONS

Une R&D intense est engagée pour la construction d'une nouvelle génération d'accélérateurs capables de délivrer des faisceaux intenses de protons. Aux côtés d'autres organismes, l'IN2P3 est particulièrement impliqué dans la définition et la construction d'un prototype d'injecteur et de cavités radiofréquence, nécessaires pour ces futures machines.

Les connaissances accumulées dans le monde en physique et technologie des accélérateurs de particules permettent aujourd'hui d'envisager la construction de nouvelles générations de machines capables de délivrer des faisceaux de protons d'une puissance de plusieurs dizaines de mégawatts, et donc de produire des flux intenses de particules secondaires intéressant de nombreux domaines des sciences fondamentales ou appliquées:

- les faisceaux d'ions exotiques en physique nucléaire;
- la transmutation des déchets nucléaires de longue vie;
- les faisceaux de muons et de neutrinos en physique des particules;
- les neutrons en physique de la matière condensée.

Pour les deux premières thématiques, des contrats européens destinés à l'élaboration d'avant-projets ont été passés. Il s'agit d'Eurisol pour les noyaux exotiques et de PDS-XADS (Preliminary Design Study-Experimental Accelerator Driven System) pour l'aval du cycle.

Tenant compte de la technologie des cavités radiofréquence supraconductrices, la plupart des installations actuellement étudiées sont basées sur l'utilisation d'un accélérateur linéaire supraconducteur pour accélérer des faisceaux de 10 à 100 mA jusqu'à 1 ou 2 GeV avec des cycles utiles variant entre 10 et 100 %. Au sein d'une collaboration CNRS, Cern, CEA et INFN, l'IN2P3 est engagé dans un programme majeur de R&D pour définir et construire un prototype d'injecteur et les cavités radiofréquence nécessaires pour ces futures machines.

Un premier objectif est la réalisation de l'injecteur de protons de haute intensité (Iphi) visant à produire un faisceau continu de 0,5 MW. Cet ensemble sera composé d'une source ECR de 100 mA à 95 kV déjà construite et opérationnelle, d'un quadripôle radiofréquence (RFQ) de 5 MeV et d'une ligne d'analyse où seront installés des diagnostics afin de déterminer les

caractéristiques du faisceau en termes d'émittance et de résolution en énergie. Iphi permettra de valider les codes de calcul des nouvelles structures accélératrices et de la dynamique des faisceaux, et de mettre au point les procédures de pilotage et de montée en puissance des futures installations.

L'IN2P3 participe aussi au développement de cavités supraconductrices dites «low-beta» et des ensembles cryogéniques associés devant équiper les sections de haute énergie des futurs accélérateurs linéaires. D'ores et déjà, plusieurs prototypes de cavité ont été testés avec succès et des résultats prometteurs ont été obtenus. Un récent exemple de cette activité est la construction du cryostat horizontal Cryholab capable d'intégrer des cavités multicellules de 700 MHz complètement équipées. Enfin, en collaboration avec l'INFN, dans le contexte des programmes Eurisol et XADS, l'étude de cavités supraconductrices spéciales adaptées aux sections de basse et moyenne énergies de l'accélérateur, entre 5 et 100 MeV, a été initiée. Ce développement permettrait de remplacer les cavités chaudes actuellement prévues pour ces étages, et donc de faire des économies notables en investissement et en fonctionnement. Le contrôle des performances de ces cavités en présence d'un faisceau pourrait être envisagé au Tandem d'Orsay.



Préprototype d'une section du quadripôle radiofréquence.
© CEA

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Orsay, ISN, LAL.

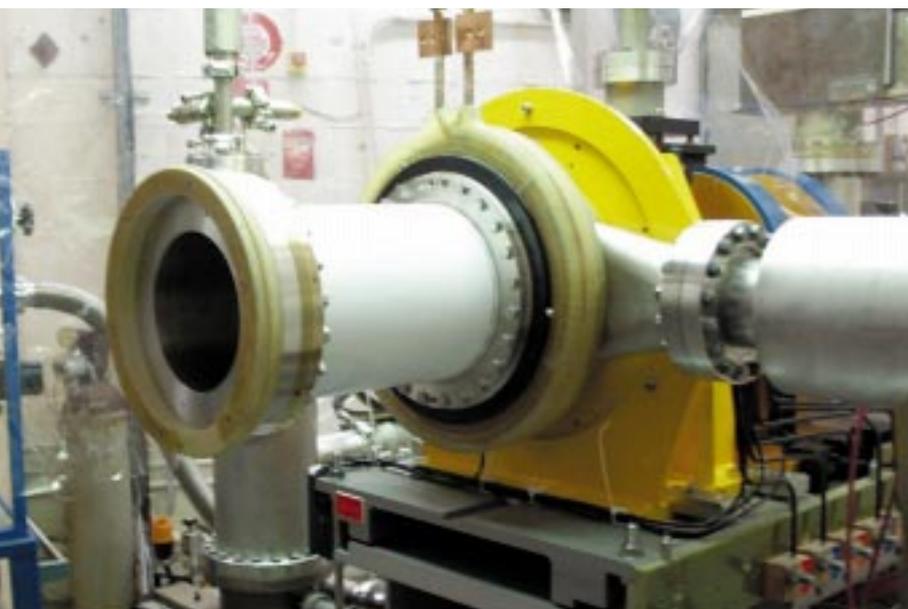
CEA/DSM : Dapnia.

LES COLLISIONNEURS ÉLECTRON-POSITON DU FUTUR

Pour la communauté de physique des hautes énergies, un collisionneur linéaire électron-positon d'une énergie de 0,5 à 1 TeV dans le centre de masse et d'une luminosité supérieure à $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ apparaît comme une machine essentielle pour la suite du programme de physique expérimentale après le LHC.

L'IN2P3 est impliqué dans les deux projets de collisionneur linéaire électron-positon à l'étude en Europe: le projet Tesla - Tera-Electronvolt Superconducting Linear Accelerator -, étudié par une collaboration internationale et piloté par le laboratoire de Desy (Hambourg), qui utilisera des cavités supraconductrices en niobium massif avec des gradients autour de 23 - 25 MV/m à une fréquence de 1300 MHz et qui pourrait être opérationnel en 2012; le projet Clic

Le canon pour la phase préliminaire de CTF3, machine test pour Clic, le projet de collisionneur linéaire d'électrons de très haute énergie au Cern. © Cern



- Compact Linear Collider - au Cern, qui utilisera des cavités accélératrices fonctionnant à 30 GHz pour exploiter les très forts gradients ($\sim 150 \text{ MV/m}$) avec un bon rendement entre la puissance électrique nécessaire et la puissance du faisceau obtenu, et qui pourrait voir le jour aux environs de 2020.

Avant de faire une proposition réaliste de construction de l'une ou l'autre de ces machines, il est nécessaire de construire des « bancs d'essais » pour valider les principes techniques.

Trois laboratoires français ont participé à la réalisation de « Tesla Test Facility » (TTF) à Desy. Cette maquette a démontré que les faisceaux pouvaient être accélérés à des gradients d'environ 22 MV/m. Divers traitements thermiques et chimiques des cavités en niobium ont permis d'atteindre des gradients de plus de 30 MV/m. Les laboratoires ont travaillé sur le développement

de nouvelles techniques d'hydroformage et de dépôt de cuivre pour les cavités supraconductrices, sur celui des coupleurs de puissance et sur la réalisation d'un cryostat et d'un modulateur pour des essais de cavités supraconductrices (projet Cryholab). Après huit ans de R&D, la collaboration Tesla a rédigé le *Tesla Technical Design Report*, qui donne une description technique de l'accélérateur proposé. Tous les problèmes techniques ne sont pas pour autant résolus. Un accord signé entre l'IN2P3 et Desy pour une période de quatre ans (2000-2004) donne au Laboratoire de l'accélérateur linéaire la responsabilité du développement des coupleurs de puissance nécessaires à l'alimentation des cavités radiofréquences.

Quant au projet Clic, il n'existe aucune source capable de fournir la puissance hyperfréquence de 30 GHz qui est nécessaire. En conséquence, Clic devra utiliser une nouvelle technique où la puissance HF nécessaire est créée par extraction de l'énergie d'un deuxième faisceau qui se propage parallèlement au faisceau principal. Cette proposition de générer la puissance HF doit être démontrée et une équipe du Cern a obtenu le feu vert pour construire le CTF3 (Clic Test Facility-3) afin de faire cette démonstration. La participation du LAL à ce projet consiste en la réalisation d'un canon à électrons et de cavités de prégroupement pour l'injecteur du faisceau secondaire. Le CTF3 sera construit entre 2001 et 2005.

POUR EN SAVOIR PLUS

The Tesla Technical Design Report, Desy 2001-011, ECFA 2001-209, ISBN 3-935702-00-0, March 2001.
A 3 TeV e+e- Linear Collider based on Clic Technology, G. Guignard (ed.), Cern 2000-008.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

TTF/TESLA:

CNRS/IN2P3: LAL, IPN Orsay.

CEA/DSM: Dapnia.

CLIC:

CNRS/IN2P3: LAL.

DES CIRCUITS INTÉGRÉS POUR LES EXPÉRIENCES ALICE ET STAR

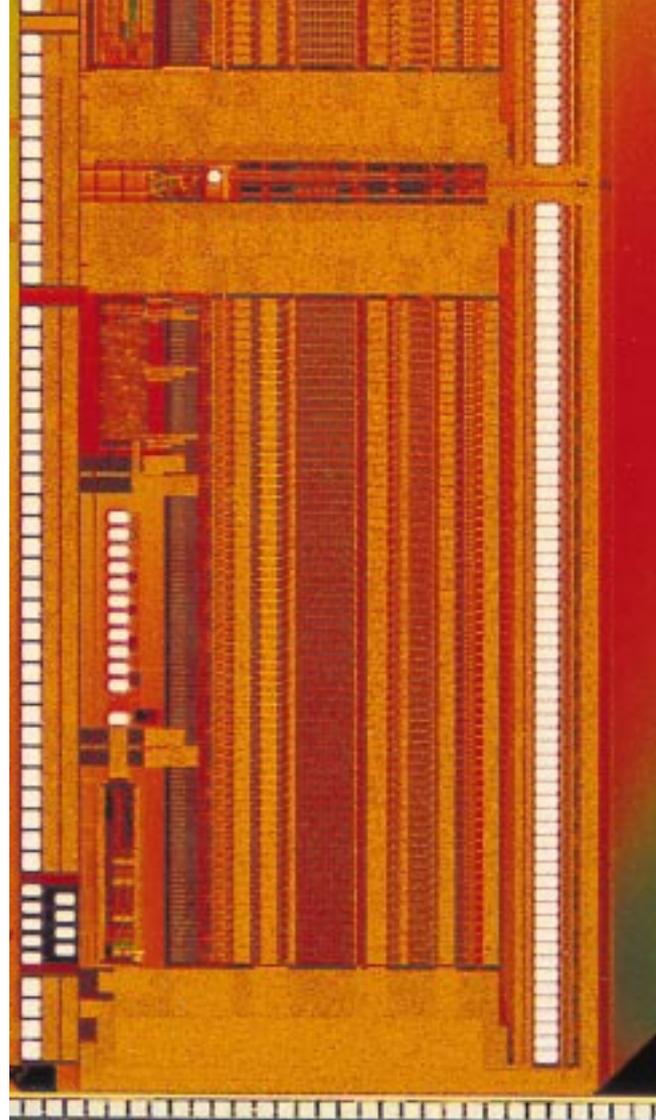
Les expériences auprès des grands accélérateurs nécessitent l'utilisation d'une électronique résistante aux forts taux de radiations engendrés par les collisions d'ions lourds. Plusieurs circuits intégrés ont été conçus et réalisés pour les expériences Star et Alice. Deux circuits sont en phase de production et d'installation sur l'expérience Star et un nouveau circuit - HAL25 - est en développement pour satisfaire les exigences du futur détecteur Alice au LHC.

De 1997 à 1999, le circuit Alice128C - 128 voies analogiques de lecture et de conditionnement des signaux issus des capteurs à micropistes de silicium - a été conçu et testé au LepSi. Fabriqué industriellement à 8000 exemplaires en technologie Cmos 1,2 μm , il est actuellement utilisé dans l'expérience Star, en cours d'installation auprès de l'accélérateur Rhic à Brookhaven aux États-Unis. En parallèle, le circuit Costar a été conçu pour permettre le contrôle et la commande d'un certain nombre de paramètres analogiques et numériques comme la température, les alimentations basse et haute tension des détecteurs de Star. Il s'insère dans le système de contrôle de l'électronique frontale sans adjonction d'autres éléments de liaison.

Le circuit Alice128C, qui fonctionne à des taux de radiations n'excédant pas 50 Krad, était prévu au départ pour équiper le détecteur à pistes de silicium du détecteur de traces de l'expérience Alice au LHC (d'où son nom). Mais, dans cette expérience, les risques de dégradation et de blocage dus aux rayonnements ionisants ne sont pas négligeables, même si le niveau de radiation auquel le circuit sera effectivement soumis est encore sujet à controverse. Ainsi, un nouveau circuit - HAL25 -, basé sur le principe d'Alice128C et extrapolé à partir de celui-ci, a été conçu en collaboration avec l'IREs. Ce circuit réalisé en technologie Cmos 0,25 μm est conçu de façon à optimiser sa tenue aux radiations et à satisfaire une demande de faible consommation et de faible bruit électronique. En effet, les nouvelles technologies submicroniques commerciales permettent de fabriquer « naturellement » des circuits ayant une bonne tenue aux radiations.

Chaque voie est constituée d'un préamplificateur de charge, d'un circuit de mise en forme et d'un étage de mémorisation commandé par un signal extérieur. Un

Schéma du circuit intégré HAL 25 pour la lecture des signaux analogiques issus des détecteurs micropistes au silicium de l'expérience Alice au LHC.



multiplexeur analogique permet la lecture séquentielle des données analogiques mémorisées. Un amplificateur de sortie intégré est commun aux 128 voies. La logique de contrôle, répondant à la norme JTAG-IEEE 1149-1, est incorporée au circuit. Elle permet de contrôler les différents courants de polarisation, le temps de mise en forme, ainsi que le choix des différents modes de test. Les caractéristiques de ce circuit, notamment sa dynamique d'entrée de ± 15 Mips (1), permettent d'atteindre les spécifications de gamme dynamique de 10 bits et de résolution en énergie proche de 8 bits sur toute la dynamique de sortie que l'on attend pour l'expérience Alice.

(1) 1 Mip = 22 000 électrons dans 300 μm de silicium.

POUR EN SAVOIR PLUS

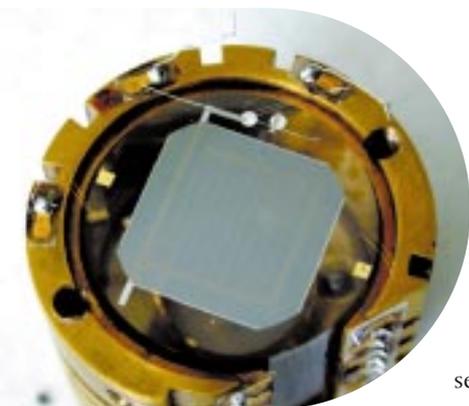
Electrical Characterization of Alice128C A Low-Power Cmos Asic for the Readout of Silicon Strip Detectors. Proceedings of the « Fourth Workshop on Electronics for LHC Experiments », Rome (Italy), 21-25 Sept. 1998 Cern/LHCC/98-36, p. 160-164.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IReS, LepSi.

DE NOUVEAUX CAPTEURS THERMOMÉTRIQUES ULTRASENSIBLES POUR LES BOLOMÈTRES

Pour détecter directement les Wimps (particules massives faiblement interactives), particules hypothétiques prévues par les théories supersymétriques, qui pourraient expliquer, au moins en partie, la nature de la masse manquante de l'Univers, les chercheurs de l'expérience Edelweiss utilisent des détecteurs bolométriques. Ceux-ci doivent être particulièrement performants en raison du faible taux d'interaction attendu, d'où la nécessité de développer de nouvelles approches technologiques qui peuvent aussi trouver des applications dans d'autres domaines.



Couche mince thermométrique déposée sur l'une des faces planes d'un absorbeur monocristallin cylindrique (ici saphir de diamètre 20 mm).
© CNRS/IN2P3

Le détecteur de l'expérience Edelweiss (voir p. 68) est un bolomètre constitué d'un monocristal de germanium ultrapur. Son principe est basé sur une double détection simultanée des interactions: impulsion d'ionisation et impulsion de chaleur. Les recherches poursuivies visent à abaisser son seuil en énergie et à améliorer son pouvoir de rejet des événements du bruit de fond radioactif.

Une nouvelle approche a été développée pour remplacer le thermomètre en germanium (Ge) dopé, collé sur l'absorbeur (voir schéma p.68) par une couche mince déposée par coévaporation. Il s'agit d'un film de 50 à 300 nm d'épaisseur, constitué d'un alliage amorphe $Nb_xSi_{(1-x)}$, placé entre deux prises de contact

électrique en niobium pur supraconducteur. Pour x inférieur à 0,09, cet alliage est un « isolant d'Anderson », matériau aux propriétés remarquables: métal à l'échelle microscopique et isolant électrique à l'échelle macroscopique. Sa résistance augmente exponentiellement lorsque la température tend vers 0, ce qui permet une mesure ultraprécise des variations de température à des valeurs très basses (du microkelvin à 20 mK).

Dans un absorbeur monocristallin diélectrique comme le saphir ou le germanium ultrapur, les diverses excitations engendrées par l'impact d'une particule sont rapidement converties en phonons (des modes de vibration des atomes). Les couches d'isolant d'Anderson ont, comme les métaux, la propriété d'absorber ceux-ci avant leur transformation en chaleur et de stocker transitoirement l'énergie dans leurs électrons. Il en résulte un signal dit « athermique » qui, à la différence de celui obtenu avec un thermomètre collé, est cent fois plus rapide et de plus forte amplitude, celle-ci dépendant de la distance du point d'impact à la couche.

La modélisation de ce nouveau type de bolomètre a de plus conduit à un approfondissement des propriétés fondamentales des isolants d'Anderson.

Le pouvoir de rejet des détecteurs actuels d'Edelweiss est limité par les événements proches des électrodes qui conduisent à une collecte incomplète des charges. Si ces électrodes sont elles-mêmes constituées de couches thermométriques, la forme du signal thermique permet d'identifier et donc de rejeter les événements qui sont proches de ces couches. De tels détecteurs, avec un pouvoir de rejet ainsi accru, sont en cours de réalisation.

Un autre intérêt des couches minces est de se prêter à une mise en forme aisée par lithographie. Après un important travail d'adaptation des couches à la bolométrie pour l'étude du fond cosmologique dans le domaine millimétrique, un programme de développement de matrices de bolomètres a été lancé où, selon les cas, on recourt à des couches « isolants d'Anderson » ou supraconductrices.

Enfin, d'autres applications ont été développées comme des thermomètres ultrasensibles qui ont servi à contrôler les températures dans l'expérience Archeops (voir p. 64) de mesure du rayonnement du fond cosmologique.

POUR EN SAVOIR PLUS

S. Marnieros, L. Bergé, A. Juillard and L. Dumoulin,
Phys. Rev. Lett. 84 (2000) 2469.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPN Lyon, CSNSM.

CNRS/Insu: IAP.

CNRS/SPM: CRTBT.

CEA/DSM: Dapnia, Drecam.

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION DE DÉTECTEURS SEMI-CONDUCTEURS

La détection des particules chargées en physique des particules exige des performances en matière de résolution, de rapidité de réponse et de résistance aux radiations telles qu'il est nécessaire de développer de nouveaux types de capteurs. C'est l'objectif de la technologie Cmos de capteurs intégrés à pixels actifs.

Alors que les détecteurs de vertex jouent un rôle de plus en plus déterminant dans les expériences de physique des particules et des ions lourds ultrarelativistes, les technologies actuelles (CCD et pixels hybrides) présentent des limitations qu'il paraît difficile de repousser au niveau exigé. De nouveaux types de détecteurs ont été recherchés, assez granulaires, rapides, minces et résistants aux radiations, pour reconstruire les paramètres d'impact des traces et les vertex secondaires avec une précision permettant d'identifier les saveurs des quarks avec une efficacité et une pureté sans précédents. C'est dans ce contexte que le développement des capteurs intégrés monolithiques à pixels actifs (Maps) pour la détection de particules chargées a vu le jour à l'IReS et au Lepsi, un type de capteur qui n'avait alors servi qu'à la détection de lumière visible (comme dans les caméras du commerce).

Des matrices de 64 x 64 pixels carrés de 20 μm de côté ont été fabriquées en technologie Cmos (1) de 0,6 et 0,35 μm . Testées au Cern avec un faisceau de pions de 120 GeV/c, elles ont révélé un rapport signal à bruit voisin de 40, une efficacité de détection de 99 % et une résolution sur la position des impacts de 1,5 μm . La pertinence de cette nouvelle technologie est donc démontrée.

Les applications des capteurs sont multiples d'autant plus qu'ils peuvent, en principe, être très minces (20-50 μm), ce qui réduit les effets de la diffusion multiple et permet de détecter des particules de très faible énergie. Le décapage chimique devrait permettre de réduire l'épaisseur du substrat d'un ordre de grandeur par rapport à sa valeur brute de fonderie, et de maîtriser l'épaisseur et la planéité du capteur à mieux qu'un micron près.

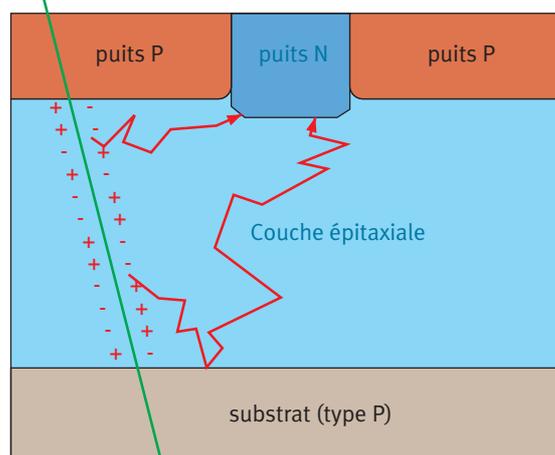
L'utilisation de ces capteurs peut ainsi être envisagée pour d'autres détecteurs utilisés en physique des particules, comme les détecteurs de trajectoires, les calorimètres ou les photodiodes hybrides (HPD). Cette der-

nière application ouvre aussi des perspectives particulièrement attrayantes en biologie, parce qu'elle permettrait un suivi des processus cellulaires étudiés en neurosciences. Les capteurs présentent également un grand intérêt pour la détection de particules β en médecine, pour l'instrumentation en milieu radioactif (particules α et neutrons) et pour les expériences embarquées. Il s'agit à présent d'en optimiser les performances pour chaque application.

(1) Cmos: Complementary Metal Oxide Silicon process technology.

Principe de détection des particules chargées:

la particule incidente libère des paires électron-trou dans la couche épitaxiale à raison de 80 paires par micron environ. Cette couche de silicium de type p de faible dopage sépare deux autres couches de type p (substrat d'un côté et puits p⁺ de l'autre), dont le dopage est sensiblement plus élevé. Les électrons libérés diffusent dans la couche épitaxiale, sans pénétrer dans les deux couches voisines à cause de leur dopage plus élevé. Des zones de type n implantées à intervalles réguliers plongent dans la zone épitaxiale, avec laquelle elles constituent des jonctions qui collectent les électrons diffusés. La résolution spatiale du détecteur est principalement dictée par l'espacement des zones de type n.



particule ionisante

POUR EN SAVOIR PLUS

G. Deptuch et al., *Design and Testing of Monolithic Active Pixel Sensors for Charged Particle Tracking*, preprint IReS-01-01 and Lepsi 2001-01, and Linear Collider Note LC-DET-2001-017

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IReS, Lepsi.

LES MIROIRS DE VIRGO

Dans le cadre du programme franco-italien Virgo de détection des ondes gravitationnelles, en cours de construction en Italie, des miroirs de grande taille quasi parfaits sont requis pour l'interféromètre géant de type Michelson, intégré dans les bras de 3 km de l'antenne.

Les miroirs de l'interféromètre de Virgo doivent être de grande taille: un diamètre de 350 mm est nécessaire. De plus, la « quasiperfection » est requise: des pertes totales de 1 ppm à 1064 nm, un front d'onde RMS de 1 nm pour un diamètre de 150 mm.

La seule technique de dépôt sous-vide permettant d'atteindre de telles performances est la pulvérisation par faisceaux d'ions, Ion Beam Sputtering (IBS). Cela a été démontré par le passé sur des composants de 100 mm de diamètre.

Pour réaliser ces optiques, la construction d'un nouveau bâti de dépôt a été nécessaire. C'est à l'heure actuelle le bâti le plus gros et le plus performant du monde pour la technique IBS. Sa conception résulte de tests conduits à l'IPN de Lyon, tandis que la chambre à vide, le porte-

substrat et les porte-cibles ont été sous-traités auprès d'industriels français. En revanche, pour préserver le savoir-faire de l'expérience, l'intégration des composants nécessaires au dépôt a été réalisée par l'équipe SMA-Virgo (pompage, sources d'ions, contrôle commande, monitoring). Les premiers tests de vide réalisés au début de l'année 2000 respectent parfaitement le cahier des charges (pression de $4 \cdot 10^{-8}$ mbar obtenue en 3 heures).

Le premier dépôt a été réalisé en juillet 2000. Une phase de R&D s'est alors engagée avec, comme objectif premier, l'optimisation des paramètres de dépôt, notamment grâce au développement en parallèle des outils de métrologie adéquats. Les miroirs « tests » réalisés aujourd'hui présentent une absorption de 0,8 ppm, valeur inférieure à la spécification requise par Virgo.

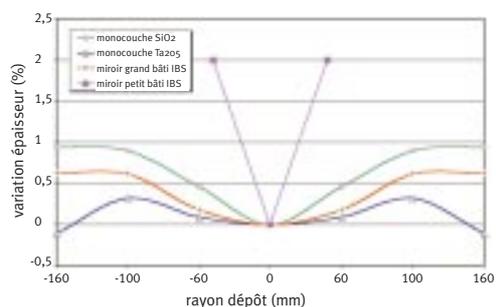
Les travaux en cours portent sur l'amélioration de l'uniformité en épaisseur des couches. Les premiers résultats sont très encourageants. Pour un miroir de 300 mm de diamètre, en ajustant au mieux l'angle des cibles par rapport aux faisceaux d'ions, ainsi que les distances cibles-substrats et cibles-sources, on a pu obtenir une uniformité de 0,6 %, alors que la simulation donnait une valeur de seulement 1,33 %.

L'utilisation de masques « intelligents », c'est-à-dire de masques différents selon la nature chimique du dépôt (oxydes de silicium ou de tantale), lors de la réalisation d'empilement multicouches dans la chambre de dépôt, devrait permettre une amélioration considérable de l'uniformité. La simulation indique une valeur inférieure à 0,01 %, résultat compatible avec le cahier des charges de Virgo.

Les premiers substrats viennent d'être livrés par la société Wave Precision (États-Unis); le planning a donc toute chance d'être respecté. Par ailleurs, un accord de collaboration avec Ligo vient d'être signé (1) pour la réalisation des optiques de deuxième génération de l'antenne « Ligo Advanced ».

(1) En septembre 2001.

Variation de l'épaisseur par rapport au centre en fonction du diamètre du dépôt.



POUR EN SAVOIR PLUS

J.M. Mackowski, L. Pinard, L. Dognin, P. Ganau, B. Lagrange, C. Michel, *et al.*,
Virgo mirrors: wavefront control,
Optical and Quantum Electronics, 31 (1999) 507.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : IPN Lyon, LAL, LAPP.

ESPCI-Paris.

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



Le bâti de dépôt IBS est un parallélépipède de 2,4 x 2,4 x 2,2 m.
© CNRS/IN2P3

LES SYSTÈMES D'ACQUISITION DE DONNÉES AU LHC

Le LHC, prochain accélérateur du Cern dont la mise en service est prévue en 2006, représente un défi fabuleux dans de nombreux domaines, parmi lesquels l'acquisition des données n'est pas un des moindres. Avec des collisions toutes les 25 ns, la décision de garder ou non un événement n'est en effet plus possible avant l'arrivée du suivant.

Les quatre détecteurs prévus au LHC - Atlas, CMS, LHCb et Alice - ne travaillent pas tous dans les mêmes conditions, contrairement à ce qui se passait au LEP: Atlas et CMS travaillent à la luminosité maximale, avec une vingtaine d'interactions à chaque croisement de faisceau toutes les 25 ns. LHCb travaille à une luminosité cent fois plus faible, mais observe seulement les croisements à une seule interaction. Alice observe non seulement les interactions proton-proton, comme les autres, mais surtout les interactions plomb-plomb qui, durant quinze jours par an, produiront des événements d'une complexité extrême.

Avec des collisions toutes les 25 ns, on ne peut plus prendre la décision de garder ou de rejeter un événement avant que le suivant ne se produise. Les données sont donc mises en attente dans des pipelines, le temps de prendre la décision. Cette première décision, réalisée par de la logique câblée, prend quelques microsecondes. Bien sûr, on travaille aussi en mode pipeline, afin de transmettre une décision accepté/rejeté pour chaque croisement de faisceau. On garde alors entre 10 et 100 kHz d'événements, d'une taille située entre 0,1 et 1 mégabyte (MB), sauf pour certains événements d'Alice, cependant peu fréquents, qui peuvent atteindre jusqu'à 80 MB.

Des logiciels sont utilisés pour pratiquer un deuxième niveau de sélection dans les « *regions of interest* » c'est-à-dire les régions du détecteur dans lesquelles un événement a été sélectionné au premier niveau. Il faut enfin assembler l'événement complet dans l'un des processeurs d'une ferme de PC. Un gros « switch » possédant quelques centaines d'entrées et de sorties assure l'envoi des « morceaux » d'un même événement vers le même PC; GigaBitEthernet est une des technologies envisagées.

La sélection finale, effectuée dans le PC par un logi-



Une ferme de PC installée au centre de calcul du Cern.
© Cern

ciel, garde finalement entre 100 et 1000 Hz d'événements, soit un volume de données de l'ordre du péta-byte (10^{15} bytes) par an pour trois des expériences, et cinq fois moins pour LHCb. Le stockage se fera directement au centre de calcul du Cern, probablement dans des bases de données.

Il faut, bien sûr, des volumes de stockage gigantesques dans l'électronique, des centaines de gigabytes, répartis sur le détecteur, écrits et lus à 40 MHz. La technologie du « switch » est aussi un défi, comme l'est le contrôle du routage à travers lui. Certains auront un « Event Manager », d'autres auront un routage automatique. Les fermes de PC disposeront d'un millier d'unités centrales, ce qui n'est pas évident non plus à gérer. Pour mettre au point ces systèmes, il est prévu plusieurs étapes de tests à grande échelle du hardware et du software.

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://cern.ch/DAQ2000/DAQ2000/Slides.htm>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

ATLAS: CNRS/IN2P3: LAPP, LPC Clermont, ISN, CPPM, LAL, LPNHE Paris VI-VII.

CMS: CNRS/IN2P3: LAPP, IPN Lyon, LPNHE Palaiseau, IReS.

LHCb: CNRS/IN2P3: LPC Clermont, CPPM, LAL.

ALICE: CNRS/IN2P3: IPN Lyon, IPN Orsay, LPC Clermont, Subatech, IReS.

DATAGRID, PROJET EUROPÉEN DE GRILLE DE CALCUL

Pouvoir accéder aux moyens de calcul intensif via un réseau à très haut débit et un partage à grande échelle des ressources aussi facilement qu'on branche une prise de courant : tel est l'enjeu de Datagrid, nouveau projet européen de grille de calcul. Né des nécessités des grandes expériences de physique des particules, il a aussi vocation à s'ouvrir vers de nombreux domaines scientifiques et aura sans doute des retombées industrielles et commerciales.

Pour les physiciens des particules, l'intérêt principal du projet Datagrid est de construire un nouveau système d'analyse des très grands volumes de données (de l'ordre du péta-octet, soit 10^{15} octets), qui seront produits au LHC. L'idée est de traiter ces données à partir d'un système de calcul hiérarchique et distribué décrit dans les conclusions du *Report of the Steering Group of the LHC Computing Review*.

Plus généralement, ce projet s'inscrit dans le cadre du cinquième PCRDT de la Commission européenne avec, pour objectif, le développement de systèmes de calcul et de stockage sur des réseaux à hauts débits (de l'ordre du gigabit par seconde). C'est la raison pour laquelle il est présenté par plusieurs partenaires publics et privés de la recherche européenne (1). Avec pour ambition le développement original de logiciels (Middleware) permettant un accès transparent et sécurisé à des ressources de calcul et de stockage distribuées géographiquement en Europe et aux États-Unis.

Le CNRS s'est engagé dans le projet à la fois en raison de son importance pour le dépouillement des expériences du LHC et aussi parce qu'il est convaincu que les techniques de calcul distribué de type « grille » sont essentielles pour l'évolution du calcul scientifique.

La complexité d'un tel projet, le nombre très important d'utilisateurs potentiels et sa pérennisation dans d'autres secteurs scientifiques et industriels ont conduit à identifier un certain nombre de domaines de développement et de R&D:

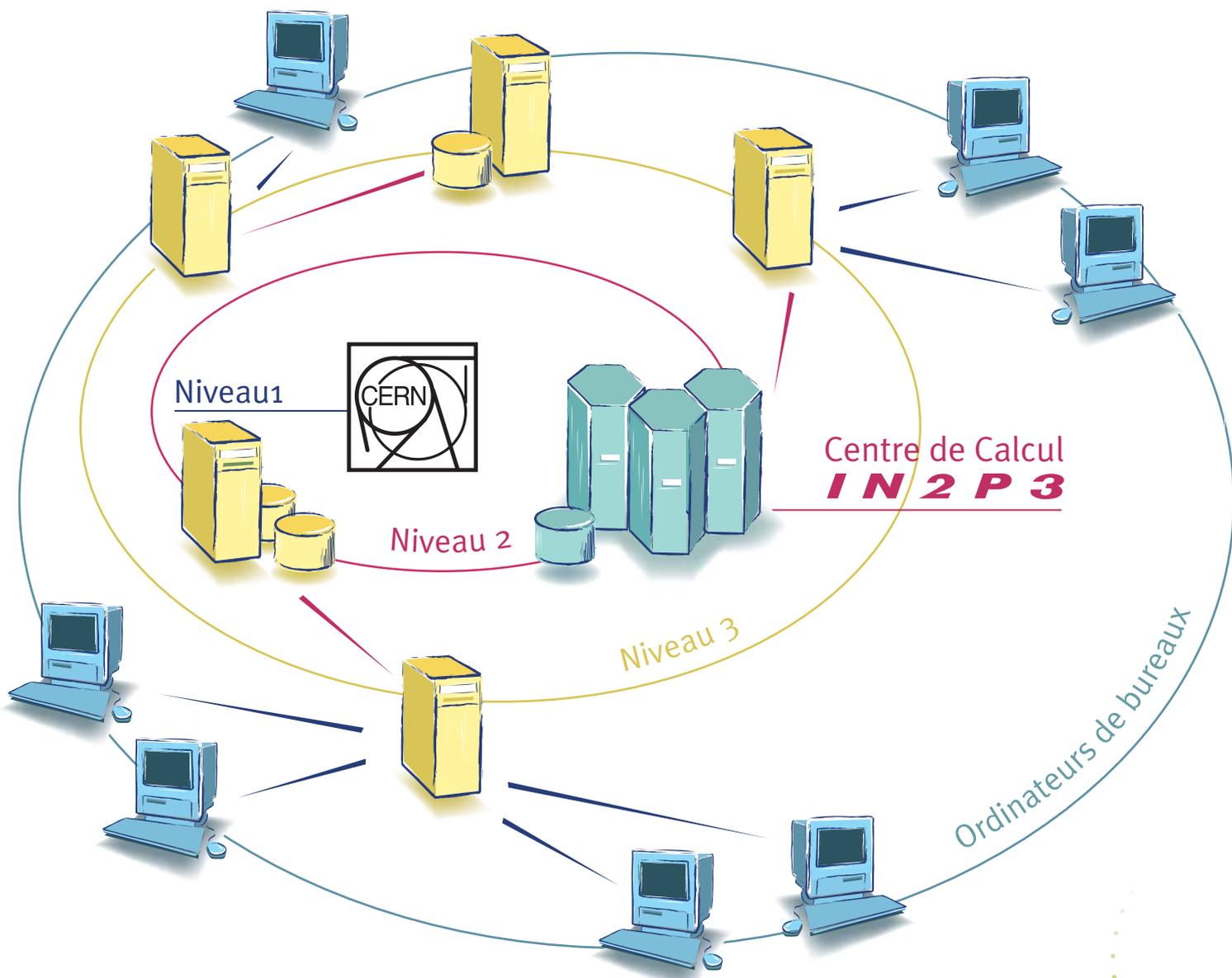
- la planification de la soumission des travaux en fonction de la disponibilité et de la proximité des ressources;
- le développement de couches « middleware » permettant un accès sécurisé à de grandes quantités de données, un transfert automatique et la création de répliques de données à hauts débits, et gestion des données ainsi distribuées;
- le monitoring de l'utilisation des ressources distribuées;
- le support de l'information concernant la disponibilité, les performances, les autorisations d'accès et les allocations de ressources pour un site donné;
- le développement d'une interface générique aux divers systèmes de stockage hiérarchiques exploités actuellement, afin de permettre l'échange de données et de méta-données entre différents sites, ainsi que l'information sur leur disponibilité et les moyens d'y accéder;
- la fourniture d'une infrastructure réseau fiable à hauts débits assurant une très grande qualité de service et dotée d'outils de gestion et d'analyse de performance.

Pour répondre aux besoins des applications mentionnées, le projet Datagrid se propose de partir d'une base logicielle disponible sous forme de logiciel libre - la « boîte à outils » Globus -, de l'adapter et de l'enrichir de façon à rendre possible la réalisation d'une architecture distribuée opérationnelle.

Les points critiques du projet tournent autour de la gestion des données, de la dimension de la grille recherchée (facteur d'échelle) et de l'administration d'un tel système réparti sur plusieurs dizaines d'organismes indépendants.

Deux projets analogues - Griphyn et PPDG - viennent d'être financés par la NSF et le DOE américains.

(1) CNRS, Cern, ESA, INFN (Italie), PPARC (Grande-Bretagne), Nikhef (Pays-Bas) et quinze partenaires associés dont le CEA et la compagnie C-S.



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www.datagrid.cnr.it/>
 Cern/LHCC/2001-004, Monarc Phase 2 report
 Cern/LCB 2000-001, March 2000.
 Foster and C. Kesselman, *The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure*, Morgan Kaufmann, 1999. ISBN 1-55860-475-8.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: CC IN2P3, CPPM, ISN, LAL,
 LPC Clermont, LPNHE Palaiseau, Subatech.
 CNRS/Stic: Centre de recherche et d'application en traitement de l'image et du signal, Informatique, modélisation et optimisation des systèmes, Informatique du parallélisme, Unité réseaux du CNRS.
 CNRS/SDV: Biométrie et biologie évolutives, Biologie comparée des protistes.
 CNRS/SDU: Centre d'étude des environnements terrestre et planétaire.

LE MANAGEMENT DE PROJET

Manager un projet revient à l'organiser, à le diriger, afin d'en maîtriser tous les aspects. Cela devient un impératif dans la gestion de grands projets de plus en plus structurés comme ceux de l'Institut. D'où la volonté de l'IN2P3 d'aider les acteurs projet à se familiariser avec les textes normatifs et, au-delà, d'instaurer une culture « management de projet-qualité » commune à tous.

Dans les domaines technologiques des accélérateurs et des détecteurs, structurés de plus en plus par projets transversaux aux laboratoires, le management de projet devient une activité primordiale. Il s'agit de respecter les coûts et les délais, d'atteindre les performances requises (assurance de la qualité), et cela dans le cadre de collaborations internationales faisant appel à de nombreux acteurs. Manager un projet s'avère donc ardu et demande de suivre les procédures adéquates. Or celles-ci, consignées dans des normes (RG 040 (1), ECSS (2), ISO 9000 (3), etc.), sont souvent difficiles à décrypter.

Depuis trois ans, incitées et encouragées par la direction technique, les actions liées au management de projet se sont considérablement développées et se sont concrétisées dans deux actions principales.

La mise en place d'outils d'aide à la gestion de projets

Ces outils sont le matériau primordial à partir duquel les actions de management de projet peuvent être construites. Ils sont de deux types :

- un serveur (<http://qualite.in2p3.fr/>), composé d'un référentiel de management (huit recommandations) et de notices méthodologiques. Adapté au contexte de l'IN2P3, il explicite les principes à appliquer pour conduire un projet et optimiser ses chances de réussite ;
- un classeur « Management de projet, guide pour l'IN2P3 ». Plus synthétique que le serveur, ce recueil énumère lui aussi les exigences à respecter pour parvenir à la réalisation d'un projet, précise les procédés à utiliser, formalise les actions à entreprendre aux étapes majeures et propose des sommaires de documents techniques.

Ces supports méthodologiques ont été rédigés dans un souci constant de pragmatisme. Exhaustifs, ils peuvent être appliqués à tous les types de projet : projets logiciels, administratifs, de valorisation ou d'infrastructure.

La formation et l'accompagnement sur le terrain des acteurs projets

Ces deux démarches sont complémentaires. La première s'est traduite par la tenue d'écoles thématiques sur le sujet, suivies par une centaine d'ingénieurs de l'Institut.

La seconde a été mise en œuvre dans une aide directe à des projets ciblés, tels que, récemment, l'élaboration d'un plan assurance de la qualité pour l'étalonnage des thermomètres destinés à l'équipement du LHC et la rédaction du plan de management d'Iphi.

Par ailleurs, la structure de l'IN2P3 ne facilite pas la diffusion des informations, en particulier technologiques, ce qui a pour effet de freiner le développement des projets. C'est pourquoi a été entamée la mise en place d'un système de gestion des documents techniques (GDT), envisagée comme un espace collaboratif permettant de partager entre tous les acteurs l'ensemble des données concernant les projets. Un groupe de travail a été constitué pour choisir, puis mettre en œuvre le système *ad hoc*.

(1) *Recommandation générale Aéro 00040, produite par le BNAE, Bureau nationale de l'aéronautique et de l'espace.*

(2) *ECSS: European Cooperation for Space Standardization.*

(3) *ISO (International Standardization Organization) 9000 sur le management de la qualité éditée par l'Afnor, Association française de normalisation.*

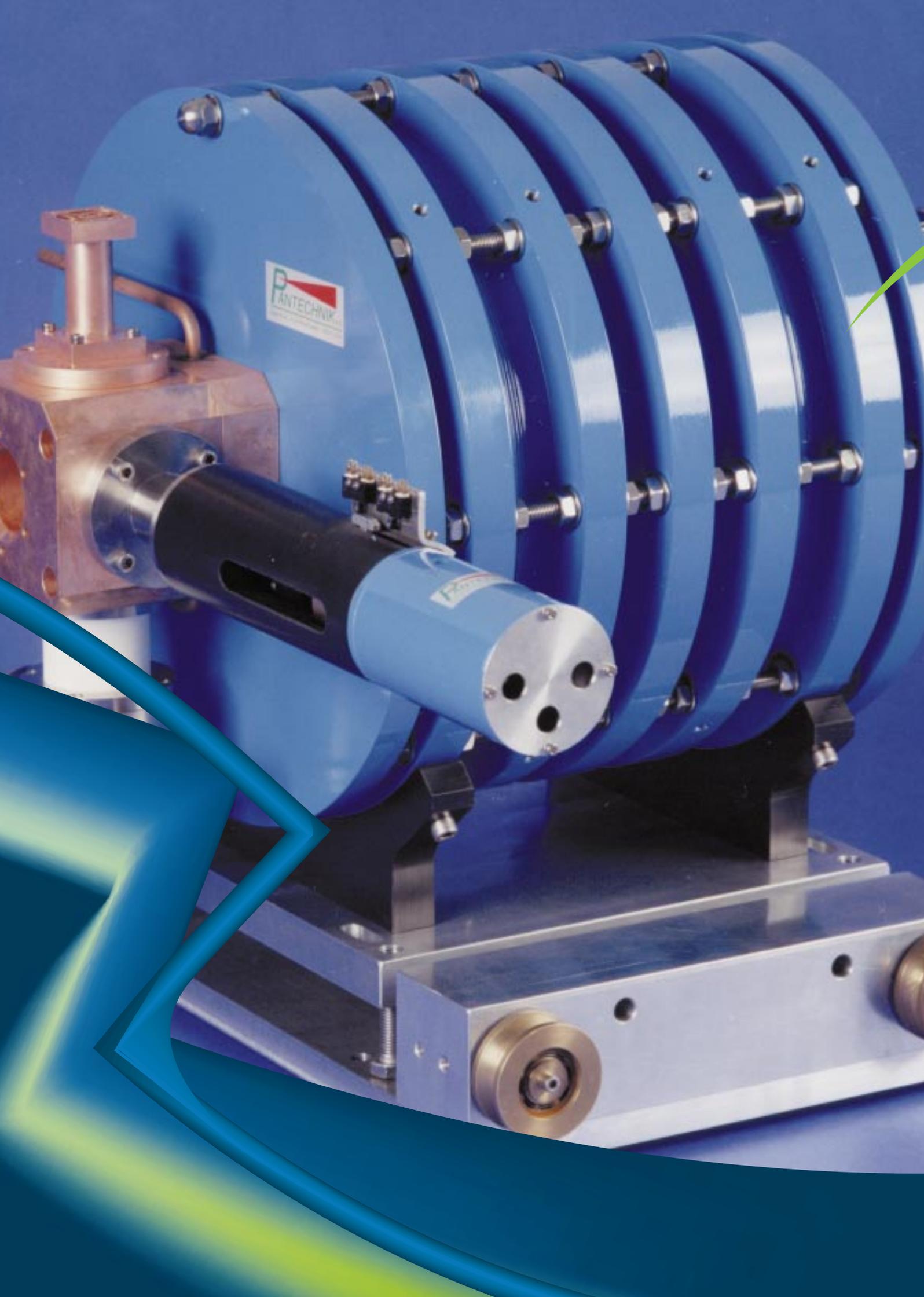


Classeur
«Management
de projet»
© CNRS/IN2P3,
photo Page B

REMERCIEMENTS

Introduction
François Dupont

Daniel Bibet
Alex Mueller
Tomas Junquera
Terence Garvey
Jean-Daniel Berst
Louis Dumoulin
Marc Winter
Laurent Pinard
Olivier Callot
François Etienne
Hélène Rozelot





TRANSFERTS DE TECHNOLOGIE

La recherche fondamentale en physique subatomique effectuée en son sein a amené l'IN2P3 à déployer une activité instrumentale très importante et probablement unique au sein du CNRS. Or la conception des instruments, aussi bien des accélérateurs que des détecteurs de particules, fait appel à des technologies parmi les plus modernes.

Les compétences ainsi développées ont donc tout naturellement conduit l'Institut à effectuer des transferts de technologies dans des domaines très divers, allant du circuit intégré analogique destiné à être monté directement derrière un capteur à des dispositifs complexes comme les sources d'ions intégrant un grand nombre de techniques. Il n'en reste pas moins que la relation entre ces compétences et les besoins de la société est difficile à établir. L'Institut a cependant nettement progressé dans ce domaine puisque la période couverte par ce rapport d'activité a vu les ressources issues de cette collaboration avec le monde industriel se multiplier par trois.

Sur ce terrain du transfert de technologie, il ne s'agit pas pour l'Institut de concurrencer l'industrie, mais au contraire d'aider les industriels à acquérir les technologies qui leur sont nécessaires dans le contexte actuel de compétition mondiale, ou, plus prosaïquement, de proposer à des industriels ou à des collectivités des prestations que seul l'Institut est capable d'offrir en raison de la technicité mise en jeu. Les technologies peuvent aussi être transférées vers les laboratoires de recherche d'autres disciplines qui ne disposent pas du savoir-faire nécessaire.

Un grand nombre de techniques sont valorisables au sein de l'Institut, qu'il est possible de regrouper en quatre grands domaines.

LA TECHNOLOGIE DES ACCÉLÉRATEURS

La technologie des accélérateurs est certainement la plus ancienne que l'Institut ait développée.

Ces dernières années ont vu la réalisation, dans le cadre d'un contrat entre l'université Paris XI et le LAL, de l'accélérateur Elyse, une technologie à la pointe de la modernité: les caractéristiques temporelles de son faisceau permettent désormais aux chimistes de l'université d'étudier en direct la cinétique de réactions. En ce qui concerne l'hadronthérapie, deux conventions sont en cours: avec le Centre de protonthérapie d'Orsay pour l'implantation d'un bras isocentrique de traitement des malades, qui permettra d'utiliser la pleine énergie de l'accélérateur existant, et avec l'université Claude-Bernard Lyon I pour l'étude de l'avant-projet sommaire d'un centre de traitement par hadronthérapie.

Mais l'application qui mérite d'être mise en exergue est certainement celle concernant les sources d'ions. Les efforts de R&D et la compétence de l'équipe grenobloise ont en

◀ *SuperNanogan, la plus grande source d'ions à haut état de charge ECR (résonance électronique cyclotronique).*
© Pantechnik

La valorisation des sources d'ions.
page 128



de gauche à droite :

Une réalisation de C4I : le traitement du signal d'un élément à effet Hall destiné à un capteur de position pour les moteurs (SNR Roulements).
© C4I

Appareils portatifs de contrôle en radioprotection.
© CNRS/IN2P3

effet permis à l'Institut d'occuper une place de premier rang dans ce domaine. La valorisation des ressources de l'Institut a principalement été assurée par la société Pantechnik, filiale d'Eurisys Mesures. Disposant de compétences propres, celle-ci a signé des contrats de recherche avec l'IN2P3 pour le développement de sources d'ions lourds. Les résultats commerciaux de Pantechnik sont notables et de forts espoirs existent en Inde et aux États-Unis.

L'ÉLECTRONIQUE

L'Institut s'est également taillé une bonne réputation dans le domaine de la conception de circuits intégrés analogiques-numériques.

Les transferts de technologie développés au sein des laboratoires se font soit en direction d'autres laboratoires, soit en direction du monde industriel. Quand des circuits développés pour une expérience sont demandés par d'autres laboratoires, ils font l'objet d'un contrat, quelques améliorations de moindre importance pouvant être apportées le cas échéant. Mais quand un industriel est intéressé par un circuit - plus d'ailleurs par le concept inventif qui est à la base de son développement que par le circuit lui-même -, cela donne lieu à des développements beaucoup plus importants qui ne peuvent être entrepris qu'à travers C4I (Centre de compétences en conception de circuits intégrés). Créé en 1992, ce GIP a pour vocation de valoriser les compétences en microélectronique des laboratoires de l'IN2P3 en diffusant leurs innovations vers l'industrie pour des produits de grande consommation. L'exemple le plus frappant est en cours : il concerne la valorisation, en collaboration avec un industriel très connu de la mesure, du circuit « pipeline analogique » développé pour l'expérience Atlas, et qui permet, sur un même circuit intégré, le stockage dynamique de microcharges sur microcapacités et leur traitement numérique. Le but premier de C4I, à sa création, était d'aider les industriels à franchir le pas de l'introduction de microélectronique dans leurs produits : cette mission est un succès.

Au-delà du circuit proprement dit, il y a le capteur. L'IN2P3 poursuit une activité importante de valorisation dans le domaine de l'imagerie, qui a conduit au développement de nombreux imageurs employant un grand nombre de techniques, de la chambre à fils aux pixels Cmos. Ce dernier secteur est probablement celui où les actions les plus innovantes sont en cours, l'intégration d'électronique et de pixels de détection sur une même puce étant une amélioration incontestable.

LA MESURE DES TRÈS FAIBLES DOSES DE RADIOACTIVITÉ

Le savoir-faire acquis par l'IN2P3 dans le domaine de la mesure des très faibles doses de radioactivité découle de ses activités dans la branche des accélérateurs (élaboration de blindages et surveillance des sites).

Une demande pour des mesures de ce type se développe en provenance des collectivités locales et des intervenants dans la gestion des déchets. Plusieurs laboratoires de l'IN2P3 disposent de fortes compétences dans ce domaine, reconnues par un agrément



C4I : Centre de compétences en conception de circuits intégrés.
page 129

La mesure des faibles radioactivités.
page 130

de l'Opri (Office de protection contre les rayonnements ionisants). Subatech est moteur de cette activité et a obtenu l'accréditation Cofrac (Comité français d'accréditation). D'autres laboratoires de l'IN2P3 devraient à leur tour obtenir cette reconnaissance de qualité. La mise en place d'un réseau regroupant le savoir-faire des équipes et permettant de répondre à la forte demande sociale est à l'étude.

LA CRÉATION D'ENTREPRISES

Ganil et Normandie-
Incubation.
page 131

Dans le domaine de la création d'entreprises, l'IN2P3 se révèle un partenaire nettement plus prolifique que ses sujets très fondamentaux de recherche ne pourraient le laisser prévoir.

Ganil, laboratoire commun CNRS(IN2P3)/CEA, s'est ainsi révélé un élément moteur dans la mise en place de l'incubateur Normandie-Incubation dont les trois membres fondateurs sont Ganil, l'Université de Caen et l'Ismra. Le but d'un incubateur est de fournir aux futurs entrepreneurs désirant créer une entreprise toute l'infrastructure et l'aide nécessaires pour le faire, et notamment pour aborder les organismes prêts à financer leur projet. Normandie-Incubation, qui s'attend à accueillir d'autres partenaires, représente donc un rouage essentiel de l'effort de création d'entreprises.

À l'opposé, l'Institut a aussi vu éclore des vocations de créateurs d'entreprises.

Véritable start-up de la nouvelle technologie, Inup a été créée par Ugo Delchini du LPNHE de Paris au début de l'année 1999 pour développer et diffuser des solutions de serveurs Internet à base de clusters (travail simultané et à une même tâche de plusieurs calculateurs) sous Linux. Le fort intérêt des produits de cette entreprise a conduit la société américaine Linéo, filiale de Motorola, à en prendre le contrôle quelques mois après sa création. Aujourd'hui, la structure française dont Ugo Delchini est le P-DG emploie vingt personnes et devrait réaliser un chiffre d'affaires supérieur à 10 MF.

Lauréat du concours Allègre en 1999, Rainer Siebert de l'INP d'Orsay a développé un séquenceur d'ADN multicapillaire dont les performances sont significativement meilleures que celles des technologies concurrentes actuelles. Créée en décembre 1999 avec le concours de subventions de l'Anvar et du Génoscope d'Évry, cette deuxième tentative s'est malheureusement heurtée à des problèmes réglementaires dans lesquels la frilosité le disputait à l'absurde.

Une start-up
pour le séquençage
de l'ADN.
page 132

Bien d'autres domaines de transfert de technologie mériteraient d'être cités, en particulier celui du logiciel, les produits architecturés et écrits au sein de l'IN2P3 ou dans les collaborations constituant des éléments logiciels valorisables. Cela concerne aussi bien des logiciels de type « Cristal », un logiciel de suivi de production développé pour l'expérience CMS et permettant une traçabilité complète de produits de grande série, que d'autres logiciels écrits au Centre de calcul et s'intéressant à la gestion de masses importantes de données. Ces dernières applications sont probablement porteuses d'avenir si l'Institut sait faire l'effort de leur promotion, ce qui n'est pas forcément simple.

LA VALORISATION DES SOURCES D'IONS

Diverses technologies sont spécifiquement développées à l'IN2P3 pour répondre aux besoins de la recherche. Parmi elles, les sources d'ions, dont les usages potentiels sont multiples, intéressent nombre de chercheurs. L'une d'elles a même donné lieu à un véritable transfert vers l'industrie.

Source Phoenix développée dans le cadre des études menées sur Spiral pour la production de faisceaux exotiques et faisant l'objet d'une valorisation auprès des grands projets étrangers d'ions radioactifs.
© Pantechnik

Les sources d'ions lourds multichargés sont développées dans le cadre de la physique des accélérateurs pour les besoins précis de l'IN2P3. Mais, du fait de leur polyvalence, elles font souvent l'objet de valorisation auprès d'autres accélérateurs, d'utilisateurs de faisceaux de basses énergies, voire d'industriels comme ceux de l'implantation ionique pour la microélectronique.

L'exemple le plus caractéristique est celui de la famille des sources Nanogan qui fait l'objet d'un transfert de technologie en direction de la société Pantechnik, laquelle en assure la diffusion dans le monde entier.

L'objectif initial était de tester le principe de la production en ligne d'ions radioactifs multichargés pour le projet Spiral, un ensemble de production et d'accélération de faisceaux exotiques. Il s'agissait donc de construire une source ECR (*electron cyclotron resonance*) qui soit très compacte et très peu coûteuse, une source jetable en quelque sorte. Le prototype Nanogan a été mis au point. Après avoir été testé et avoir donné lieu à la version finale du système de production sur Spiral, il a ouvert la voie à de nombreuses autres possibilités d'utilisation de telles sources. Les sources ECR peuvent en effet être utilisées dans les lignes de faisceaux simplifiées pour la physique atomique, dans les injecteurs sur plate-forme THT (très haute tension) ou même dans les injecteurs des machines électrostatiques comme les Tandem ou les Van De Graaf.

Enfin, toute une famille de sources développée par Pantechnik est née du prototype Nanogan: SuperNanogan, Microgan ou Microgan «Industrie». C'est cette dernière qui fait l'objet d'une étude spécifique par un grand fabricant du domaine de l'implantation, en vue de son utilisation à échelle industrielle pour la microélectronique.

Certains technologies, pouvant donner lieu à de nombreuses applications, font aussi l'objet de valorisation avant même d'être mises au point. C'est le cas, par exemple, de la source Phoenix «Booster» développée pour l'augmentation en charge des faisceaux d'ions sur Spiral. Du fait de ses propriétés d'adaptation à n'importe quel type de faisceaux d'ions injectés, elle intéresse la plupart des laboratoires impliqués dans les faisceaux radioactifs. Le Rutherford Laboratory a été le premier à s'équiper de cette source.

Certains technologies, pouvant donner lieu à de nombreuses applications, font aussi l'objet de valorisation avant même d'être mises au point. C'est le cas, par exemple, de la source Phoenix «Booster» développée pour l'augmentation en charge des faisceaux d'ions sur Spiral. Du fait de ses propriétés d'adaptation à n'importe quel type de faisceaux d'ions injectés, elle intéresse la plupart des laboratoires impliqués dans les faisceaux radioactifs. Le Rutherford Laboratory a été le premier à s'équiper de cette source.

POUR EN SAVOIR PLUS

C. Bieth, J.L. Bouly, J.C. Curdy, S. Kantas, P. Sortais, P. Sole, *et al.*, ECRIS for high currents of mono and multicharged ion and general purpose unlimited lifetime application on implantation devices, *Review of Scientific Instruments*, Vol.71, Num 2, Feb. 2000.

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: ISN.

CNRS/CEA: Ganil.

C4I: CENTRE DE COMPÉTENCES EN CONCEPTION DE CIRCUITS INTÉGRÉS

Créé en région Rhône-Alpes sur la base d'un partenariat entre le CNRS/IN2P3 et un groupement d'industriels afin de valoriser certains travaux de microélectronique réalisés au sein de laboratoires de l'IN2P3, le C4I a depuis lors réussi à intéresser de nombreux industriels.

Dans le cadre de la valorisation de ses compétences, l'IN2P3 a créé en 1992 le Centre de compétences en conception de circuits intégrés ou C4I, un groupement d'intérêt public (GIP) entre le CNRS(IN2P3) et GIE Industriel. Ce GIP a pour vocation de diffuser, en France, l'innovation en microélectronique dans les produits de grande consommation. Son activité principale consiste donc à accompagner les industriels pour l'intégration d'Asic (circuits intégrés développés pour un usage particulier) dans leurs produits (essentiellement grand public à faible coût).

Le C4I a ainsi contribué à sensibiliser nombre d'industriels peu familiers avec la microélectronique et à faire émerger une dynamique régionale. Charnière entre le monde de la physique (capteurs) et le monde du numérique, les Asic analogiques mixtes sont en effet stratégiques pour beaucoup d'industriels. Appréciée et reconnue comme pertinente, l'offre du C4I a permis à des PME d'accéder aux technologies et de concevoir des Asic mixtes en les aidant à assumer les investissements en ressources techniques, financières et humaines à travers la mutualisation des moyens. La R&D au C4I a été, pour les industriels, un élément critique du développement d'applications et de produits nouveaux. Enfin, les relations du C4I avec les laboratoires de l'IN2P3 ont permis un transfert essentiel d'innovations vers les industriels, qui ont contribué en retour à la valorisation des travaux de recherche de ces laboratoires.

Le projet du C4I est de renforcer sa mission de service public auprès des PME en capitalisant son expérience et en renforçant sa position de spécialiste de la conception d'Asic analogiques mixtes en relation avec les laboratoires, en particulier avec ceux de l'IN2P3. Ce projet passe par deux actions majeures. Tout d'abord, le C4I entend développer des collaborations encore plus étroites avec les laboratoires de recherche (CNRS, Leti, etc.) et les organismes de la région Rhône-Alpes (Aratem, etc.) pour valoriser les travaux de recherche et rendre les technologies accessibles à travers, par



*Une réalisation de C4I: un circuit intégré destiné à l'électronique de pesage (Tefal).
© C4I*

exemple, la formalisation de blocs IP analogiques. En parallèle, il entend contribuer au développement d'activités de R&D en réponse à la demande des industriels. Pour cela, il collabore avec des centres spécialisés (en particulier Thésame: pôle technologique mécatronique et management pour PME, mis en place par le conseil général de Haute-Savoie), avec des laboratoires et, sur des thématiques spécifiques, avec les industriels demandeurs. Ces derniers se sont engagés financièrement dans ce sens.

Le GIP C4I a été renouvelé pour quatre ans le 10 octobre 2000 par arrêté ministériel. Un accord de collaboration concernant les PME/PMI a été signé avec le Leti.



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www.c4i.fr>

LABORATOIRES DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3 : LAPP, LAL, IPN Orsay, Lepsil, ISN, CPPM, LPC Clermont.
Cern.

LA MESURE DES FAIBLES RADIOACTIVITÉS

Pour répondre à la demande sociale grandissante de mesures de radioactivité effectuées de manière fiable et par des organismes indépendants, la direction de l'IN2P3 s'est engagée dans la création d'un véritable réseau de laboratoires capables d'y répondre. Subatech, un laboratoire en pointe dans ce domaine, a déjà reçu l'accréditation Cofrac (1). L'IREs effectue les travaux nécessaires à son obtention.

Créé en partenariat avec l'École des mines de Nantes, le service Smart du pôle radiochimie de Subatech a été accrédité, il y a plus de deux ans et demi, par le Cofrac pour des analyses d'échantillons d'eaux par des techniques de comptages α T et β T et de spectrométries α et γ . Il a aussi reçu deux certificats de qualification technique du ministère de la Santé, portant l'un sur la mesure des émetteurs α des chaînes naturelles de l'uranium et du thorium, et l'autre sur celle des émetteurs β - γ et β purs.

Destiné aux mesures de radioactivité dans l'environnement, en particulier autour des installations nucléaires de base (INB), Smart est aujourd'hui majoritairement impliqué dans des interventions liées à des inventaires radiologiques en INB. Il participe également au contrôle d'anciens sites miniers uranifères et d'anciens laboratoires potentiellement contaminés, et fait partie du groupe de travail de

mesure du radon dans les Pays-de-la-Loire. Enfin, il coopère au réseau européen de laboratoires de métrologie nucléaire (Eugram) créé en 2000.

Les démarches nécessaires à la mise au point de protocoles de mesure de nouveaux radio-isotopes, généralement émetteurs β ou X, ont été engagées avec, notamment, l'étude de l'acquisition d'une chaîne de spectrométrie X et l'utilisation de l'ICP-MS. Une nouvelle technique de détermination du radium-226 par spectrométrie α a également été élaborée. Enfin, dans le cadre du contrôle des déchets destinés au futur site de stockage des déchets de très faibles activités, une étude a été menée sur la qualification de la Cellule de mesure automatique des déchets de faible activité (Cadefa), un appareil qui pourrait être utilisé pour la mesure non destructive des radioéléments émetteurs γ de certains colis de déchets issus des INB: les savoir-faire en modélisation ont été acquis et la méthode de calibration de la mesure fixée.

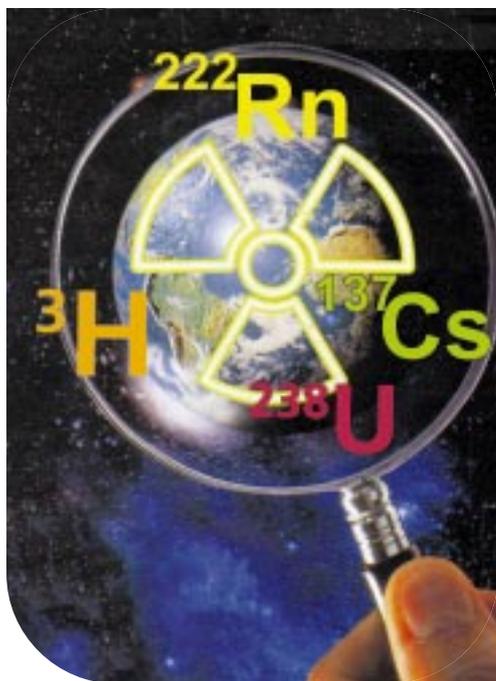
Ramses, le groupe de radioprotection et mesures environnementales de l'IREs, a été créé en 1996 avec le soutien de l'IN2P3 et la présidence de l'université Louis-Pasteur (ULP). Sa mission est l'ouverture vers la société, et le développement de techniques de métrologie nucléaire et de leurs applications. Il s'est engagé dans une démarche d'accréditation par le Cofrac pour l'analyse de radionucléides dans l'environnement. Ses activités s'organisent autour de trois axes:

- radioprotection des installations de l'IREs et de l'ULP, dosimétrie individuelle réglementaire, contrôle et gestion des sources et des déchets radioactifs du site;
- mesure et analyse de la radioactivité naturelle et artificielle, expertises radiologiques sur site, développement de techniques d'analyse multiélémentaires (Pixe, XRF), application de la thermoluminescence pour la datation archéologique;
- caractérisation et mise en application de détecteurs solides de traces nucléaires et de détecteurs photostimulables, développement d'un dosimètre opérationnel par les capteurs Cmos.

Son savoir-faire s'est affirmé notamment dans les expertises radiologiques sur site et les mesures de radon dans l'habitat, les établissements recevant du public et les sites industriels.

(1) Comité français d'accréditation.

Analyses et mesures de la radioactivité et d'éléments traces dans l'environnement.
© CNRS/IN2P3



POUR EN SAVOIR PLUS

<http://www.smart-subatech.com>

<http://ireswww.in2p3.fr/ires/recherche/ramsес/index.html>

M.B. Mokili, Dosage de Sr-90, Ni-63 et Fe-55 dans les bétons par scintillation liquide, *Eichrom Users' Group Meeting*, 2000, Paris.

GANIL ET NORMANDIE-INCUBATION

Créés à l'initiative du ministère de la Recherche, les incubateurs sont des structures visant à accueillir et à accompagner, en termes de formation, de conseil et de financement, toutes les personnes porteuses d'un projet de création d'une entreprise innovante, afin de les aider à passer de l'«idée» à la réalisation proprement dite. En janvier 2001, il existait 29 incubateurs. L'un d'entre eux, dans la région Basse-Normandie, est porté par l'Université de Caen, le Ganil et l'Ismra.

Le 2 mars 2000, les trois partenaires associés au projet d'incubateur d'entreprises technologiques, l'Université de Caen, l'Ismra (Institut des sciences de la matière et du rayonnement, école d'ingénieurs) et le Ganil (Grand accélérateur national d'ions lourds) recevaient l'agrément du ministère de la Recherche. Le 26 juillet 2000, l'incubateur Normandie-Incubation voyait le jour sous la forme d'une association loi 1901, avec vocation à se transformer en GIP (groupement d'intérêt public) dans les deux ans.

Normandie-Incubation est installée à Caen, provisoirement dans les locaux du Ganil. Son bureau est constitué du président de l'Université et des directeurs du Ganil et de l'Ismra.

Deux instances jouent un rôle important:

- le comité de sélection: composé de représentants des milieux économiques, il propose au bureau de l'association les projets pouvant être retenus;
- le comité de pilotage: il regroupe l'ensemble des partenaires de l'incubateur (conseil régional, préfecture, Anvar, DRRT...) et examine les questions d'ordre général (modalités des soutiens, cohérence régionale, évolution du statut...).

L'incubateur a vocation à accueillir d'autres membres, tous acteurs du développement scientifique et technologique de la région Basse-Normandie comme Ispa (Institut supérieur de plasturgie) à Alençon, Intechmer à Cherbourg, ou bien encore à Caen, Cycéron, le Cnet, ou le Centre anticancéreux Baclesse.

Il a noué des relations très fortes avec les structures régionales agissant dans le domaine de la création d'entreprises: la technopôle de Caen, la couveuse d'entreprises de l'Université, les plates-formes d'initiatives locales, le réseau régional de transfert de technologies...

Son budget d'environ 4,4 MF par an est alimenté par la subvention du ministère de la Recherche (3,5 MF sur trois ans), par les fonds européens (Fonds européen pour le développement régional et Fonds social européen), ainsi que par une aide très importante de la région Basse-Normandie (3,2 MF sur trois ans). Il est destiné à soutenir tout autant les créateurs que les structures. L'Anvar accompagne par ailleurs les projets retenus par l'incubateur. Les trois partenaires participent également sous diverses formes au financement de l'incubateur (3,5 MF sur trois ans).

Normandie-Incubation s'est fixé l'objectif de créer quinze entreprises technologiques d'ici à trois ans. Quatre premiers projets ont été sélectionnés en décembre 2000: valorisation des déchets celluloseux, conception de nouveaux systèmes mobiles d'information, développement et industrialisation de capteurs optiques innovants, mise en place d'une écloserie d'ormeaux.

UNE START-UP POUR LE SÉQUENÇAGE DE L'ADN

Le séquenceur à haut débit de l'ADN développé à l'IN2P3 entre 1996 et 1998 fait aujourd'hui l'objet d'un transfert industriel. Créée en 1999, la toute nouvelle société OptiGene est désormais chargée de la commercialisation, auprès des grands centres de séquençage, de son prototype industriel.

La connaissance du code génétique est un élément clé pour mieux comprendre les implications des gènes dans le fondement et l'évolution d'un grand nombre de maladies. Or un nouvel instrument pour le séquençage de l'ADN a été développé ces dernières années au sein du groupe Interfaces Physique Biologie de l'IPN d'Orsay et se trouve aujourd'hui en cours de transfert industriel. Cet instrument utilise une nouvelle technique de lecture du code génétique contenu dans la longue suite de nucléotides (séquence) constituant la molécule d'ADN.

Cette équipe a commencé à s'intéresser au séquençage de l'ADN vers la fin des années 1980, alors qu'elle possédait déjà des compétences en imagerie 2D et dans le domaine de la migration sous champs électriques de molécules d'ADN dans des gels. Le développement proprement dit d'un nouveau séquenceur à haut débit n'a cependant démarré qu'en 1996. Basé sur l'électrophorèse capillaire, il permet la séparation des molécules d'ADN en parallèle dans une centaine de canaux. Ses bonnes performances résultent de deux innovations: le système d'imagerie original, développé à l'IPN d'Orsay, et un nouveau polymère, déterminant pour la séparation des molécules d'ADN, mis au point par une équipe de l'Institut Curie.

Très rapidement, ce démonstrateur a intéressé les utilisateurs des grands centres de séquençage et, en 1999, son industrialisation a été décidée. La société OptiGene a été créée, et une collaboration entre le Centre national de séquençage, l'IPN d'Orsay, l'Institut

Curie et la toute nouvelle société a été mise en place. Un prototype industriel a été réalisé qui se trouve actuellement dans sa dernière phase de mise en route. Toute cette période de R&D a pu être menée au sein de la collaboration. L'intervention de différents services de l'IPN d'Orsay a été déterminante pour étudier et réaliser la partie optique (SMR), concevoir les logiciels de traitement (SII), et développer une technologie de collage, propre et reproductible, de réseaux de cent capillaires (SD).

Dans le même temps, il a fallu également préparer la future vie commerciale de la société, c'est-à-dire faire une étude de marché, établir un business plan, trouver un business développeur et rechercher des fonds. Le montage financier de la société a pu être réalisé grâce au capital initial, à l'investissement du Génopôle d'Évry et à l'aide de l'Anvar. Passages non obligés mais très profitables, le fondateur de la société, Rainer Siebert, a participé au concours de la création d'entreprises dans la catégorie « Émergence », dont il a été lauréat, ainsi qu'à la formation « Challenge + » d'HEC. Le projet a été intégré dans le Génopôle d'Évry. Les carnets d'adresses d'HEC et du Génopôle ont été très utiles pour trouver et profiter des services de professionnels, dans des domaines (juridique, gestion, étude de marché, propriété industrielle et levée de fonds) qui ne sont pas de la compétence d'un scientifique.

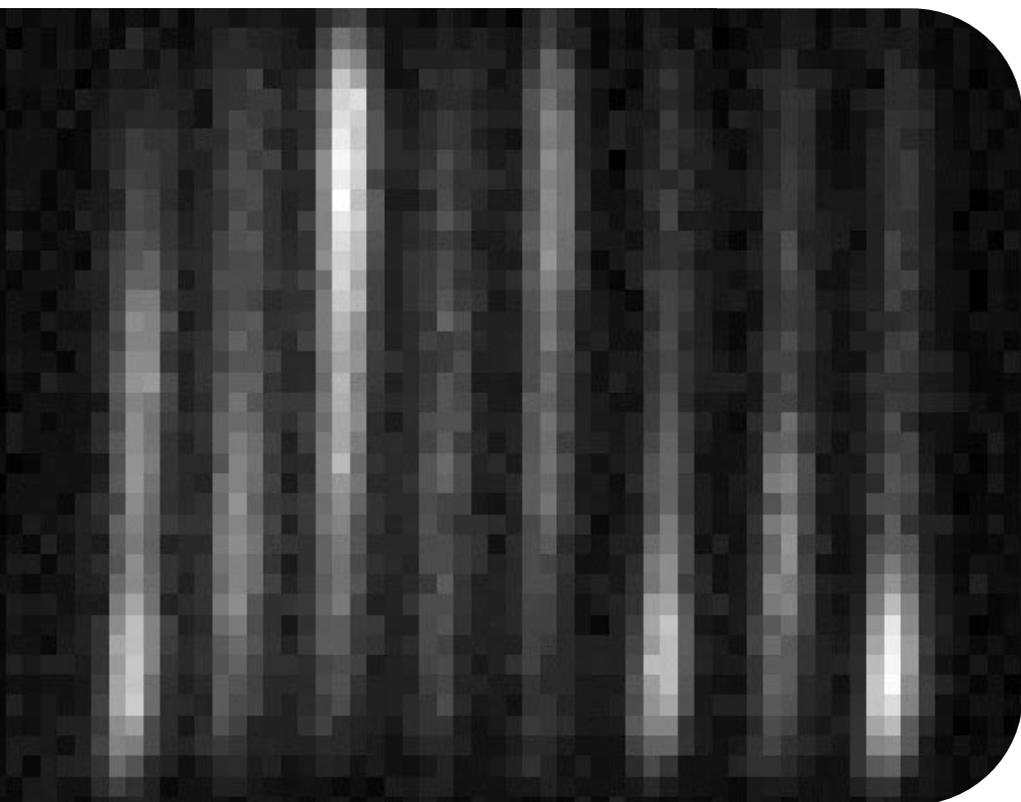
Dans le futur, R&D et commercialisation continueront à se poursuivre de concert.

*Le prototype industriel de séquençage de l'ADN.
© CNRS/IN2P3*



POUR EN SAVOIR PLUS

E. Guerry *et al.*, A numerical study of persistence length effects on DNA conformation in sequencing electrophoresis, *Electrophoresis*, 17 (1996) 1420.
Z. Djouadi *et al.*, Mobility and activation energy of single stranded DNA in denaturing cross-linked polyacrylamide slab gel, *Journal of Chromatography A*, 894 (2000) 231.



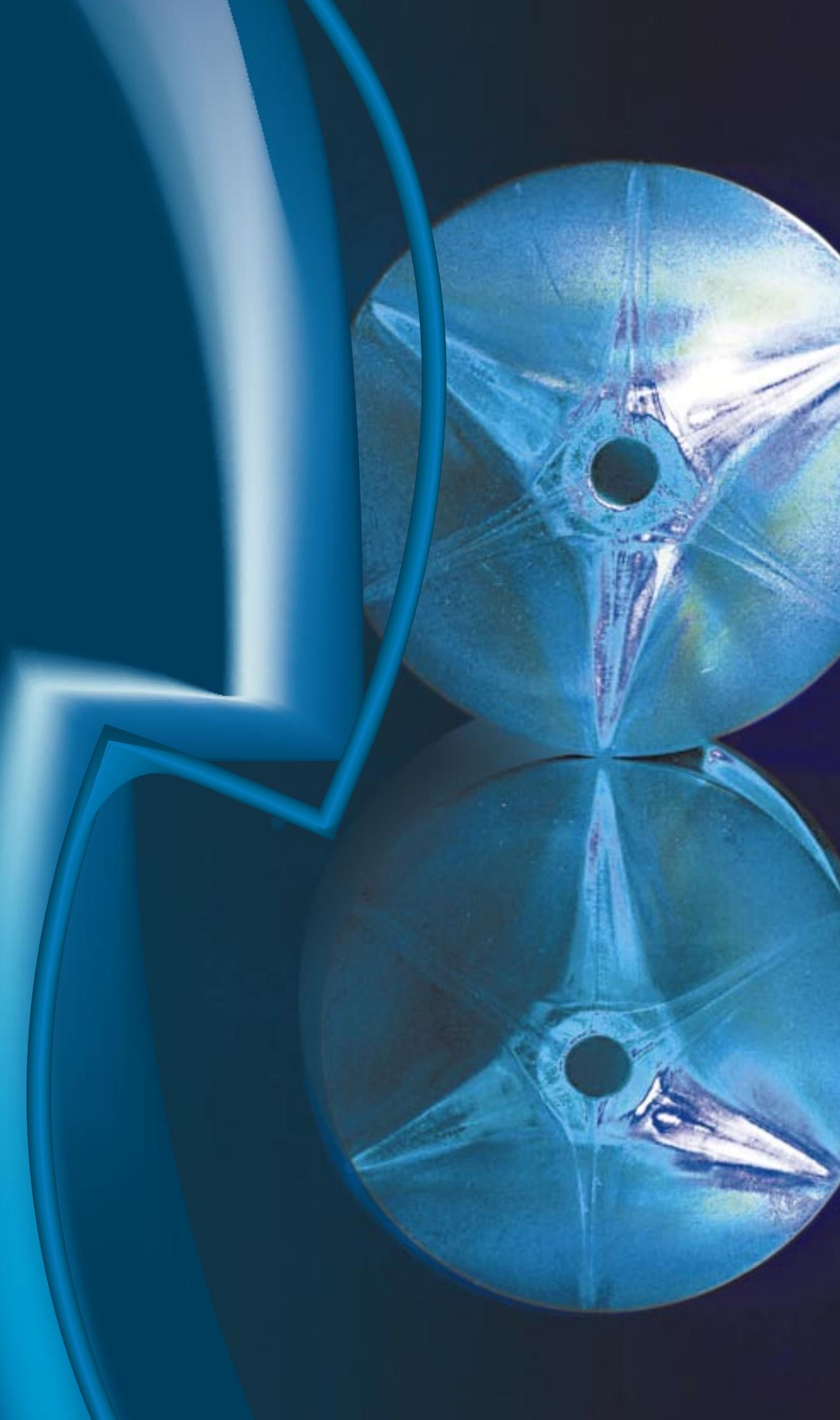
Vue axiale de sortie de huit capillaires : les bases marquées émettent dans une longueur d'onde spécifique fonction de la nature de la base (sur l'image, la position de la tache lumineuse est d'autant plus haute que la longueur d'onde émise est grande). Distance entre deux capillaires : 200 μ . Hauteur totale de l'image : 90 nm correspondant à une résolution de 5 nm environ.

REMERCIEMENTS

Introduction
François Dupont

Pascal Sortais
Jean-Michel Thénard
Bernd Grambow
Abdelmjid Nourreddine
Laurent Beauvais
Rainer Siebert

PARTENARIATS





l'action internationalepage 136

l'IN2P3 et l'enseignementpage 138

la communication et l'information scientifique et technique ..page 140

L'ACTION INTERNATIONALE

Dès sa création, l'IN2P3, par la dimension de ses programmes le plus souvent internationaux, a été naturellement conduit à soutenir les coopérations multilatérales et à participer à la construction de l'espace européen de la recherche. L'existence du Cern en physique des particules est ainsi symbolique d'une première étape réussie dans la construction de l'Europe de la science. Plus récemment, au début des années quatre-vingt-dix, les physiciens nucléaires ont ressenti la nécessité d'une réflexion prospective sur leur discipline, et c'est ainsi qu'est né NuPECC, le Comité européen de collaboration en physique nucléaire.

L'importance attachée à la dimension internationale de l'Institut et à ses relations avec nombre d'institutions de pays étrangers n'a fait que se renforcer au cours du temps.

Dans la période 1998-2000, les accords de coopération signés par l'Institut avec des partenaires privilégiés ont été maintenus à un niveau élevé et, en septembre 1999, l'IN2P3 a même signé un nouvel accord-cadre avec l'Institut de physique théorique et expérimentale (Itep) de Moscou pour élargir son champ de collaboration avec ce dynamique laboratoire russe, très impliqué notamment dans les expériences Nemo et Antares.

Les échanges initiés au titre des accords de coopération ont souvent été le fer de lance de programmes plus ambitieux utilisant les outils mis en place par la Direction des relations internationales du CNRS, tels que programmes internationaux de coopération scientifique (Pics), jumelages et laboratoires européens associés (LEA). Ces outils sont maintenant très prisés par les chercheurs, du fait de leur souplesse de gestion mais aussi en raison des financements qui encouragent les rencontres entre équipes.



Au cours des trois dernières années, une quinzaine de nouveaux programmes internationaux de coopération scientifique ont été mis en place portant à 35 le nombre d'actions financées pendant cette période et à près d'une soixantaine celles initiées depuis la création de ce type de coopération, reconnu et soutenu au niveau tant ministériel qu'international.

Ces actions ont permis de dynamiser les collaborations avec des équipes étrangères sur la base d'un équilibre de moyens humains et/ou financiers, de renforcer la présence des pays d'Europe centrale et orientale, particulièrement la Russie, dans les grands programmes auxquels participe l'Institut et parfois même d'ouvrir ces programmes aux pays du Maghreb; citons notamment la coopération du Maroc à la construction du détecteur Atlas au Cern.

Deux laboratoires européens associés ont été mis en place récemment, l'un avec l'Instituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Legnaro pour une coopération bilatérale franco-italienne en structure et réactions nucléaires, l'autre avec l'Institut Max Planck de physique nucléaire de Heidelberg (MPIK) de la Max Planck Gesellschaft (MPG) pour une action bilatérale franco-allemande sur l'astronomie gamma des hautes énergies.

Les programmes communautaires du cinquième programme cadre recherche et développement (PCRD) ont également été exploités, notamment le programme Euratom « fission nucléaire », les actions de formation par la recherche, qu'il s'agisse de l'accès aux grandes installations et des programmes de R&D associés ou des bourses Marie-Curie. L'IN2P3 va aussi jouer un rôle moteur dans le projet Datagrid pour le calcul réparti à grande échelle impliquant de gros volumes de données.

Grâce à toutes ces actions, les accueils dans les laboratoires ont été largement soutenus. Environ 120 chercheurs (post-docs ou confirmés) de nationalité étrangère ont été accueillis annuellement pour des séjours de longue durée et 300 autres sont venus pour des séjours de courte durée s'inscrivant dans le cadre de programmes conjoints, régulièrement examinés en comités mixtes.

La dimension internationale de l'IN2P3 en 2000

119 chercheurs étrangers (post-docs ou confirmés)

449 mois d'accueil = 7,1 MF

12 conventions bilatérales d'échanges, 16 Pics, 1 jumelage, 1 LEA

294 dossiers = 210 mois = 3 MF

Ressources propres contrats communautaires 6,4 MF

La Cellule de logistique internationale, créée pour résoudre au mieux les questions liées au transport des marchandises entre les laboratoires et les sites d'expérimentation, a poursuivi son action et développé des outils performants pour faciliter le dialogue entre fournisseurs et utilisateurs.

Elle a ouvert son propre site Web: <http://logistique.in2p3.fr/> pour assurer dans les meilleures conditions tout échange de matériels entre un laboratoire et son partenaire étranger, tout transport national, intra- ou extracommunautaire, tout affrètement particulier et toute opération d'import-export. Elle est également opérationnelle pour les questions douanières et la fiscalité des échanges. *Eliane Perret*

L'IN2P3 ET L'ENSEIGNEMENT



LES LIENS AVEC L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

Dès sa création, en 1971, l'IN2P3 a entretenu des relations étroites avec l'université. Celles-ci résultent en quelque sorte de l'acte fondateur de l'Institut: du fait des spécificités de la discipline, notamment du besoin de rationalisation, au niveau national, de la politique en équipements lourds du domaine, cet acte établissait la consolidation, au sein du seul IN2P3, de l'ensemble des moyens du CNRS et de l'enseignement supérieur consacrés à la physique nucléaire et des particules.

A partir de 1995, le CNRS a entamé un processus de contractualisation destiné à structurer et, par certains aspects, à clarifier ses relations avec les universités dans lesquelles ses unités sont implantées. A l'issue de ce processus, tous les laboratoires de l'Institut sont devenus des unités mixtes de recherche (UMR) fonctionnant selon les procédures élaborées en commun par le CNRS, la Direction de la recherche du ministère de la Recherche, la Conférence des présidents d'université ou la Conférence des directeurs d'écoles et formations d'ingénieurs ou encore les grands établissements de recherche, à l'exception du laboratoire national Ganil, doté du statut de groupement d'intérêt économique (GIE).

L'Institut est organisé en un petit nombre de laboratoires qui coordonnent en leur sein l'activité de nombreuses équipes, permettant ainsi la rationalisation du potentiel technique requis par la complexité de l'instrumentation dans ses domaines de recherche. L'implantation universitaire de l'IN2P3 ne couvre donc pas tout le territoire national. Pour remédier à cet inconvénient, un effort important est fait dans deux directions : créer partout où cela sera possible de nouvelles équipes de taille réduite dans des universités où l'IN2P3 n'est pas représenté - un premier exemple réussi est celui du Groupe d'astroparticules de Montpellier - et y promouvoir l'enseignement de la physique subatomique. Un groupe de réflexion, créé début 2000 sur ce thème, a formulé de nombreuses propositions, tant à l'adresse des tutelles que des enseignants-chercheurs des laboratoires de l'Institut.



L'OUVERTURE VERS L'AMONT DE L'ENSEIGNEMENT UNIVERSITAIRE

Depuis l'automne 1999, il existe à l'IN2P3 une structure de réflexion sur l'enseignement de la physique subatomique. Appelée Greps (Groupe de réflexion sur l'enseignement de la physique subatomique), elle est constituée d'un représentant par laboratoire de l'IN2P3, d'un représentant du Dapnia du CEA et de deux théoriciens.

Le Greps est une structure d'échange d'informations et d'expériences dans le domaine de l'enseignement des disciplines de la physique subatomique. C'est aussi un lieu de propositions d'actions pour en développer la diffusion, soit pour attirer des jeunes, soit pour assurer leur formation sur des sujets majeurs.

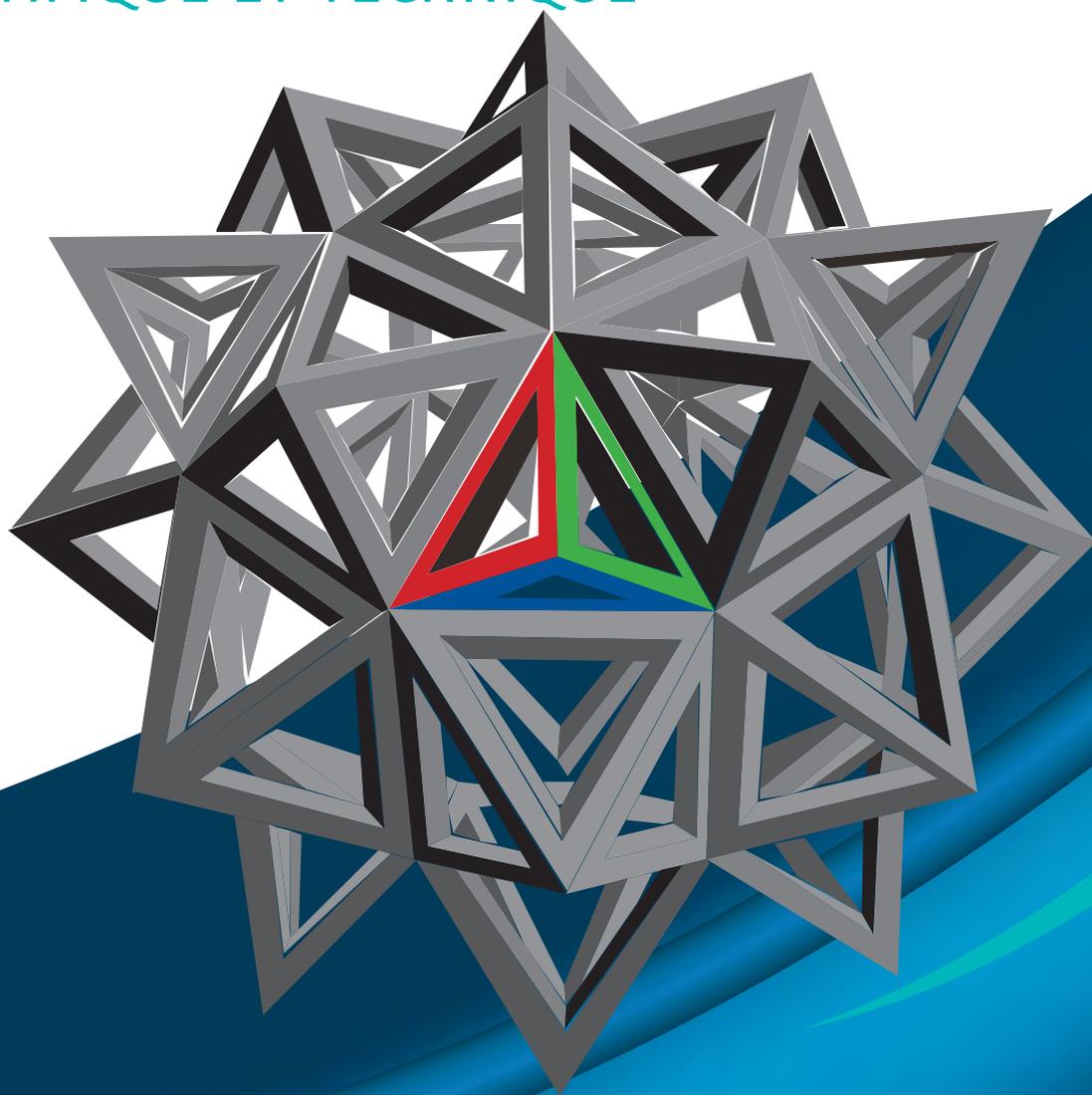
Le Greps a publié fin 2000 un document de synthèse de ses travaux. On y trouve une analyse de la désaffection actuelle des jeunes pour la physique, des propositions d'évolution des enseignements tant à l'université qu'en amont de l'université. Des programmes universitaires types sont proposés qui peuvent servir de canevas dans les diverses universités. Ces enseignements relèvent soit des connaissances de base (importantes pour tout scientifique, voire pour tout citoyen), soit de thèmes pluridisciplinaires auxquels la physique subatomique contribue, soit de domaines plus pointus débouchant sur la recherche. Des exemples de formations professionnelles sont aussi présentés.

Le Greps a entrepris plusieurs actions visant toutes à diffuser ces connaissances :

- la première vise les lycéens à travers leurs enseignants. Il s'agit de l'organisation d'écoles d'été de physique (appelées e2phy) traitant de questions de société majeures dans lesquelles la physique subatomique joue un rôle fort. Le premier thème choisi pour l'école 2001 a été celui de l'énergie. Un site Internet a été ouvert : <http://e2phy.in2p3.fr>
- la deuxième consiste à préparer et à proposer des séries de conférences à effectuer dans des lycées. Cette démarche avait déjà été initiée par le groupe Nepal qui avait préparé des conférences types sur des thèmes de recherche des laboratoires de l'IN2P3. Le Greps a étendu ces conférences aux implications de la physique subatomique dans le monde d'aujourd'hui (applications de la radioactivité, effets biologiques des rayonnements, problème des déchets nucléaires, problème des productions d'énergie).
- la troisième concerne la diffusion des connaissances dans les universités. Pour cela, le Greps s'implique dans le programme Ruca qui permet de mettre en ligne dans les universités des enseignements spécialisés avec exercices de contrôle. Des groupes de travail ont été constitués et des demandes budgétaires ont été faites à divers niveaux (Ruca, IN2P3, Europe) pour pouvoir financer des informaticiens chargés de réaliser les animations accompagnant les modules. Enfin, des actions ont été entreprises aux niveaux des universités, du ministère de l'Éducation nationale et de la Conférence des présidents d'université pour faire reconnaître le travail des jeunes enseignants-chercheurs qui ont accepté de s'y consacrer.

Bernard Tamain

LA COMMUNICATION ET L'INFORMATION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE



L'expression générique de communication et information scientifique et technique recouvre, à l'IN2P3, trois types d'activité différents :

- la communication proprement dite, à la Direction scientifique et dans les laboratoires ;
- une activité muséale et d'histoire des sciences au musée et archives Curie, Joliot-Curie ;
- la gestion de la base de données documentaires des publications et ouvrages « Démocrite ».



LA COMMUNICATION DE L'INSTITUT: OBJECTIFS ET RÉALISATIONS

Les objectifs qui ont guidé l'action du bureau de la communication au cours de ces trois années peuvent se décliner selon trois axes:

- faire connaître les résultats scientifiques de l'Institut par la diffusion de l'information scientifique et technique;
- participer, avec l'ensemble des autres départements scientifiques, au développement de la visibilité et de la lisibilité du CNRS;
- favoriser la circulation de l'information entre les différentes sous-disciplines et entre les différentes catégories de personnel.

Ces objectifs peuvent être illustrés par la description de quelques événements plus marquants.

Les expositions au Palais de la découverte

Au cours de l'année 2000, deux expositions ont été présentées au Palais de la découverte.

« Quand l'énergie devient matière »: élaborée par le Cern, cette exposition itinérante visitant tous les pays d'Europe a été organisée par le Palais de la découverte, en collaboration étroite avec l'IN2P3 et le Dapnia du CEA, du 2 juin au 2 octobre 2000.

Les trois institutions ont élaboré une dizaine de panneaux supplémentaires décrivant l'activité de la France au Cern. En clôture de l'exposition, une journée de conférences ouverte au grand public a été l'occasion de présenter les grandes questions actuelles de la physique subatomique; elle a été ponctuée par une discussion en direct avec le Cern en visioconférence et s'est terminée par une représentation théâtrale, *L'Oracle de Delphi*, créée par la compagnie Miméscope de Genève.

« La radioactivité, une facette de la nature »: cette exposition a été conçue par l'IN2P3, l'INFN, le GSI et l'Université technique de Vienne, dans le cadre de Pans (Physical Awareness in Nuclear Sciences), le groupe de communication de NuPECC. Elle a été financée par un contrat européen dans le cadre de la Semaine européenne de la science et de la technologie 2000. Organisée en trois grands modules, elle présentait les origines de la radioactivité et le rôle que sa découverte a eu dans le développement des sciences nucléaires (« La radioactivité et l'Univers »), puis mettait l'accent sur ses applications innombrables, tant dans le domaine de la santé et de l'environnement (« La radioactivité et la nature ») que dans celui de l'industrie, de l'énergie, de la recherche (« La radioactivité à l'ouvrage »). Elle s'est déroulée au Palais de la découverte du 6 novembre 2000 au 19 mars 2001.

La communication dans les établissements d'enseignement secondaire

Deux raisons président à l'action dans les lycées: d'une part, la participation à la formation des jeunes, moyen de restituer à la société ce que la recherche reçoit d'elle; d'autre part, le souci d'inciter les lycéens à s'orienter vers des études scientifiques, dans le contexte de désaffectation observé au niveau mondial.

C'est en 1996, à l'initiative de Claude Détraz alors directeur de l'IN2P3, qu'un groupe de physiciens a préparé cinq conférences types sur la physique subatomique, les Conférences Népal, que, depuis lors, des chercheurs vont régulièrement présenter dans des classes de lycées. Poursuivant cet effort, l'actuelle Direction de l'Institut a nommé Bernard Tamain chargé de mission pour les relations avec l'enseignement. À son initiative, un groupe de chercheurs prépare des conférences sur les applications de la radio-

activité, les effets biologiques des rayonnements, le problème des déchets nucléaires et celui des productions d'énergie (voir p. 139). Le bureau de la communication s'implique dans cette action afin d'apporter toute son aide, aux niveaux de la pédagogie et de la communication ainsi que sur le plan logistique.



Les relations avec les médias

Le bureau de la communication a un rôle quotidien de veille scientifique et de médiation, et notamment d'alerte des médias lorsque paraît un résultat scientifique marquant. Cela peut se faire par le biais de communiqués de presse ou d'articles dans *CNRS-Info*, publication mensuelle de la Délégation à l'information scientifique et technique (Dist) du CNRS.

De façon moins ponctuelle, l'IN2P3 participe avec la Dist aux « Transversales du CNRS », rencontres régulières avec la presse sur un thème transversal aux départements scientifiques du CNRS, lancées en 1999. L'IN2P3 a été à l'initiative de la première d'entre elles, autour de l'Observatoire Auger, et a participé à deux autres : l'une sur la perception du risque et l'autre sur les instruments de la physique au service de la biologie et de la médecine.

La communication interne

L'arrivée, fin 2000, d'une seconde chargée de communication a permis, entre autres, de mieux prendre en compte l'information des personnels de l'Institut, jusqu'à présent assurée par une *Lettre de département* à la périodicité aléatoire ! Sa première action a été de lancer une lettre électronique mensuelle, *Info-express*, dont le premier numéro a été adressé à tous les personnels répertoriés dans l'annuaire en février 2001.

La création d'un prix de la Communication, décerné en octobre 2000 lors des journées de prospective de l'IN2P3, avait pour but de promouvoir les activités de communication et de vulgarisation scientifique au sein de l'Institut. Il a été attribué à David Calvet, chercheur au CPPM, pour la création d'un site Internet « Voyage au cœur de la matière » (<http://marwww.in2p3.fr/voyage/>)

L'ACTIVITÉ DES LABORATOIRES

Chaque laboratoire de l'Institut dispose d'un responsable de la communication chargé de l'action locale et des relations avec le service de la communication de l'IN2P3. La plupart des laboratoires s'impliquent fortement dans les diverses manifestations de la fête de la Science (journées portes ouvertes, visites de classes, expositions...), qui amènent un public toujours plus important. Ces trois dernières années ont vu aussi fleurir plusieurs sites Web de laboratoires « relookés ».

Sur le plan de l'information scientifique et technique, la présentation des conférences Nepal dans les lycées a mobilisé nombre de chercheurs et un ouvrage collectif écrit à partir de ces conférences est en cours d'édition à CNRS-Éditions.

Au titre de réalisations plus ponctuelles, il faut noter une initiative particulièrement originale d'un chercheur du CPPM : le « Cosmophone ». Il s'agit d'une installation de détection et de restitution sonore, dans l'espace, des rayons cosmiques, qui a valu à son auteur, Claude Vallée, d'être lauréat du prix Création 1999 de la culture scientifique et technique, décerné par le ministère de la Recherche. Cette installation est actuellement en fonctionnement dans un espace « Astroparticules » à la Cité des sciences et de l'industrie. Par ailleurs, les laboratoires de Strasbourg et de Lyon ont accueilli durant

l'année 1998 l'exposition « Sur les traces de l'invisible » réalisée dans le cadre des vingt-cinq ans de l'Institut. Enfin, l'Institut de physique nucléaire d'Orsay a lancé, en février 2000, un nouveau journal destiné à accroître l'impact de la discipline et sa visibilité vis-à-vis de l'extérieur.

LE MUSÉE ET ARCHIVES CURIE, JOLIOT-CURIE

Les missions du musée Curie ont été déclinées durant les années 1998, 1999 et 2000 dans toute une série d'activités: gestion, conservation et mise à disposition des collections, information et documentation, conseil et orientation de publics professionnels, et, enfin, accueil des visiteurs du musée.

Rénové en 1996, le musée a connu des réaménagements jusqu'en 1999. Le nombre de ses visiteurs est en croissance. La gamme d'activités proposées s'est diversifiée par la mise en place de conférences-promenades et de parcours-enquêtes pour le jeune public.

Au cours de ces trois années, le personnel, les collections et les ressources documentaires ont été régulièrement sollicités dans le cadre d'événements culturels, d'expositions, de documentaires audiovisuels ou multimédia, portant sur des thématiques variées: les Curie, les Joliot-Curie, la radioactivité, l'histoire des sciences ou encore l'histoire des femmes. Le musée a ainsi largement contribué aux manifestations des centenaires de la découverte de la radioactivité et de la fondation des prix Nobel. Il a de plus réalisé et organisé l'exposition « Les rayons de la vie », une histoire des applications médicales de la radioactivité (1895-1930), qui s'est déroulée de septembre 1998 à février 1999 au Muséum national d'histoire naturelle.

LA BASE DOCUMENTAIRE DES PUBLICATIONS

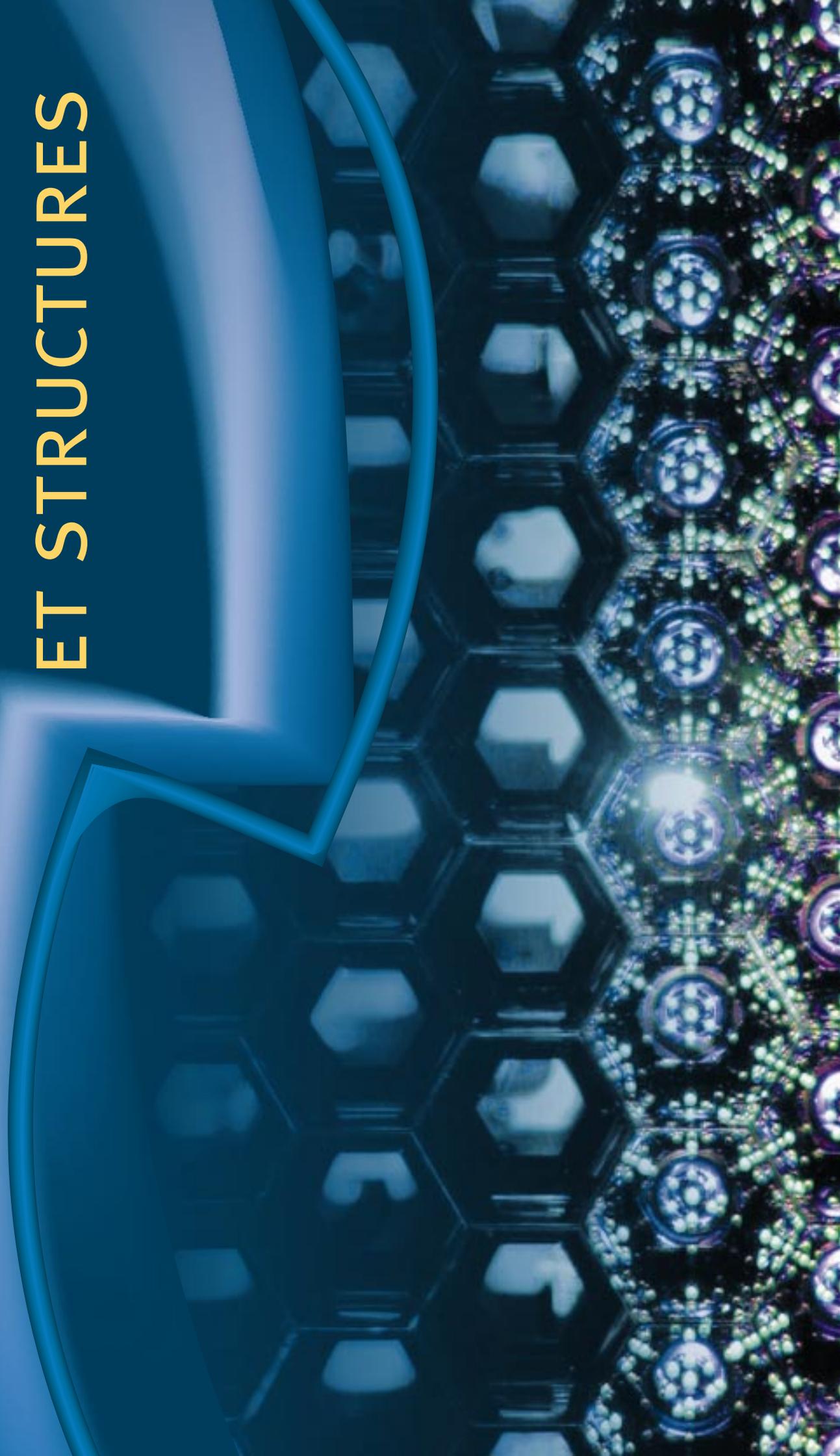
L'année 1998 a vu la mise en route du deuxième module de « Démocrite 2 », la base documentaire des publications des laboratoires de l'IN2P3. Les deux modules « Publications » et « Fonds documentaire » sont désormais accessibles sur le Web à partir de Netscape. Tous les types de documents sont répertoriés: les articles publiés, ainsi que les preprints, rapports, thèses, contributions et présentations aux conférences, et cours. Une attention toute particulière a été portée à la mise à disposition, en ligne, du texte intégral du document associé à sa notice descriptive. Les documents sont indexés selon la thématique Labintel. La finalité de cette base est de fournir à chaque chercheur, à chaque laboratoire ou aux autorités de tutelle un outil permettant une édition rapide de listes de publications, par chercheurs, par laboratoires, par thèmes scientifiques, par types de documents. Cette base accessible à tous en consultation est alimentée par chaque laboratoire. Plusieurs d'entre eux ont mis en place, par l'intermédiaire de leur documentaliste, un lien entre cette base et la page Web du laboratoire (ou avec la page de chaque groupe de recherche) permettant ainsi la consultation en temps réel de la production du laboratoire. Un fichier est transmis mensuellement vers Labintel pour une mise à jour, par laboratoire, de sa partie « Publications ».

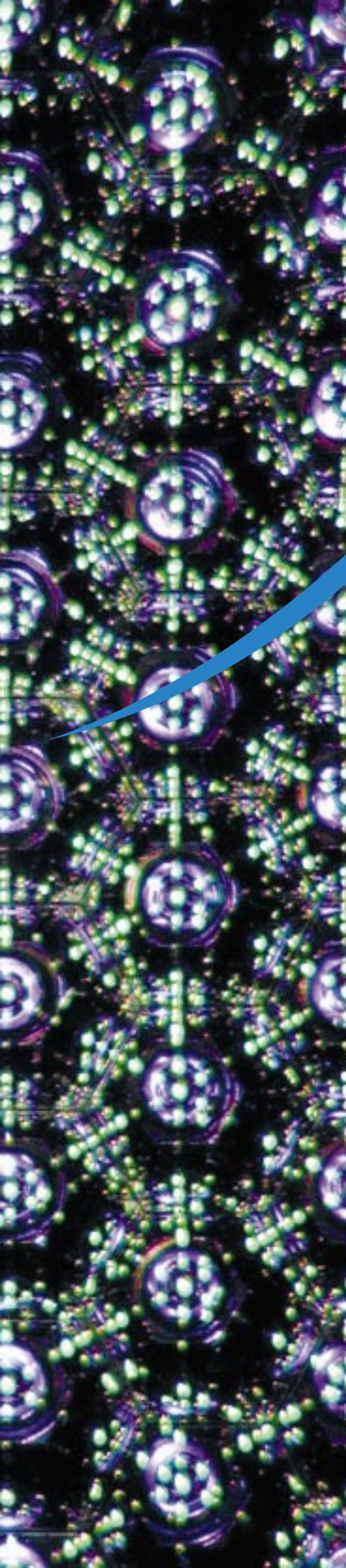
Une mise à jour rétroactive des données depuis 1990 a été effectuée dans la plupart des laboratoires. Des contacts sont en cours actuellement avec le « Cern Document Server » dont les responsables souhaitent pouvoir intégrer sur leur base les publications de l'IN2P3, par l'intermédiaire d'un transfert périodique des données. Un cahier des charges, définissant les évolutions, à la fois pour la saisie et pour l'interface de consultation libre, a été rédigé début 2001; il devrait permettre de mieux répondre aux attentes des utilisateurs.

Geneviève Edelheit, Soraya Boudia, Dominique Jarroux-Declais



PROGRAMMES ET STRUCTURES





les programmespage 146

l'IN2P3 en chiffrespage 150

la directionpage 151

les laboratoirespage 152

LES PROGRAMMES



PHYSIQUE DES PARTICULES

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs ou sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations françaises ¹
Tests du Modèle standard ; au-delà du Modèle standard				
La physique des collisions électron-positon	DELPHI	LEP	CPPM, IPNL, IReS, ISN, LAL, PCC, LPNHE - Paris	CEA/Dapnia
	ALEPH			
	L3			
La physique des collisions proton-proton	ATLAS	LHC	CPPM, ISN, LAL, LAPP, LPC - Clermont, LPNHE - Paris	CEA/Dapnia
	CMS			
La physique des collisions électron-proton	H1	HERA	CPPM, LAL, LPNHE - Paris, LPNHE - Palaiseau	CEA/Dapnia
La physique des collisions proton-antiproton	D0	Tevatron	CPPM, IPN L, IReS, ISN, LAL, LPNHE - Paris	CEA/Dapnia

Violations de symétrie

Violation de CP dans le système des mésons B	BABAR	SLAC	LAL, LAPP, LPNHE - Paris, LPNHE - Palaiseau	CEA/Dapnia
Violation directe de CP dans le système des mésons K	NA48	SPS	LAL	CEA/Dapnia
Violation de CP dans le système des mésons B	LHCb	LHC	CPPM, LAL, LPC - Clermont	

¹ La plupart de ces expériences se déroulent dans le cadre de très grandes collaborations internationales. Il n'est pas possible, dans ce cadre, de citer toutes les institutions étrangères impliquées.



PHYSIQUE HADRONIQUE ET NUCLÉAIRE

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs	Laboratoires IN2P3	Collaborations
La structure des hadrons				
Fonctions de structure en spin du nucléon		SLAC	LPC - Clermont	CEA/Dapnia, États-Unis
Facteurs de forme faibles du nucléon	PVA4	MAMI B	IPNO	Université de Mayence
Facteurs de forme faibles du nucléon et violation de parité	GO	TJNAF	IPN, ISN	États-Unis
Diffusion Compton virtuelle	DVCS		LPC - Clermont	CEA/Dapnia
Fonction de structure généralisée	Deep-Rho		ISN, IPN - Orsay	CEA/Dapnia
Structure du proton	H1	HERA	(voir Physique des particules)	
Les hadrons dans le milieu nucléaire				
	HADES	GSI	IPNO	Allemagne, Espagne, Italie, Chypre, Pologne, République tchèque, Russie, Slovaquie
Les mécanismes de production et d'interaction des hadrons				
Photoproduction de mésons	GRAAL	ESRF	IPNO, ISN	Italie, Russie
Structure nucléaire				
Interactions neutron-proton dans le noyau superfluidité effets collectifs	EUROBALL DIAMANT SAPHIR	VIVITRON	IReS, CSNSM, IPNO, ISN	Europe
	BBS	AGOR	IPNO	Hollande
Noyaux exotiques				
Degré de liberté d'isospin du champ moyen Matière nucléaire et noyaux loin de la stabilité Nucléosynthèse stellaire	LISE SPEG DEMON MUST EXOGAM VAMOS	GANIL/SPIRAL	CENBG, CSNSM GANIL, IPNL, IPNO IReS, LPC - Caen	Europe
	MISTRAL COMPLIS	ISOLDE	CSNSM IPNO	Cern Cern
Collisions nucléaires				
Physique à la barrière de Coulomb	ICARE CHARISSA	VIVITRON GANIL	IReS, ISN, LPC - Caen, LPC - Clermont, Subatech	
Thermodynamique de la matière nucléaire, fragmentation	INDRA FOPI	GANIL GSI	LPC - Clermont	

Ions lourds relativistes

Recherche du plasma quark-gluon	ALICE	LHC	IPNL, IPNO, IReS, LPC - Clermont, Subatech	Cern
	STAR PHENIX	RHIC	Subatech - IReS LPNHE-X	



NEUTRINOS ET ASTROPARTICULES

Programmes	Détecteurs	Sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations
------------	------------	-------	--------------------	----------------

Neutrino

La double désintégration bêta	NEMO	LSM	CENBG, IReS, LAL, LPC - Caen	CFR (CNRS/Insu)
Le moment magnétique du neutrino	MUNU	BUGEY ¹	ISN	
Les oscillations de neutrinos	CHOOZ CNGS	CHOOZ ² CERN- GRAN SASSO	LAPP, PCC IPNL, IReS, LAL, LAPP	

Rayons cosmiques

Recherches de gamma	CAT	Thémis ³	CENBG, LPNHE - Palaiseau, LPNHE - Paris, PCC, GPF - Perpignan	CEA/Dapnia; CESR (CNRS/Insu) République tchèque
	CELESTE	Thémis	CENBG, LAL, PCC, LPNHE - Palaiseau GPF - Perpignan	CEA/Dapnia; CESR (CNRS/Insu) République tchèque
Antimatière	AMS	Navette spatiale	LAPP, ISN	Observatoire de Grenoble Collaboration internationale
	ARTEMIS	Whipple Observatory	LPNHE - Palaiseau	Observatoires de Whipple et de Dublin
Cosmiques de très haute énergie	Observatoire Auger	Argentine, États-Unis	IPNO, LAL, LPNHE - Paris, PCC	Observatoire de Besançon, ENS Télécom Collaboration internationale
Neutrinos	ANTARES	Toulon	CPPM, IReS, GRPHE	Centre d'océanologie et Institut Gassendi, Marseille (CNRS/Insu); CEA/Dapnia; Ifremer; Espagne; Grande-Bretagne

Cosmologie observationnelle

Recherche de matière noire	EDELWEISS	Laboratoire souterrain de Modane	IPNL, CSNSM	CRTBT (CNRS/SPM); IAP (CNRS/Insu); CEA/Dapnia et Drecam
	EROS	La Silla (Chili)	LAL, PCC	IAP, Observatoire de Marseille, Observatoire de Paris (CNRS/Insu); CEA/Dapnia
	AGAPE	Observatoire du pic du Midi	PCC	Observatoire Midi-Pyrénées; CNRS/Insu; CEA/Dapnia
Anisotropies du rayonnement à 3K	PLANCK	Point de Lagrange L2	ISN, LAL, PCC	IAP, IAS (CNRS/Insu); CRTBT (CNRS/SPM); CEA/Dapnia; Collaboration internationale
Recherche de supernovæ de type Ia	SUPERNOVÆ	Cosmos	CPPM, IPNL, LPNHE - Paris	Collaboration internationale

Ondes gravitationnelles

	VIRGO	Cascina (Italie)	IPNL, LAL, LAPP	Italie
--	-------	------------------	-----------------	--------

Astrophysique nucléaire et neutrinos solaires

Astrophysique nucléaire		Orsay (PAPAP) Bordeaux (Van de Graaf)	CENBG, CSNSM IPNO	
Les neutrinos solaires	HELLAZ	Gran Sasso (Italie)	PCC	

1 Site aménagé avec le soutien de EDF.

2 Site aménagé avec le soutien de EDF, de la Société électronucléaire des Ardennes et du conseil général des Ardennes.

3 Site aménagé avec le soutien de EDF et de la région Languedoc-Roussillon.



RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs ou sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations
------------	------------	---------------------------	--------------------	----------------

Aval du cycle électronucléaire

Recherche sur l'aval du cycle électronucléaire	MUSE Données nucléaires dont N-TOF	CADARACHE GSI CERN, KVI, LLN	CENBG, CSNSM, IPNL, IPNO IPNO, IReS, CENBG LPC - Caen, Subatech	GDR Gedéon CEA/DAPNIA
Migration des déchets nucléaires dans les matériaux liquides et solides	MEGAPIE	PSI	Subatech, IReS, LPC - Caen, CSNSM IPNO, IReS, Subatech	GDR Practis CNRS (IN2P3 + SC) CEA, ANDRA, EDF

Interaction faisceaux-matière

Agrégats métalliques et gazeux		TANDEM Microsonde ARAMIS	IPNO, IPNL, CENBG, CSNSM	CNRS/SPM - SPI
Caractérisation des matériaux et implantation ionique Interactions ions lourds-plasma		GANIL/CIRIL GSI		

Techniques de détection pour la biologie et la médecine

Imagerie médicale	TOHR, POCI		IPNO	
Détecteurs pour l'imagerie médicale			CPPM, IPNO, IReS, ISN, LPC - Caen	
Séquençage de l'ADN			IPNO	
Irradiation de la cellule		Microsonde nucléaire	CENBG	149

Spectrométrie de masse par accélération

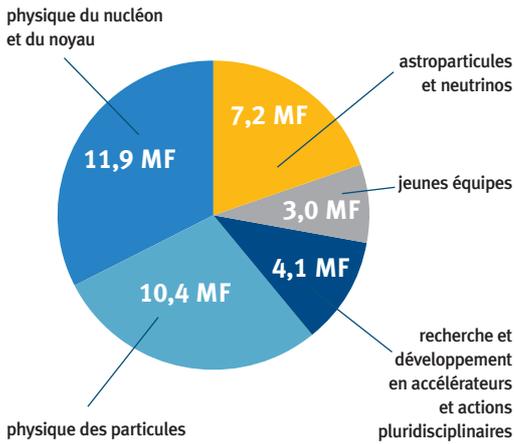
		Tandétron	CSNSM	Europe
--	--	-----------	-------	--------



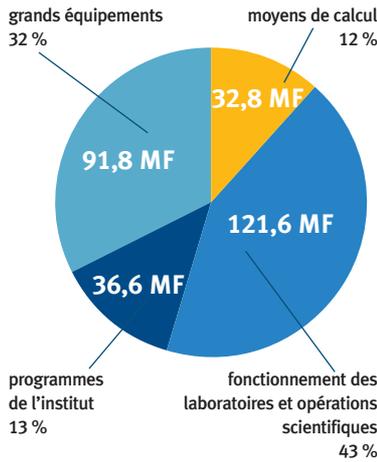
L'IN2P3 EN CHIFFRES

LE BUDGET 2000

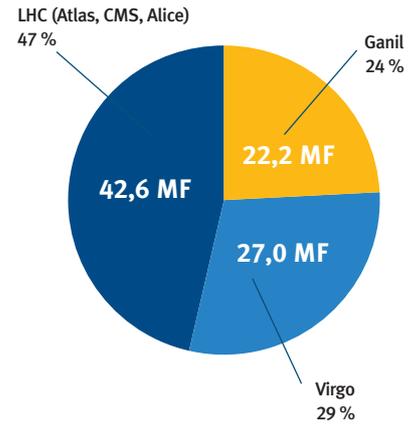
Programmes et actions incitatives



Autorisations de programmes pour les moyens scientifiques



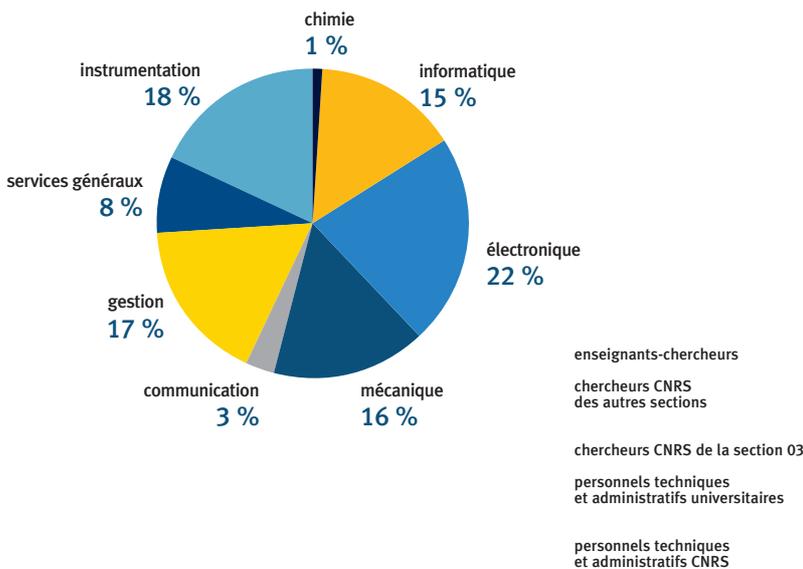
Grands équipements



Hors : politiques transversales, opérations immobilières, programmes CNRS

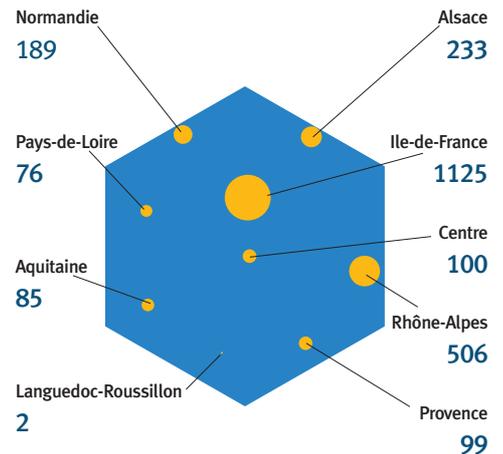
LES PERSONNELS

Répartition des personnels ITA, TPN, et CDD dans les laboratoires de l'IN2P3 par branches d'activité professionnelle (effectifs de 1509 personnes)

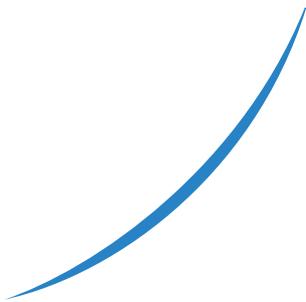


Effectifs totaux des personnels permanents des laboratoires de l'IN2P3 : 2415

Répartition par régions (effectif de 2415 personnes)



LA DIRECTION DE L'IN2P3



LES LABORATOIRES DE L'IN2P3

UMR 5797 Centre d'Études Nucléaires de Bordeaux Gradignan - CENBG

Université Bordeaux I
BP 120
Domaine du Haut-Vigneau
33175 Gradignan CEDEX
Tél.: 05 57 12 08 04
Fax: 05 57 12 08 01

Directeur: **Pierre Aguer**

EFFECTIFS

17 chercheurs CNRS - 24 enseignants chercheurs, 29 ITA CNRS, 13 ITA non CNRS, 11 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Étude théorique de la structure des noyaux et des hadrons; noyaux à très haut spin et/ou à très grande déformation. Noyaux « exotiques » (loin de la vallée de stabilité) et radioactivités rares. Physique du neutrino et double désintégration bêta. Astronomie gamma de haute énergie. Étude de systèmes innovants de production d'énergie électronucléaire. Interface physique-biologie. Physique corpusculaire auprès des lasers de puissance.

USR 6402 Centre de Calcul de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules - CCIN2P3

29, boulevard
du 11-Novembre-1918
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél.: 04 78 93 08 80
Fax: 04 72 69 41 70

Directeur: **Denis Linglin**

EFFECTIFS

1 chercheur CNRS, 31 ITA CNRS

THÈMES DE RECHERCHE

Activité de services et de développements: calcul, logiciels, données et bases de données, télécommunications et réseaux, documentation. Développement de dispositifs informatiques basés sur des fermes spécialisées de stations. Validation de modèles et réalisation d'architecture distribuée (logiciel et matériel).

UMR 6550 Centre de Physique des Particules de Marseille - CPPM

Université Aix-Marseille II
Faculté des Sciences
de Luminy
Case 907
13288 Marseille CEDEX 9
Tél.: 04 91 82 72 00
Fax: 04 91 82 72 99

Directeur: **Elie Aslanidès**

EFFECTIFS

25 chercheurs CNRS, 7 enseignants-chercheurs, 67 ITA CNRS, 1 ITA non CNRS, 11 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Physique au LEP: expérience Aleph (Cern). Physique auprès du collisionneur électron-proton Hera : expérience H1 (Desy). Physique auprès du collisionneur Tevatron : expérience D0 (Fermilab). Préparation de la physique auprès du LHC (Cern): expériences Atlas et LHCb. Détection de neutrinos cosmiques de haute énergie : expérience Antares.

UPR 6412 Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse - CSNSM

Université Paris XI,
Bât. 104 et 108
91405 Orsay CEDEX
Tél.: 01 69 15 52 13
Fax: 01 69 15 50 08

Directeur:
Hubert Dobre

EFFECTIFS

32 chercheurs CNRS, 4 enseignants-chercheurs, 44 ITA CNRS, 9 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Structure nucléaire. Réactions nucléaires d'intérêt astrophysique et nucléosynthèse. Mesure, évaluation et étude théorique des masses des noyaux atomiques. Séparation d'isotopes. Fission induite par les ions lourds. Préparation par implantation de matériaux nouveaux. Nanomagnétisme et nano-optique. Identification et dosage d'éléments radioactifs dans l'environnement. Datation. Applications géologiques et climatiques. Analyse de micrométéorites recueillies en Antarctique. Recherche de méthodes de confinement des déchets radioactifs. Supraconducteurs à haute température. Bolomètres cryogéniques. Croissance sous irradiation.

UMR 5139 Groupe d'Astroparticules de Montpellier

Université de Montpellier II
Case 85 - Bât. 11 / 3^e étage
Place Eugène-Bataillon
34095 Montpellier CEDEX 05
Tél./Fax: 04 67 14 93 05

Directeur: **Alain Falvard**

EFFECTIFS

3 chercheurs CNRS, 1 enseignant-chercheur, 2 ITA CNRS, 3 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Astronomie gamma: recherche indirecte de la matière noire. Expérience Celeste.

UMR 6415 Grand Accélérateur National d'Ions Lourds - GIE Ganil (CNRS/CEA)

Boulevard Henri-Becquerel
BP 5027
14076 Caen CEDEX 5
Tél.: 02 31 45 46 47
Fax: 02 31 45 45 86

Directeur:
Dominique Goutte

EFFECTIFS

23 chercheurs (13 CNRS, 10 CEA), 1 enseignant-chercheur, 212 ingénieurs et techniciens (124 CNRS, 88 CEA),
24 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Laboratoire d'accueil de la communauté nationale et internationale des physiciens utilisant des faisceaux d'ions lourds. Production des faisceaux et mise à disposition des physiciens. Soutien technique des expériences et hébergement des utilisateurs. Thèmes de physique: production et étude de la structure des noyaux loin de la stabilité, production et étude des noyaux chauds, dynamique des collisions nucléaires, physique nucléaire des ions lourds, aval du cycle électro-nucléaire.

UMR 6424 Institut de Physique Nucléaire d'Orsay - IPNO

Université Paris XI,
91406 Orsay CEDEX
Tél.: 01 69 15 67 50
Fax: 01 69 15 64 70

Directeur: **Sydney Galès**

EFFECTIFS

77 chercheurs CNRS, 34 enseignants-chercheurs, 276 ITA CNRS, 12 ITA non CNRS, 28 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Structure et dynamique nucléaire loin de la stabilité, Thermodynamique des systèmes finis et multifragmentation, Plasma quark-gluon: NA50, Alice au LHC (Cern), Physique hadronique: expériences Hades (GSI), G0 et Deep-Rho (TJNAF, E.-U.), Graal (ESRF), Astroparticules, Observatoire Auger. Radiochimie et aval du cycle électronucléaire: N-TOF (Cern), Interaction ion-agrégats avec surface et solides. Interface physique-biologie-médecine. Physique théorique.

UMR 5822 Institut de Physique Nucléaire de Lyon - IPNL

Université Lyon I - Bât. 210
43, boulevard
du 11-Novembre-1918
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél.: 04 72 44 84 57
Fax: 04 72 44 80 04

Directeur: **Yves Declais**

EFFECTIFS

34 chercheurs CNRS, 41 enseignants-chercheurs, 65 ITA CNRS, 16 ITA non CNRS, 25 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Physique au LEP: L3 et Delphi (Cern), au Tevatron: D0 (Fermilab) et CMS au LHC (Cern). Plasma de quarks et de gluons: NA50, NA60, Alice et CMS-ions (Cern). Matière nucléaire chaude: Indra. Noyaux superdéformés: Euroball et noyaux exotiques en isospin: Exogam. Recherche de matière noire non baryonique: Edelweiss. R&D de composants optiques à faible perte et miroirs de Virgo. Physique du neutrino: Opera. Programme Supernovæ de mesure des paramètres cosmologiques: Snifs, projet Snap. Physique théorique. Interaction d'ions et d'agréats énergétiques avec la matière. Aval du cycle électronucléaire: migration de radioéléments et confinement des déchets nucléaires. Effets biologiques des rayonnements ionisants à l'échelle moléculaire. Hadronthérapie.

UMR 7500 Institut de Recherches Subatomiques - IReS

Université Louis-Pasteur
Strasbourg I
23, rue du Loess, BP 28
67037 Strasbourg, CEDEX 2
Tél.: 03 88 10 62 87
Fax: 03 88 10 62 92

Directeur: **Daniel Huss**

EFFECTIFS

46 chercheurs CNRS, 30 enseignants-chercheurs, 157 ITA CNRS, 4 ITA non CNRS, 22 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Physique du noyau avec l'accélérateur Vivitron: structure de la matière dans des états extrêmes de spin et de déformation, Euroball. Mécanismes de réaction et de fission. Interactions ions lourds-matière. Noyaux exotiques et faisceaux radioactifs: Isolde (Ganil). Physique nucléaire théorique. Chimie nucléaire: aval du cycle. Radioprotection et mesures environnementales: Ramses. Physique des collisions électron-positon au LEP: Delphi (Cern). Participation à Star au RHIC (BNL). Physique des collisions proton-proton et ions lourds au LHC: CMS et Alice (Cern). Développement des capteurs CMOS et applications au projet de collisionneur Tesla. Physique du neutrino: Nemo, Opera et Antares.

UMR 5821 Institut des Sciences Nucléaires - ISN

Université Joseph-Fourier
53, avenue des Martyrs
38026 Grenoble CEDEX
Tél.: 04 76 28 40 00
Fax: 04 76 28 40 04

Directeur: **Joël Chauvin**

EFFECTIFS

36 chercheurs CNRS, 29 enseignants-chercheurs, 97 ITA CNRS, 7 ITA non CNRS, 26 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Participation aux expériences LEP: Delphi et Atlas au LHC (Cern); D0 (Fermilab). Mesure du moment magnétique du neutrino: Munu au Bugey. Recherche d'antimatière dans l'Univers: AMS. Participation à l'expérience Archeops et au projet Planck. Physique hadronique (TJNAF, E.-U.), Graal (ESRF). Réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur et transmutation des déchets nucléaires. Structure nucléaire. Physique théorique. Physique des accélérateurs.

UMR 6423 Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire - LAL

Université Paris XI
Bât. 200,
Campus d'Orsay
BP 34
91898 Orsay CEDEX
Tél.: 01 64 46 83 00
Fax: 01 69 07 94 04

Directeur:
François Richard

EFFECTIFS

52 chercheurs CNRS, 14 enseignants-chercheurs, 239 ITA CNRS, 2 ITA non CNRS, 17 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Tests de précision du Modèle standard et recherche de nouvelles particules à LEP: Aleph et Delphi (Cern). Préparation de l'expérience Atlas (Cern). Expérience D0 (Fermilab). Structure du proton: H1 (Desy). Violation de la symétrie CP: NA48 (Cern), BaBar (Slac), LHCb (Cern). Physique du neutrino par recherche de désintégration double bêta (Nemo). Étude des oscillations du neutrino mu (Opera). Étude du rayonnement cosmique aux énergies extrêmes: Observatoire Auger. Recherche de matière noire: Eros. Détection d'ondes gravitationnelles: Virgo. Étude du rayonnement à 3 K: Planck. Physique et technique des accélérateurs à électrons: projets Clic (Cern) et Tesla (Desy), Elyse (Université d'Orsay).

UMR 5814 Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules - LAPP

BP 110
74941 Annecy-le-Vieux
CEDEX
Tél.: 04 50 09 16 00
Fax: 04 50 27 94 95

Directeur: **Jacques Colas**

EFFECTIFS

42 chercheurs CNRS, 8 enseignants-chercheurs, 83 ITA CNRS, 10 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Expériences auprès du LEP: L3, Aleph (Cern). Expériences Atlas et CMS auprès du LHC (Cern). Violation de symétrie: BaBar (Slac), LHCb au LHC (Cern). Projet Virgo de détection d'ondes gravitationnelles. Recherche d'antimatière dans l'Univers: AMS. Physique du neutrino: Opera.

UMR 6534 Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen - LPC Caen

ISMRA
6, bd. du Maréchal-Juin
14050 Caen CEDEX
Tél.: 02 31 45 25 00
Fax: 02 31 45 25 49

Directeur:
Jean-François Lecomte

EFFECTIFS

10 chercheurs CNRS, 16 enseignants-chercheurs, 22 ITA CNRS, 8 ITA non CNRS, 9 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Étude de la matière nucléaire chaude et comprimée: multifragmentation et flot nucléaire (Indra, Démon). Production et caractérisation de noyaux exotiques. Réactions induites par faisceaux exotiques. Physique du neutrino par recherche de désintégration double bêta. Étude des corrélations β - ν dans la désintégration β . Mesures de données nucléaires (Gedéon). Interface physique-biologie-médecine.

UMR 6533 Laboratoire de Physique Corpusculaire - LPC Clermont

Université Blaise-Pascal
Complexe scientifique
des Cézeaux
24, avenue des Landais
63177 Aubière CEDEX
Tél.: 04 73 40 72 72
Fax: 04 73 26 45 98

Directeur:
Bernard Michel

EFFECTIFS

15 chercheurs CNRS, 38 enseignants-chercheurs, 40 ITA CNRS, 5 ITA non CNRS, 17 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Physique des particules: expérience Aleph au LEP, projets Atlas et LHCb au LHC (Cern), projet FLC/Tesla. Collisions d'ions lourds ultrarelativistes: NA50-NA60 au SPS, projet Alice au LHC (Cern). Matière nucléaire: expérience Fopi (GSI). Physique hadronique: expériences à Slac, au TJNAF (E.-U.) et à Mayence; expérience Hadès (GSI); projet Elfe. Physique théorique. Physique appliquée à la géologie et à l'archéologie (thermoluminescence). Physique appliquée à la biologie: effets biologiques des neutrons, biomatériaux, plate-forme de calculs, techniques de détection en imagerie médicale. Étude d'émission induite par laser de courants forts par des photocathodes au silicium.

UMR 7585 Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Énergies - LPNHE - P6/7

Universités Paris VI/VII
4, place Jussieu
75252 Paris CEDEX 05
Tél.: 01 44 27 63 13
Fax: 01 44 27 46 38

Directeur:
Jean-Eudes Augustin

EFFECTIFS

27 chercheurs CNRS, 28 enseignants-chercheurs, 49 ITA CNRS, 11 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Physique des collisions électron-positon: Delphi, futur collisionneur linéaire (Cern). Étude des faisceaux de neutrinos: Harp (Cern). Expérience Atlas au LHC (Cern). D0 (Fermilab). Violation de symétrie CP: BaBar (Slac). Photons de hautes énergies dans l'Univers: CAT et Hess. Programme Supernovæ de mesure des paramètres cosmologiques: SCP, Snif, Snap. Étude des rayons cosmiques aux énergies extrêmes: Observatoire Auger.

UMR 7638 Laboratoire de Physique Nucléaire des Hautes Énergies - LPNHE-X

École polytechnique
Plateau de Palaiseau
Route de Saclay
91128 Palaiseau CEDEX
Tél.: 01 69 33 41 36
Fax: 01 69 33 30 02

Directeur: **Henri Videau**

EFFECTIFS

36 chercheurs CNRS, 39 ITA CNRS, 13 ITA non CNRS, 10 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE

Physique des collisions électron-positon : expérience Aleph, LEP (Cern). Structure interne du nucléon: H1 auprès de Hera (Desy). Étude de la violation de CP : expérience BaBar (Slac). Collisions de protons de très haute énergie : CMS auprès du LHC (Cern). Plasma de quarks et de gluons dans des collisions d'ions lourds: NA50 au SPS (Cern) et Phenix au Rhic (BNL). R&D pour le détecteur d'un collisionneur linéaire à électrons : Tesla (Desy). Astronomie gamma: CAT et Celeste (Thémis), Hess (Namibie), projet Glast sur satellite.

UMR 6417 Laboratoire Souterrain de Modane - LSM

2, rue Polset
73500 Modane
Tél.: 04 79 05 22 57
Fax: 04 79 05 24 74

Directeur: **Luigi Mosca**

EFFECTIFS

1 chercheur CNRS, 1 chercheur CEA, 3 ITA CNRS, 2 ITA non CNRS

THÈMES DE RECHERCHE

Lieu d'expériences en environnement de très faible radioactivité et à l'abri du rayonnement cosmique.

UMR 7553 Physique Corpusculaire et Cosmologie - PCC

Collège de France
11, place Marcelin-Berthelot
75231 Paris CEDEX 05
Tél.: 01 44 27 14 39
Fax: 01 43 54 69 89

Directeur:
Daniel Vignaud

EFFECTIFS

17 chercheurs CNRS, 6 enseignants-chercheurs, 1 chercheur CEA, 38 ITA CNRS, 8 ITA de l'Éducation nationale, 10 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE

Cosmologie observationnelle: matière noire baryonique, expérience Agape. Étude du rayonnement cosmologique primordial avec le ballon Archeops et le satellite Planck. Rayonnement cosmique de très haute énergie: Observatoire Auger. Astronomie gamma au sol : CAT, Celeste, Hess, et dans l'espace: Glast. Neutrinos solaires: R&D Hellaz, Borexino, Lens.

UMR 6457 Laboratoire de Physique Subatomique et des Technologies Associées - SUBATECH

École des mines de Nantes
4, rue Alfred-Kastler
La Chantrerie - BP 20722
44307 Nantes CEDEX 03
Tél.: 02 51 85 81 00
Fax: 02 51 85 84 79

Directeur:
Jacques Martino

EFFECTIFS

9 chercheurs CNRS, 24 enseignants-chercheurs, 34 ITA CNRS, 9 ITA non CNRS, 18 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE

Recherche du plasma de quarks et de gluons dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes : expériences Alice au LHC (Cern), Alice et Star au Rhic (BNL). Modélisation des interactions fondamentales aux énergies ultrarelativistes, étude du plasma quark-gluon. Théorie et modélisation d'interactions aux énergies ultrarelativistes; modélisation des phénomènes de transport dans la matière nucléaire. Aval du cycle électronucléaire GDR Gedéon: données nucléaires p + A et étude de cibles pour un réacteur : Lisor, Megapie. Radiochimie: recherche, métrologie et service (Smart). Développement de détecteurs gazeux nouveaux (Micromégas).

UMS 6425 Musée et archives de l'Institut du Radium

Institut Curie
11, rue Pierre-et-Marie-Curie
75231 Paris CEDEX 05
Tél./Fax: 01 42 34 67 49

Directeur: **Soraya Boudia**

EFFECTIFS

2 ITA CNRS, 5 ITA non CNRS, 1 doctorant

THÈMES DE RECHERCHE

Conservation, restauration et valorisation des collections historiques. Accueil du public au musée. Recherches historiques et muséologiques.

SIGLES ET ACRONYMES



ALEPH - Apparatus for LEP physics :
une des quatre expériences
auprès du LEP

ALICE - A large ion collider
experiment : expérience
sur les ions lourds au LHC

AMS - Anti-matter in space :
expérience de recherche
d'antimatière dans l'espace

ANDRA - Agence nationale pour
la gestion des déchets radioactifs

ANTARES - Astronomy with a
neutrino telescope and abyss
environmental research :
programme européen de recherche
et développement pour un
détecteur sous-marin de neutrinos
cosmiques de haute énergie

ANVAR - Association nationale pour
la valorisation de la recherche

APPEC - Astroparticle physics
European coordination :
coordination européenne
en astroparticules

ARAMIS - Accélérateur pour la
recherche en astrophysique,
microanalyse et implantation
dans les solides

ARCHEOPS - Ballon stratosphérique
dédié à la cartographie du fond
de rayonnement cosmologique

ASIC - Application specific integrated
circuit : circuit intégré spécifique
à une application

ATLAS - A toroidal LHC apparatus :
une des expériences auprès
du LHC

AUGER (Observatoire Pierre) -
Expérience de détection des
rayons cosmiques d'énergie
extrême (supérieure à 10^{19} eV),
Argentine

BABAR - Expérience d'étude des
mésons beaux au Stanford linear
accelerator (SLAC), États-Unis

CAT - Cherenkov array at Thémis :
expérience destinée à
l'observation des rayons gamma
de très haute énergie
(de 200 GeV à 20 TeV)

CDF - Expérience auprès du
collisionneur proton-antiproton
à Fermilab, États-Unis

CEA - Commissariat à l'énergie
atomique

CEBAF - Continuous electron beam
accelerator facility : accélérateur
d'électrons du Thomas Jefferson
National Laboratory (TJNAF),
États-Unis

CELESTE - Expérience destinée
à l'observation des rayons
gamma de très haute énergie
(de 20 à 300 GeV)

CERN - Organisation européenne
pour la recherche nucléaire :
laboratoire européen de physique
des particules à Genève

CESR - Centre d'étude spatiale
des rayonnements : laboratoire
CNRS/INSU

CFHT - Canada-France-Hawaii
telescope : télescope Canada-
France-Hawaii

CIME - Cyclotron d'injection
de moyenne énergie

CLIC - Projet de collisionneur linéaire
à électrons multi-TeV

CMOS - Complementary metal oxide
silicon process technology :
technologie pour les détecteurs
semi-conducteurs

CMS - Compact muon solenoid : une
des expériences auprès du LHC

CNES - Centre national d'études
spatiales

COM - Centre d'océanologie de
Marseille : laboratoire CNRS/INSU

COMPLIS - Collaboration for
spectroscopic measurements
using a pulsed laser ions source :
expérience de spectroscopie laser
pour sonder les noyaux

CRA - Centre de recherche
astronomique de Lyon :
laboratoire CNRS/INSU

CRTBT - Centre de recherche sur
les très basses températures :
laboratoire CNRS/SPM

DO - Expérience auprès du
collisionneur proton-antiproton
à Fermilab, États-Unis

DAPNIA - Département
d'astrophysique, de physique des
particules, de physique nucléaire
et de l'instrumentation associée :
CEA/DSM

DARC - Département d'astrophysique
relativiste et de cosmologie :
laboratoire CNRS/SPM

DEEP-RHO - Expérience d'électroproduction exclusive de mésons et de photons

DELPHI - Detector for electron, lepton, photon, hadron identification : une des quatre expériences auprès du LEP

DEMON - Détecteur modulaire de neutrons : détecteur pour des expériences de physique nucléaire

DESY - Deutsches elektron synchrotron : laboratoire allemand de physique des particules installé à Hambourg

DIRC - Detection of internally reflected Cherenkov light : détecteur Cherenkov pour l'expérience BABAR

DMILL - Durci mixte sur isolant logico-linéaire : électronique capable de résister aux radiations

DRECAM - Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules : CEA/DSM

DRRT - Direction régionale de la recherche et de la technologie

DSM - Direction des sciences de la matière : CEA

DSV - Direction des sciences du vivant : CEA

DVCS - Expérience de diffusion Compton virtuelle

ECR - Source d'ions par résonance cyclotronique électronique

EDELWEISS - Expérience pour la détection des WIMPs en site souterrain : recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au Laboratoire souterrain de Modane

ELFE - Electron laboratory for Europe : projet de faisceau continu d'électrons pour la physique hadronique

ELYSE - Accélérateur d'électrons déclenché par un laser pulsé

EPICA - European project for ice coring in Antarctica

EROS - Expérience de recherche d'objets sombres : expérience de recherche de matière noire par effet de lentille gravitationnelle installée à l'observatoire de La Silla, Chili

ESA - European space agency : Agence spatiale européenne

ESF - European science foundation : Fondation européenne de la science

ESO - European southern observatory : Observatoire européen de l'hémisphère austral

ESRF - Electron synchrotron radiation facility : équipement de rayonnement synchrotron à Grenoble

EURISOL - European isotope separation on-line : projet de futur accélérateur européen de faisceaux radioactifs

EUROBALL - Multidétecteur européen de rayonnements gamma pour la physique nucléaire, successeur d'EUROGAM

EUSO - Extreme universe space observatory : projet d'observation des grandes gerbes cosmiques dans l'atmosphère depuis la station spatiale internationale

EXOAM : Spectromètre gamma de grande efficacité dédié à la spectroscopie nucléaire des noyaux exotiques

FERMILAB - Fermi national laboratory : laboratoire américain de physique des particules installé près de Chicago

GO - Expérience de contenu en étrangeté du nucléon au TJNAF

GANIL - Grand accélérateur national d'ions lourds : CEA/IN2P3 à Caen

GDR - Groupement de recherche

GDT - Gestion de documents techniques

GEDEON - Gestion des déchets par des options nouvelles : groupement de recherche CNRS/CEA/EDF/Framatome

GENEPI - Générateur de neutrons pulsés de forte intensité

GIP - Groupement d'intérêt public

GLAST - Gamma-ray large area space telescope : futur télescope d'observation des sources célestes de rayonnement gamma (de 10 MeV à 100 GeV)

GRAAL - Grenoble anneau accélérateur laser : projet de construction d'un faisceau de photons polarisés à 100 % à l'énergie maximale (1,5 GeV) par rétrodiffusion Compton de photons laser sur les électrons de 6 GeV de l'anneau de stockage de l'ESRF

GRIP - Greenland ice core project

GRPHE - Groupe de recherche en physique des hautes énergies à Mulhouse

GSI - Gesellschaft für schwerionenen forschung : laboratoire allemand de physique nucléaire, à Darmstadt

H1 - Expérience auprès du collisionneur HERA

HADES - Spectromètre diélectron de grande acceptance pour la physique hadronique

HAPPEX - Expérience de violation de la parité à TJNAF

HERA - High energy ring accelerator : collisionneur électron-proton installé à DESY, Hambourg

HESS - High energy stereoscopic system : un détecteur de nouvelle génération pour l'astronomie gamma au-delà de 100 GeV

HINDAS - High and intermediate energy nuclear data for accelerator driven systems: programme européen d'étude de certaines réactions nucléaires

IAP - Institut d'astrophysique de Paris: laboratoire CNRS/INSU

IAP, Bucarest - Institute of atomic physics

IAS - Institut d'astrophysique spatiale: laboratoire CNRS/INSU

IFIN-HH, Bucarest - National institute for physics and nuclear engineering

IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

INDRA - Identification de noyaux par détection à résolution accrue: multidétecteur de physique nucléaire à très grand angle solide au GANIL

INFN - Istituto nazionale di fisica nucleare: institut italien de physique nucléaire et de physique des particules

INSU - Institut national des sciences de l'Univers: CNRS

INTEGRAL - Satellite qui transportera des expériences d'astrophysique nucléaire

IPHI - Injecteur de protons de haute intensité

ISMRA - Institut des sciences de la matière et du rayonnement: école d'ingénieurs à Caen

ISOLDE - Installation de production d'ions radioactifs par séparation isotopique en ligne, CERN

ITEP - Institute of theoretical and experimental physics à Moscou, Russie

KEK - National laboratory high energy physics à Tsukuba, Japon

KVI - Kernfysich versneller Institut à Groningue, Pays-Bas

L3 - Une des quatre expériences du LEP

LAC - Laboratoire Aimé-Cotton: laboratoire CNRS/SPM

LAEC - Laboratoire d'astrophysique extragalactique et de cosmologie: laboratoire CNRS/INSU

LAM - Laboratoire d'astrophysique de Marseille: laboratoire CNRS/INSU

LAOB - Laboratoire d'astrophysique de l'observatoire de Besançon: laboratoire CNRS/INSU

LAOG - Laboratoire d'astrophysique de l'observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble: laboratoire CNRS/INSU

LEA - Laboratoire européen associé

LEP - Large electron positron collider: collisionneur électron-positron du CERN

LEPSI - Laboratoire d'électronique et de physique des systèmes instrumentaux de l'université Louis-Pasteur à Strasbourg

LETI - Laboratoire d'électronique, de technologie et d'instrumentation: laboratoire du CEA pour la recherche appliquée en électronique

LHC - Large hadron collider: futur collisionneur proton-proton du CERN

LHCb - Détecteur pour l'étude de la violation de CP au LHC

LISE - Ligne d'ions superépluchés du GANIL à Caen

MACHO - Massive astronomical compact halo objects: objets massifs non lumineux qui pourraient contribuer à la matière noire de l'Univers

MAMI - Mainz microtron: accélérateur allemand pour la physique nucléaire à Mayence

MAP - Mission spatiale de la NASA pour l'étude du rayonnement de fond cosmologique

MUNU - Expérience de recherche du moment magnétique du neutrino à la centrale du Bugey

MUSE - Multiplication d'une source externe auprès du réacteur Masurca (CEA, Cadarache): expérience de caractérisation des propriétés neutroniques d'un réacteur sous-critique

NA48 - Expérience sur la violation directe de CP auprès du collisionneur SPS au CERN

NA50 - Expérience de plasma quark-gluon au CERN

NASA - National aeronautics and space agency

NEMO - Neutrino-molybdène: expérience de double désintégration bêta au Laboratoire souterrain de Modane

NuPECC - Nuclear physics European collaboration committee: comité européen pour la physique nucléaire

OMP - Observatoire Midi-Pyrénées: laboratoire CNRS/INSU

OPERA - Oscillation project with emulsion tracking apparatus: expérience d'oscillation de neutrinos

OPRI - Office de protection contre les rayonnements ionisants

PACE - Programme pour l'aval du cycle électronucléaire

PHENIX - Expérience d'étude du plasma quark-gluon au Brookhaven national laboratory, États-Unis

PICS - Programme international de coopération scientifique

PLANCK - Projet de satellite de l'ESA pour la mesure du rayonnement de fond cosmologique

PRACTIS - GDR Physicochimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces

PSI - Paul Scherrer Institut à Villigen, Suisse

PVA4 - Expérience de la violation de la parité auprès de MAMI à Mayence

QCD - Quantum chromodynamics : chromodynamique quantique, théorie des interactions fortes

QED - Quantum electrodynamics : électrodynamique quantique, théorie des interactions électromagnétiques

QGP - Plasma quark-gluon

RHIC - Relativistic heavy ion collider : projet américain de collisionneur d'ions lourds Brookhaven national laboratory, États-Unis

SAMPLE : Expérience de mesure du magnétisme faible du proton au MIT-Bates

SCP - Supernovæ cosmology project

SDV - Département des sciences de la vie du CNRS

SLAC - Stanford linear accelerator center : laboratoire américain de physique des particules installé à l'université de Stanford, États-Unis

SMA - Spectrométrie de masse par accélérateur

SN - Supernovæ : phase terminale d'une étoile, moment où elle explose

SNAP - Supernova acceleration probe : projet de télescope spatial grand champ de mesure des paramètres cosmologiques à l'aide de supernovæ de type Ia

SNIFS - Spectromètre intégral de champ

SPEG - Spectromètre à perte d'énergie du GANIL

SPES IV-II - Spectromètre de physique hadronique à grand angle solide

SPI - Département des sciences pour l'ingénieur du CNRS

SPIRAL - Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne : équipement installé auprès du GANIL à Caen

SPM - Département des sciences physiques et mathématiques du CNRS

SPS - Super proton synchrotron : accélérateur de protons du CERN, aussi utilisé en collisionneur proton-proton et en injecteur du LEP

STAR - Expérience d'étude du plasma quark-gluon au Brookhaven national Laboratory

SUPERKAMIOKANDE - Expériences japonaises de désintégration du proton, et d'étude des neutrinos solaires et atmosphériques à Kamiokande

TEP - Tomographie à émission de positons

TESLA - Tera electron-volt superconducting linear accelerator : projet allemand de collisionneur linéaire électron-positon

TEVATRON - Accélérateur proton-antiproton à Fermilab à Chicago

THEMIS - Site de l'ancienne centrale solaire, construite par EDF à Targassonne près de Font-Romeu (Pyrénées-Orientales).

TJNAF - Thomas Jefferson national accelerator facility : laboratoire américain de physique hadronique à Newport news, Virginie

TTF - TESLA test facility : accélérateur de démonstration pour le projet TESLA à DESY

UMR - Unité mixte de recherche CNRS

UPR - Unité propre de recherche CNRS

VAMOS - Variable mode spectrometer : spectromètre de grande acceptance

VIRGO - Expérience de détection directe des ondes gravitationnelles à Cascina, Italie

VIVITRON - Accélérateur électrostatique à Strasbourg

VLT - Very large telescope

WIMP - Weakly interacting massive particle : particules massives considérées comme d'excellents candidats à la masse manquante de l'Univers

XADS - Experimental accelerator driven system



TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	P. 6
AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES	P. 8
Physique des particules	P. 10
Quatre détecteurs à la recherche de nouvelles particules au LEP	P. 18
Mesures électrofaibles et masse du boson de Higgs	P. 20
La physique du boson W au LEP	P. 21
Atlas et le boson de Higgs	P. 22
CMS: du développement à la production	P. 23
La violation directe de CP dans le système des kaons neutres	P. 24
BaBar: des premières collisions à la révélation d'une nouvelle violation de symétrie CP	P. 25
LHCb: la seconde génération des expériences de violation de symétrie CP	P. 26
Potentiel de découvertes au Tevatron sur D0	P. 27
De la structure du proton aux particules et interactions au-delà du Modèle standard	P. 28
La supersymétrie et les dimensions supplémentaires	P. 30
Physique du nucléon et de la matière nucléaire	P. 34
Le déconfinement des quarks et des gluons	P. 42
Transition de phase liquide-gaz de la matière nucléaire	P. 44
Sonder nucléons et petits noyaux au plus près de leurs quarks	P. 45
À la quête du contenu étrange du proton	P. 48
Structure des noyaux exotiques légers riches en neutrons	P. 49
Découverte de ⁴⁸ Ni, un nouveau noyau doublement magique	P. 50
Noyaux à halo Borroméens et autres structures exotiques	P. 51
La spectroscopie laser pour déterminer la forme des noyaux	P. 53
Les rotations exotiques des noyaux	P. 54
Astroparticules, neutrinos et cosmologie	P. 56
Les anisotropies du fond de rayonnement cosmologique	P. 64
Pourquoi l'Univers est-il en expansion?	P. 65
De la masse manquante de l'Univers	P. 68
Sonder le contenu du rayonnement cosmique de haute énergie	P. 69
Les rayons cosmiques d'énergies extrêmes	P. 70
Le rayonnement gamma de très haute énergie	P. 71
Les neutrinos, messagers du cosmos	P. 73
À la recherche des ondes gravitationnelles	P. 74
De l'oscillation et des masses des neutrinos	P. 75
Les rayons gamma pour comprendre les novæ	P. 76

Recherches interdisciplinaires	P. 78
L'imagerie gamma haute résolution pour la cancérologie	P. 84
L'irradiation par microfaisceau pour la radiobiologie à l'échelle cellulaire	P. 86
Enregistrement magnétique haute densité: dessiner avec des ions	P. 87
Des agrégats d'or pour l'étude du dépôt d'énergie dans les solides	P. 88
Éléments superlourds: une chimie atome par atome	P. 89
Elyse: un accélérateur au service de la science «aux temps ultracourts»	P. 90
Micrométéorites et exobiologie	P. 91
Aval du cycle électronucléaire	P. 94
Mieux connaître les réactions nucléaires induites par des nucléons	P. 98
Un programme dédié à l'étude des réacteurs sous-critiques	P. 99
Rétention des radionucléides par les argiles	P. 100
L'oxyde d'uranium comme matrice de confinement des déchets radioactifs	P. 101
Développements technologiques	P. 104
Spiral : le nouvel accélérateur de faisceaux radioactifs	P. 110
La contribution de la France à la construction du LHC	P. 112
Des accélérateurs de faisceaux intenses de protons	P. 113
Les collisionneurs électron-positon du futur	P. 114
Des circuits intégrés pour les expériences Alice et Star	P. 115
De nouveaux capteurs thermométriques ultrasensibles pour les bolomètres	P. 116
Une nouvelle génération de détecteurs semi-conducteurs	P. 117
Les miroirs de Virgo	P. 118
Les systèmes d'acquisition de données au LHC	P. 119
Datagrid, projet européen de grille de calcul	P. 120
Le management de projet	P. 122
Transferts de technologie	P. 124
La valorisation des sources d'ions	P. 128
C4I: Centre de compétences en conception de circuits intégrés	P. 129
La mesure des faibles radioactivités	P. 130
Ganil et Normandie-Incubation	P. 131
Une start-up pour le séquençage de l'ADN	P. 132
PARTENARIATS	P. 134
L'action internationale	P. 136
L'IN2P3 et l'enseignement	P. 138
La communication et l'information scientifique et technique	P. 140
PROGRAMMES ET STRUCTURES	P. 144
Les programmes	P. 146
L'IN2P3 en chiffres	P. 150
La direction	P. 151
Les laboratoires	P. 152
SIGLES ET ACRONYMES	P. 156



DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Jean-Jacques Aubert

COORDINATION ÉDITORIALE

Dominique Armand

Geneviève Edelheit

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Reza Ansari

Isabelle Billard

Vincent Breton

Gilles de France

Serge Kox

Yvon Le Beyec

Marcel Lieuvin

Sylvie Rosier-Lees

CONCEPTION ET RÉALISATION

Page B

IMPRESSION

Aubin Imprimeur

novembre 2001