



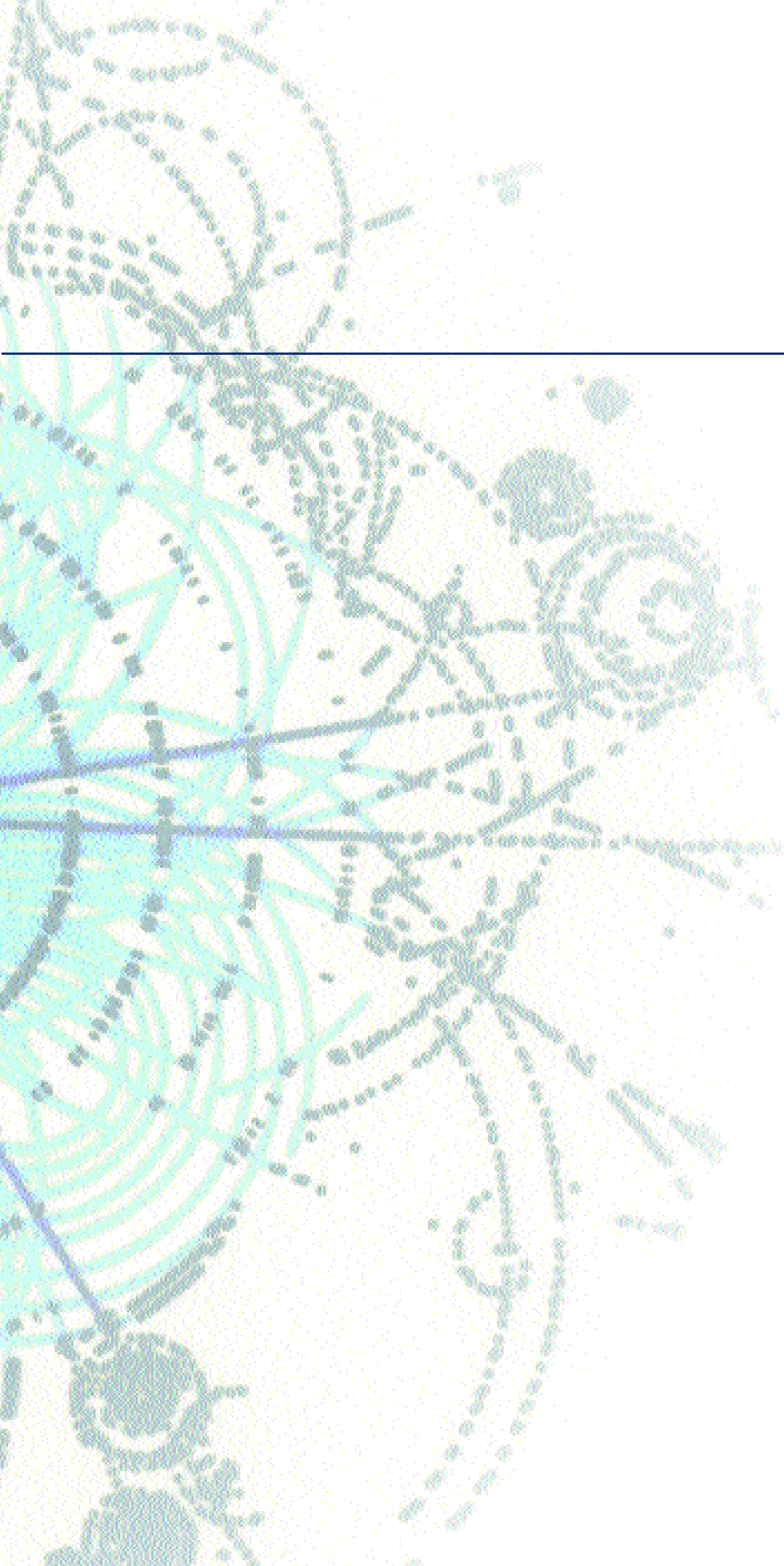
RAPPORT D'ACTIVITÉ 1994-1997

IN2P3

Institut
National
de Physique
Nucléaire
et de Physique
des Particules

IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES



Sommaire

AVANT-PROPOS

page 6

AVANCÉES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

page 9

PARTENARIATS

page 141

PROGRAMMES ET STRUCTURES

page 157



© CNRS/N. Tiget.

Avant-propos

***E**n quelques mois, l'Institut édite deux documents de référence. Le premier est de nature prospective : le Plan d'action, diffusé au début de l'année 1998, fixe, à partir des initiatives des chercheurs et des évaluations du Conseil scientifique, les orientations que nous entendons suivre et les programmes que nous souhaitons développer jusqu'en l'an 2000. Le second, ce présent rapport d'activité, rend compte de la recherche et de ses résultats au cours des dernières années. Dans une science qui pourtant n'évolue, comme on se plaît à le dire, que sur des temps longs, on découvrira à sa lecture, l'ampleur des changements intervenus en quatre ans et l'originalité des résultats obtenus.*

Donnons-en quelques exemples, non exclusifs et qui ne constituent en aucune façon un palmarès.

La décision de construire le LHC, intervenue dans les derniers jours de 1994, a constitué un événement majeur. Elle marque la capacité et la volonté des Européens, qui vont pouvoir étudier, avec des collaborateurs venus du monde entier, les événements élémentaires mettant en jeu une énergie de l'ordre du TeV (mille milliards d'électron-volts), là où tout semble indiquer qu'une physique nouvelle devrait s'ouvrir. Trouver l'origine des masses, découvrir les particules du monde supersymétrique, élargir d'un coup le cadre du « Modèle standard » : voici les perspectives historiques nouvelles qui s'offrent aux jeunes chercheurs de l'IN2P3.

Une autre évolution radicale est en cours, où l'Institut joue un rôle mondial majeur : élargir d'un coup les champs de la physique des noyaux en les bombardant avec des noyaux radioactifs. La réalisation de Spiral qui va devenir opérationnel à Ganil a mobilisé talents et énergies pendant ces dernières années. Les physiciens ont conçu des expériences originales pour exploiter ses possibilités, par exemple dans le domaine des noyaux exotiques où l'étude des « halos » de faible densité donne accès à une forme nouvelle de la matière nucléaire, qu'on pensait bien installée dans sa densité quasi uniforme. Les chercheurs de l'IN2P3 disposeront, pour plusieurs années, de l'instrument de ce type le plus performant au monde et partageront ce nouveau domaine de recherche avec leurs collègues/concurrents accourus de loin.

La physique hadronique a su gérer une transition à la fois difficile par les contraintes qu'elle a dû subir et féconde par les perspectives ouvertes. Renoncer à l'outil privilégié des faisceaux de protons pour étudier les quarks dans les noyaux, cela a signifié la fermeture de Saturne et la fin d'un programme de qualité. Mais cela a permis de développer, en peu de temps et grâce aux efforts d'un nombre d'abord limité de physiciens, l'utilisation d'une sonde élémentaire, l'électron, pour pousser plus loin ces études. Nous sommes convaincus que cette voie d'avenir passera par la construction d'un accélérateur de 30 GeV dont le projet Elfe a montré la faisabilité et les mérites.

Même si sa portée paraît moins générale, la réussite du programme du Vivitron doit être comptée très positivement au bilan de ces dernières années. Cette machine originale fonctionne désormais avec une fiabilité qui en fait un instrument de référence en Europe dans le champ de la structure nucléaire. Les études des propriétés de la matière nucléaire dans ses états extrêmes de rotation et de déformation ont pris un éclairage nouveau et passionnant. Le développement technologique a joué, dans ce nouvel élan, un rôle déterminant : le multidétecteur Euroball, construit en un effort collectif, par des dizaines de laboratoires européens, a été l'outil indispensable de ce succès.

Au titre des domaines émergents, on relève aussi le développement de la physique des neutrinos. Après des années d'expériences audacieuses et souvent marginales, le domaine a acquis un dynamisme scientifique considérable, les idées originales d'expériences fleurissent et se réalisent, avec parfois le sentiment qu'à travers l'étude des neutrinos, on pourrait bien apporter une contribution décisive au développement de la physique.

En astrophysique des particules, des résultats marquants ont été obtenus, en particulier sur les rayons γ cosmiques de haute énergie ou dans la recherche de la matière noire. On a pu observer en direct, à cette occasion, les capacités magnifiques des physiciens à imaginer des expériences inédites, à investir avec audace les domaines nouveaux, à s'approprier de la connaissance à grande allure et à la transformer en interrogations. L'IN2P3, dans un premier temps, a pris grand soin de ne pas trop contraindre ce nécessaire foisonnement, tout en sachant que bientôt des choix s'imposeront.

Les recherches de l'Institut avancent grâce à une interaction continue entre science et technologie, à un degré sans doute supérieur à ce que l'on connaît dans d'autres domaines. Cette caractéristique détermine la vie de l'Institut depuis sa création et légitime le poids (souvent mal compris) des activités technologiques dans ses laboratoires. Ce rapport rend compte du dynamisme et de l'originalité de ces activités.

Le lecteur sera aussi frappé par la place croissante que prennent les recherches liées à ce que l'on convient d'appeler la demande sociale. C'est vrai, les progrès sont frappants. Ils demeurent à nos yeux encore insuffisants, car les technologies souvent très avancées de nos laboratoires doivent être mises en interaction plus forte avec l'industrie. Le changement le plus profond dans ce domaine vient de l'investissement réussi dans les recherches concernant l'électronucléaire. Après des dizaines d'années où, pour des raisons très compréhensibles, nous n'avons pas été impliqués dans ce domaine, la loi du 31 décembre 1991 a marqué un nouveau départ. Déjà nos contributions y sont importantes et des possibilités (et donc des responsabilités) encore plus étendues s'annoncent.

D'autres faits marquants mériteraient d'être relevés. On les découvrira, avec intérêt et parfois surprise, au fil des pages. Tous portent témoignage du dynamisme de la recherche dans nos laboratoires. Ainsi, ce recueil est-il d'abord le signe tangible de la qualité du travail des personnels de l'Institut, le reflet de leur ardeur et de leurs ambitions.

Claude Détraz
Directeur de l'IN2P3

Avancées scientifiques et technologiques

QUARKS ET LEPTONS

page 11

PHYSIQUE HADRONIQUE

page 43

MATIÈRE NUCLÉAIRE

page 57

CHAMPS, PARTICULES ET NOYAUX DANS L'UNIVERS

page 75

RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES

page 93

TECHNOLOGIE DES ACCÉLÉRATEURS ET DES DÉTECTEURS

page 109



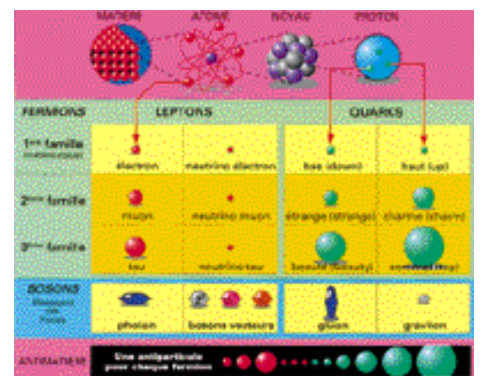
*Prototype
pour le détecteur
de traces
au silicium de CMS.
© Cern.*

Quarks et leptons

Le domaine «Quarks et leptons» rassemble les recherches expérimentales visant à faire progresser la connaissance des constituants les plus élémentaires de la matière - les quarks et les leptons, considérés actuellement comme tels - et de leurs interactions mutuelles. Ces recherches conduisent à la mise en évidence ou à la mise en question d'un ensemble de principes de symétries simplificatrices, tout en s'épanouissant dans l'étude d'une richesse croissante de divers états de la matière.

Les avancées parallèles et couplées des observations expérimentales et des progrès théoriques enregistrés depuis les années 60 ont permis l'élaboration de ce qui est appelé le Modèle standard. Celui-ci comprend la description de l'interaction électro-faible, résultant de l'unification des interactions électromagnétique et faible, et de l'interaction forte (la chromodynamique quantique ou QCD).

Une illustration schématique des éléments essentiels de ce Modèle standard, présentée ci-contre, permet d'éclairer la vision actuelle du monde des constituants fondamentaux et de leurs interactions. Ce tableau des constituants révèle des régularités qui sont apparues au gré de l'accumulation des résultats expérimentaux et de leurs interprétations théoriques. Les constituants se rangent ainsi selon trois familles de quatre éléments chacune: les particules les plus élémentaires appelées fermions, car de spin 1/2. La première famille suffit à elle seule à la description de notre environnement dans les conditions courantes. Elle est constituée de deux leptons, l'électron et le neutrino qui lui est associé, et des 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 avec cependant des masses plus élevées.



Constituants élémentaires de la matière et forces fondamentales.

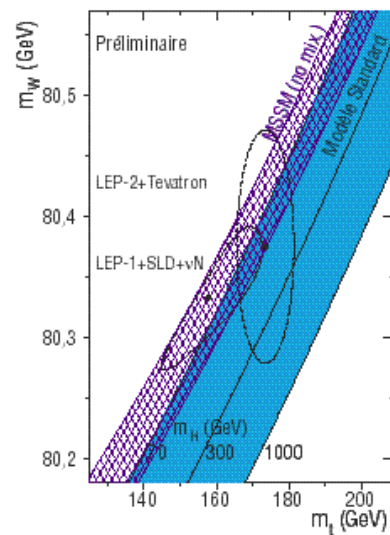
Trois des quatre types d'interactions sont représentés dans l'illustration p. 11 par les bosons vecteurs qui en sont les messagers et par ordre d'intensité décroissante: le gluon pour l'interaction forte, le photon pour l'interaction électromagnétique et les bosons W et Z pour l'interaction faible. L'interaction gravitationnelle propagée par le graviton ne figure pas dans le schéma dans la mesure où le Modèle standard ne rend pas encore compte de celle-ci.

De même que les interactions électromagnétiques traduisent les forces s'exerçant entre les particules ayant une charge électrique, la force forte décrite par la chromodynamique quantique s'exerce entre les quarks «porteurs» d'une charge de couleur (trois couleurs et trois anticouleurs) par l'intermédiaire des gluons. La charge de couleur n'a jamais pu être isolée; en effet, les seuls objets observés sont les hadrons, composés de trois quarks de couleur différente, ou les mésons, constitués de paires quark-antiquark de couleur opposée. A chacun des fermions correspond son antiparticule, semblable mais de charge opposée à la particule (conjugaison de charge).

L'ensemble du Modèle standard, esquissé dans ce qui précède, était déjà établi au début de la période couverte par ce rapport d'activité si ce n'est que la preuve directe du quark top, le plus lourd, n'a été apportée qu'en 1995 et que le neutrino tauique n'a pas encore été observé directement.

Les résultats expérimentaux qui ont marqué cette période relèvent de deux approches de nature complémentaire: d'une part, une moisson abondante de mesures de plus en plus variées et de plus en plus précises a été rassemblée. Toutes les confrontations qui ont été faites avec les prédictions du Modèle standard n'ont fait que confirmer la validité de celui-ci; d'autre part, un grand nombre de recherches ont visé à mettre en évidence des prolongements du Modèle standard ou des phénomènes nouveaux.

En effet, malgré la précision avec laquelle il rend compte de l'ensemble des résultats expérimentaux, le Modèle standard n'est pas complètement satisfaisant. L'unification simplificatrice des interactions électromagnétique et faible dans un même formalisme implique déjà une brisure de symétrie, ne serait-ce que dans la différence de leurs intensités ou dans la différence de masse entre le photon et les bosons W ou Z. L'introduction d'une nouvelle particule, le boson de Higgs, fournirait une manière d'échapper à ces difficultés. On franchirait un pas de plus en élaborant une théorie unifiée encore plus large qui inclurait la théorie électrofaible, la QCD, et même la gravité. Dans cette direction, le concept de supersymétrie semble très prometteur. Cette nouvelle symétrie associerait à chaque fermion (constituant) un boson (vecteur des interactions). Ainsi, chaque particule aurait



Contraintes sur la masse du boson de Higgs dans le Modèle standard (bleu) et dans le modèle supersymétrique minimal (MSSM en violet) en fonction de la masse du boson W et du quark top. Les contours en traits pleins et pointillés délimitent les zones, estimées respectivement à partir de mesures indirectes (LEP-1, Stanford et expériences de diffusion de neutrinos) et directes (LEP-2 et Tevatron).

une image supersymétrique qui reste à découvrir.

Ces extensions du Modèle standard donnent des pistes d'exploration. Quelques effets inattendus ont été observés dans divers domaines, certains ont été contredits par des mesures plus précises et les autres sont jusqu'ici trop ténus pour que l'on puisse conclure à des preuves. Aucune des extensions élaborées pour aller au-delà du Modèle standard n'a encore reçu de confirmation expérimentale indéniable, mais en contrepartie, l'accord observé entre toutes les mesures et les prédictions de ce modèle impose des contraintes fortes aux extensions envisageables.

Les activités de l'Institut dans ce domaine de la physique des constituants élémentaires et des interactions fondamentales peuvent être regroupées en cinq grands axes, examinés ci-dessous.

L'étude des interactions électron-positon au LEP

Le LEP, collisionneur électron-positon construit au Cern, a continué de fonctionner de façon remarquable au cours de ces années et deux phases distinctes se sont succédé. La première, correspondant aux années 1994 et 1995, a permis de poursuivre l'étude détaillée des désintégrations du boson Z⁰; pour cela, l'énergie du LEP a été maintenue à 91 GeV ou à son voisinage. Chacune des quatre expériences a ainsi pu porter de 2 à 4,2 millions le nombre de désintégrations observées. Dans la seconde

phase qui a débuté à la fin de 1995, l'énergie du LEP a été augmentée par paliers grâce à l'installation progressive des cavités supraconductrices requises pour atteindre 200 GeV dans sa phase ultime, le LEP-2. Les étapes de cette montée en énergie ont été de 136 GeV en 1995, de 161 puis 172 GeV en 1996, ce qui a permis pour la première fois la matérialisation et l'observation de paires de bosons W, et enfin de 183 GeV en 1997.

La physique étudiée à LEP est d'une grande richesse; les thèmes développés ci-dessous ont été particulièrement étudiés par les groupes de l'IN2P3 dans l'une ou l'autre des expériences Aleph, Delphi et L3.

Les mesures des paramètres des bosons Z⁰ et W[±] ainsi que leurs couplages ont permis de déterminer la masse du Z⁰ avec une précision de 2 MeV et donné une mesure préliminaire de la masse du W à LEP-2, en combinant les résultats des quatre expériences. Le nombre de 3 pour les familles de neutrinos est établi avec une précision de 4 pour 1000.



Cavités supraconductrices pour LEP-2 au Cern. © Cern.

L'étude des propriétés de production et de désintégration des saveurs lourdes a conduit notamment à la mesure de la production de paires $b\bar{b}$, test critique du Modèle standard car cette mesure est sensible à la masse du top et à l'effet de particules lourdes qui n'ont pas encore été observées mais qui peuvent intervenir de façon virtuelle dans les diagrammes.

Les recherches et les études des oscillations de mésons beaux: l'oscillation du B_d^0 a été observée et la mesure de sa période donne la valeur de la différence de masse des états propres lourds et légers.

La spectroscopie des particules charmées et des hadrons beaux: des baryons associant des quarks de beauté et d'étrangeté ont pu être isolés.

L'étude des propriétés de production et de désintégration du lepton tau: cette particule est singulière puisqu'elle est un lepton comme l'électron et le muon avec lesquels on a pu établir l'universalité des couplages et que, par ailleurs, sa masse est élevée. Cette propriété lui permet une grande richesse de désintégrations possibles, ce qui a ainsi conduit à un nouveau champ de recherche.

La recherche des bosons de Higgs standard et supersymétriques est la façon directe d'élucider le mécanisme de la brisure de la symétrie électrofaible. Les analyses développées par les expériences LEP ont établi une limite inférieure de 84 à 88 GeV pour la masse d'un boson standard. De même une limite de 71 à 76 GeV a pu être obtenue sur la masse du Higgs supersymétrique le plus léger.

La recherche de particules supersymétriques: aucune particule de ce type n'a été mise en évidence, mais des limites de masse très contraignantes ont été établies.

L'IN2P3 est resté fortement impliqué dans les trois expériences Aleph, Delphi et L3 avec les participations respectives de cinq, six et deux laboratoires qui ont rassemblé au total une centaine de physiciens. L'analyse des données a représenté l'essentiel du travail des groupes et elle a été fortement favorisée par les moyens informatiques disponibles dans les laboratoires et particulièrement au Centre de calcul de Lyon.

Au cours de ces quatre années, les groupes de l'IN2P3 ont bien sûr assuré la maintenance des parties de détecteurs dont ils avaient assumé la construction et ils ont contribué à leurs améliorations. Les plus notables ont concerné l'amélioration de leur herméticité (Delphi et L3), l'extension des détecteurs de vertex (Aleph et Delphi), l'électronique de déclenchement pour l'expérience L3, la modernisation des processeurs d'acquisition (Aleph). Ces transformations ont été motivées par le besoin d'accroître les performances des détecteurs en vue de la phase à haute énergie et particulièrement



Le détecteur H1.
© Desy.

pour les signatures par énergie manquante ou production de particules de beauté dans la recherche de la supersymétrie et du boson de Higgs.

L'expérience H1 à Hera

En 1992, le laboratoire Desy à Hambourg a mis en fonctionnement Hera, le premier collisionneur positon-proton. Celui-ci permet d'atteindre une énergie de 300 GeV dans le centre de masse de la collision, ce qui représente un bond d'un facteur de plus de 10 sur les énergies qui étaient accessibles jusque-là. Les années 1994 à 1997 ont vu l'accroissement régulier des performances de la machine, comme le traduit la progression des luminosités délivrées annuellement.

L'IN2P3 est impliqué dans l'expérience H1 depuis son début, avec d'abord trois puis quatre laboratoires, après qu'un nouveau groupe a été formé à Marseille en 1994. Après la construction du détecteur initial, une contribution a été apportée à son amélioration par la participation à la construction du nouveau calorimètre arrière Spacal. Les groupes de l'IN2P3 ont eu un impact sur le choix de la calorimétrie à fibres scintillantes puis dans la réalisation de l'électronique de lecture et d'acquisition. Les analyses des données accumulées ont apporté des résultats dans plusieurs domaines de recherche.

- Des études fines de la structure du proton ont été réalisées par la mesure de la fonction de structure F_2 dans un domaine d'énergie jusqu'ici inaccessible. Le proton est ainsi sondé avec une finesse meilleure que le centième de sa taille.

- L'analyse d'événements présentant des topologies particulières, comme la présence de un ou plusieurs jets, permet de donner une autre mesure de la constante α_s des interactions fortes ou de mettre en évidence des classes d'événements qui s'interprètent comme le résultat de l'échange d'un poméron.

- L'observation d'événements constitués d'un jet et d'un positon énergétique à grand angle en nombre supérieur à celui des prédictions des processus standard, ou encore d'événements avec un muon et de l'énergie manquante représente un phénomène inattendu. Il reste à vérifier ces observations et, si elles se confirment, à comprendre l'origine de ces phénomènes.

Les physiciens de l'IN2P3, qui ont été aux environs d'une trentaine, ont eu une contribution marquée ou prépondérante à tous ces sujets de recherche.

La physique des neutrinos

Comme le rappelle l'illustration p. 11, le Modèle standard comporte trois types de neutrinos dont la masse est supposée nulle. Ce schéma est conforme aux résultats accumulés depuis l'existence, postulée par Pauli en 1929, du neutrino. Si le nombre de trois neutrinos a été clairement établi en 1990 par le LEP, la valeur de leur masse n'est toujours pas connue. Seules des valeurs supérieures ont pu être établies par des mesures directes: 5 eV pour le neutrino électronique, 170 KeV pour le neutrino muonique, 24 MeV pour le neutrino tauique, cette dernière limite ayant d'ailleurs été établie par le LEP.

Dans une situation où au moins un neutrino d'une famille aurait une masse non nulle, des transitions entre familles pourraient survenir et conduire ainsi à l'observation de phénomènes d'oscillations. C'est là une manière d'accroître de plusieurs ordres de grandeur la sensibilité à des masses non nulles.

De fait, un certain nombre d'observations troublantes ont été publiées ces dernières années. Ce sont, d'une part, un déficit d'un facteur environ 2 par rapport au flux anticipé des neutrinos d'origine solaire, d'autre part, une anomalie dans le rapport des flux de neutrinos de types électronique et muonique engendrés par les rayons cosmiques dans l'atmosphère, enfin, peut-être l'observation récente à Los Alamos de l'apparition de neutrinos électroniques dans un faisceau de neutrinos muoniques. L'interprétation de ces résultats en termes d'oscillation est une possibilité qui établirait ainsi le fait que tous les neutrinos ne peuvent avoir une masse nulle. Les neutrinos restent donc un puzzle en physique et l'Institut est fortement impliqué dans plusieurs tentatives de clarification.

L'expérience **Nomad** au Cern cherche à mettre en évidence l'apparition de neutrinos tauiques dans un faisceau de neutrinos muoniques. La sensibilité aux environs de l'électron-volt se situe dans une plage qui pourrait représenter une contribution à la masse manquante dans l'Univers. Deux laboratoires de l'Institut y participent, leurs contributions à l'appareillage ont été centrées sur le détecteur à rayonnement de transition et à l'électronique de lecture.

Une série d'expériences fondées aussi sur un phénomène possible d'oscillation ont cherché à mettre en évidence la disparition d'antineutrinos électroniques issus de réacteurs. La première expérience, qui impliquait quatre laboratoires de l'IN2P3 et dont le résultat final a été publié en 1995, a été installée auprès des réacteurs du Bugey. Un accroissement de sensibilité d'un facteur 10 a ensuite pu être gagné dans une deuxième expérience, grâce à une implantation à 1 km des deux réacteurs construits

Chooz:
un nouveau
résultat
sur la masse
du neutrino
page35

à la centrale de Chooz dans les Ardennes.

Une approche différente consiste à rechercher l'observation de double désintégration bêta sans émission de neutrino, ce qui prouverait que le neutrino est de type Majorana, c'est-à-dire qu'il est sa propre antiparticule et que sa masse n'est pas nulle. Ce programme de longue haleine appelé Nemo, qui s'effectue au Laboratoire souterrain de Modane, procède en plusieurs phases. La première a établi le principe de détection des deux électrons et la mesure de leur direction et énergie dans un détecteur d'ultrabasse radioactivité. La deuxième phase, qui s'est achevée en 1997, a permis de tester un prototype à l'échelle du dixième du détecteur final. L'accès à une large palette de noyaux isotopiquement enrichis et purifiés est un des points forts de cette expérience.

Enfin, l'expérience appelée Munu vise à déceler l'existence d'un moment magnétique anormal du neutrino en mesurant le spectre en énergie de l'électron diffusé par interaction d'antineutrinos électroniques. L'installation de cette expérience s'est achevée fin 1997 auprès d'un des réacteurs de la centrale du Bugey. La sensibilité attendue est de quelques 10^{-11} magnéton de Bohr, une gamme de valeur qui pourrait expliquer un déficit de neutrinos solaires.

Des programmes de R&D ont été lancés dans le but d'étudier la faisabilité d'un détecteur de neutrinos électroniques susceptible de reconstituer, en temps réel, l'ensemble du spectre des neutrinos solaires. Basé sur une chambre à projection temporelle de grand volume, un tel détecteur vise à mesurer simultanément l'énergie et la direction de l'électron diffusé. Deux approches ont été poursuivies utilisant comme gaz l'une de l'hélium (Hellaz), l'autre du fréon (Munu).

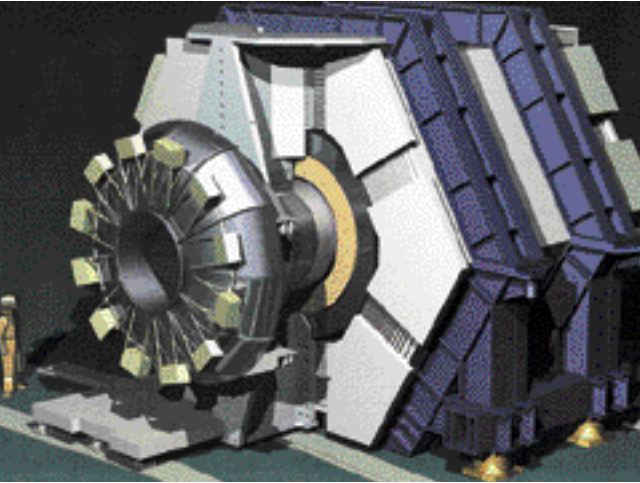
L'ensemble des expériences de ce domaine a rassemblé au cours de ces années environ cinquante physiciens.

La double
désintégration
bêta et la
masse du
neutrino
page32

L'étude de la violation de CP

Plus de trente ans après sa première observation, la nature de la violation de la symétrie CP dans les interactions faibles n'est toujours pas élucidée. L'importance de sa compréhension dépasse le cadre de la physique des particules du fait de son lien avec l'évolution de l'antimatière dans l'Univers primordial.

Jusqu'ici la violation de CP n'a été observée que dans les désintégrations des mésons K^0 qui comprennent un quark étrange. Il est primordial de poursuivre son étude et de l'étendre aux désintégrations des mésons de beauté qui comprennent un quark b. Dans la période 1994-1997, l'Institut a été impliqué dans trois expériences. Deux



*Détecteur Babar
pour l'usine
à mésons beaux
à Stanford
aux États-Unis.*

d'entre elles concernent l'étude de la violation de CP dans le système des mésons K et la dernière concerne le système des mésons B.

L'expérience CPLEar a étudié les violations d'invariance des kaons neutres. Elle teste les symétries CP (conjugaison de charge et parité), T (renverse-

ment du temps) et CPT. La collection des données est achevée depuis 1996 et les résultats sont pratiquement tous publiés. Les efforts des physiciens ont surtout porté sur le système de déclenchement et sur l'analyse des modes de désintégration en trois pions et le test crucial de l'invariance CPT.

L'expérience NA48 porte aussi sur l'étude de la violation de CP dans le système K_S , K_L et plus particulièrement le test de sa violation directe dans la désintégration du kaon neutre en deux pions. Cette expérience n'a d'intérêt que si elle atteint une précision nettement meilleure que la précédente, NA31, et sa concurrente à Fermilab. Elle requiert donc plusieurs millions d'événements dans chaque mode et une maîtrise stricte des erreurs systématiques. Un groupe du Laboratoire de l'accélérateur linéaire a rejoint l'expérience en 1994 alors que sa construction était bien avancée et participe à la prise des données et à leur analyse.

Une nouvelle voie de recherche a été ouverte en 1994 par les groupes de quatre laboratoires de l'IN2P3 : c'est l'engagement dans l'expérience Babar. La décision a été prise en 1993 aux États Unis de construire à Stanford une usine à mésons beaux, c'est-à-dire un collisionneur électron-positon asymétrique de haute intensité à l'énergie de 9 GeV. Les paires de mésons $B_d\bar{B}_d$ qui sont produites constituent une source particulièrement adaptée à l'étude de l'origine de la violation de CP dans ce système. Les physiciens de l'IN2P3 et ceux du laboratoire du CEA impliqués dans ce projet ont coordonné leurs efforts pour prendre en charge les détecteurs d'identification des particules chargées émises dans les désintégrations des mésons. Outre le but essentiel de progresser sur la violation de CP, ce programme permettra l'étude détaillée des leptons tau, des mésons B et D et par là même de progresser aussi dans la compréhension des interactions faible et forte.

Le nombre de chercheurs de ce domaine a progressivement augmenté dans la période 1994-1997 par suite de l'engagement dans les expériences NA48 et Babar pour atteindre quarante physiciens. De plus, une participation de laboratoires de l'IN2P3 à l'expérience LHCb au Cern a commencé à prendre forme en 1997.

Conjugaison
de charge,
parité, temps :
symétries dans
le système des
kaons neutres
page 39

Détection
de lumière
Cerenkov
dans
l'expérience
Babar
de violation
de symétrie
page130

La construction des détecteurs du LHC

Les années 1994-1997 ont été d'une grande importance pour l'avancement du projet LHC et de ses détecteurs. La décision de construire ce collisionneur proton-proton a été prise par les pays membres du Cern en décembre 1994. Cette décision a d'abord été acquise dans le cadre d'une construction en deux étapes, la première conduisant à une énergie de collision à 9 TeV en 2004, la seconde à l'énergie ultime de 14 TeV en 2008. Puis une revue du projet a eu lieu fin 1996, après deux années supplémentaires mises à profit pour approfondir la conception de l'accélérateur et des détecteurs. Cette revue et les avancées sur des contributions au financement par des pays non membres du Cern ont permis de revenir à une construction en une seule étape et à un calendrier de mise en exploitation en 2005.

Un programme très soutenu de R&D sur les détecteurs a été mené par les laboratoires de l'IN2P3 depuis 1990. La plupart de ces développements ont conduit à des résultats qui ont fondamentalement orienté les choix des techniques retenues pour les détecteurs.

L'IN2P3 a pris la décision de participer aux deux détecteurs polyvalents Atlas et CMS, avec un effort plus important dans le premier. Les responsabilités prises par les laboratoires se sont focalisées progressivement au cours de cette période sur un nombre limité de sous-détecteurs, les choix étant fortement orientés par les programmes de R&D et les compétences particulières dans l'Institut. Ces choix ont aussi demandé un effort de simulation détaillée de la réponse attendue des détecteurs aux processus physiques essentiels.

• Six laboratoires sont engagés dans la construction du détecteur Atlas. Cinq d'entre eux (Annecy, Grenoble, Marseille, Orsay et Paris) coordonnent leurs efforts sur la calorimétrie électromagnétique à argon liquide suivant un nouveau concept qui a été initié par les physiciens de l'IN2P3. Cette contribution représente 80 % de l'effort de l'Institut sur Atlas, ce qui lui donne un poids prépondérant au niveau de la collaboration. Les responsabilités couvrent à la fois la conception, la réalisation et les tests d'éléments de mécanique et d'électronique. La mécanique comporte la fabrication des absorbeurs constitués de sandwichs plomb-acier, le suivi de fabrication des circuits constituant les électrodes puis l'assemblage et les tests des modules constituant les calorimètres. L'électronique, qui a aussi requis des développements complexes, comporte les circuits d'amplification, de stockage analogique et de conversion digitale des signaux. De plus ces circuits ont dû être réalisés en une technologie durcie aux radiations.

Les absorbeurs du calorimètre à argon liquide d'Atlas
page124

L'engagement est complété par une contribution à deux autres détecteurs. Le laboratoire de physique corpusculaire de Clermont travaille sur la lecture des signaux issus du calorimètre hadronique construit à base de plaques de scintillateur plastique. Le Centre de physique des particules de Marseille met à profit ses compétences particulières sur la détection de traces chargées dans des pixels au silicium pour participer à la construction du détecteur de micro vertex d'Atlas.

● Quatre laboratoires sont engagés dans la construction du détecteur CMS. Leur contribution sera également répartie sur la calorimétrie et la détection des traces.

Trois d'entre eux coordonnent leurs efforts sur la calorimétrie électromagnétique à cristaux scintillants de tungstate de plomb (Annecy, Lyon et Palaiseau). Les propriétés de ces cristaux, qui ont finalement été choisis par la collaboration CMS, ont été particulièrement étudiées au LAPP pendant la phase de R&D. La responsabilité de l'IN2P3 porte sur le montage mécanique des cristaux et la détection de la lumière par des photodiodes à avalanche.

Deux laboratoires (Lyon et Strasbourg) ont pris des responsabilités dans le détecteur de traces chargées. Elles concernent les détecteurs eux-mêmes et leur électronique de lecture. La résistance aux radiations de cet ensemble est un impératif qui a conduit ces laboratoires à de nombreux développements technologiques.

Un cristal
de tungstate
de plomb pour
le calorimètre
électromagnétique
de CMS
page125

Perspectives

Ces années ont été marquées par un éventail de résultats qui, par leur nombre et leur précision, ont approfondi notre connaissance des constituants et de leurs interactions. Cependant rien ne vaudrait quelque découverte majeure qui ouvrirait des perspectives nouvelles de réponse aux multiples interrogations du domaine. Par exemple, quel est le mécanisme responsable de l'éventail des masses des bosons, des leptons et des quarks? Les neutrinos ont-ils une masse non nulle? Pourquoi existe-t-il trois et seulement trois familles de particules? Pourquoi l'électron et le proton ont-ils une charge électrique exactement opposée?

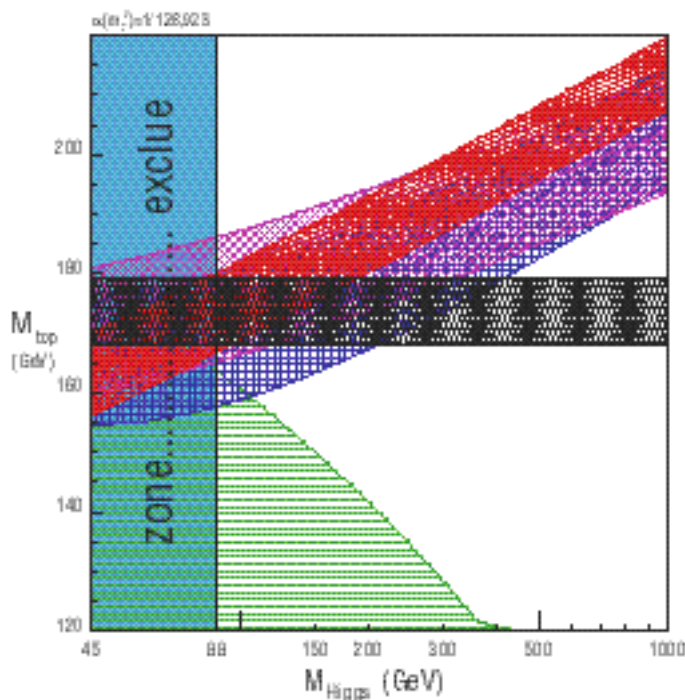
Toutes ces questions ont des portées diverses et la chance d'y répondre dépend évidemment des moyens d'expérimentation dont disposent ou disposeront les physiciens des particules. Ces moyens reposent essentiellement sur l'accès à des accélérateurs de particules d'énergies et de flux accrus et à des détecteurs plus performants. Ainsi, l'énergie du LEP est poussée au maximum, le domaine couvert par le LHC représentera un gain d'énergie d'un ordre de grandeur. Enfin, pour aller vers des énergies encore plus grandes, la recherche et développement se poursuit: parmi les projets, ceux de collisionneurs linéaires électron-positon sont les plus avancés.

La prédiction des masses du quark top et du boson de Higgs

Les mesures de précision au collisionneur électron-positon (LEP) du Cern ont permis de prédire une masse du quark top très proche de celle qui a été mesurée directement lorsque cette particule a été découverte. C'est maintenant le boson de Higgs qui est recherché au LEP. S'il existe, il pourrait y être observé si sa masse est inférieure à 105 GeV/c².

9 1186,3... C'est probablement un numéro de compte bancaire, mais pour les physiciens du Cern, c'est la masse du boson Z en MeV/c². 2494,6, c'est la valeur de la largeur de cette résonance. Ces cinq ou six chiffres sont le résultat des sept campagnes de prises de données au LEP. L'IN2P3 a participé à ce programme dans les collaborations Aleph, Delphi et L3, et a aussi pris part aux mesures d'énergie du faisceau par la méthode de dépolarisation résonante (on utilise le spin des électrons qui se polarisent dans l'anneau de collisions pour faire la mesure du champ magnétique de la machine par résonance magnétique).

Ces mesures de précision procurent une fierté bien compréhensible à leurs auteurs. Mais bien sûr, la précision n'est pas une fin en soi. La motivation physique est que la relation entre la masse du Z et sa largeur dépend de la masse de particules plus lourdes. Cette propriété unique du modèle standard des interactions faibles et électromagnétiques est due à ses symétries profondes. Les particules lourdes en question sont le quark top et le boson de Higgs. Jusqu'à son observation directe en 1994, le quark top, dont l'existence était certaine mais la masse ignorée, fournissait l'inconnue majeure aux prédictions du modèle. Cependant, une évaluation indirecte de sa masse était obtenue grâce aux mesures de précision. En mars 1994, les chercheurs du LEP avaient prédit une masse du quark top de 179 ± 20 GeV/c², masse sur laquelle convergeaient toutes les observations expérimentales. Un mois plus tard, la collaboration CDF, au laboratoire Fermi à Chicago, annonçait l'observation possible d'une nouvelle particule ayant les propriétés attendues pour le quark top, avec une masse de 174 ± 16 GeV/c²! Depuis, les mesures à Chicago se sont améliorées et la masse du top est maintenant connue avec



Un faisceau d'indices convergents.

Une fois la masse du Z connue avec précision, il n'y a plus dans le Modèle standard que deux inconnues : la masse du top et la masse du Higgs, auxquelles sont sensibles d'autres quantités mesurables, telle la largeur du Z, le rapport de désintégrations du Z en hadrons, la masse du W, les asymétries dans les désintégrations du Z. Les bandes correspondant aux diverses mesures se recoupent magnifiquement dans la région de masse du Higgs située autour de 100 GeV.

1. En bleu ciel, la région de masse du Higgs exclue par les recherches directes

de cette particule (si la masse du Higgs était plus petite que 88 GeV, on l'aurait déjà observée).

2. Bande bleu foncé : la contrainte due à la largeur totale du Z.

3. Bande verte : la contrainte due au rapport de désintégrations du Z en hadrons.

4. Bande magenta : la contrainte due à la masse du W.

5. Bande rouge : la contrainte due aux asymétries dans les désintégrations du Z.

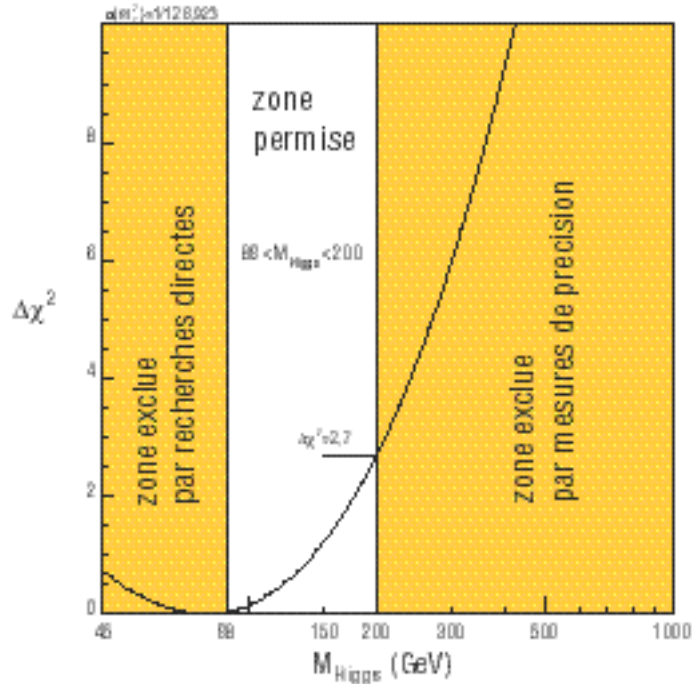
6. Bande noire : la détermination de la masse du quark top à Fermilab.

La théorie est acceptable si les différentes bandes se superposent, ce qui est le cas pour les masses du Higgs inférieures à 200 GeV.

bien plus de précision: $175 \pm 5 \text{ GeV}/c^2$.
Voilà une bonne chose de faite.

La dernière terra incognita dans le modèle standard est le mécanisme par lequel les bosons W et Z, qui, par symétrie, devraient avoir une masse nulle comme le photon, acquièrent une masse. Pour l'expliquer, le modèle standard invoque le boson de Higgs. Cette particule mystérieuse interagirait avec elle-même de telle sorte qu'il est plus économique énergétiquement de peupler le vide de bosons de Higgs en interaction que de le laisser vide justement. Comment se fait-il que nous ne voyions rien? C'est que ce Higgs est neutre et par conséquent les photons, utilisés comme mode d'investigation habituel, ne le voient pas. Les bosons W et Z, eux, interagissent avec le Higgs, cela les ralentit, et c'est justement cela que les physiciens appellent une masse.

Donc le boson de Higgs... a été cherché à LEP, et aurait été observé directement si sa masse était inférieure à $88 \text{ GeV}/c^2$. Bien que le boson de Higgs puisse apparaître comme un élément arbitraire et peu naturel dans la théorie, aucune théorie alternative convaincante, où l'on pourrait à la fois se passer du Higgs et faire des prédictions précises, n'a pu être trouvée. Le fait même que les expériences de précision soient en si bon accord avec les prédictions du modèle standard indique que, si le boson de Higgs n'existe pas, le phénomène inconnu qui en tient place doit y ressembler de très très près! Si l'on suppose un moment que le modèle standard avec son boson de Higgs est la bonne théorie, alors les mesures précises du LEP et d'ailleurs sont sensibles, à nouveau, à sa masse. Comme on le voit sur la figure (à gauche), chaque mesure de précision définit un domaine permis dans le plan (M_H , M_{top}). Les bandes correspondant aux diverses mesures se recourent magnifiquement dans la région de masse du



Une fenêtre qui se rétrécit. L'accord entre les différentes contraintes de la 1^{re} figure (et quelques autres) peut être exprimé par un facteur χ^2 en fonction de la masse du boson de Higgs. On voit que la meilleure convergence est obtenue pour $M_H = 79 \text{ GeV}$, mais qu'un accord acceptable est encore obtenu jusqu'à 200 GeV .

Higgs située autour de $100 \text{ GeV}/c^2$. Cet accord peut être quantifié en déterminant le facteur χ^2 des différentes mesures entre elles (ci-dessus). Ces mesures correspondent en fait à une mesure indirecte de la masse du Higgs: $M_H = 79_{-38}^{+62} \text{ GeV}/c^2$.

Au-delà de $200 \text{ GeV}/c^2$, l'accord est mauvais et cette région est probablement exclue. Cela permet d'affirmer que, s'il existe, le boson de Higgs doit avoir une masse située entre 88 et $200 \text{ GeV}/c^2$, avec une certaine préférence pour la région de basse masse. Cela laisse toutes ses chances à la recherche directe, d'abord au LEP jusqu'à $105 \text{ GeV}/c^2$ environ, puis au LHC jusqu'au-delà de $400 \text{ GeV}/c^2$.

Pour en savoir plus :

Sites Web:

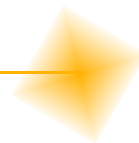
LEP electroweak working group:

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

LEP energy working group:

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

Le troisième lepton



La connaissance du lepton τ a considérablement progressé avec la moisson de résultats des expériences LEP. L'image de ce lepton est particulièrement simple et ses propriétés sont identiques à celles de l'électron et du muon. La structure des fermions fondamentaux en trois familles couplées universellement aux interactions semble être le reflet d'une symétrie encore cachée dont la compréhension est au-delà du cadre théorique actuel.

La phénoménologie de l'interaction unifiée électro-faible réclame que les constituants fondamentaux de la matière, les leptons et les quarks, soient associés par familles. La première famille comporte l'électron et son neutrino (e^- , ν_e), et deux quarks (u , d), ceux-ci étant les constituants des particules à interaction nucléaire forte (hadrons). A ce jour, trois familles ont été mises en évidence expérimentalement, correspondant aux trois leptons chargés: l'électron e , le muon μ et le lepton τ . S'agissant du troisième lepton, le τ , 3600 fois plus lourd que l'électron, il peut être une fenêtre sur la dynamique responsable de la structure en familles. En pratique, il s'agit de rechercher les différences possibles entre les propriétés du τ et celles, mieux connues, des leptons les plus légers (e , μ).

Or on sait d'après les mesures effectuées avec le LEP que le nombre de familles est limité à trois. Fondamentalement, le problème posé est de taille: quelle est la raison profonde de l'existence de trois et seulement trois familles? Pour comprendre la pertinence de cette question, il est bon de rappeler que la théorie «standard» de l'interaction électrofaible n'apporte aucun éclairage sur ce problème. En fait, la théorie marche très bien avec une seule famille de leptons et de quarks et, par extension, avec chaque famille prise séparément. Les études sur le lepton τ se situent donc dans cette démarche de compréhension des trois familles de leptons et de quarks.

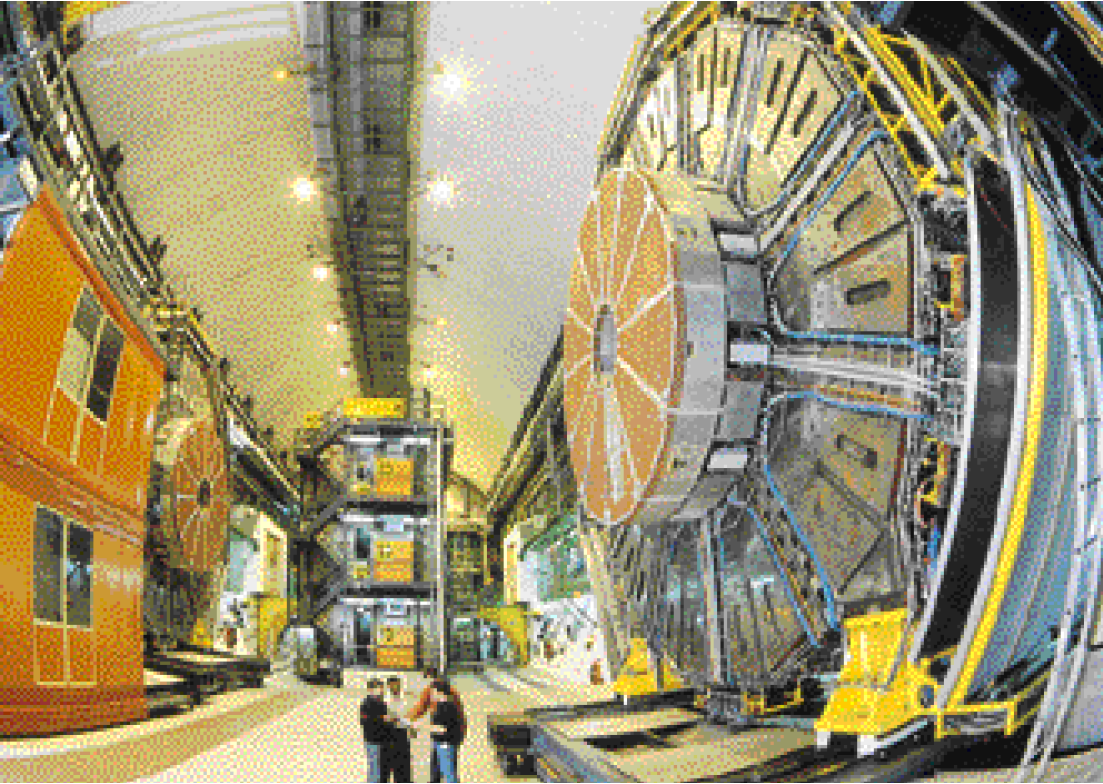
Des progrès remarquables dans la connaissance du τ ont été réalisés au cours des vingt dernières années, avec une accélération très nette depuis 1991 où le programme du LEP a commencé à produire des données en quantité importante et de très grande qualité. Actuellement,

l'étude du lepton τ se fait principalement avec LEP grâce à ses détecteurs Aleph, Delphi, L3 et Opal et à Cornell University aux États-Unis avec le détecteur Cleo.

Si l'électron est stable, les leptons μ et τ se désintègrent sous l'effet de l'interaction faible. Comme le τ est beaucoup plus lourd, sa durée de vie moyenne est très réduite (environ 3×10^{-13}) et sa désintégration conduit à des états finals très variés. Sa courte durée de vie fait qu'il ne parcourt au LEP qu'une distance moyenne de 2mm avant de se désintégrer! On conçoit donc la difficulté de cette mesure. Néanmoins, grâce aux expériences LEP, la vie moyenne du τ est maintenant connue avec une précision de 0,4 %, ce qui représente une incertitude de seulement $8 \mu\text{m}$ sur la distance de vol reconstruite par extrapolation des trajectoires mesurées à plus de 5 cm du point de désintégration.

La connaissance des états finals dans la désintégration du τ a beaucoup progressé, en particulier avec Aleph grâce à la fine granularité de son calorimètre électromagnétique. La mesure précise des différents rapports d'embranchement montre un comportement en tous points conforme au modèle standard. Cet accord peut être quantifié en comparant les déterminations des couplages des leptons aux bosons de jauge W et Z qui mesurent l'intensité des interactions électrofaibles des trois types de leptons: l'expérience tranche en faveur de la propriété d'universalité de ces couplages qui sont égaux avec une précision de 0,3 %, aussi bien pour les courants chargés (W) que neutres (Z).

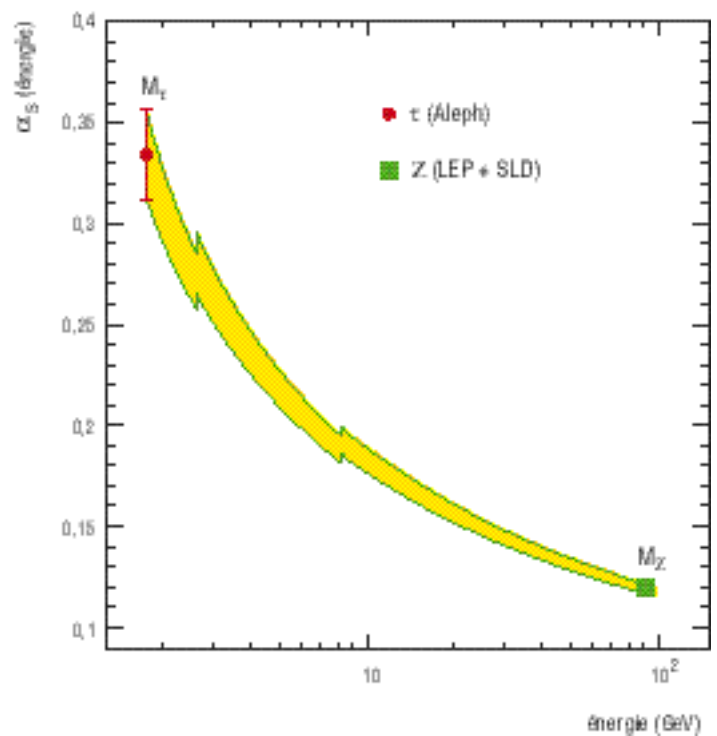
Une des plus grandes surprises de l'étude du lepton τ est venue du comportement de ses états finals hadroniques. Malgré l'échelle de masse relativement basse de ces derniers, il a été montré par Aleph qu'une description en termes de chromodynamique quantique (QCD) s'appliquait en moyenne avec une grande précision. De ce fait, la détermination, avec les données sur le τ , du couplage intrinsèque de la QCD et de son évolution en fonction de l'échelle d'énergie a pu être menée à bien avec une précision supérieure aux autres approches utilisées jusque-là. Notre connaissance du lepton τ a donc considérablement progressé avec la moisson de résultats des expériences LEP, donnant une image particulièrement simple du troisième lepton. Hormis sa grande masse et son nombre leptonique propre compatible avec l'existence de son



Vue générale du détecteur Aleph. © Cern.

Intensité effective de l'interaction forte obtenue à l'aide des données d'Aleph sur le τ et son extrapolation à plus haute énergie prédite par la chromodynamique quantique: la mesure directe de la même quantité à l'énergie correspondant à la masse du boson Z vérifie très exactement cette prédiction. Ce résultat représente le test le plus direct et le plus précis de la validité de QCD.

neutrino associé ν_τ , ses propriétés sont identiques à celles de l'électron et du muon. La structure des fermions fondamentaux en trois familles couplées universellement aux interactions semble être le reflet d'une symétrie encore cachée dont la compréhension est au-delà du cadre théorique actuel.



Pour en savoir plus :

M. Davier, Le troisième lepton, Bulletin de la Société Française de Physique (1996).

La physique de la beauté

Avec un million de désintégrations du boson Z^0 en hadrons beaux, les expériences du LEP ont pu étudier les propriétés de ces particules. Les résultats, dont la plupart sont nouveaux, sont conformes aux prédictions du modèle standard, tant pour ce qui concerne le phénomène d'oscillation des hadrons beaux que pour celui de la violation de symétrie CP.

De 1989 à 1995, chaque expérience LEP a enregistré environ un million de désintégrations du boson Z^0 en hadrons beaux. L'ensemble de ces événements a permis à la fois d'étudier le couplage du Z^0 aux quarks b et de mesurer précisément les propriétés des hadrons beaux. Les études sur le couplage Z^0 - $b\bar{b}$ concernent principalement les mesures du taux de production de la beauté et des asymétries avant-arrière, non traitées dans ce rapport. Le calcul du taux de production des quarks b se distingue de celui des autres types de quarks par la présence de corrections quantiques électrofaibles particulières, où contribue le quark top. L'effet attendu est faible, de l'ordre du pour-cent pour une masse du top égale à $175 \text{ GeV}/c^2$. Des particules plus exotiques que le top, comme certaines particules supersymétriques, peuvent

également se manifester par l'intermédiaire de ces corrections mais les effets attendus sont généralement plus faibles que le précédent. Un effort particulier a donc été fait, principalement par Aleph et Delphi, pour obtenir des mesures de précision du taux de production des quarks beaux. La précision atteinte est de 0,4 % et le taux de production est en bon accord avec la valeur prédite par le modèle standard, en incluant le quark top trouvé au Tevatron de Fermilab. (voir figure ci-contre).

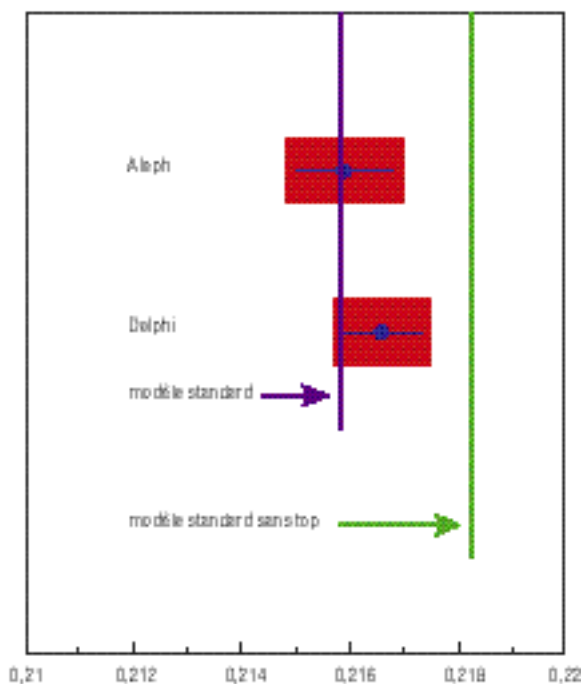
L'étude des couplages du W aux paires $q\bar{q}'$ donne accès à la physique des quarks massifs : charme (c), étrange (s) et beau (b). L'ensemble de ces couplages, dont certains doivent être complexes pour rendre compte du mécanisme de violation de CP, sont rassemblés dans une matrice 3×3 qui, dans le modèle standard, dépend de quatre paramètres réels que l'on désignera par λ , A , ρ et η . L'étude du quark b joue un rôle central dans la mesure des trois derniers paramètres. Sa durée de vie et son taux de désintégration semi-leptonique permettent de fixer A , alors que les oscillations temporelles B^0 - \bar{B}^0 et les désintégrations en un quark u, accompagné d'autres particules, dépendent aussi des valeurs de ρ et de η . Le phénomène d'oscillations temporelles provient du fait que les mésons B^0 et \bar{B}^0 sont des superpositions orthogonales de deux mésons massifs, un léger B_L^0 et l'autre lourd B_H^0 , lesquels voyagent à des vitesses différentes. Ainsi, après avoir été produit, un B^0 peut se retrouver dans un état \bar{B}^0 et vice versa, d'où le terme d'oscillation.

À LEP, revient la première mesure de la dépendance temporelle des oscillations du système B_d^0 ($\bar{b}d$) - \bar{B}_d^0 . Grâce à ces expériences, la différence de masse entre les états massifs $B_{d,H}^0$ et $B_{d,L}^0$ est connue maintenant avec une précision de 4 % : $\Delta m_d = (3,047 \pm 0,118) \times 10^{-4} \text{ eV}$.

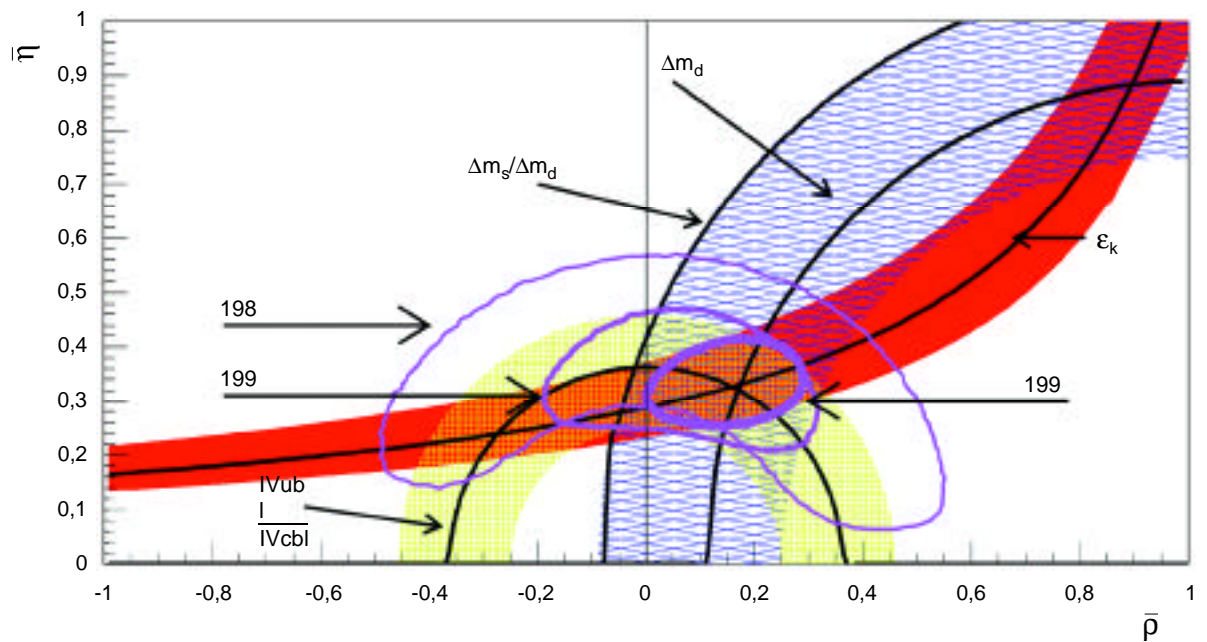
Si la période des oscillations des mésons B_d^0 est « très grande », de l'ordre de 14 ps, on s'attend à ce que celle des B_s^0 ($\bar{b}s$) soit beaucoup plus courte, inférieure ou de l'ordre de 1 ps, ce qui correspond à une distance de vol de 2 mm pour un hadron beau produit à LEP. La limite actuelle, à 95 % de niveau de confiance, sur Δm_s est supérieure à $67,1 \times 10^{-4} \text{ eV}$. Elle se situe dans la zone permise par le modèle standard qui prévoit une valeur comprise entre 33 et $138 \times 10^{-4} \text{ eV}$.

Tous les résultats, dont beaucoup sont soit des « premières » réalisées par les expériences LEP, soit dominés

Taux de production de la beauté à LEP, relatif à l'ensemble des désintégrations hadroniques du Z. Les deux lignes verticales représentent les valeurs attendues à partir du modèle standard en incluant ou non la présence du quark top. Les deux points avec les barres d'erreurs sont les mesures d'Aleph et de Delphi. Les incertitudes systématiques sont représentées par les bandes rouges et celles dues à la statistique correspondent aux traits bleus.



Vérification de la cohérence interne de la description du mécanisme de violation de CP proposé par le modèle standard. Les contours fermés, en magenta, dans le plan (ρ, η) correspondent aux régions sélectionnées par les contraintes expérimentales disponibles respectivement en 1988, 1994 et 1997: le progrès a été spectaculaire. Il est également remarquable que la région préférée par les mesures sur les oscillations des mésons B (en hachuré bleu) et les transitions $b \rightarrow u$ (en jaune) se situe dans le même domaine que celle permettant d'expliquer la violation de CP dans le système $K^0 - \bar{K}^0$ (en orange). A l'intérieur des incertitudes actuelles, le mécanisme de violation de CP est compatible avec la description donnée par le modèle standard.



par ces mêmes expériences, peuvent être rassemblés afin de tester la cohérence du mécanisme de violation de symétrie CP contenu dans le modèle standard. La figure ci-dessus représente l'évolution des résultats dans ce domaine. Un même couple de valeurs pour les paramètres ρ et η doit pouvoir expliquer toutes les transitions faibles entre quarks de familles différentes. Il est tout à fait remarquable que la zone sélectionnée par la mesure de la violation de CP dans le système $K^0 - \bar{K}^0$ se situe dans le même domaine que celle privilégiée par les oscillations des mésons B neutres et par le couplage W-b- \bar{u} . Ainsi, avant même le démarrage des usines à hadrons beaux, on a commencé à LEP l'exploration du mécanisme de violation de CP qui apparaît être très «standard» lui aussi.

Pour en savoir plus :

P. Roudeau, Physique du charme, de la beauté et du tau à LEP, trois conférences données dans le cours «Heavy Flavour Physics: a probe of nature's grand design», Varenna, 8-18 juillet 1997.

Du boson Z aux bosons W: les débuts de LEP-2

Après avoir exploré la physique du boson Z au LEP, le collisionneur électron-positon du Cern, les physiciens accèdent maintenant à la physique des bosons W, ceci grâce à l'augmentation d'énergie du collisionneur. Avec une énergie de 80 GeV par faisceau en 1996, ils ont pu mesurer avec précision la masse du boson W, un paramètre fondamental de la théorie électrofaible.

La précision de cette mesure s'est encore améliorée avec la montée en énergie (91,5 GeV par faisceau en 1997).

De plus, cette connaissance précise permet d'accéder à la masse du boson de Higgs, une des grandes inconnues et un des enjeux essentiels de la physique des particules de la décennie à venir.

Depuis l'automne 1995, les faisceaux du LEP sont accélérés à des énergies de plus en plus élevées de manière à poursuivre, dans un domaine d'énergie encore inexploré, les mesures des paramètres fondamentaux du modèle standard et les tests de sa validité entrepris à LEP-1. Bien qu'il soit à même de rendre compte de la quasi-totalité des observations expérimentales, le modèle standard a plusieurs limitations intrinsèques qui poussent les physiciens à rechercher les manifestations d'une théorie au pouvoir prédictif plus puissant. Ainsi ce modèle ne prédit-il pas la valeur de la masse des particules, ce qui a motivé la mesure expérimentale très précise de la masse

du boson Z^0 (le médiateur neutre de la force faible) à LEP-1 puis celle des bosons W (ses homologues chargés) à LEP-2.

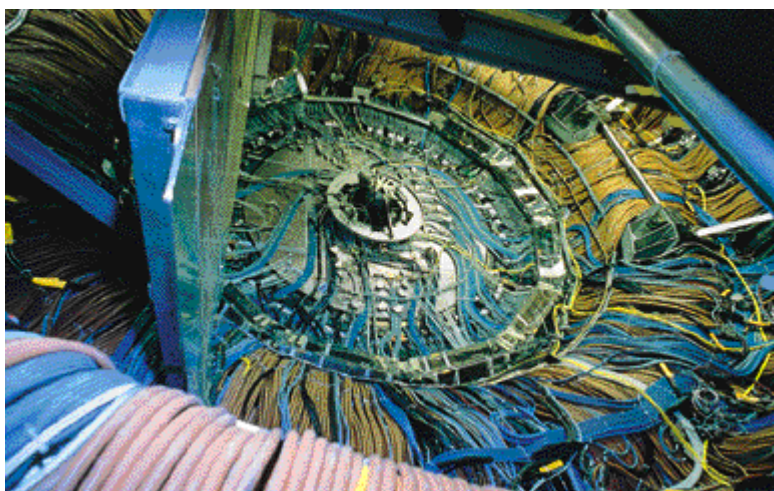
Pour mesurer la masse des bosons W, l'énergie des faisceaux disponible à LEP-1 (environ 45 GeV par faisceau) était insuffisante. Leur énergie a été portée à 80,5 GeV dès le printemps 1996, de manière à ce que les collisions électron-positon produisent des paires de bosons W^+W^- au seuil cinématique de la réaction.

La production de paires W^+W^- dans les collisions électron-positon n'avait jamais été mise en évidence. Son observation suscitait d'autant plus d'intérêt que le taux de paires produites dépend de l'existence d'interactions ponctuelles de trois bosons de jauge (γW^+W^- et $Z^0 W^+W^-$) qui expriment la structure élémentaire de l'interaction électrofaible, et que ce taux est très sensible à la valeur de la masse M_W des bosons. En quelques mois de prise de données, les quatre expériences installées au LEP ont effectivement enregistré le taux attendu de paires W^+W^- (quelques centaines), et la masse M_W a été mesurée. La valeur de M_W est obtenue en comparant le nombre observé de paires W^+W^- à celui prédit par le modèle standard. Comme cette prédiction dépend de M_W , il suffit de trouver la valeur de M_W qui permet de reproduire le nombre de paires observé. La valeur ainsi trouvée vaut $80,40 \pm 0,22$ GeV/c².

La montée en énergie s'est poursuivie en 1996 avec un palier à 86 GeV, puis un autre à 91,5 GeV en 1997. Ces énergies sont trop éloignées du seuil de la réaction pour que le taux de paires W^+W^- produites soit sensible à M_W

au point d'en permettre la mesure. Cette dernière peut néanmoins être réalisée par une autre méthode, qui présente l'avantage d'être indépendante des prédictions du modèle standard. Elle s'appuie sur la masse du système que constituent les produits de désintégration de chaque W. Les W se désintègrent en effet très rapidement en une paire quark-anti-quark ou lepton chargé-neutrino. Comme les quarks se matérialisent en jets de hadrons, les états finals observés sont constitués soit de

Vue d'une extrémité
du détecteur Delphi.
© Cern.



hadrons (46% des cas), soit de deux leptons chargés et de deux neutrinos (11 % des cas), soit de hadrons et d'un lepton chargé accompagné d'un neutrino (43 % des cas). On combine les impulsions mesurées de toutes les particules pour reconstituer la masse des deux bosons dont elles proviennent. La valeur de M_W extraite des données enregistrées avec des faisceaux de 86 et 91,5 GeV vaut $80,35 \pm 0,09 \text{ GeV}/c^2$. L'analyse des données des trois années à venir permettra de réduire cette incertitude d'un facteur 2, et les trois années à venir du programme LEP-2 devraient se concrétiser par une amélioration supplémentaire d'un facteur 2 à 3.

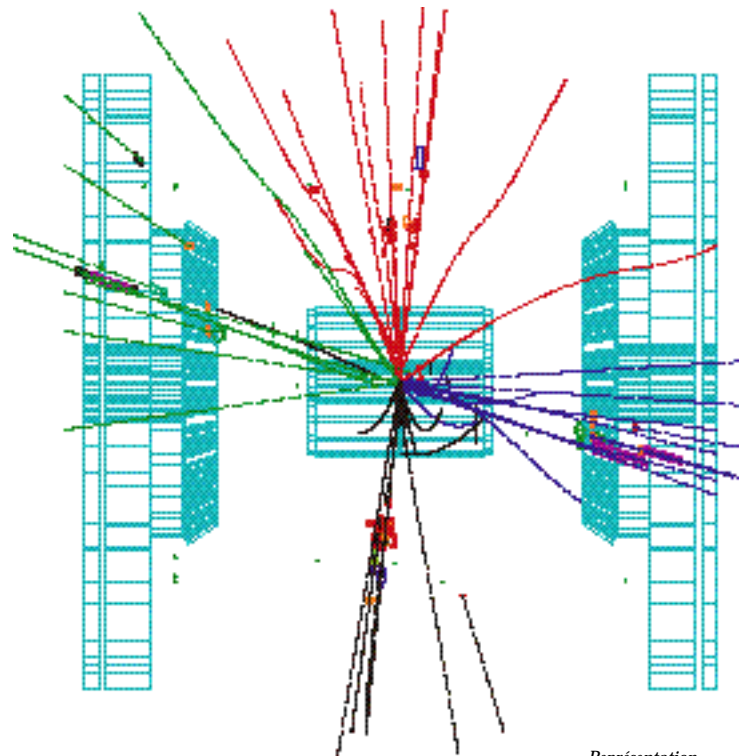
Les mesures de précision réalisées à LEP-1 permettent en fait de prédire une valeur de M_W à l'aide du formalisme du modèle standard, mais la prédiction ($M_W = 80,333 \pm 0,041 \text{ GeV}/c^2$) est trop inféodée au modèle pour constituer une véritable mesure. Elle permet cependant de tester sa validité car il serait mis en défaut si la valeur prédite différait des résultats des mesures directes.

Au-delà de l'an 2000, les mesures réalisées auprès du collisionneur proton-antiproton du laboratoire Fermi à Chicago permettront d'atteindre une précision voisine de celle obtenue à LEP-2. La comparaison des résultats des deux mesures, extraites de processus très différents (annihilation électron-positon au LEP, annihilation quark-antiquark au laboratoire Fermi), constituera un nouveau test de la validité du modèle standard. Si les deux résultats étaient en accord, leur combinaison pourrait conduire à une précision sur M_W meilleure que 30 MeV. Mais M_W n'est pas seulement un paramètre fondamental de la théorie électrofaible. Sa connaissance permet aussi d'accéder à la masse (M_H) du boson de Higgs, particule qui constitue la dernière inconnue du modèle standard et en est l'élément le plus singulier. La valeur de M_H est fonction de cinq paramètres fondamentaux (parmi lesquels M_W), dont quatre sont connus précisément. Il reste à déterminer M_W avec un maximum de précision. LEP-2 doit répondre à cette attente.

Simultanément, l'énergie des faisceaux atteindra près de 100 GeV dès 1999, ce qui permettra d'observer la production directe du boson de Higgs s'il est plus léger que 100 GeV ou d'attribuer une limite inférieure du même ordre à sa masse s'il n'est pas observé. LEP-2 offre ainsi deux moyens complémentaires de partir sur les traces du

boson de Higgs: on peut prédire la valeur de M_H à l'aide du formalisme du modèle standard puis le rechercher à la masse prédite. L'absence du boson de Higgs à la valeur prédite traduirait l'émergence d'une théorie dépassant le cadre du modèle standard.

Le LEP ne permettra sans doute pas d'étudier toute la région de masse intéressante, l'énergie maximale qu'il peut délivrer étant insuffisante. Ce n'est qu'avec la mise en service du grand collisionneur de hadrons du Cern, le LHC, dans les années 2005-2006, que cette exploration pourra être menée à son terme.



Représentation graphique de la désintégration d'une paire de bosons W en quatre jets de hadrons (expérience Delphi, 9 juillet 1996).

Pour en savoir plus :
Site Web: <http://www.cern.ch>

A la recherche du boson de Higgs et des neutralinos

Comprendre l'origine des masses, rechercher une physique au-delà du modèle standard: ces deux questions font partie des grandes problématiques actuelles de la physique des particules. Pour tenter d'y répondre, la recherche du boson de Higgs, la mise en évidence de particules supersymétriques sont à l'ordre du jour des expériences du LEP.

Comment les particules acquièrent-elles une masse? La compréhension de ce mécanisme est aujourd'hui l'une des problématiques principales de la physique des particules. Une des explications possibles est le mécanisme de brisure spontanée de symétrie électrofaible (dit mécanisme de Higgs du nom de son auteur). Il propose l'existence d'une nouvelle particule - le boson de Higgs - notée H^0 , interagissant avec toutes les autres avec une intensité d'autant plus grande que leur masse est plus élevée.

Les meilleures estimations de la valeur de la masse m_H du boson de Higgs sont obtenues par combinaison de toutes les mesures effectuées lors des collisions e^+e^- à LEP, à la mesure de la masse du quark top obtenue au Tevatron (à Fermilab aux États-Unis) dans les collisions proton-anti-proton. La valeur la plus probable est $m_H = 115_{-0.6}^{+1.6} \text{ GeV}/c^2$. La limite inférieure de m_H donnée par les recherches directes au LEP est obtenue en recherchant des événements où un boson Z^0 , produit par une collision e^+e^- ,

émet un boson de Higgs. Ces événements sont constitués de quatre fermions dont deux viennent de la désintégration du boson de Higgs et les deux autres de la désintégration du boson Z^0 . La combinaison des quatre expériences LEP à une énergie de collision de 172 GeV donne une limite m_H supérieure à $77,5 \text{ GeV}/c^2$. L'analyse en cours des événements enregistrés à une énergie de collision de 183 GeV permettra d'atteindre des limites de l'ordre de $88 \text{ GeV}/c^2$ par expérience.

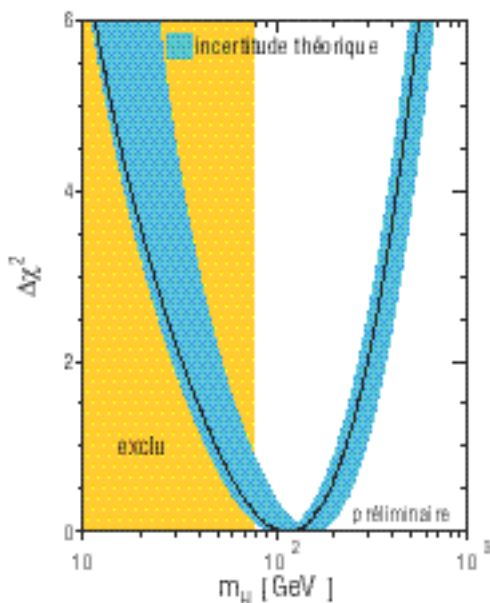
En dépit de son succès, le modèle standard laisse un certain nombre de problèmes en suspens: pourquoi l'échelle électrofaible donnée par la masse des bosons Z^0 et W^\pm est-elle si petite par rapport à l'échelle présumée de la grande unification (un facteur 10^{14})? Comment inclure la gravité dans une théorie d'unification des forces fondamentales? Comment résoudre le problème de l'instabilité de la masse du boson de Higgs?

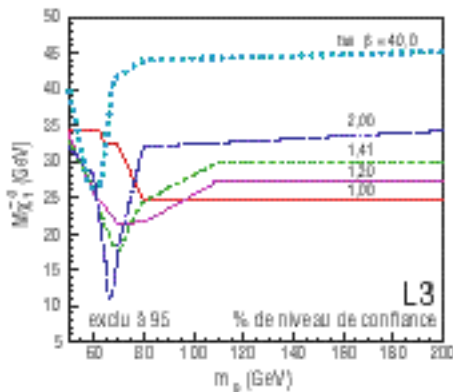
Les théoriciens suggèrent une théorie basée sur une nouvelle symétrie fondamentale entre les fermions (les particules de matière) et les bosons (les particules messagères des interactions). A chaque particule connue actuellement, il faudrait associer, par supersymétrie, une superparticule sœur ayant une masse plus élevée et une demi-unité de spin en moins. Le secteur de Higgs est également agrémenté de nouveaux bosons. Un modèle, appelé MSSM, présentant une extension minimale (en termes de nombre de particules supersymétriques) du modèle standard, est généralement utilisé dans la description phénoménologique de la supersymétrie.

Les expériences LEP n'ont eu de cesse de rechercher les particules supersymétriques, en particulier le neutralino supposé être la particule la plus légère, stable qui plus est. La mise en évidence d'un neutralino ouvrirait une nouvelle fenêtre sur la physique, comblant les vœux à la fois des physiciens et des astrophysiciens. La question de l'abondance cosmologique des neutralinos se pose et peut être la réponse à une autre grande interrogation, celle de l'existence et de la nature de la masse cachée de l'Univers.

La production de neutralinos au LEP se fait par paires, et, comme leurs homologues neutrinos, ils échappent à toute détection. Les expériences recherchent donc la production de paires de particules supersymétriques plus lourdes qui fournissent des événements avec beaucoup d'énergie

Graphique obtenu à partir d'un ajustement simultané de l'ensemble des mesures électrofaibles, montrant que la valeur la plus probable de m_H est autour de 115 GeV. La zone jaune indique la région exclue par les recherches directes à LEP.





Résultats de l'expérience L3 à 161-172 GeV concernant la limite inférieure de la masse du neutralino en fonction de m_0 pour différentes valeurs de $t\beta\beta$, autre paramètre du modèle supersymétrique minimal.

manquante, signature caractéristique. Jusqu'à présent, aucun signal supersymétrique n'a pu être observé. Par contre, les expériences présentent des limites inférieures de la masse du neutralino en fonction des paramètres du modèle MSSM comme m_0 , la masse universelle supposée fournir les masses des particules scalaires.

La prochaine montée en énergie de LEP à 200 GeV à l'horizon 2000 devrait ouvrir une nouvelle fenêtre de recherche des bosons de Higgs et des neutralinos.



Vue générale du spectromètre à muons dans le détecteur L3, avec les portes de l'aimant ouvertes. © Cern.

Pour en savoir plus :

M. Felcini, Search for Susy signatures at LEP, Proceedings of the international Europhysics conference on high energy physics, Jerusalem, août 1997.

Site Web: <http://www.cern.ch/LEPSUSY/>

Un groupement de recherche pour la supersymétrie

Le groupement de recherche GDR Supersymétrie vise à rassembler l'ensemble de la communauté française des expérimentateurs et des théoriciens intéressés par la recherche de la supersymétrie. Il regroupe donc sur des thèmes de recherche communs expérimentateurs et théoriciens, physiciens des particules et astrophysiciens, physiciens travaillant aux collisionneurs présents ou futurs et physiciens travaillant hors accélérateurs. Il cherche à donner à la communauté française une expertise en supersymétrie à une période (1997-2000) cruciale pour les recherches expérimentales, avec en particulier la montée en énergie du collisionneur LEP, la phase de préparation du collisionneur LHC et le développement des expériences de recherche de la matière cachée. Le GDR fonctionne depuis bientôt un an sur un rythme de deux réunions générales annuelles (à Lyon et Orsay en 1997 et à Montpellier en avril 1998) qui permettent de rassembler la communauté concernée et où le point est fait sur les résultats obtenus et les objectifs envisagés. Le travail se fait au sein de groupes, actuellement au nombre de sept, qui se réunissent environ quatre fois par an. Les thèmes de ces groupes vont de l'étude des différents aspects du modèle supersymétrique minimal à celle des propriétés de la particule supersymétrique la plus légère, considérée comme un des candidats sérieux à la matière cachée dans l'Univers; du développement d'outils, type générateurs d'événements, (une réunion internationale a été organisée en mars 1998 à Annecy par le groupe « Outils ») à l'étude des problèmes liés à la saveur des quarks, comme celui de la violation de CP, dans le cadre supersymétrique. Le GDR joue aussi un rôle d'expertise et produit par exemple un document scientifique à propos du fonctionnement envisagé pour le collisionneur LEP à 200 GeV. Les travaux du GDR sont publiés dans des notes GDR. De façon générale, l'ensemble de ses activités (calendrier des réunions, informations sur la supersymétrie, transparents des présentations faites en réunion générale, notes GDR...) est présenté sur son site Web, dont l'adresse est <http://www.in2p3.fr/susy>. Tout chercheur intéressé à participer aux travaux du GDR peut s'y inscrire.

La double désintégration bêta et la masse du neutrino

L'observation du processus de désintégration de certains noyaux par radioactivité bêta, avec émission de deux électrons sans émission de neutrinos, permettrait d'attribuer une masse non nulle au neutrino. L'expérience Nemo au Laboratoire souterrain de Modane tente de mettre en évidence ce processus interdit.

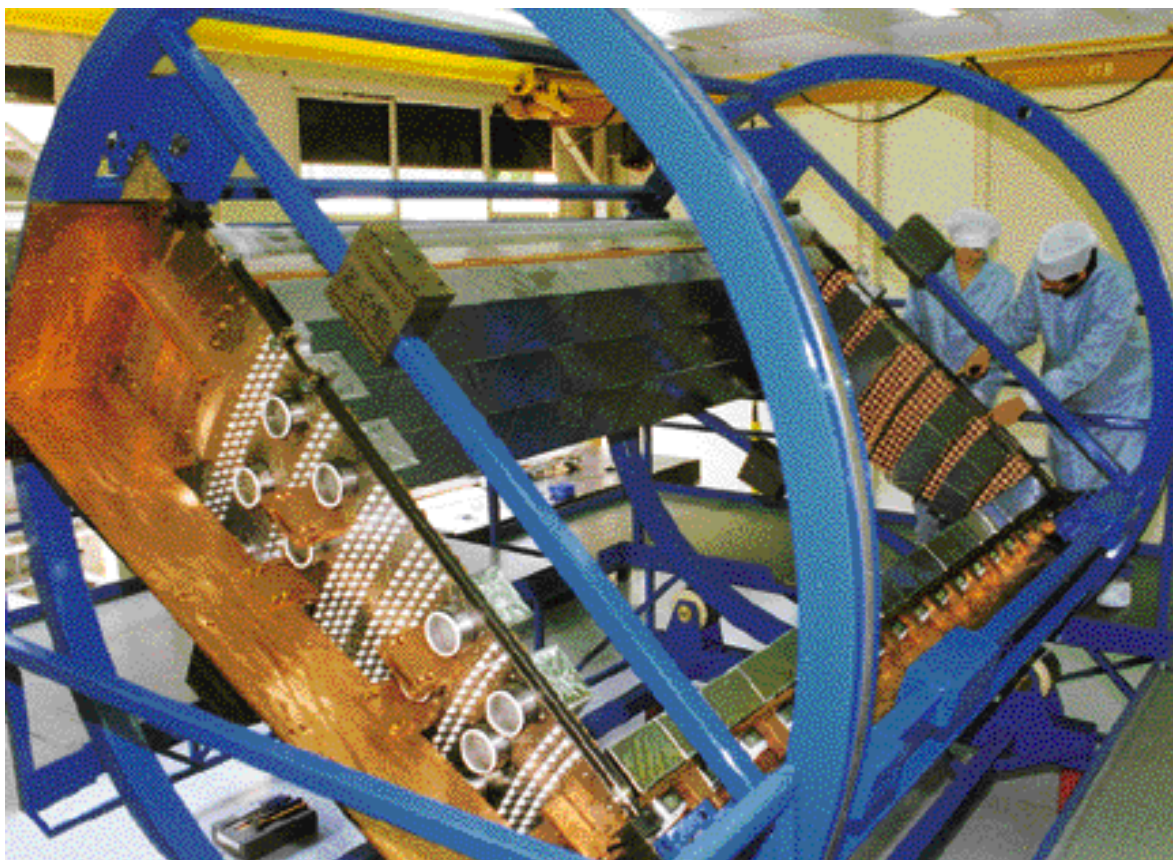
La double désintégration bêta sans émission de neutrino est une voie d'investigation pour l'étude des neutrinos, un domaine particulièrement actif de la physique des particules pour ses enjeux liés à la mise en évidence d'une nouvelle physique, c'est-à-dire de phénomènes qui ne rentrent pas dans le cadre du modèle standard, et pour ses implications cosmologiques. La désintégration permise de certains noyaux par émission de deux électrons et deux neutrinos est un processus rare mais déjà observé. L'observation du processus interdit, c'est-à-dire d'une désintégration avec émission de

deux électrons seulement emportant toute l'énergie disponible, permettrait d'attribuer une masse non nulle au neutrino. De plus le neutrino serait de type Majorana, c'est-à-dire qu'il serait sa propre antiparticule.

L'expérience de double désintégration bêta ne nécessite pas d'accélérateur mais un laboratoire souterrain: le Laboratoire souterrain de Modane (LSM), situé dans le tunnel routier de Fréjus. Ce laboratoire, qui se situe sous 1500 m de roches, est parfaitement bien protégé des rayonnements cosmiques qui seraient, au niveau de la mer, une source rédhibitoire de bruit de fond pour l'expérience.

Le LSM a abrité le détecteur Nemo-2, destiné à l'étude des bruits de fond et à la faisabilité d'un détecteur de grande dimension, Nemo-3. Nemo-2 a fonctionné pendant cinq ans, jusqu'en 1997, et fourni des résultats intéressants sur le plan de la physique et sur celui de la conception du futur appareillage. Tous les éléments du détecteur ont été sélectionnés en fonction de leur faible

Le tissage de la chambre à fils de l'un des vingt secteurs du détecteur Nemo 3. Crédit: IN2P3.

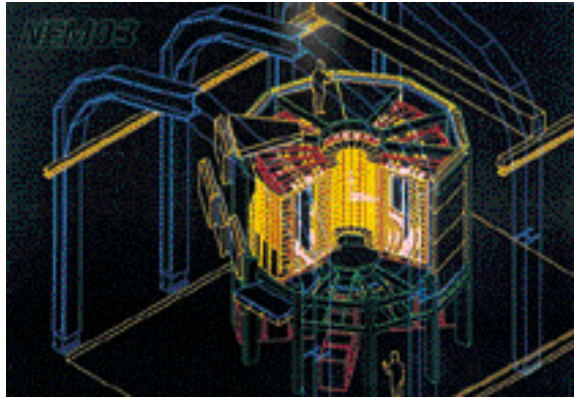


radioactivité; des développements techniques ont ainsi été nécessaires pour obtenir des photomultiplicateurs de bas bruit de fond et des sources de très haute pureté radioactive.

Quelques chiffres pour illustrer la qualité de l'expérience et la rareté des désintégrations détectées, dans le processus permis avec une source de cadmium 116 de 150 g: le nombre d'événements d'énergie inférieure à 3 MeV enregistrés pendant une année d'acquisition est inférieur à 200, ce qui correspond à une demi-vie du cadmium 116 de quelques 10^{19} ans. Cependant si le bruit de fond est pratiquement nul au voisinage de 2,8 MeV, énergie à laquelle se manifesterait le processus interdit, la sensibilité de cette expérience est insuffisante pour pouvoir observer ce processus s'il existe.

La réalisation du détecteur Nemo-3 est en cours dans le cadre d'une collaboration internationale: les laboratoires russes fournissent notamment les sources enrichies en isotopes candidats à la double désintégration bêta; un laboratoire américain prend en charge leur purification. L'expérience pourra être équipée de sources jusqu'à une masse de 10kg; dans le cas du molybdène 100, on pourra accéder à des demi-vies de 10^{25} ans, c'est-à-dire à des masses de neutrino de l'ordre de 0,1 eV/ c^2 , un gain d'un ordre de grandeur par rapport aux limites actuelles.

L'installation de l'expérience au LSM débutera au cours de l'année 1998 et les premières acquisitions devraient avoir lieu en 1999. Le détecteur de traces comporte 6000 cellules Geiger et le calorimètre est équipé de 2000 photomultiplicateurs. Plusieurs années seront nécessaires pour atteindre la sensibilité ultime de l'expérience.



Vue en CAO du détecteur Nemo 3, représenté sur sa charpente au Laboratoire souterrain de Modane.

Pour en savoir plus :

D. Dassié et al., Two-neutrino double-beta decay of Molybdenum 100, Phys. Rev. D51, (1995) 2090.

R. Arnold et al., Double-beta decay of Cadmium 116, Z. Phys. C72 (1996) 239.

R. Arnold et al., Performances of a prototype detector for double-beta decay measurements, Nucl. Instr. Meth. A395 (1995) 338.

Site Web:

<http://www.lal.in2p3.fr/NEMO/nemo.html>

Laboratoires de la collaboration:

CNRS/IN2P3: CENBG, Bordeaux; LPC, Caen;

LAL, Orsay; IReS, Strasbourg.

CNRS/Insu: CFR, Gif-sur-Yvette.

Russie: JINR, Dubna; ITEP, Moscou.

Ukraine: INR, Kiev.

République tchèque: FNSPE, Prague.

Finlande: Université de Jyväskylä.

Nomad: des neutrinos muoniques aux neutrinos tauiques

L'expérience Nomad au Cern cherche à mettre en évidence une oscillation entre neutrinos muoniques et tauiques qui serait le signe d'une masse non nulle des neutrinos et la première mise en évidence du neutrino de la troisième famille.

Elle se situe dans un domaine d'exploration d'intérêt cosmologique pour la détermination de la nature de la matière noire.

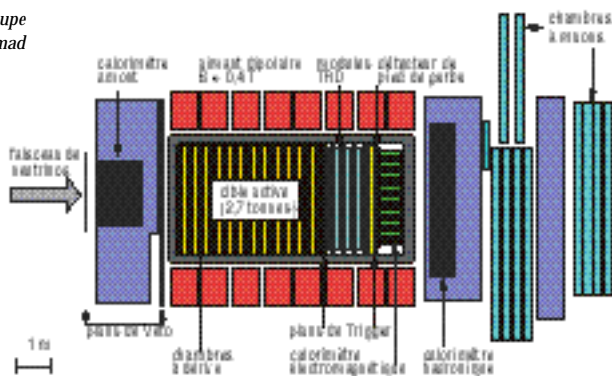
L'expérience Nomad recherche des oscillations entre neutrinos muoniques et neutrinos tauiques dans le faisceau de neutrinos de haute énergie du Cern. Il s'agit d'y détecter l'apparition, dans un détecteur, de neutrinos d'une autre famille (neutrinos tauiques) que celle produite par l'accélérateur (neutrinos muoniques). La mise en évidence de telles oscillations impliquerait une masse non nulle pour les neutrinos, ce qui bouleverserait le modèle standard des interactions électrofaibles. L'oscillation est caractérisée par la différence des carrés des masses des deux types de neutrinos mis en jeu (δm^2),

diatement en produisant un nouveau neutrino tau, invisible, mais identifiable par le bilan d'impulsion. Cette méthode, dont le pouvoir de réjection par rapport au bruit de fond doit atteindre 10^6 , suppose un détecteur massif - pour accumuler suffisamment d'événements - mais possédant une grande finesse de détection des traces chargées, une excellente identification des électrons et des muons et une bonne mesure de l'énergie des particules neutres. Le compromis est réalisé dans l'appareillage visualisé ci-contre.

L'expérience accumule des données depuis 1995 et continue jusqu'à la fin 1998. En tout, elle disposera d'environ un million et demi d'interactions de neutrinos muoniques dont il faut extraire un signal éventuel de neutrino tauique. La stratégie d'analyse adoptée consiste à utiliser les données de 1995 pour bien comprendre les aspects instrumentaux et expérimentaux (notamment en comparaison avec les simulations Monte-Carlo) et définir des conditions permettant l'élimination des bruits de fond attendus tout en gardant une acceptation raisonnable sur le signal recherché. Pour le moment, l'analyse permet uniquement d'exclure la possibilité d'oscillations entre les neutrinos muoniques et tauiques dans une zone du plan ($\delta m^2, \sin^2 2\theta$) déjà couverte par les expériences antérieures. L'analyse en cours de l'ensemble des événements des années 1995 à 1998 permettra de rechercher des oscillations pour des valeurs de $\sin^2 2\theta$ d'un ordre de grandeur plus faible.

Si aucun signe d'oscillation n'était observé par l'expérience Nomad (ou par Chorus, sa concurrente, également au Cern, basée sur un détecteur à émulsions photographiques), la recherche future pourrait se tourner soit vers l'exploration des faibles angles de mélange à grande valeur de δm^2 , en restant à des distances source-détecteur comparables à celles de Nomad et Chorus, soit vers l'exploration des faibles valeurs de δm^2 en accroissant la distance entre l'accélérateur et le détecteur. Des sites et des détecteurs dans le Jura (distance 17 km) ou au Gran Sasso (732 km) sont actuellement à l'étude.

Vue en coupe
du détecteur Nomad



et par l'angle de mélange θ qui donne la composition en neutrinos massifs des neutrinos muoniques et tauiques. Le domaine d'exploration de Nomad se situe dans les valeurs de δm^2 supérieures à 1 eV^2 , d'intérêt cosmologique dans le cadre de la recherche de matière noire, et pour des angles de mélange dix fois plus faibles que dans les expériences précédentes.

La méthode choisie pour détecter l'apparition des neutrinos tauiques dans le faisceau de neutrinos muoniques est de caractériser la présence, dans les particules finales, d'un lepton tau produit par interaction faible en courant chargé. Un éventuel lepton tau se désintégrerait immé-

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://nomadinfo.cern.ch>

Laboratoires français
de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : LAPP ; LPNHE, Paris.

CEA/DSM : Daphnia.

Chooz: un nouveau résultat sur la masse du neutrino

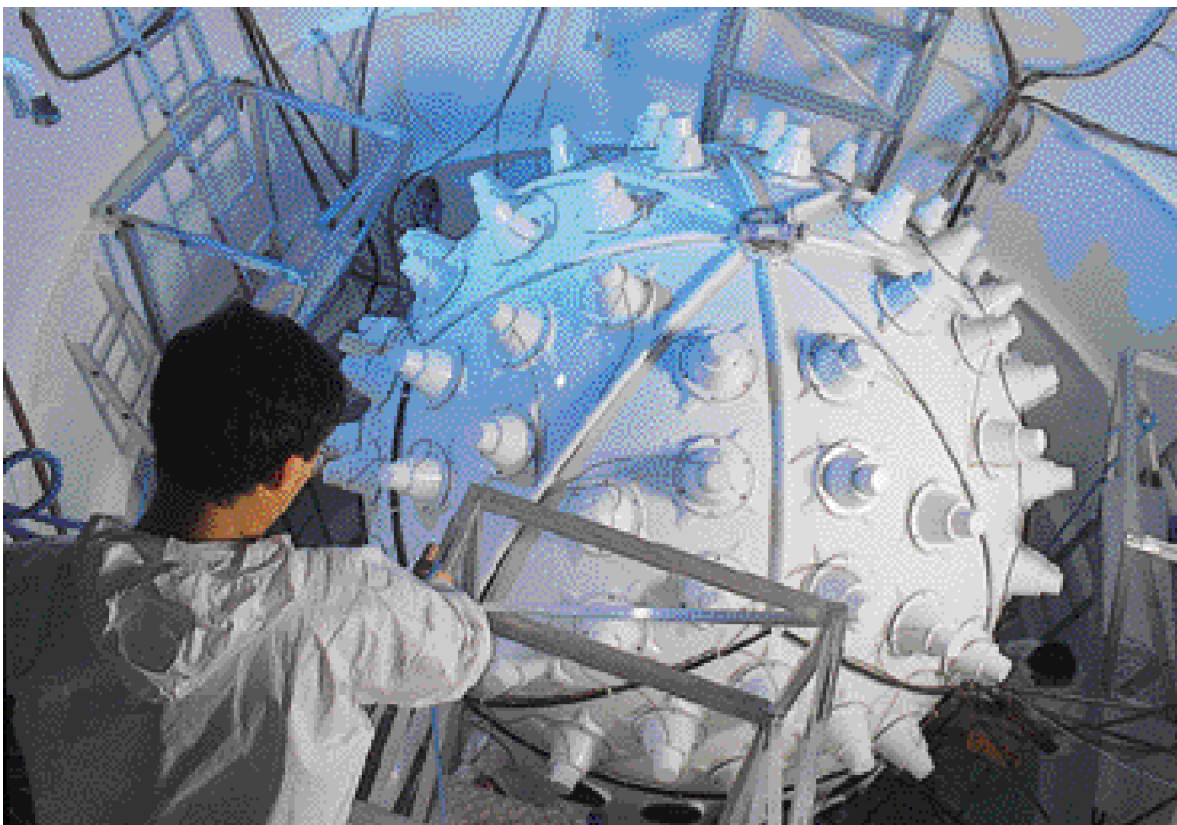
Les neutrinos ont-ils une masse? Pour tenter de le montrer, l'expérience auprès de la centrale nucléaire de Chooz (Ardennes) a étudié l'oscillation des neutrinos dans le flux considérable de ces particules émis par les réacteurs.

La concordance observée entre le nombre de neutrinos détectés et celui qui était attendu laisse penser que la masse des neutrinos, si elle n'est pas nulle, est très faible.

Les trois neutrinos, associés chacun à un lepton de l'une des trois familles de particules - à l'électron pour la première famille, au muon pour la deuxième, et au tau pour la troisième - restent encore des particules très mystérieuses. Prédites au début des années 30, découvertes expérimentalement en 1956, on ne sait toujours pas si elles ont une masse très petite ou nulle. C'est le problème le plus important posé aujourd'hui à la physique des neutrinos car l'existence d'une masse aurait une pro-

fonde influence sur les théories actuelles de la physique des particules. Par ailleurs, les neutrinos issus du big-bang sont suffisamment nombreux pour qu'une masse, même très faible, puisse permettre d'explicitier, au moins en partie, la nature de la matière non visible dans l'Univers.

Une voie expérimentale très sensible pour mettre en évidence de faibles différences de masses est la recherche d'oscillations: si les neutrinos ont une masse, et si les neutrinos associés aux trois familles sont un mélange des états propres de masse, une telle oscillation existera. Elle se manifestera par des transformations d'une famille dans une autre, durant le parcours du neutrino entre sa source et le détecteur. Pour pouvoir observer de petites différences de masse de neutrinos, il faut que ceux-ci aient une faible énergie et que la distance entre la source et le détecteur soit importante.



*Le détecteur en cours d'installation dans la galerie souterraine à 1km de la centrale nucléaire de Chooz.
© CNRS/L.Médard.*

Il faut tout d'abord disposer d'une source de neutrinos d'une seule famille. Les réacteurs nucléaires offrent un double avantage : ils émettent des neutrinos électroniques de basse énergie (quelques MeV) en un flux très important. Ainsi, les deux réacteurs de Chooz produisent 400 MW de neutrinos, ce qui représente la consommation électrique d'une ville comme Lyon.

Le flux des neutrinos décroît avec le carré de la distance : quand on s'éloigne de 10 m du réacteur, le flux de neutrinos est divisé par 100. Il faut donc éliminer au maximum toute autre source de neutrinos : la réduction du bruit de fond est donc essentielle. Pour cela, on utilise des matériaux de basse radioactivité, et il devient indispensable de s'installer dans un site souterrain. Chooz offre un tel site, à 1 km des réacteurs et sous 100 m de terre : il s'agit d'un ancien réacteur nucléaire, maintenant arrêté.

Les expériences, réalisées près de la centrale du Bugey depuis le début des années 80, ont permis de montrer que le flux de neutrinos est connu avec une précision de quelques pour-cent. Elles ont recherché les oscillations de neutrinos de 11 m jusqu'à 150 m du réacteur nucléaire et atteint une différence du carré des masses de $10^{-2} \text{ eV}^2/c^4$.

La construction de l'expérience de Chooz a commencé en 1994 et la prise de données a eu lieu en 1996. EDF a pris en charge la transformation d'un ancien tunnel d'accès en laboratoire et le département des Ardennes a apporté son soutien. Il a été possible de mesurer le bruit de fond avant le démarrage des réacteurs de la centrale de Chooz B en 1997. Celui-ci s'est avéré très bas : il n'est que de un événement par jour, à comparer à un signal de 26 neutrinos par jour, un rapport exceptionnellement favorable pour ce type d'expérience.

Des résultats préliminaires ont permis d'exclure une oscillation des neutrinos électroniques dans cette zone, avec une très bonne précision : le rapport entre le nombre de neutrinos détectés et attendus est de 0,98, avec une erreur de 4 %. Ce résultat était très attendu, car plusieurs expériences ont mis en évidence un manque de neutrinos muoniques dans le flux de neutrinos créés dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique. Un déficit de neutrinos électroniques à Chooz aurait pu l'expliquer. Pour tenter d'élucider ce phénomène, la meilleure proposition devient la recherche d'oscillation des neutrinos muoniques vers les neutrinos tauiques. Pour cela, on prévoit de produire de nouveaux faisceaux de neutrinos qui permettront des parcours de centaines de kilomètres entre l'accélérateur et le détecteur.

Pour en savoir plus :

Initial results from the Chooz long baseline reactor neutrino oscillation experiment, Physics Letters B 420 (1998) 397.

Sites Web : <http://www.PI.INFN.IT/chooz/>
http://Duphy4.drexel.edu/chooz_pub/

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : LAPP, Annecy ; PCC, Paris.

États-Unis : Philadelphie, New Mexico, Irvine.

Italie : INFN Pise, Trieste.

Russie : Institut Kurchatov, Moscou.

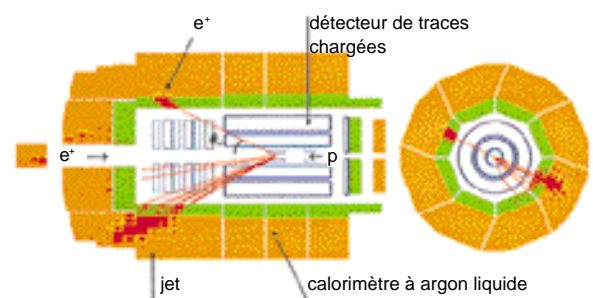
Des événements inattendus à Hera

Les expériences H1 et Zeus auprès du collisionneur positon-proton Hera à Hambourg ont pour but de mieux comprendre la structure en quarks et en gluons du proton. Elles ont observé récemment un nombre d'événements en excès par rapport à la prédiction théorique basée sur le modèle standard de la physique des particules. Si ces résultats étaient confirmés sur un plus grand nombre d'événements, ils pourraient être le premier signe d'une nouvelle physique

Approfondir la compréhension de la structure en quarks et en gluons du proton constitue un des enjeux majeurs des expériences H1 et Zeus au collisionneur positon-proton Hera (Hadron Electron Ring Accelerator) de Desy (Deutsche Elektronen Synchrotron) à Hambourg. Pour ce faire, les deux expériences détectent et analysent les débris de collisions inélastiques profondes. C'est dans de telles collisions que les expériences ont observé un nombre d'événements en excès par rapport à la prédiction théorique qui s'appuie sur le modèle standard de la physique des particules. Malgré les faibles statistiques accumulées à ce jour, ce qui interdit de conclure prématurément à la mise en évidence d'une nouvelle physique, «l'anomalie» observée a suscité un intérêt théorique considérable. Intérêt motivé en partie par le fait que les mesures se situent dans un domaine d'énergie inexploré jusqu'à présent, où le collisionneur Hera peut jouer un rôle unique pour la recherche d'une nouvelle physique reliée intimement à la symétrie entre quarks et leptons.

Lors d'une diffusion inélastique, le positon incident peut interagir avec un des quarks du proton par l'échange virtuel d'un boson vecteur de l'interaction électromagnétique (photon) ou faible (Z ou W). Ce boson agit comme une sonde permettant l'analyse de la répartition de l'impulsion du proton entre ses quarks de valence et le nuage quantique de gluons et de quarks qui les entourent. La sonde est d'autant plus performante que le carré de l'énergie-impulsion (Q^2) associée au boson échangé est grand. Hera a permis pour la première fois d'atteindre des valeurs de Q^2 supérieures à 10000 GeV², pénétrant ainsi dix fois plus profondément au cœur de la matière

nucléaire. C'est dans ce nouveau domaine à très grand Q^2 où, par ailleurs, l'unification électrofaible devient manifeste, que «l'anomalie» a été observée. Il s'avérerait très difficile d'expliquer une déviation telle que celle qui a été constatée en imaginant une structure «exotique» pour le proton. Un accroissement substantiel des sections efficaces à très grand Q^2 serait néanmoins possible en pré-



sence d'une composante «intrinsèque» de quarks lourds dans le proton. Celui-ci pourrait, par exemple, avoir une faible probabilité de se trouver dans un état où presque toute son impulsion serait transportée par un quark charmé appartenant à la deuxième génération de fermions. Au-delà du modèle standard, on a spéculé sur l'existence de nouveaux couplages lepton-quark permettant la production directe de bosons leptoquarks ou encore de squarks (partenaires supersymétriques associés aux quarks). Une autre possibilité consisterait à considérer l'existence d'une nouvelle échelle de structure de la matière, dans laquelle les quarks et les leptons ne seraient plus élémentaires.

L'augmentation appréciable du nombre d'événements accumulés par les expériences H1 et Zeus dès l'année 1997 fournira peut-être un nouvel éclairage sur la nature de la déviation observée par rapport au modèle standard, qu'il s'agisse d'une fluctuation statistique ou du premier signe d'une nouvelle physique.

Visualisation dans H1 d'un événement avec deux jets à grand moment transverse.

Pour en savoir plus :

C. Adloff et al., H1 Collaboration, Z. Phys. C74 (1997) 191-206;

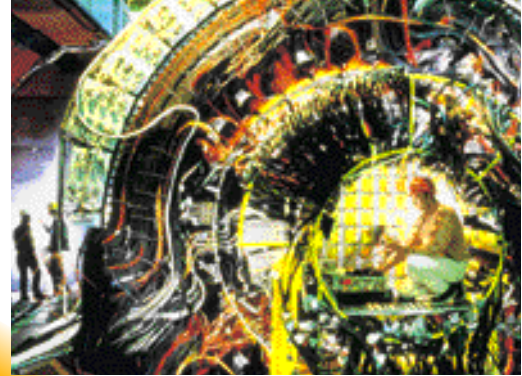
J. Breitweg et al., Zeus Collaboration, Z. Phys. C74 (1997) 207-220.

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : CPPM; LAL; LPNHE, Paris;

LPNHE, Palaiseau.

CEA/DSM : Dapnia.

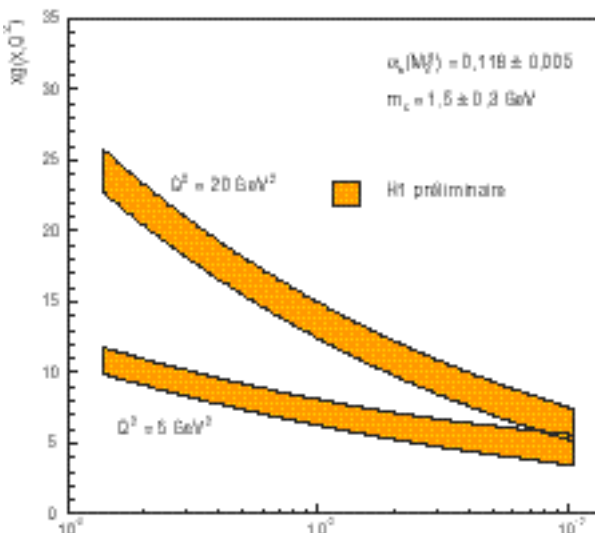


Combien de gluons dans un nucléon ?

La densité de gluons à l'intérieur du nucléon est un élément essentiel pour la connaissance de la structure interne de ces nucléons et pour tester la théorie de l'interaction forte. Les données enregistrées ces dernières années par l'expérience H1 à Hera ont permis la première détermination précise des gluons.

Comment et pourquoi déterminer précisément la densité de gluons dans le nucléon? Ces particules, messagères de l'interaction forte, représentent environ 40 % de la structure interne du proton. Or, elles ne sont pas observables directement et la détermination de leur densité n'est possible qu'à travers l'étude des mesures de sections efficaces de réactions de diffusion profondément inélastique. Ce peut être, par exemple, la réaction d'un positon avec un proton qui produit dans l'état final un ensemble de hadrons et un positon diffusé à un angle supérieur de quelques degrés à sa direction initiale. La section efficace de ce processus dépend de plusieurs fonctions décrivant la dynamique interne du proton que l'on nomme fonctions de structure. A partir des mesures de ces fonctions de structure, une étude phénoménologique ayant pour cadre la théorie de l'interaction forte, la chromodynamique quantique (QCD), permet habituellement d'extraire la densité de gluons.

La densité de gluons g est présentée en fonction des deux variables x , fraction de l'impulsion du proton, et Q^2 , masse du quadrivecteur échangé entre le positon et le proton, dans la réaction de diffusion positon + proton \rightarrow positon + hadrons à Hera. L'intervalle en x , en abscisse, correspond à la zone de sensibilité des mesures actuelles faites à Hera. Les bandes d'incertitudes incluent les incertitudes expérimentales (statistiques et systématiques) ainsi que deux sources d'erreurs théoriques. Il s'agit ici d'une analyse encore préliminaire; les données des expériences sur cibles fixes du Cern ont été utilisées avec les données de 1994-1996 de H1.



Dès 1994, la densité de gluons a été déterminée avec une incertitude d'environ 12 % grâce aux résultats de la collaboration H1 à Hera, obtenus dans des conditions de faible intensité (luminosité intégrée de 2,7 pb⁻¹). L'année suivante, le calorimètre et le détecteur de traces arrière ont été changés afin d'améliorer la précision des mesures, d'une part l'identification des positons à des énergies plus faibles (à partir de 4 GeV) et à des plus petits angles de diffusion (à partir de 1,5°), d'autre part une meilleure réjection du bruit de fond. L'analyse préliminaire des données enregistrées de 1994 à 1996 a réduit la précédente incertitude à la valeur de 5%. Un meilleur faisceau, un meilleur détecteur ont permis d'enregistrer un plus grand nombre d'événements et ont donc rendu possible une telle augmentation de la précision. Sur la figure est représenté le résultat de cette analyse. On peut aussi y observer un des résultats les plus remarquables de Hera: l'accroissement de la densité de gluons lorsque le constituant du proton qui interagit avec le positon emporte une petite fraction x de l'impulsion du proton. C'est par cet accroissement que l'on explique la remontée de la section efficace que l'on observe aussi à petit x . Avec une luminosité intégrée d'environ 24 pb⁻¹ en 1997, l'incertitude sur la densité de gluons devrait encore diminuer et devenir comparable à l'erreur théorique.

Quant au sens de cette recherche, les réponses sont multiples: tests de la théorie QCD; réduction de l'incertitude sur la mesure de la constante de couplage de l'interaction forte α_s ; prédictions des sections efficaces des processus de diffusion profondément inélastique dans le cadre du modèle standard.

Pour en savoir plus :

R.G. Roberts, The structure of the proton, Cambridge University Press, 1990.
Comptes rendus des colloques DIS, plus particulièrement: Deep Inelastic Scattering and QCD.

5th International Workshop, Chicago, AIP, 1997.

Sites Web: <http://info.desy.de/>

<http://durpdg.dur.ac.uk/HEPDATA/PDF>

<http://www.phys.psu.edu:80/~cteg/>

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : CPPM, Marseille; LAL, Orsay;

LPNHE, Paris; LPNHE, Palaiseau.

CEA/DSM : Dapnia.

Conjugaison de charge, parité, temps: symétries dans le système des kaons neutres

La compréhension de la nature de la violation de symétrie CP est un des enjeux majeurs de la recherche en physique des particules car ses conséquences sont au cœur des théories sur l'évolution de l'Univers et de l'asymétrie matière-antimatière.

L'expérience CPLEar au Cern a étudié en détail les symétries CP, T et CPT dans le système des kaons neutres et a pu obtenir le premier signe expérimental de la violation de symétrie T liée au renversement du sens du temps.

La notion des symétries a fourni des outils extrêmement puissants pour comprendre la nature et les lois de la physique. Par exemple, notre incapacité à définir de façon absolue notre position dans l'espace ou dans le temps est à l'origine de l'invariance des lois de la physique par toutes les translations spatiales et temporelles. Ces symétries se traduisent par la conservation bien connue de l'impulsion, du moment angulaire et de l'énergie.

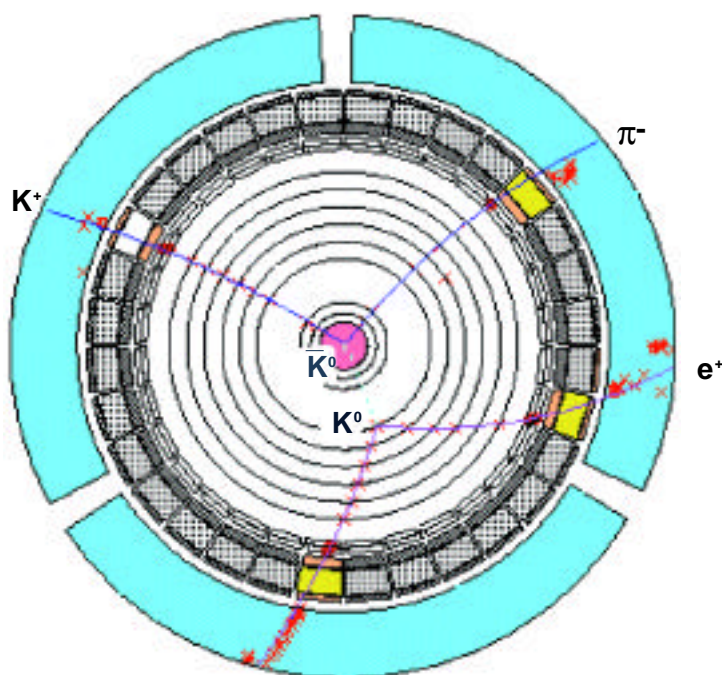
A l'échelle subatomique, il existe des opérations de symétrie supplémentaires qui sont reliées aux fondements de la formulation théorique décrivant le monde microscopique. Parmi ces symétries, la conjugaison de charge (C) transforme la charge d'une particule en son opposé, la parité (P) inverse la gauche avec la droite et l'opérateur T renverse le sens du temps. Dans ce cadre, les lois de la physique sont invariantes par le produit des opérations de symétrie C, P et T (théorème CPT). Cette invariance se traduit par l'égalité de la masse d'une particule à celle de son antiparticule. Il en va de même pour leur durée de vie ainsi que pour leur moment magnétique dipolaire.

L'expérimentation a montré que les lois de la physique ne sont pas invariantes par les opérations de symétries C, P et CP: il y a violation de symétries. Par contre, elles semblent être invariantes par CPT.

La violation de CP a été observée uniquement dans le système des kaons neutres (K^0 et \bar{K}^0) et son origine exacte nous échappe encore. L'invariance par CPT implique que la violation de CP correspond à la violation de T qui, elle, n'a pas été encore observée. La compréhension de la nature de la violation de CP est un des enjeux majeurs



Vue générale de la zone d'expérimentation. On aperçoit les lignes de faisceaux vers les détecteurs CPLEar, Crystal Barrel et Obelix.
© Cern.



π^-

*Événement
de désintégration
semileptonique
d'un kaon neutre
dans le détecteur
de CPLEAR,
caractérisé par une
oscillation $K^0 - \bar{K}^0$.*

des recherches en physique des particules, car ses conséquences sont au cœur des théories sur l'évolution de l'Univers et de l'asymétrie matière-antimatière. Des idées théoriques, telles que l'évaporation de trous noirs et des théories de cordes, ont amené certains théoriciens à penser que l'on devrait observer une petite violation de CPT à l'approche de très hautes énergies, proches de la masse de Planck.

Ces motivations ont conduit la collaboration CPLEAR à étudier en détail les symétries CP, T et CPT dans le système des kaons neutres. L'expérience a été installée au Cern, à Genève, auprès de l'anneau d'antiprotons de basse énergie Lear. Les antiprotons d'une impulsion de 200 MeV/c sont arrêtés au centre du détecteur dans une cible d'hydrogène à haute pression, où ils s'annihilent au repos. Ce système permet de savoir, événement par événement, quel est le type du kaon neutre produit, tandis que les produits de désintégration étudiés permettent de connaître également le type du kaon neutre qui s'est désintégré. Ainsi, on peut mesurer l'asymétrie qui compare la probabilité d'un état initial K^0 d'osciller à l'instant t dans un état \bar{K}^0 , avec la probabilité du processus inverse.

La valeur obtenue de $[6,3 \pm 2,1 \text{ (stat.)} \pm 1,8 \text{ (syst.)}] \times 10^{-3}$ est le premier signe expérimental de la violation de T. Dans les limites d'erreurs, elle est égale à la violation connue de CP. La violation de CPT se manifesterait par une valeur de masse différente pour les deux types de kaons neutres. CPLEAR a pu établir que leur différence de masse relative était inférieure à 7×10^{-19} , ce qui en fait la plus petite différence de masse à ce jour entre particule et antiparticule, et celle-ci s'approche du domaine attendu d'une éventuelle violation de CPT.

Pour en savoir plus :

R. Adler et al., CPLEAR Collaboration, Proceedings Workshop on K physics, Orsay 1996, Editions Frontières (1997) 307.

Site Web: <http://www.cern.ch/cplear>

Laboratoires français
de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : CPPM, Marseille; CSNSM.

CEA/DSM : Dapnia.

Remerciements

Introduction

Jean-Paul Repellin

Faits marquants

Alain Blondel

Michel Davier

Patrick Roudeau

Marc Winter

Michel Chemarin

Jean-Paul Martin

Pierre Binétruy

Francis Laplanche

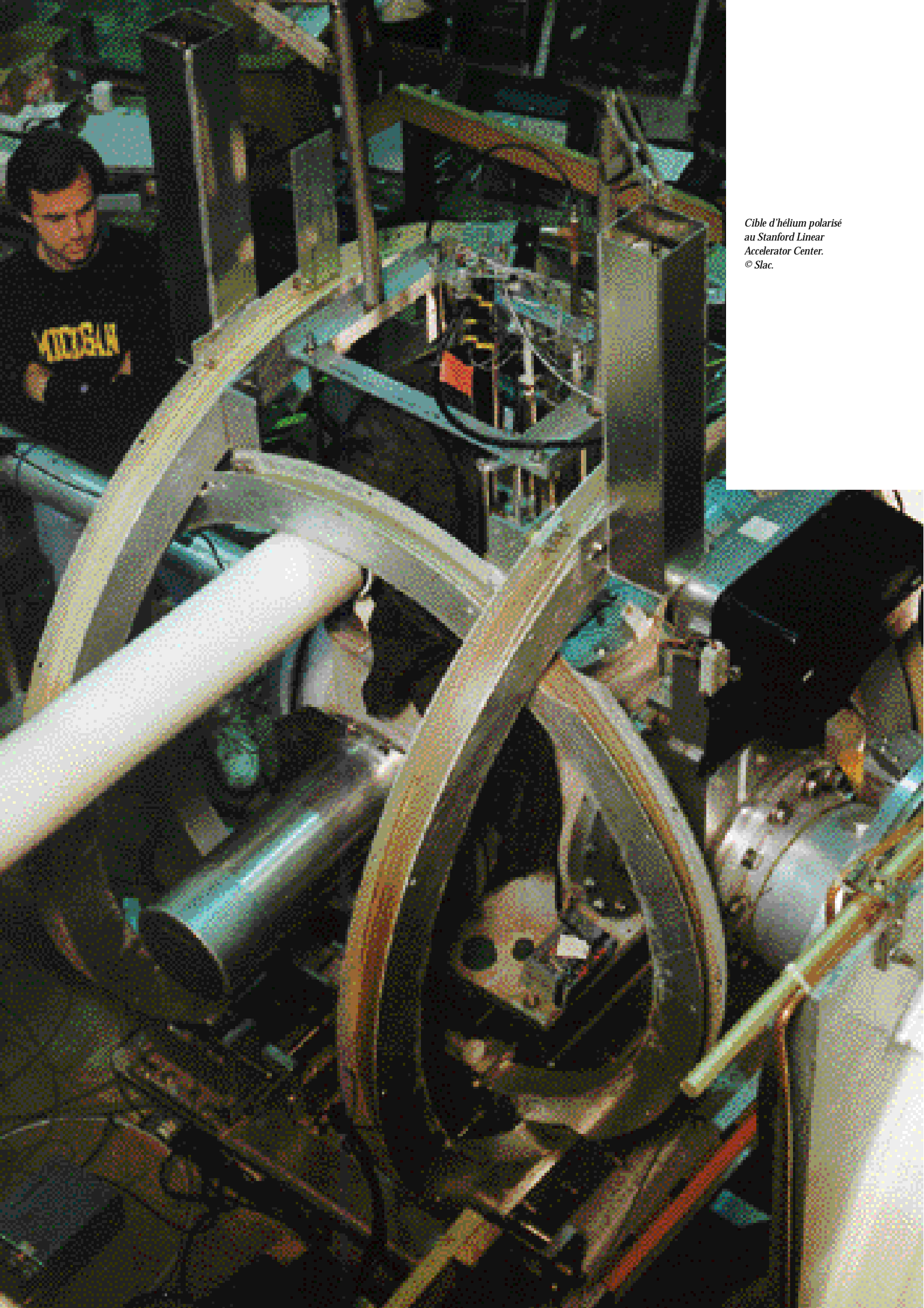
Jacques Dumarchez

Hervé de Kerret

Yves Sirois

Fabian Zomer

Renaud Le Gac



*Cible d'hélium polarisé
au Stanford Linear
Accelerator Center.
© Slac.*

Physique hadronique

La physique hadronique étudie la façon dont les quarks et les gluons, objets fondamentaux de la chromodynamique quantique (QCD), théorie de l'interaction forte, s'assemblent entre eux pour former des objets composites appelés hadrons. L'ensemble des hadrons inclut les protons et neutrons bien connus, mais aussi de nombreuses particules classées en baryons et mésons. Les interactions entre ces particules et le rôle qu'elles jouent dans les interactions au sein du noyau font aussi partie de ce domaine scientifique. Celui-ci se situe en interface entre les propriétés fondamentales des quarks et des leptons et la physique de la matière nucléaire.

Une des difficultés de ces études vient de ce qu'on n'observe jamais les objets élémentaires, mais toujours des objets composites (propriété de confinement), et que la structure du vide quantique de QCD est riche et complexe. Lorsqu'on observe ces objets à courte distance, la liberté asymptotique de la théorie diminue les forces en présence, ce qui, en s'affranchissant localement de la contrainte du confinement, permet des calculs en théorie des perturbations. Mais lorsqu'on veut traiter les hadrons dans leur globalité, les méthodes de calcul perturbatives ne sont plus applicables, et il n'existe pas aujourd'hui de solution générale au problème.

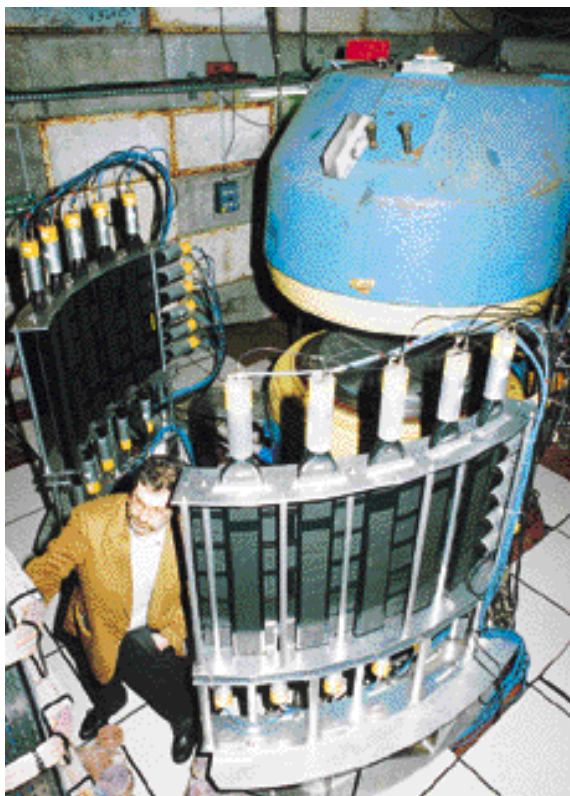
Dans la majorité des cas, il a jusqu'ici été nécessaire de construire des modèles d'interaction effective, souvent éloignés de la théorie fondamentale sous-jacente. Cependant, des avancées théoriques récentes permettent maintenant de faire des prédictions dans le cadre de QCD sur les composantes les plus simples de la fonction d'onde des hadrons. Pour les tester expérimentalement, il faut sélectionner avec soin les conditions les plus appropriées : mesure de toutes les particules dans des réactions dures, en privilégiant la sonde électromagnétique, plus élémentaire, et qui permet de sélectionner, par l'impulsion et l'énergie transférée au système, la taille de la zone étudiée et le temps d'interaction. Il sera ainsi possible d'étudier la transition cruciale entre la description des systèmes hadroniques en termes d'échange de nucléons et mésons, et celle en termes de degrés de liberté des quarks et gluons. Cette stratégie a été validée par la communauté nationale et internationale (rapport de l'Académie des Sciences et comité NuPECC).

Saturne

Cet accélérateur de protons et d'ions légers de quelques GeV, utilisé dans le cadre d'un laboratoire national commun à la CEA/DSM et au CNRS/IN2P3, a été l'outil principal de cette physique pendant quinze à vingt ans avec une capacité de produire des faisceaux de particules polarisées de très haute qualité. En décembre 1993, pour les raisons exposées dans le paragraphe précédent, il a été décidé de poursuivre cette physique en utilisant principalement des faisceaux d'électrons et de photons, et corrélativement d'arrêter Saturne à la fin de 1997. Ce rapport d'activité couvre donc exactement les expériences conduites entre cette décision et l'arrêt de l'accélérateur. Tout en poursuivant l'analyse des expériences précédentes, et en particulier l'étude de la production des résonances avec le spectromètre SPES3, l'activité expérimentale a été concentrée sur trois axes prioritaires :

- l'expérience Disto pour l'étude de la production de particules étranges, et de l'influence des variables de polarisation dans la production d'hypérons Σ et Λ , et de méson ϕ ;
- l'expérience SPES4 π , étudiant les excitations isoscalaires de spin et les réactions d'échange de charge, en particulier les propriétés de la résonance de Roper et la propagation du baryon Δ dans la matière nucléaire mettant en évidence un effet de milieu sur les propriétés de la résonance ;
- la mesure des neutrons de spallation pour l'étude de la transmutation des déchets radioactifs (hors du domaine scientifique discuté dans cette section).

Ces expériences ont été menées à leur terme, l'accélérateur arrêté comme prévu à la fin de 1997 (et les personnels techniques réaffectés à d'autres fonctions). Les chercheurs analysent actuellement les données et préparent de futures expériences auprès d'autres installations.



Vue d'ensemble
du détecteur Disto
pour l'étude
de la production
de particules étranges.
© CEA.

Les expériences avec la sonde électromagnétique en Europe

En parallèle avec la diminution de l'activité de Saturne, un ensemble d'expériences a été lancé auprès d'accélérateurs d'électrons européens.

● Le détecteur Harp, utilisé en 1996 et 1997 auprès de l'accélérateur AmPS du Nikhef à Amsterdam, a étudié les mécanismes d'interactions lors de la brisure du deuton.

● Une expérience auprès de l'accélérateur Mami à Mayence a permis de réaliser de 1995 à 1997 les premières mesures de la diffusion Compton virtuelle sur le proton. Cette réaction exclusive, donnant accès aux polarisabilités généralisées, fait également l'objet d'un programme à plus haute énergie aux États-Unis (voir également ci-dessous).

● Une autre expérience utilisant Mami a été approuvée en 1996 pour mesurer les facteurs de forme faibles du proton. Elle s'appuie sur des études technologiques développant une source gazeuse d'électrons polarisés de haute intensité et prépare également des mesures à plus haute énergie prévues aux États-Unis.

● A Grenoble, le programme franco-italien Graal, approuvé en 1992, a mis au point un faisceau de photons gamma polarisés de 1,5 GeV, obtenu par rétrodiffusion d'un faisceau laser sur les électrons de l'anneau de l'ESRF. Ce faisceau de caractéristiques uniques au monde est entré en service en 1996 et délivre des photons gamma dont tous les paramètres sont bien contrôlés. Il est utilisé depuis cette date pour étudier les asymétries dans la photoproduction de mésons pseudo-scalaires afin de déterminer les amplitudes de transition dépendant du spin, et d'autres mesures sont en préparation. Une cible polarisée innovante Hydile a été approuvée en 1997 en vue de réaliser des mesures de double polarisation.

La diffusion d'électrons pour comprendre la structure interne des noyaux les plus simples

Selpo :
une source
d'électrons
polarisés
page 119

Graal :
des photons
gamma
polarisés pour
étudier
la structure
du nucléon

Le hall expérimental C
au Thomas Jefferson
National Accelerator
Facility (TJNAF).
© TJNAF.



Les expériences avec la sonde électromagnétique aux États-Unis

Pour se rapprocher des conditions de mesure requises dans le cadre de la stratégie exposée plus haut, il faut disposer d'une énergie plus élevée que celle disponible auprès des accélérateurs européens. Deux accélérateurs situés aux États-Unis permettent d'aller dans cette direction, sans toutefois atteindre le domaine recherché. Ils ont été utilisés par les équipes de l'IN2P3 associées à celles du CEA, en dépit de la difficulté de conduire des expériences à des milliers de kilomètres de leur laboratoire.

Une série d'expériences sur les fonctions de structures polarisées du nucléon (proton ou neutron) a été effectuée auprès de l'accélérateur d'électrons de Stanford à 30 et 50 GeV. Cette série s'est achevée à la fin de 1996, et a permis de vérifier la règle de somme de Bjorken, propriété fondamentale de QCD. Elle a également démontré que les quarks ne portaient qu'environ 30 % du spin du nucléon, et donc que d'autres composantes doivent aussi jouer un rôle important.

Un effort important a été consacré à l'utilisation de l'accélérateur d'électrons à faisceau continu entré en service à Cebaf (maintenant Thomas Jefferson National Laboratory, TJNAF) en Virginie en 1996. L'énergie initiale des électrons était de 4 GeV avec un plan de montée en énergie d'environ 1 GeV par an. Pour organiser les conditions d'accès des équipes françaises à ces installations, un accord a été conclu en 1994 entre Cebaf d'une part et le CEA et l'IN2P3 d'autre part, dans le cadre duquel un certain nombre d'équipements de faisceau ont été ou sont en cours de réalisation. Une première expérience majeure t_{20} a effectué une mesure exclusive du facteur de forme tensoriel du deuton au moyen du polarimètre Polder construit à l'ISN et calibré à Saturne. La prise de données a eu lieu en 1997 et l'analyse est en cours. Une autre expérience majeure sur la diffusion Compton virtuelle a été préparée pendant la période couverte par ce rapport.

Le spin
du nucléon
page 52

La diffusion
d'électrons
pour
comprendre la
structure
interne
des noyaux
les plus simples
page 50

Le projet Elfe

La réalisation complète de la stratégie choisie nécessite de disposer à la fois d'une énergie de 20 à 30 GeV (comme à Slac) et d'un faisceau continu de haute intensité (comme à TJNAF). C'est l'objet du projet Elfe: Electron Laboratory For Europe.

A la suite de la publication fin 1993 du rapport basé sur les travaux issus de l'atelier de Mayence, des groupes de travail ont été mis en place en 1995 au niveau national et sous l'égide du comité européen NuPECC pour approfondir le programme de physique et les moyens permettant de le réaliser. Il en est résulté une recommandation de NuPECC pour la réalisation d'un tel accélérateur, et la proposition de le faire en le couplant à d'autres équipements à Desy, à **Hambourg**. Le comité scientifique de Desy s'est déclaré favorable à cette perspective à condition que la communauté des physiciens européens de ce domaine, actuellement très dispersée dans ses objectifs, se rassemble autour de ce projet. Du côté américain, cette cohésion existe déjà, et TJNAF a développé un plan pour une future montée en énergie jusqu'à 12 GeV, puis éventuellement une extension à 24 GeV.

Elfe à Desy :
une synergie
nécessaire dans
la construction
d'accélérateurs
page 117

Échanges de charge entre noyaux : le rôle des mésons

Quelle est la nature du méson échangé lors de réactions d'échange de charge entre un noyau projectile et un noyau cible? Comment ce méson se propage-t-il dans le noyau? Subit-il un effet collectif? Pour répondre à ces questions, l'étude d'un état excité du nucléon - la résonance Δ - au sein d'un noyau a été réalisée avec les détecteurs Diogène puis SPES4 π . Les derniers résultats pourraient prouver l'existence d'effets collectifs prédits par les théoriciens.

Lorsqu'un noyau projectile échange une charge électrique avec un noyau cible, il se produit une réaction, dite d'échange de charge, dans laquelle il y a transfert d'énergie. Pour un transfert de l'ordre de 300 MeV, l'énergie se concentre pour former ce que l'on appelle la résonance Δ . Plusieurs questions se posent alors: quelle est la nature du méson qui est échangé lors de la réaction? Comment ce méson se propage-t-il dans le noyau? Subit-il un effet collectif? Telles ont été les motivations du programme entrepris au Laboratoire national Saturne (LNS). Des mesures inclusives, il ressort deux faits: quelle que soit la cible, la résonance Δ est fortement excitée et une diminution, d'environ 70 MeV, de l'énergie d'excitation du Δ dans un noyau par rapport à celle du Δ libre est observée. La moitié de ce déplacement est attribuée à des effets connus. L'autre serait due à une forte attraction résultant de la propagation résonante du pion dans la matière nucléaire.

Pour aller plus loin dans la compréhension de ce déplacement, il faut savoir comment interagit le Δ dans le noyau. Plusieurs processus sont possibles. Le plus simple est sa désintégration en un pion et un nucléon, il est alors considéré comme «quasi libre», il ne subit aucun effet du milieu nucléaire. Le plus complexe est l'absorption avec un autre nucléon, ce qui se traduit par l'éjection de deux nucléons. Le plus exotique est la production cohérente de pions. On peut décrire simplement ce processus par l'image suivante. L'hélium 3 interagit avec le noyau cible par l'intermédiaire de l'échange d'un pion «virtuel», un objet qui a toutes les propriétés du pion sauf sa masse! Ce pion interagit avec un nucléon, ils forment un Δ qui se désintègre dans le noyau, puis le processus recommence

jusqu'à ce que le pion sorte du noyau, retrouve sa masse et devienne réel.

Pour étudier au LNS ces réactions dites «exclusives», on a utilisé le détecteur Diogène, qui observe les particules chargées émises par la cible et on lui a ajouté un spectromètre. On en tire trois conclusions: la désintégration quasi libre est importante mais ne contribue en rien au déplacement en énergie; l'absorption domine et contribue de façon importante au déplacement du pic d'excitation; quant à la production cohérente, elle est observée mais la résolution du dispositif est insuffisante pour affirmer que le noyau résiduel est dans son état fondamental. La dernière étape est l'étude spécifique de cette production cohérente de pions. Diogène a été remplacé par SPES4 π , association du spectromètre SPES4 et d'un détecteur situé autour de la cible placée dans un aimant. La réaction de diffusion de ^3He , projeté sur une cible de ^{12}C produisant un tritium, un pion positif et un ^{12}C dans son état fondamental, a été choisie car le premier niveau excité du carbone est situé à 4,4 MeV. La mesure précise des composantes cinématiques permet de calculer la «masse manquante» du système résiduel et donc de l'identifier. La résolution expérimentale, de l'ordre de 6 MeV, est suffisante pour isoler l'état fondamental du carbone. Les résultats de Diogène sont confirmés et cette production cohérente de pions contribue au déplacement du pic d'excitation. L'analyse complète de ces résultats, obtenus en 1997, n'est pas terminée. Ce phénomène serait la preuve expérimentale de l'existence des effets collectifs prédits depuis plusieurs années par les théoriciens.

Pour en savoir plus :

Coherent pions in charge exchange reactions, Physics Letters, B303 (1993) 236.
S. Tarle-Rousseau, Étude des voies de décroissance de la résonance Delta excitée dans l' ^4He et d'autres noyaux par la réaction (^3He , t) à 2 GeV, thèse, Orsay, 1995.
L. Farhi, Production cohérente de pions dans les noyaux ^{12}C , ^{40}Ca par réaction d'échange de charge (^3He , $t\pi^+$) à 2 GeV, thèse, Orsay, 1997.
Laboratoires de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : IPN, Orsay.
CNRS/CEA : LNS, Saclay.
Danemark : Niels Bohr Institute, Copenhague.
Pologne : SINS, Varsovie.

Les observables de spin: un moyen d'explorer le noyau

La mesure des observables de spin offre une méthode puissante et unique pour obtenir des informations indispensables à une bonne compréhension de la structure des noyaux et des forces qui s'y développent. L'étude des énergies de transition entre différents états excités des noyaux apporte des éléments précieux dans le calcul des effets de corrélation entre les nucléons du noyau.

Parmi les méthodes d'étude de la structure nucléaire, les techniques usuelles de spectroscopie par réaction s'appuient sur les distributions angulaire et énergétique des particules diffusées dans des collisions entre un faisceau et une cible. L'utilisation de faisceaux polarisés pour lesquels le spin des projectiles a une orientation privilégiée et de polarimètres permettant de déterminer la polarisation des particules diffusées fournit un outil puissant et nouveau pour étudier cette structure.

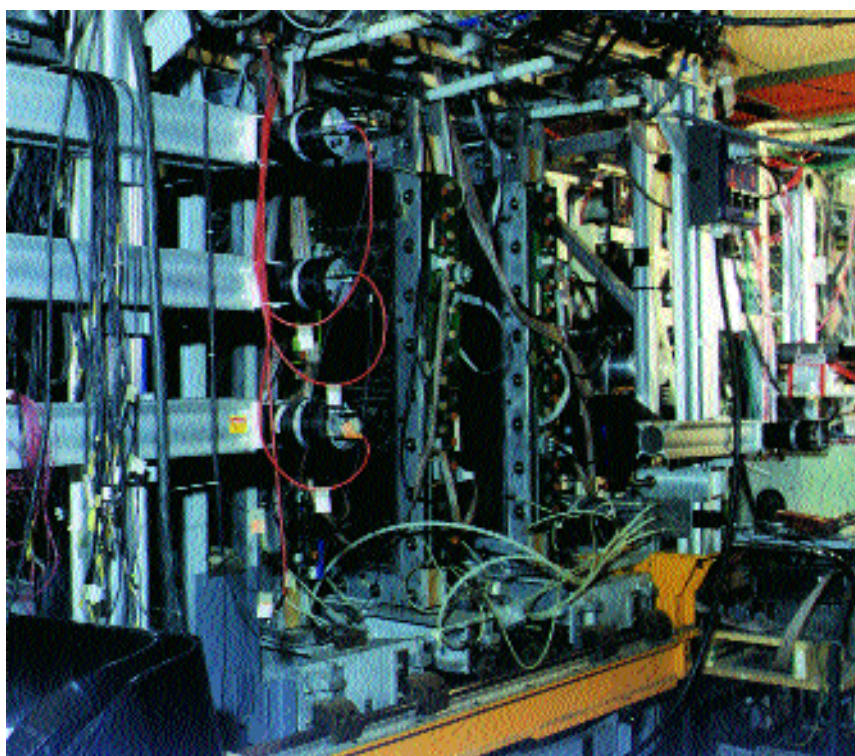
Hors de son état fondamental, un noyau peut exister dans des états instables (états excités). Ces états se groupent en quatre classes caractérisées par leur symétrie (protons et neutrons et/ou spin haut et bas oscillant en phase ou en opposition). La force liant les nucléons dépend de l'isospin T (qui distingue les états proton et neutron) et du spin S de la paire de nucléons en interaction. Ces nombres ne peuvent prendre que les valeurs 0 ou 1, par conséquent l'interaction entre deux nucléons comporte quatre termes correspondant chacun à un état de spin-isospin (S, T) particulier. Lorsqu'un projectile se couple au noyau, celui-ci peut transiter vers un état excité, chacun des termes de l'interaction n'excitant qu'une classe particulière d'états.

Les excitations dans la configuration $T = 0, S = 1$ de spin sont très peu connues en raison de la faible valeur de l'interaction. Dans le cas de la diffusion de deutons, elles deviennent accessibles grâce aux observables de spin. Cette expérience de diffusion de deutons polarisés de 400 MeV a été réalisée au Laboratoire national Saturne (LNS). La validité de la méthode a été vérifiée sur un noyau cible de ^{12}C . La distribution des excitations de spin $T = 0, S = 1$ dans les noyaux ^{12}C , ^{40}Ca , ^{90}Zr et ^{208}Pb a pu alors être observée pour la première fois.

La séparation en énergie d'excitation des distributions de

spin $T = 0, S = 1$ dans un noyau donne des contraintes indispensables pour comprendre les corrélations existant entre les nucléons de celui-ci. Les excitations mises en évidence se groupent parfois en larges résonances, suggérant l'existence d'ondes de spin.

Afin d'accéder à la polarisation tensorielle des deutons diffusés, un polarimètre tensoriel (Hypom) a été développé au LNS par une collaboration internationale. Il permettra un test encore plus efficace des modèles théoriques décrivant ces corrélations.



Pour en savoir plus :

Physics Reports, 289 (1997) 235-382.

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : IPN, Orsay.

CNRS/CEA : LNS.

États-Unis : Rutgers University, University of Georgia, University of South Carolina.

Le polarimètre tensoriel Hypom utilisé pour mesurer la polarisation des deutons diffusés dans la recherche des excitations dans la configuration $T = 0, S = 1$ de spin à Saturne.
Crédit: IN2P3.

La diffusion d'électrons pour comprendre la structure interne des noyaux les plus simples

Un des enjeux essentiels de la physique hadronique aujourd'hui est de comprendre la nature de l'interaction forte, décrite dans le cadre de la théorie de la chromodynamique quantique (QCD). Un outil très performant a été récemment mis à la disposition des physiciens au Thomas Jefferson National Laboratory (TJNAF), en Virginie, aux États-Unis: Cebaf, un accélérateur d'électrons délivrant des faisceaux intenses d'une énergie de 5 GeV en flux continu. Les physiciens de l'IN2P3 participent à deux expériences: dans le hall C, l'étude du facteur de forme du deuton; dans le hall A, la diffusion Compton virtuelle.

Comprendre la structure interne du noyau de deutérium

La compréhension de la structure interne du deuton (le noyau atomique le plus simple, formé d'un proton et d'un neutron) est un enjeu important de la physique hadronique qui s'attache à l'étude de l'interaction forte entre hadrons. En particulier, la structure électromagnétique de ce noyau de spin 1 est décrite par trois facteurs de forme liés aux distributions internes de charge et de courant. Cette structure, qui dépend de la distance relative entre nucléons, peut être étudiée par le processus de diffusion élastique de leptons. Ces projectiles sans structure interne (électrons par exemple) interagissent avec la cible par l'intermédiaire d'un processus décrit exactement par l'électrodynamique quantique (QED). L'échelle des distances dans le noyau cible peut être fixée par le choix de l'impulsion transférée à celui-ci et les hadrons apparaissent alors soit comme une somme de constituants élémentaires libres (quarks) soit comme des objets composites (dans lesquels les quarks sont confinés). De nombreux modèles théoriques prédisent la structure interne du deuton. Ils sont souvent basés sur des degrés de liberté nucléoniques (nucléons en interaction par l'échange de mésons) à grande distance entre les nucléons, mais une transition est attendue vers des degrés de liberté subnucléoniques (quarks) lorsque l'impulsion transférée devient suffisamment grande.

Les expériences réalisées sans mesure de polarisation, à des angles de diffusion différents, mais pour une même

valeur de l'impulsion transférée, permettent la séparation des fonctions de structure électrique et magnétique du deuton. De telles mesures ont été effectuées récemment au TJNAF avec la participation de physiciens français, dans le hall A. Toutefois, pour déterminer individuellement les trois facteurs de forme du deuton, une observable de polarisation doit aussi être mesurée. C'était le but de cette expérience, réalisée par une collaboration de laboratoires américains et européens à Cebaf, et qui a été la première des grandes expériences programmées (plusieurs mois de montage et de prises de données en 1997). Les physiciens ont mesuré la polarisation tensorielle t_{20} des deutons de recul, produits dans la diffusion élastique électron-deuton, et qui est liée à la différence des nombres de deutons formés dans les états de projections de spin 0 et ± 1 . Cette mesure présente plusieurs difficultés expérimentales. D'une part, la polarisation des deutons de recul est mesurée avec un polarimètre tensoriel dans un bruit de fond ambiant très important. C'est ainsi une expérience de double diffusion, avec un taux d'événements très faible. L'expérience a donc requis la mise au point d'une cible liquide de deutérium à forte puissance cryogénique (600 W) et l'utilisation de deux spectromètres (pour les électrons et les deutons diffusés). Le polarimètre Polder a été calibré au Laboratoire national Saturne (laboratoire commun CNRS-CEA à Saclay) avant son transport aux États-Unis.

Six nouveaux points dans un domaine de grande impulsion (de l'ordre de 1 GeV) ont été mesurés, permettant de sélectionner des configurations où le neutron et le proton sont très proches l'un de l'autre. Les résultats finaux, espérés en 1998, seront suffisamment précis pour discriminer entre les modèles existants et contraindre fortement leurs hypothèses physiques.

Pour ausculter le proton, la diffusion

Le polarimètre Polder, étalonné au Laboratoire national Saturne et utilisé dans le hall C du TJNAF pour l'étude du facteur de forme du deuton.
© LNS.



Compton virtuelle

La diffusion Compton virtuelle sur un proton, réaction où un proton émet un photon sous l'impact d'un électron, est un processus tout à fait original et nouveau pour sonder sa structure.

En effet, un matériau placé dans un champ électrique se polarise. La distribution des charges dans ce matériau change, et on observe expérimentalement un champ électrique différent de celui qui y a été appliqué. C'est la notion classique de polarisabilité.

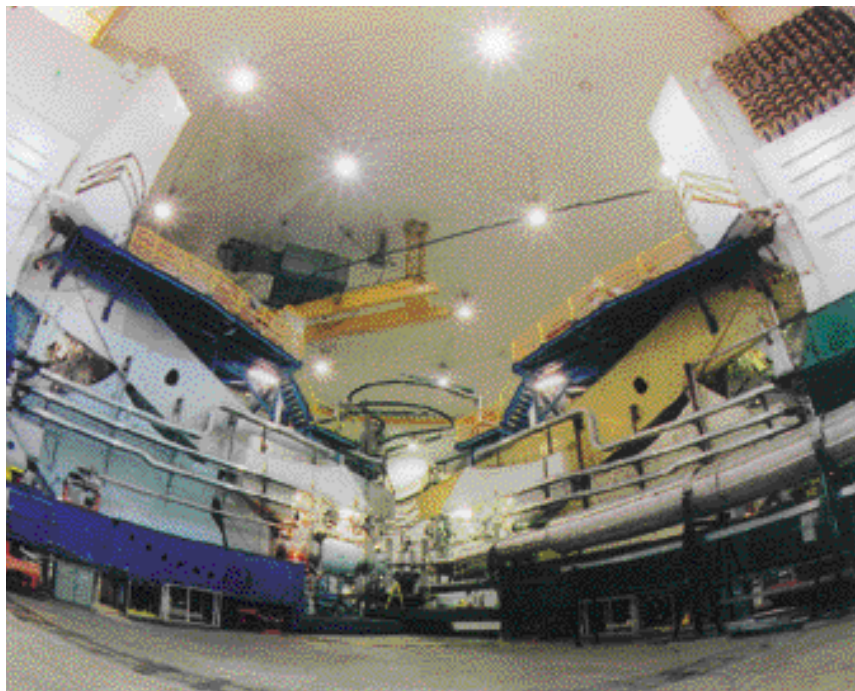
De manière analogue, le proton étant constitué de quarks chargés, on peut définir la polarisabilité électrique du proton qui sera sa réponse à un champ électrique extérieur. Une polarisabilité magnétique, correspondant à la réponse du proton à un champ magnétique, peut également être définie. Celle-ci peut être comprise par la somme de deux réponses: d'une part, les moments magnétiques propres des quarks vont augmenter ce champ magnétique en s'orientant de préférence dans sa direction (paramagnétisme); d'autre part, les boucles de courant liées au mouvement des paires de quarks et d'antiquarks à l'intérieur du proton vont s'orienter sous l'action du champ magnétique extérieur de manière à induire un champ magnétique dans la direction opposée à celui-là (diamagnétisme).

Comment mesurer ces champs électrique et magnétique induits au niveau du nucléon? Depuis plus d'une décennie, les polarisabilités du proton ont été mesurées avec des faisceaux de photons réels. Mais les quantités observées sont alors des réponses globales du proton. Pour obtenir la distribution des effets à l'intérieur du proton, il faut avoir recours à la diffusion d'électrons de très haute énergie sur le proton, avec un grand transfert d'impulsion, tout en gardant intact le proton. Placé dans le champ intense créé par le passage des électrons, le proton répond en émettant un photon. Compte tenu du faible taux d'interactions, et de la nécessité de détecter toutes les particules dans l'état final (proton et photon), ces réactions ne sont accessibles que depuis l'avènement d'accélérateurs d'électrons de haute intensité et de grand cycle utile.

La diffusion Compton virtuelle a ainsi été l'objet d'une expérience de grande précision à Mayence, en 1995, auprès d'un accélérateur d'électrons délivrant des fais-

ceaux intenses d'électrons de 1 GeV en flux continu. C'est à Cebaf que se déroulent les nouvelles expériences de diffusion Compton virtuelle, dans le hall expérimental A, mis en service en 1997. Les données, prises début 1998 à une énergie incidente de 4 GeV, répètent les mesures réalisées à Mayence, mais à des échelles de distance d'un ordre de grandeur inférieur, et permettront, lorsqu'elles seront analysées, de savoir si la structure électrique et magnétique du proton est rigide ou pas.

*Le hall A du TJNAF
où se déroule
l'expérience
de diffusion Compton
virtuelle.
© TJNAF*



Pour en savoir plus :

Sites Web: <http://www.cebaf.gov>
<http://clrwww.in2p3.fr/>
<http://isnwww.in2p3.fr/>

Laboratoires français
de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : ISN ; LPC, Clermont-Ferrand;
IPN, Orsay.
CNRS/CEA : LNS.
CEA/DSM : Dapnia.

Le spin du nucléon



Comment les quarks et les gluons, constituants élémentaires du nucléon, contribuent-ils à son spin ? Des expériences réalisées auprès de l'accélérateur d'électrons de Stanford et au Cern ont montré que les quarks ne contribuaient que pour 30 %. Les gluons apportent-ils le complément ? La question reste posée actuellement.

Les expériences de diffusion d'électrons ou de muons polarisés sur des cibles nucléaires polarisées contribuent à notre compréhension de la structure interne du nucléon (proton ou neutron) en termes de quarks et de gluons, dans le cadre de la théorie de l'interaction forte, la chromodynamique quantique (QCD). Ces expériences étudient plus spécifiquement comment se fait l'arrangement interne des quarks et des gluons pour donner un spin résultant de 1/2 (en unités de constante de Planck), égal à celui du nucléon. La question est complexe : non seulement chacun des constituants est lui-même porteur de spin, mais il peut posséder un moment orbital ; de plus, la densité de constituants dans le nucléon est une fonction imparfaitement connue.

Les expériences sont faites par diffusion d'électrons ou de muons dans laquelle l'énergie et l'impulsion transférées au nucléon cible sont très grandes : c'est la diffusion profondément inélastique. Le projectile voit alors les quarks dans un nucléon cible comme s'ils étaient libres, malgré la force forte qui les confine dans un volume minuscule de rayon 10^{-15} m. Dans ce régime particulier dit de « liberté asymptotique », les observables (asymétries de spin) sont reliées de manière simple à la distribution des quarks au sein du nucléon. On accède ainsi à leur polarisation.

Initiées dans les années 80, ces expériences ont eu un fort développement dans les années 90, grâce aux progrès techniques réalisés sur la polarisation des faisceaux et des cibles. Un groupe de physiciens de l'IN2P3 s'est impliqué dans les collaborations utilisant le faisceau d'électrons du Slac (Stanford Linear Accelerator Center aux États-Unis). Après les premières mesures sur des cibles contenant des neutrons polarisés, à Stanford et au Cern en 1992-1994, les expériences réalisées de 1995 à 1997 ont étendu le domaine d'énergie et la précision des mesures.

Actuellement, les résultats combinés sur le proton et le neutron permettent de vérifier, avec une précision meilleure que 10%, une prédiction théorique fondamentale due à James Bjorken. Les résultats montrent aussi que la « polarisation nette » des quarks ne vaut qu'environ 30 % de la valeur du spin du nucléon. Sont-ce les gluons qui amènent le complément ? Les mesures effectuées jusqu'à présent sont peu sensibles à la polarisation des gluons, qui n'intervient qu'au second ordre. On extrait cette quantité en comparant les évolutions théorique et expérimentale des sections efficaces en fonction de la quantité de mouvement échangée dans la diffusion. Avec la précision actuelle des données, il apparaît que le spin porté par les gluons dans le proton est compris entre 0 et 2 unités.

Les axes de recherche liés au spin du nucléon vont se poursuivre dans le futur. Le domaine d'énergie accessible à l'accélérateur Hera à Hambourg rend possible un test plus précis de la prédiction de Bjorken. Au Cern, le projet Compass prévoit d'extraire la polarisation des gluons en détectant plus de particules dans l'état final.

Pour en savoir plus :

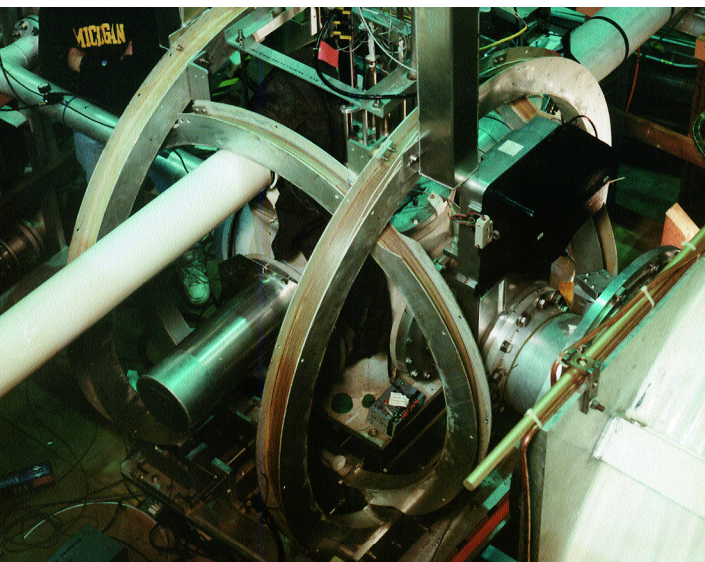
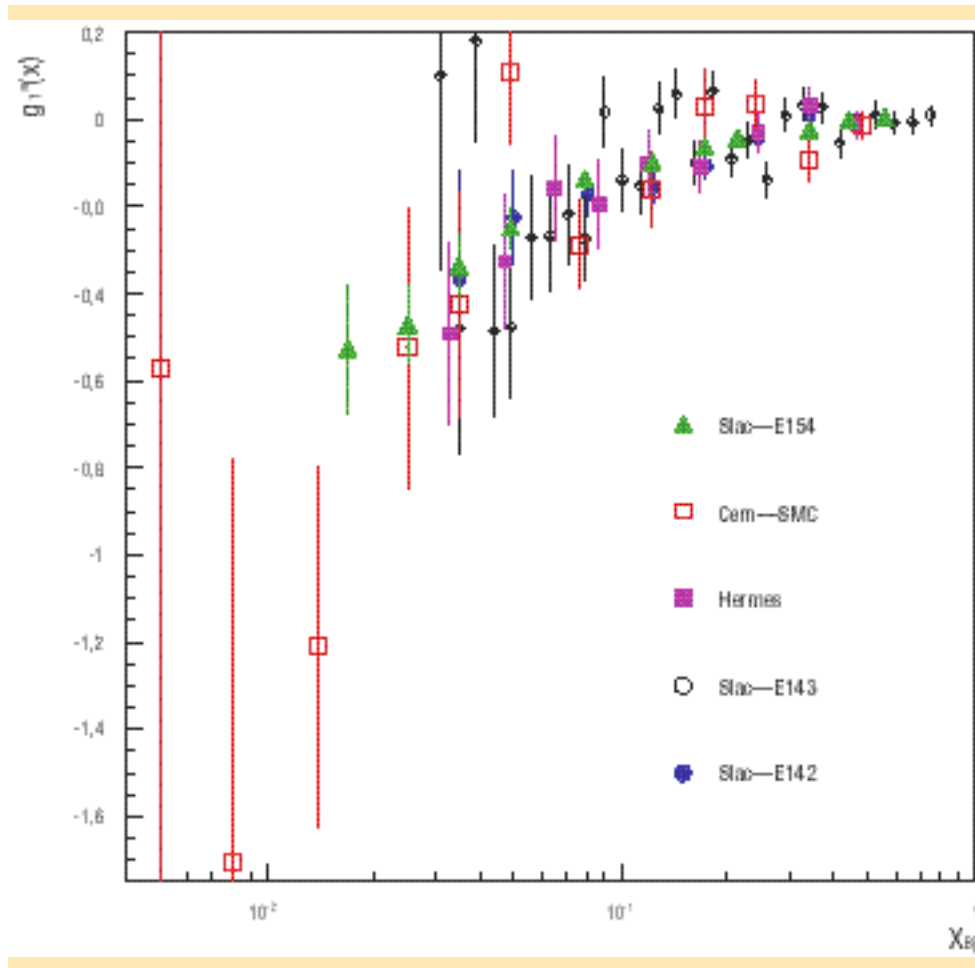
V. Breton, H. Fonvielle, Le spin du nucléon, Images de la physique (1995).
U. Stiegler, The nucleon spin structure, Physics Reports, 277, n° 1 (1996).

Sites Web :

<http://clrwww.in2p3.fr/sondem/sondem2.html>
<http://www.slac.stanford.edu/exp/e143/home.html>

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : ISN, Grenoble ;
LPC, Clermont-Ferrand.
CEA/DSM : Dapnia.



Cible d'hélium polarisé au Stanford Linear Accelerator Center.
© Slac.

Diffusion de leptons polarisés sur le neutron polarisé: résultat des expériences menées au niveau mondial de 1992 à 1997. L'observable représentée est la fonction de structure en spin du neutron $g_1^n(x)$, où x est la variable d'échelle de Bjorken x . Toutes les mesures sont ramenées à un même quadrimoment de transfert $Q^2 = 5 \text{ GeV}^2$.

Graal: des photons gamma polarisés pour étudier la structure du nucléon

La photoproduction de mésons (paires quark-antiquark) comme moyen d'approfondir la connaissance de la structure du nucléon est un des enjeux importants du programme de Graal.

L'originalité de l'expérience réside notamment dans l'utilisation de la technique de diffusion Compton de photons laser sur le faisceau d'électrons de l'ESRF qui permet d'atteindre un haut degré de polarisation des photons gamma.

Graal est un dispositif expérimental installé auprès de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble. Il est destiné à l'étude de la structure du nucléon à l'aide de photons gamma polarisés, d'énergie comprise entre 500 et 1600 MeV. C'est dans cette région en énergie que sont observées la plupart des résonances du nucléon et que se situent les seuils de photoproduction des mésons η et K . La compréhension du couplage de ces mésons au nucléon et à ses résonances est au cœur de la physique hadronique et constitue un des enjeux importants du programme de Graal.

La particularité de ce dispositif expérimental est d'utiliser la diffusion Compton de photons laser sur des électrons ultra relativistes. Avec la raie UV la plus lointaine d'un laser argon et les électrons de 6 GeV de l'ESRF, une énergie maximale de 1,67 GeV peut alors être atteinte. Le haut degré de polarisation des photons (pratiquement 100 % à l'énergie maximale) que permet d'atteindre cette technique constitue la grande originalité de ce faisceau. On peut ainsi mesurer les variables de polarisation des réactions de photoproduction dans d'excellentes conditions. Ces grandeurs, très peu étudiées jusqu'à maintenant, sont

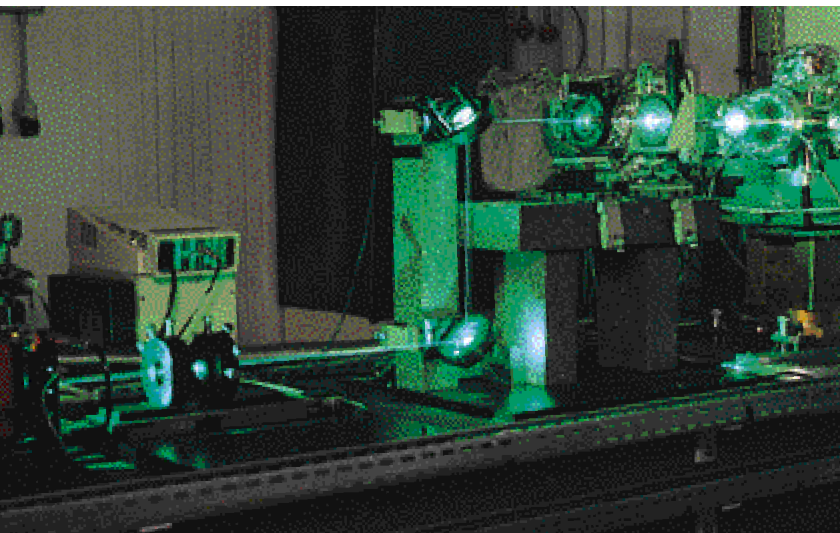
beaucoup plus sensibles à l'excitation des résonances du nucléon que les sections efficaces. Elles constituent l'atout essentiel de ce dispositif.

Démarrées fin 1993, l'installation puis la mise en route du dispositif expérimental se sont achevées au début de l'année 1996 avec l'obtention des premiers faisceaux stables et de forte intensité. Après une expérience test au printemps 1996, les premières prises de données ont débuté en septembre de la même année, avec comme premier objectif la photoproduction du méson η , dont pratiquement aucune observable de polarisation n'était connue. La production de π^0 , π^+ , $2\pi^0$ a également été mesurée lors de cette expérience. Le détecteur, de géométrie 4π , permet d'identifier ces réactions sans ambiguïté et de mesurer leur distribution dans l'espace. On obtient ainsi les asymétries faisceau (Σ) pour un faisceau polarisé linéairement.

La valeur de Σ pour la photoproduction du η a été mesurée jusqu'à 1,1 GeV (raie verte du laser) et cela pour la première fois dans ce domaine d'énergie. Les résultats ont été comparés aux modèles existants, basés essentiellement sur des données de sections efficaces. Les fortes valeurs observées au-delà de 900 MeV ne peuvent être reproduites. De même, dans la production de π^0 , et bien que celle-ci ait déjà été longuement étudiée, les résultats de Graal montrent des différences significatives par rapport aux prédictions d'une analyse en ondes partielles basée sur l'ensemble des données existantes. Les productions de π^+ et $2\pi^0$ sont en cours d'analyse.

Grâce aux raies UV du laser, le domaine en énergie du faisceau pourra être étendu jusqu'à 1,67 GeV. La photoproduction des mésons pseudo-scalaires K et η' , ainsi que des mésons vecteurs ω et ρ sera alors possible. En utilisant le même laser avec un doubleur de fréquence, il est envisageable d'atteindre 1,8 GeV et le seuil du méson. Par ailleurs, une cible polarisée HD (projet Hydile) est en cours de développement au sein de la collaboration entre l'IN2P3 et l'institut national de physique nucléaire italien (INFN).

Laser et banc d'optique de l'expérience Graal.
© ISN/J. Larruat.



Laboratoires de la collaboration:
CNRS/IN2P3 : IPN, Orsay; ISN, Grenoble.
INFN (Italie) : laboratoires de Gênes, Catane, Rome, Turin, Frascati.
Russie : INR, Moscou, Institut Kurchatov, Moscou.

Remerciements

Introduction

Gérard Fontaine

Faits marquants

Jean-Louis Boyard

Marcel Morlet

Serge Kox

Pierre-Yves Bertin

Hélène Fonvieille

Dominique Rebreyend

Matière nucléaire

La dynamique des noyaux et de la matière nucléaire se situe dans des domaines de dimension et d'énergie qui leur sont spécifiques dans le monde de la physique: quelques fermis (10^{-15} m) pour la première et du méga- au giga-électron-volt pour la seconde. A ces échelles, c'est en principe l'interaction forte décrite par la chromodynamique quantique qui régit la dynamique des systèmes. Toutefois, comme pour beaucoup de systèmes complexes, leur comportement présente des caractéristiques qu'on ne sait pas - pour les noyaux - ou qu'on sait mal - pour la matière nucléaire à haute énergie - expliquer à partir des interactions entre leurs composants élémentaires, les quarks. Dans le cas des noyaux, à basse énergie, on ne sait pas non plus l'expliquer à partir de l'interaction mesurable entre les composants moins élémentaires que sont les nucléons: protons et neutrons. C'est donc essentiellement l'exploration expérimentale qui permet d'accéder à la connaissance du comportement de systèmes comme les noyaux qui, sur Terre comme dans les étoiles, jouent un rôle important dans la dynamique de l'Univers. Pendant les quatre ans écoulés, les physiciens de l'Institut ont apporté des contributions à l'ensemble du domaine concerné par la structure et par les mécanismes dynamiques d'ensembles constitués de nucléons ou de quarks.

Les outils de la discipline

Pour leur recherche, les chercheurs de l'IN2P3 ont utilisé une palette d'outils nationaux et internationaux à la définition et à la construction desquels ils ont contribué de façon essentielle en s'appuyant toujours fortement sur le potentiel technique des laboratoires. Au premier rang de ces outils collectifs se trouvent les accélérateurs fournissant les faisceaux, qui sont aussi bien les sondes que les objets d'étude de la discipline. Ainsi, après la fermeture de l'accélérateur Sara à Grenoble, le Grand accélérateur national d'ions lourds (Ganil) à Caen dont les performances, tant pour la



Ensemble accélérateur
du Ganil.
© Studios Schuller/
Ganil.

Indra et les
noyaux chauds
page 68

De la sphère au
ballon de rugby :
la
superdéformatio
n des noyaux
page 70

dans le domaine des propriétés des noyaux loin de la stabilité que dans la compréhension de la dynamique de la fission et des phénomènes de fragmentation et vaporisation nucléaire. Le Vivitron, l'accélérateur électrostatique de Strasbourg, a été un centre d'activité européenne dans le domaine de la spectroscopie en alimentant en faisceaux le détecteur Eurogam. Le Cern a fourni les faisceaux d'ions lourds relativistes que demandait la physique du plasma de quarks et de gluons. Plus récente par contre est l'évolution dans le domaine des détecteurs vers une intégration au-delà du laboratoire, voire d'un seul pays. A l'instar du projet franco-britannique Eurogam qui a renouvelé le champ de recherche dans le domaine de la spectroscopie gamma, d'autres détecteurs ont été souvent pensés et conçus dans le cadre de collaboration multilaboratoires. Ainsi la réalisation du détecteur Taps, destiné à l'étude du rayonnement émis par de la matière nucléaire fortement chauffée, a coordonné les efforts de laboratoires français, néerlandais et allemands. Une étape supplémentaire de ce processus a été franchie avec le successeur d'Eurogam, le détecteur Euroball, monté depuis 1997 à Legnaro en Italie, qui résulte du travail des équipes de six pays. Toutefois, en marge de cette évolution qui correspond à une tendance de fond de la discipline, subsistent des niches spécifiques permettant à des petits groupes de développer des outils originaux ayant un impact sur la discipline. Comme réalisation récente de ce type d'appareillage, on peut citer le détecteur Diamant qui, en autorisant la détection de particules chargées simultanément à celle du rayonnement gamma, a accru de façon significative le pouvoir de résolution d'Euroball.

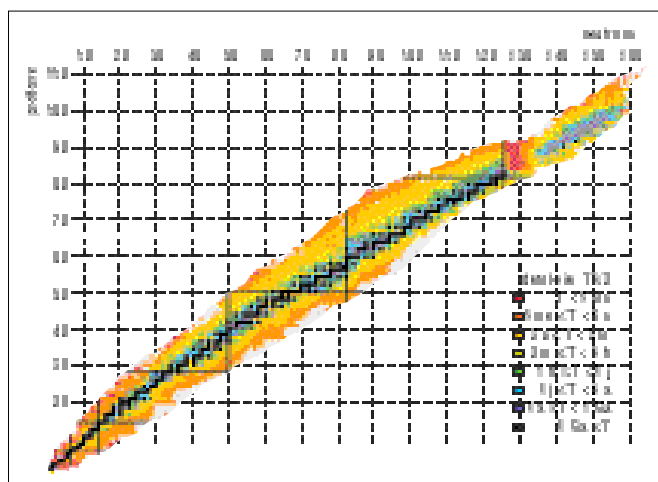
L'étude de la structure nucléaire

Notre connaissance du noyau en tant que système quantique a progressé de façon spectaculaire, grâce à l'étude de la structure nucléaire. Celle-ci s'est appuyée notamment sur des avancées réalisées en collaboration avec l'industrie dans la technologie des cristaux de germanium segmentés. Le pouvoir de résolution accru d'instruments comme Eurogam a permis d'entamer une analyse sélective des composantes individuelles, collectives et statistiques du spectre nucléaire à haute énergie d'excitation et ainsi de commencer à accéder à une vision globale de la dynamique nucléaire qui

Étain 100 :
le cinquième
noyau
doublement
magique
page 62
Noyaux
exotiques,
nombres
magiques
et isomères
page 64

Une horloge
pour la mesure
du temps de
fission d'un
noyau
page 66
Plasma de
quarks et de
gluons :
un nouvel état
de la matière
page 72

*La vallée de stabilité
des isotopes.*



échappait aux études antérieures auxquelles n'étaient accessibles que quelques-uns des premiers états excités des noyaux. Pour la communauté française, l'accès à

Eurogam pendant sa campagne strasbourgeoise jusqu'à son arrêt en novembre 1996, pour préparer son intégration dans Euroball a été la pierre de touche de cette nouvelle physique. Un élément de mesure de la productivité scientifique d'Eurogam est le nombre de publications scientifiques qu'il a suscité. Celui-ci a dépassé la centaine d'articles pour l'élaboration desquels les équipes de nos laboratoires ont su associer leurs efforts à ceux des meilleures équipes européennes.

En structure nucléaire, un des thèmes majeurs a été l'étude des états dits «superdéformés», états où le noyau prend une forme oblongue dont le rapport du grand axe au petit axe est voisin de 2 et qui apparaissent aujourd'hui comme des paradigmes d'une situation de symétrie brisée associée à des effets de couches nucléaires. Sur la carte des noyaux dans le plan neutron-proton, trois zones de superdéformation ont fait l'objet d'analyses par des groupes français autour de lignes de physique très spécifiques. Ainsi dans la région des isotopes du mercure déficitaires en neutrons (nombre de charge $Z = 80$, nombre de masse $A = 192$), une cartographie des orbitales a été réalisée. Celle-ci a établi que, conformément à la théorie, les derniers états individuels occupés par des nucléons correspondent à des états très excités de la configuration sphérique du noyau et dont l'occupation, paradoxalement, stabilise les déformations extrêmes. A l'occasion de ces travaux, par l'étude des moments d'inertie des noyaux en rotation, la communauté de physique nucléaire a pu faire progresser l'étude des forces d'appariement nucléaire en testant la résistance de la superfluidité à l'accroissement du moment angulaire. Dans une autre zone de superdéformation ($A = 150$) a été détecté un phénomène, encore incompris, d'oscillation d'énergie des niveaux quantiques indiquant qu'une structure fine (de l'ordre de 100 eV) se superpose à la structure superdéformée (échelle de l'ordre de 100 keV). Par ailleurs, la première observation des transitions discrètes qui, par effet tunnel, permettent aux états superdéformés de se désexciter vers des états normaux à travers la barrière de potentiel qui sépare les configurations nucléaires sphériques et superdéformées a été un des résultats expérimentaux les plus marquants obtenus auprès du Vivitron.

Un autre programme d'étude de l'Institut a concerné les radioactivités spéciales par lesquelles un noyau lourd peut émettre spontanément un noyau léger comme l'oxygène ou le carbone. Ces radioactivités établissent un lien conceptuel entre la radioac-

De la sphère au
ballon de rugby:
la
superdéformatio
n des noyaux
page 70

*Lise III - Ligne d'ions
super épiluchés
/exotiques.*

*Cet appareillage a deux
objectifs principaux :
produire et sélectionner
des noyaux radioactifs
« exotiques » situés aux
limites de la stabilité,
produire et sélectionner
des ions lourds très
« épiluchés » dont
le cortège atomique est
réduit à quelques
électrons.*

*© Ganil/
J.M. Enguerrand.*



tivité alpha, connue depuis un siècle, et le phénomène de fission observé il y a soixante ans. Avec les études de radioactivité à un proton qui ont débuté récemment, par exemple au Ganil, elles complètent le panorama global des désintégrations spontanées des noyaux associées à la seule interaction forte. Par ailleurs, une partie de la communauté française de structure, en collaboration avec le laboratoire russe JINR à Dubna, a réalisé une cible de matériau nucléaire métastable. Celle-ci contient une grande proportion de ^{178}Hf , dont l'énergie d'excitation est de quelques MeV et dont la durée naturelle de vie est de quelques années. La disponibilité de cette cible, qui sert de support à un ensemble d'expériences, a fourni pour la première fois aux physiciens un échantillon macroscopique présentant une situation d'inversion de population nucléaire du type de celle qui dans les atomes est mise à profit dans des dispositifs optiques comme les lasers.

La physique au Ganil

Plusieurs exemples d'autres thèmes essentiels de l'activité dans le domaine de la matière nucléaire sont illustrés dans les articles qui suivent. En ce qui concerne la physique aux énergies inférieures à 100 MeV par nucléon, il s'agit d'une part de la production et de l'étude des noyaux loin de la stabilité et d'autre part des propriétés de la matière nucléaire compressée ou chauffée. En France, ces études sont conduites au Ganil dont les caractéristiques ont permis aux équipes de l'Institut d'obtenir un ensemble de résultats originaux aussi bien dans le domaine de la métrologie des noyaux, y compris pour certains systèmes remarquables comme le noyau doublement magique ^{100}Sn , que dans celui de la structure des noyaux très riches en neutrons - ou inversement riches en protons - du type de ceux qui participent aux divers processus des évolutions stellaires. Par ailleurs, des équipes de l'Institut ont analysé la structure du halo de certains noyaux légers dont le cœur est entouré d'un nuage neutronique leur conférant ainsi les dimensions des noyaux les plus lourds. La versatilité du Ganil apparaît aussi dans sa capacité à fournir des faisceaux tels que ceux ayant permis la première mesure directe du temps de fission d'un noyau. Le résultat de cette mesure, qui indique un temps très « long » (compris entre 10^{-16} et 10^{-19} s) relance les réflexions théoriques sur un phénomène aussi anciennement connu que la fission.

Les propriétés de la matière nucléaire chaude ont fait l'objet d'études intensives par des équipes françaises au Ganil et auprès de sites étrangers (GSI à Darmstadt et Agor à Groningue). A une énergie inférieure à 100 MeV par nucléon, les travaux ont porté sur une caractérisation des propriétés thermodynamiques de la matière excitée et en

Étain 100 :
le cinquième
noyau
doublement
magique
page62

Noyaux
exotiques,
nombres
magiques
et isomères
page 64
Une horloge
pour la mesure
du temps de
fission d'un
noyau
page66

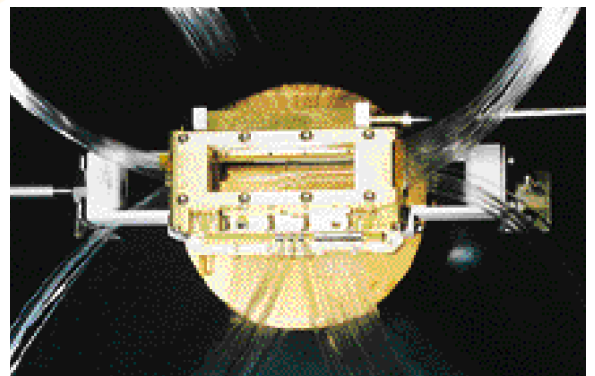
particulier sur la détermination de l'existence d'une transition du type liquide-gaz. Toutefois, les résultats montrent que des phénomènes de fragmentation de nature non thermodynamique jouent un rôle important sur toute la gamme des énergies explorées.

Plasma quark-gluon : un nouvel état de la matière?

Ce domaine en croissance au sein de l'Institut recherche la transition de déconfinement qui, à de hautes températures comme celles ayant existé dans les premières secondes de la vie de l'Univers, fait passer d'un état de la matière constitué de nucléons en interaction à un état où les quarks constituants de ces nucléons sont déconfinés au sein d'un plasma. Les théories prévoient que ce plasma constitué de quarks et de gluons (les particules qui, pour la chromodynamique quantique, jouent un rôle analogue à celui des photons pour l'électrodynamique) puisse être formé à des énergies que l'on peut atteindre au Cern dès aujourd'hui. Les résultats de l'expérience NA50 conduite par des équipes de l'IN2P3 ont fourni le signal qui, à ce jour, apparaît comme le plus probant de l'existence d'une transition.

Plasma de
quarks et de
gluons :
un nouvel état
de la matière?
page 72

Ce chapitre donne un aperçu des lignes principales de l'activité récente des physiciens de l'IN2P3 dans le domaine de la physique des noyaux. L'ensemble constitué par ce texte et les articles qui l'accompagnent reflète aussi l'importance au sein de l'Institut des thèmes qui vont être explorés par les physiciens nucléaires dans la période qui s'engage. Dans le domaine des énergies pour lesquelles le noyau réagit comme un tout (et non comme une assemblée de nucléons indépendants), l'effort va aller croissant et concerner l'élucidation des problèmes de structure de noyaux très excités parce qu'on leur a imparti soit un très grand spin (moment angulaire de rotation), soit un très grand isospin (différence entre les nombres de neutrons et de protons). Par ailleurs le programme d'étude des mécanismes de réactions nucléaires va se poursuivre. Enfin, les expériences à des énergies de collision telles que non seulement le noyau mais les nucléons eux-mêmes se fondent en un plasma de quarks vont occuper une fraction grandissante des physiciens nucléaires de l'IN2P3.



Détecteur NA50
pour le Cern.
© CNRS/F. Planche.

Étain 100: le cinquième noyau doublement magique

Recherché depuis vingt-cinq ans, le noyau doublement magique d'étain 100 a été découvert en 1994 simultanément au Ganil et à GSI. L'étude de ses propriétés doit permettre de mieux comprendre les relations entre magicité et stabilité, ainsi que le rôle de l'égalité du nombre des neutrons et des protons dans les noyaux lourds.

Les propriétés du noyau (masse, abondance naturelle...) sont discontinues pour certaines valeurs du nombre de neutrons et de protons. Cela indique une structure en couches du noyau analogue à celle des niveaux atomiques pour le cortège électronique. Les nombres de protons et de neutrons (2, 8, 20, 28, 82, 126) pour lesquels ces discontinuités existent sont appelés nombres magiques car ils confèrent au noyau une structure exceptionnellement stable par rapport à ses voisins. En outre, les noyaux magiques ayant le même nombre de neutrons et de protons sont rares; et sur l'ensemble des quelques milliers de noyaux prédits, seuls 5 sont doublement magiques. ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca sont les seuls noyaux doublement magiques existant dans la nature. Le quatrième

connu, ^{56}Ni , est instable avec une durée de vie de six jours. Le dernier et le plus lourd, ^{100}Sn (50 neutrons = 50 protons), situé aux confins de la ligne de stabilité, était recherché depuis vingt-cinq ans. En avril 1994, quelques dizaines d'atomes de ^{100}Sn ont été produits et identifiés à la fois au GSI en Allemagne et au Ganil en France. Après cette découverte, une série de mesures a été entreprise sur ce noyau pour répondre aux questions suivantes:

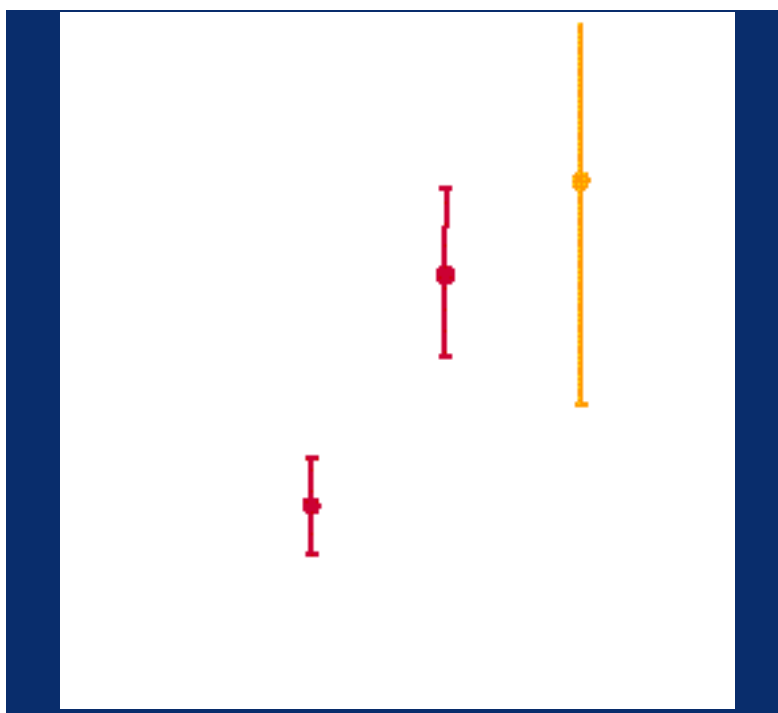
- la notion de stabilité renforcée par les couches magiques est-elle toujours valable aussi loin de la stabilité?
- quel est encore le rôle de l'égalité du nombre de protons et de neutrons, qui est une symétrie très spéciale, pour les noyaux lourds?

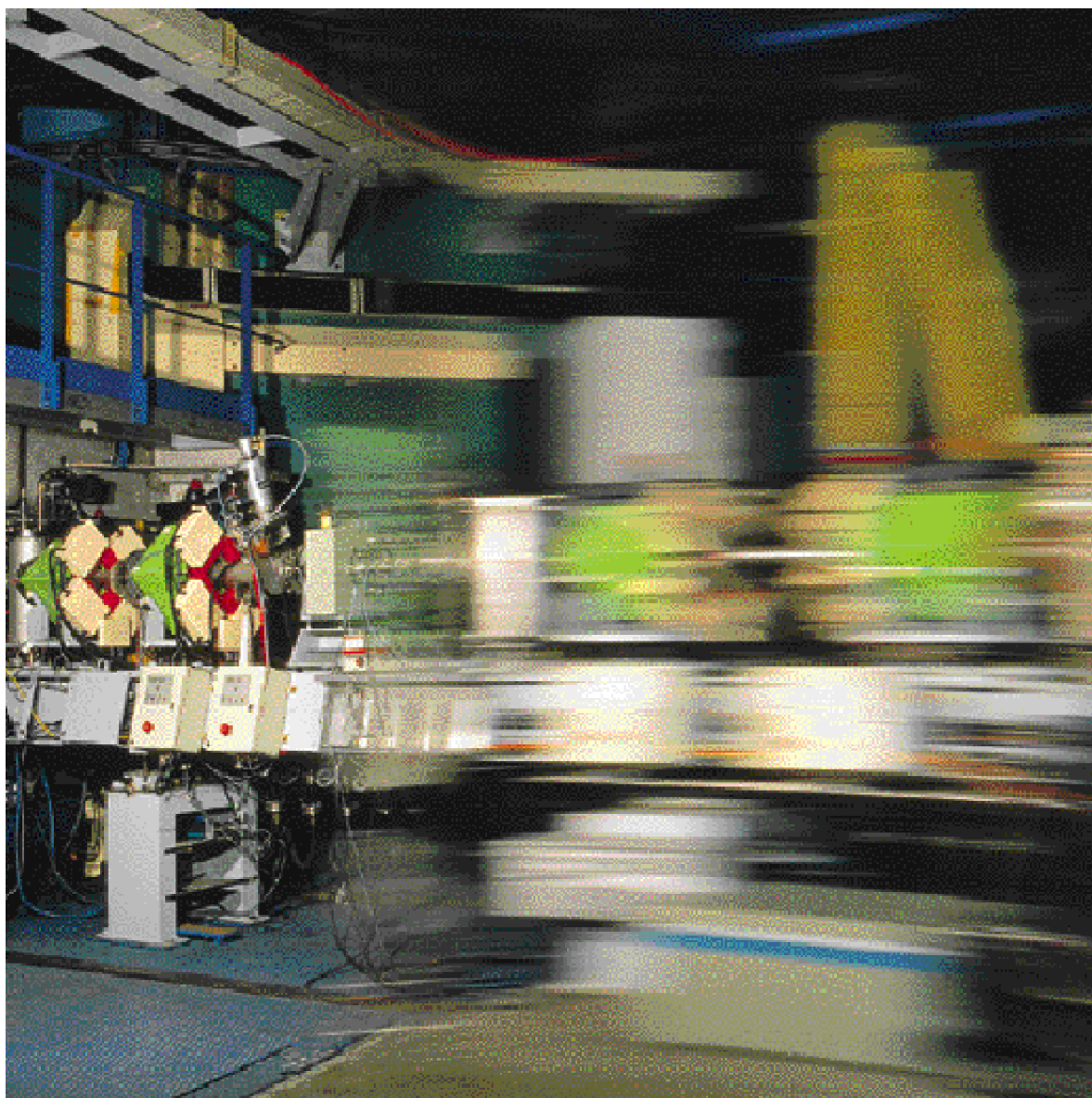
La masse des noyaux, reliée à l'énergie de liaison des nucléons dans le noyau, est une quantité fondamentale qui répond directement à la question de sa plus ou moins grande stabilité.

Pour mesurer la masse d'un noyau aussi rare et éphémère (temps de vie ≈ 1 s), tout en le séparant de ses faux-frères produits simultanément (noyaux de même nombre de nucléons ou isobares), il a été nécessaire de mettre au point une méthode originale.

Les caractéristiques de l'accélérateur Ganil qui possède deux cyclotrons en cascade ont été mises à profit. Le premier cyclotron est utilisé pour produire un faisceau primaire qui par réaction dans une cible crée les noyaux recherchés. Ces noyaux ainsi formés, emportés par l'élan de la réaction nucléaire sont alors injectés dans le deuxième cyclotron qui est utilisé ici de manière non conventionnelle. Les ions obéissent à l'équation de base des cyclotrons où la fréquence de rotation s'écrit en fonction du champ magnétique et de la fréquence du cyclotron, de la masse et de la charge électronique de l'ion. Du fait de cette propriété, un cyclotron est donc un spectromètre de haute résolution: la mesure du temps de parcours des ions permet de mesurer la fréquence de rotation et par là même la masse des noyaux accélérés.

Comparaison
entre
les valeurs déduites
d'une extrapolation
à partir des noyaux
connus et les derniers
résultats
expérimentaux.





*Vue artistique de l'ensemble des deux cyclotrons du Ganil. Le cyclotron situé à gauche est celui utilisé comme « balance » de précision.
© Ganil/M. Desauvay.*

Cette méthode a permis d'accélérer une dizaine d'atomes de ^{100}Sn et d'en déterminer la masse avec une précision de 10^{-5} . Le résultat de cette mesure est comparé aux prédictions des tables de masse et indique clairement que le noyau de ^{100}Sn est plus lié qu'attendu. Ces résultats illustrent la difficulté de faire des prévisions fiables sur une quantité aussi fondamentale que la masse des noyaux et donc que le chemin est encore long pour avoir une compréhension plus fine de la structure interne des noyaux.

Pour en savoir plus :

Identification of the doubly magic nucleus ^{100}Sn in the reaction $^{112}\text{Sn}+^{nat}\text{Ni}$ at 63 MeV/nucleon. Phys. Lett. B, vol.332, p. 20-24 (1994).

A cyclotron as a high resolution mass spectrometer for fast secondary ions. Nucl. Instr. Meth. vol. A350, p. 235-243 (1994).

Mass measurement of ^{100}Sn . Phys. Rev. Letters, vol.77, N°12, p. 2400-3 (1996).

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : LPC, Caen.

CNRS/CEA : Ganil, Caen.

CEA/DSM : Dapnia.

Noyaux exotiques, nombres magiques et isomères

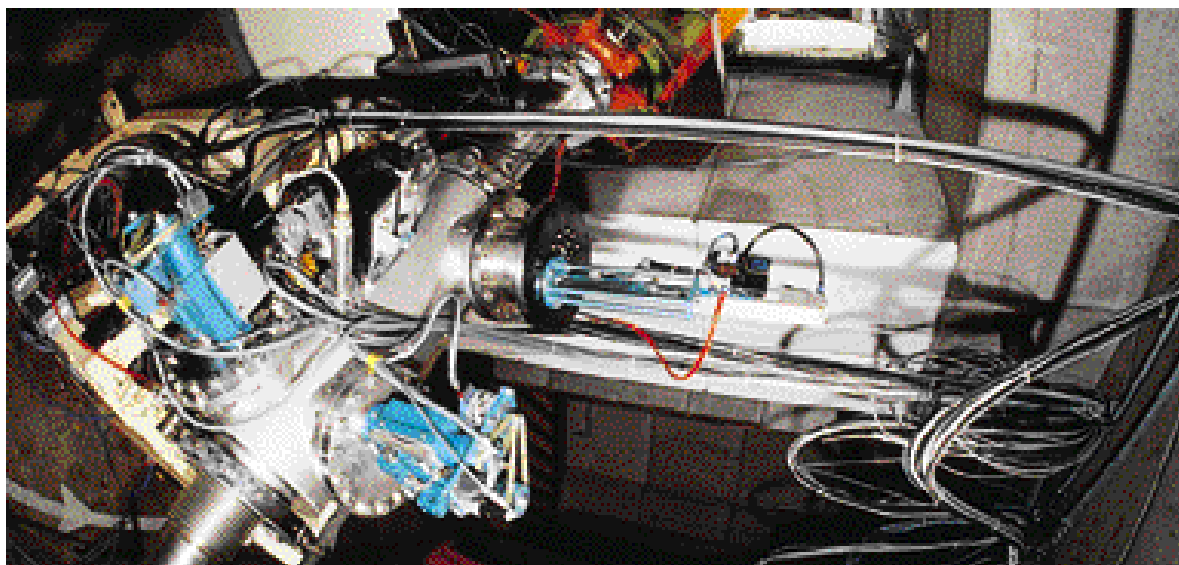
La connaissance de la structure des « noyaux exotiques », dont la proportion de neutrons et de protons diffère fortement de celle des noyaux stables, constitue un moyen essentiel de tester la validité des modèles actuels du noyau. Cette disproportion entre nombres de protons et de neutrons doit entraîner des changements dans les nombres « magiques » caractérisant les couches nucléaires fermées, souvent déterminées pour des noyaux stables. Les recherches de structure nucléaire sont grandement facilitées par la découverte récente d'isomères de durée de vie de l'ordre de la microseconde.

La méthode de production de noyaux par fragmentation de projectiles stables à haute énergie a démontré depuis de nombreuses années la possibilité de produire et d'étudier des noyaux dont la proportion de neutrons et de protons diffère fortement de celle des noyaux stables. Les méthodes d'investigation utilisées pour connaître les propriétés de ces noyaux, appelés exotiques, se révèlent bien sûr limitées puisque ceux-ci ne sont produits qu'à très faible intensité. Par exemple, quelques noyaux de ^{100}Sn ou quelques dizaines de noyaux de ^{74}Ni sont produits en une journée dans un accélérateur tel que le Ganil. Ces chiffres sont à comparer à ceux des isotopes stables de ces mêmes éléments qui peuvent être accélérés

en tant que faisceaux primaires avec des intensités de 10^{10} particules par seconde pour le ^{112}Sn et du même ordre de grandeur pour le ^{64}Ni .

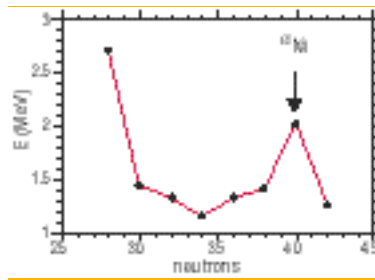
La connaissance de la structure de ces noyaux exotiques, dans leur état fondamental (sphéricité, déformation) et dans leurs états excités (rotation, vibration ou excitation de nucléons), constitue l'unique moyen de tester la validité des modèles actuels basés sur les études approfondies réalisées depuis des décennies sur les noyaux stables. Il est par exemple intéressant de suivre l'évolution de la forme de l'interaction entre les Z protons et les N neutrons d'un noyau atomique lorsque l'on augmente considérablement le nombre de neutrons par rapport à celui des protons. Celle-ci est souvent modélisée par un potentiel moyen que ressent chacun des constituants. Étant donné la courte portée de l'interaction forte entre nucléons, ceux-ci ne sont sensibles qu'aux interactions avec leurs proches voisins. Ainsi, le potentiel ressenti par un nucléon au cœur d'un noyau dépend assez peu du nombre de nucléons qui le composent. Par contre, un nucléon en surface ressentira une interaction plus ténue du fait de la diminution du nombre de ses proches voisins. Les caractéristiques particulières des noyaux sont révélées par les nucléons de surface qui devraient être essentiellement constitués de matière neutronique pour des noyaux très riches en neutrons. Cette variation de champ moyen doit se traduire sur la position des orbitales qu'occupent les nucléons et donc sur les écarts en

Point de focalisation
achromatique
du spectromètre Lise.
© CNRS/D. Wallon.



Évolution de l'énergie du premier état excité des isotopes de nickel. Le ^{56}Ni et le ^{68}Ni présentent une augmentation de cette énergie qui traduit

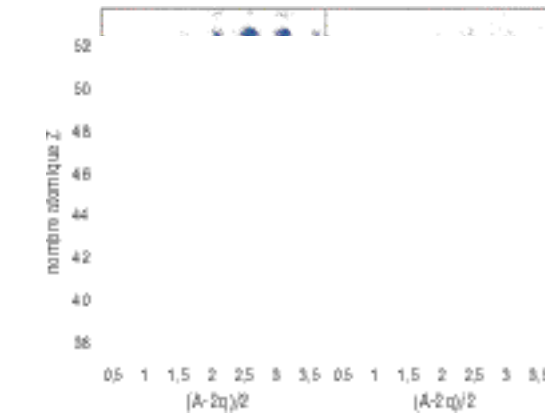
le fait que ces noyaux sont difficilement excitables. Cet effet de «magie» apparaît clairement pour un nombre de neutrons égal à 40.



énergie entre deux orbitales consécutives. Les isotopes dont le niveau fondamental est très écarté en énergie du premier état excité sont appelés noyaux magiques. Cette magie est bien établie pour des noyaux composés de 28 neutrons mais dont le rapport neutrons/protons est voisin de 1 (isotones). Il semble toutefois qu'elle disparaisse lorsque ce rapport devient très supérieur à 1 comme dans le cas du ^{48}S , composé de 28 neutrons et seulement de 16 protons. Il est alors probable que de nouveaux nombres magiques apparaîtront pour des noyaux très enrichis en neutrons.

Les noyaux exotiques issus de la fragmentation d'un projectile stable sont produits à haute énergie d'excitation, notion proche d'une température. Ces états excités se «refroidissent» entre autres par émission de photons de quelques dizaines de keV à quelques MeV en cascades sur les états excités du noyau. Ce refroidissement est en général très rapide, de l'ordre de 10^{-14} secondes. Toutefois certains de ces états, du fait de l'excentricité de leur orbitale par exemple, peuvent survivre beaucoup plus longtemps et constituer des états métastables appelés isomères. Ces états vont alors subsister un temps suffisamment long pour pouvoir révéler des configurations de noyaux parfois très particulières. La partie gauche de la figure ci-dessus à droite présente les noyaux produits par fragmentation d'un faisceau de ^{112}Sn à une énergie de 69 MeV par nucléon. Les noyaux comportant un état isomère sont visibles sur la partie de droite qui est conditionnée par le fait que ces noyaux émettent un photon «retardé». Par exemple, il a été démontré que la méthode de fragmentation du projectile permet de peupler des états isomériques à haute énergie d'excitation (environ 5 MeV) et/ou à haut spin ($J = 14$ dans le ^{94}Pd). Il a été démontré, dans une expérience similaire, qu'un noyau, le ^{74}Kr , peut coexister dans des formes différentes de grande déformation. Cette coexistence a été révélée par la transition isomérique qui signe le changement de forme cigare (prolate) -> aplati (oblate) de ce noyau.

Un autre exemple marquant est la détection de l'état isomérique du ^{70}Ni (42 neutrons, 28 protons) à 2,86 MeV de durée de vie égale à 210 ns. Cet état isomérique décroît vers le niveau fondamental en émettant une cascade de quatre photons. La comparaison entre l'énergie du premier état excité dans ce noyau de ^{70}Ni (1,264 MeV) et celle



Identification de noyaux produits lors de la fragmentation d'un faisceau de ^{112}Sn au Ganil. Z, A, q représentent respectivement le nombre de protons, le nombre de nucléons et la charge des noyaux produits. La partie droite représente la même carte avec la condition de détecter un photon retardé de quelques microsecondes par rapport à la détection de ces noyaux. Cette condition révèle la présence des isomères de Ag, Pd, Ru et Mo.

du noyau voisin de ^{68}Ni (28 protons, 40 neutrons) à 2,03 MeV révèle l'apparition d'un nombre «magique» nouveau $N = 40$ qui n'existe, semble-t-il, que pour des noyaux enrichis en neutrons. En effet, le ^{68}Ni présente une grande différence d'énergie entre son état fondamental et son premier état d'excitation (courbe), qui est une des caractéristiques d'un noyau «magique». Par ailleurs, il est important de noter que ces états isomériques offrent la possibilité d'étudier le comportement du potentiel nucléaire pour des états d'excitation de quelques MeV. Pour des noyaux très riches en neutrons, cet état excité devient très peu lié dans le potentiel constitué par les nucléons et pourrait ainsi se trouver en moyenne assez loin de la «surface» du noyau. L'utilisation de faisceaux de noyaux dans un état isomérique constitue un défi expérimental important qui permettra de confronter les théories actuelles sur le comportement des noyaux riches en neutrons proches de la limite de liaison nucléaire.

Pour en savoir plus :

C. Chandler et al., Transition isomérique oblate -> prolate Physical Review C, vol. 56, n° 6, p. 56, 1997.

R. Grzywacz et al., Isomères du nickel, Physical Review Letters, sous presse.

Laboratoires français de la collaboration :

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

CNRS/CEA : Ganil, Caen ;

CEA : Centre d'études nucléaires de Bruyères-le-Châtel.

Une horloge pour la mesure du temps de fission d'un noyau

Des monocristaux de silicium bombardés par un faisceau d'ions d'uranium ont été utilisés pour mesurer les temps de fission de noyaux. Ceux-ci s'échelonnent entre 10^{-16} et 10^{-19} s en fonction de la température du noyau considéré. Des informations relatives à l'évolution de la viscosité de la matière nucléaire en fonction de sa température peuvent en être déduites.

La fission reste aujourd'hui encore un phénomène privilégié pour étudier certaines propriétés de la matière nucléaire comme sa viscosité. Or, pendant longtemps la fission n'a pu être étudiée que sur des noyaux modérément excités soit par capture neutronique soit par des interactions avec des projectiles chargés de faible énergie. Seule la viscosité de la matière nucléaire froide ou tout au plus tiède était donc connue.

Avec des faisceaux d'ions lourds de moyenne énergie (quelques dizaines de MeV/nucléon), on est aujourd'hui à même de déposer dans un noyau une énergie thermique de l'ordre de quelques centaines de MeV, voire de l'ordre du GeV. Il en résulte des noyaux très chauds ($T > 6-7$ MeV, c'est-à-dire de quelques dizaines de milliards de degrés) dont certains peuvent fissionner. La mesure du temps que mettent ces noyaux à subir la fission donne accès à l'évolution de la viscosité en fonction de la température du noyau.

Une méthode de mesure directe de ce temps de fission a été mise en œuvre en utilisant un monocristal, qui par un phénomène d'ombre, joue le rôle d'un chronomètre sensible à des échelles de temps comprises entre 10^{-16} et 10^{-19} s. Ces expériences ont été réalisées au Ganil par une équipe pluridisciplinaire de physiciens de la matière condensée, de l'atome et de la matière nucléaire.

Dans cette expérience, on fait interagir un noyau d'uranium du faisceau sur un noyau cible d'un monocristal de silicium et on observe l'émission des fragments de fission le long d'un axe du cristal. Le noyau qui subit la fission, animé d'une certaine vitesse de recul, verra ses fragments défléchis par le potentiel atomique régnant à proximité de l'axe du cristal ou du plan cristallin. Il en résulte un effet d'ombre dans la direction de l'axe ou du plan cris-

tallin, ombre qui est maximale quand la distance de recul par rapport à l'axe ou au plan est très inférieure aux fluctuations thermiques dans le cristal (de l'ordre de $0,08 \text{ \AA}$ pour du silicium à 300 K) puis qui diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'axe ou du plan. Connaissant l'interaction électromagnétique, il est possible de déduire, à partir des caractéristiques de l'ombre, la distance à laquelle la fission intervient par rapport à l'axe ou au plan cristallin. La vitesse du noyau subissant la fission étant déterminée à partir des caractéristiques des fragments de fission, le temps est déduit de façon immédiate. Il s'agit donc là d'une mesure très directe.

En choisissant l'uranium comme projectile et le silicium comme cible plutôt que l'inverse, on obtient une vitesse beaucoup plus élevée du noyau qui fissionne. On a ainsi pu accéder, pour la première fois dans ce type de mesures, et grâce à la très grande qualité du faisceau d'uranium, à une échelle de temps comprise entre 10^{-16} et 10^{-19} s, soit des temps beaucoup plus courts que dans les expériences précédentes. La température des noyaux a été déduite événement par événement à partir du nombre total de neutrons évaporés, mesurés par le détecteur 4π Orion. Une rapide évolution des temps de fission a été observée en fonction de la température initiale du noyau.

Pour en savoir plus :

D. Hilscher et H. Rossner, Ann. Phys. Fr. 17 (1992) 471.

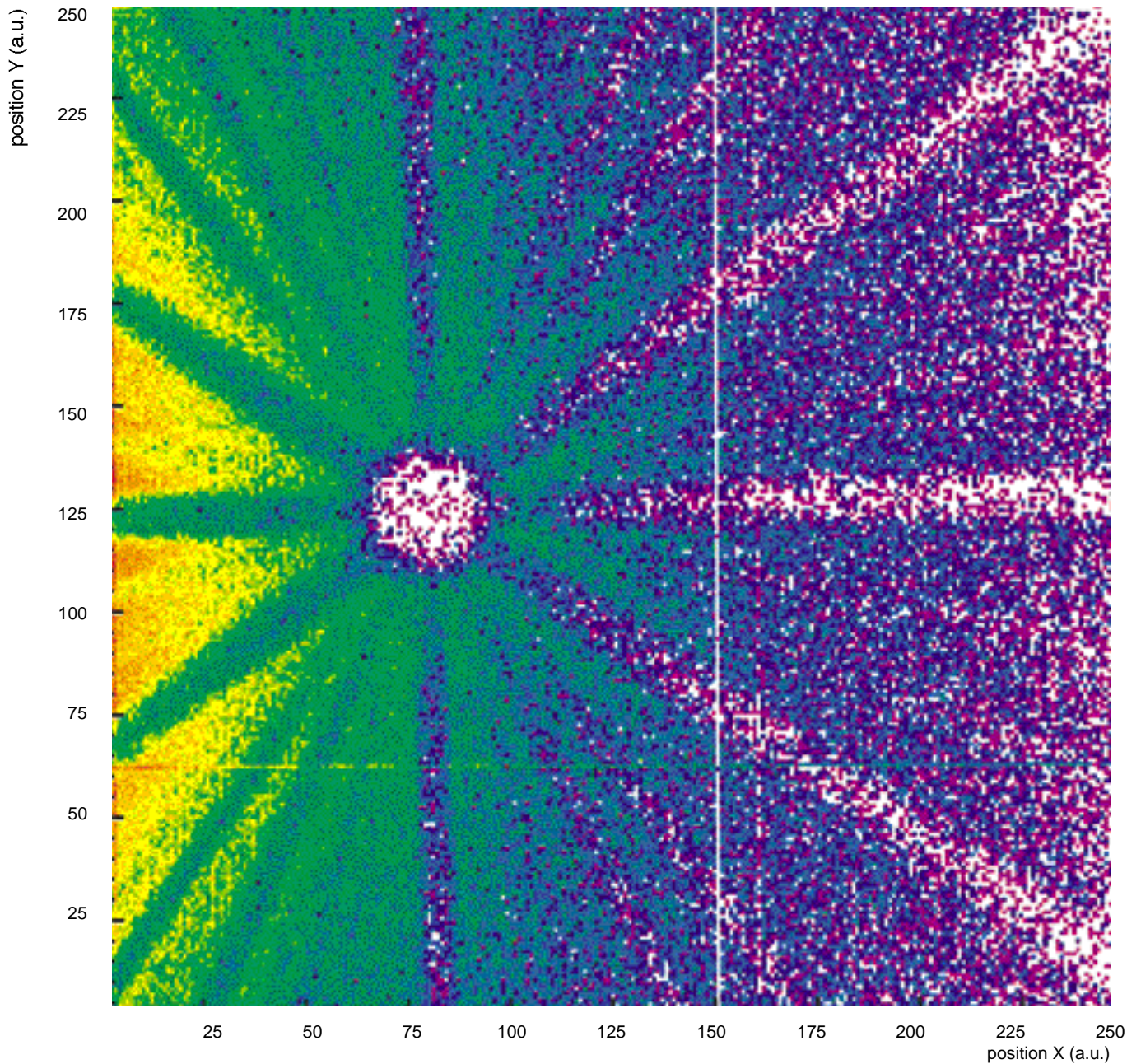
Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : IPN, Lyon ; IPN, Orsay.

CNRS/CEA : Ganil ; Ciril.

CNRS/SPM : Groupe de physique des solides, Paris VI/VII.

Effets d'ombre mis en évidence dans un monocristal de silicium par des ions d'uranium diffusés élastiquement ($^{238}\text{U} + ^{28}\text{Si}$ 24 MeV/nucléon). Les lignes claires sont dues à l'effet d'ombre sur les différents plans cristallins. Ces lignes se rejoignent sur l'axe $\langle 110 \rangle$ du cristal qui est responsable du fort effet d'ombre visible autour de la position (80,125).



Indra et les noyaux chauds



Lors de la collision entre noyaux, une partie de l'énergie cinétique incidente du projectile est transformée en chaleur: on produit ainsi des «noyaux chauds».

Indra, multidétecteur qui permet d'observer les particules dans la presque totalité de l'espace, est particulièrement adapté à l'étude des mécanismes de production et de désexcitation de ces noyaux.

Pour pouvoir explorer les propriétés de la matière nucléaire sur une large gamme de température et de pression, une des approches expérimentales les plus efficaces consiste à étudier les collisions noyau-noyau. On peut mettre en évidence le rôle des degrés de liberté nucléoniques (protons et neutrons) pour des collisions en dessous de 200 MeV par nucléon, hadroniques dans le domaine relativiste (5 à 2 GeV par nucléon) ou sub-nucléoniques (quarks et gluons) aux énergies ultrarelativistes (plus de 20 GeV par nucléon).

Lors d'une collision entre deux noyaux, une partie de l'énergie cinétique du projectile (comprise entre 20 et 100 MeV/nucléon dans le cas présent) est transformée en chaleur de sorte que tout ou partie du système en collision peut être fortement chauffé: on parle alors de production de noyaux chauds. La violence de la collision peut de plus mener à une compression du système. Un grand nombre de particules légères et de fragments est émis dans tout l'espace. Il est nécessaire de les détecter avec la meilleure efficacité et la meilleure résolution possibles. Les limitations des ensembles de détection, dits de première génération, utilisés dans les années 80, ont conduit à la construction du multidétecteur Indra. Une large gamme de systèmes et d'énergies incidentes a été explorée, permettant une étude détaillée des mécanismes de production et de désexcitation des noyaux chauds.

La forte analogie entre l'interaction nucléon-nucléon dans les noyaux et les forces de Van der Waals dans les fluides macroscopiques suggère l'existence d'une transition de phase liquide-gaz dans les noyaux. Une première indication d'une telle transition a été fournie grâce à l'étude de l'évolution des modes de décroissance des noyaux chauds. L'état liquide observé lorsque l'énergie déposée est une fraction de l'énergie de liaison est caracté-

térisé par l'évaporation de quelques particules (et éventuellement par la fission) alors que l'état gazeux est caractérisé par la vaporisation complète du système en particules légères (neutrons, protons, particules α) lorsque l'énergie déposée dépasse largement l'énergie de liaison. Une meilleure caractérisation passe par la mesure d'une quantité thermodynamique liée à la discontinuité de la capacité calorifique. Cette mesure a été faite pour un grand nombre de systèmes par les méthodes de la calorimétrie et de la thermométrie nucléaire. L'interprétation des résultats à travers leur comparaison avec des modèles théoriques est encore largement débattue.

Enfin, l'état intermédiaire associé à la décomposition du système en fragments de masse intermédiaire et particules légères a été clairement sélectionné et caractérisé. Ce processus appelé multifragmentation a été étudié, tant par l'analyse de la distribution de la matière émise qu'à travers ses aspects énergétiques et temporels. En particulier ont été mis en évidence des lois d'échelles dans les distributions de charge des fragments et un mouvement collectif de la matière emportant une fraction importante de l'énergie disponible. Ce mouvement résulte de la transformation en énergie d'expansion de tout ou partie de l'énergie de compression stockée par le système dans les premiers instants de la collision: il est relié à la compressibilité de la matière nucléaire. La similitude des propriétés des états gazeux et intermédiaires observées expérimentalement dans les modèles basés sur l'équilibre thermodynamique montre que les lois de la thermodynamique s'appliquent à des systèmes finis de petite taille tels que les noyaux chauds. D'autre part, des comparaisons systématiques avec les prédictions de théories microscopiques

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://infodan.in2p3.fr/indra>

Laboratoires de la collaboration :

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

CNRS/CEA : Ganil, Caen.

CEA/DSM : Dapnia.

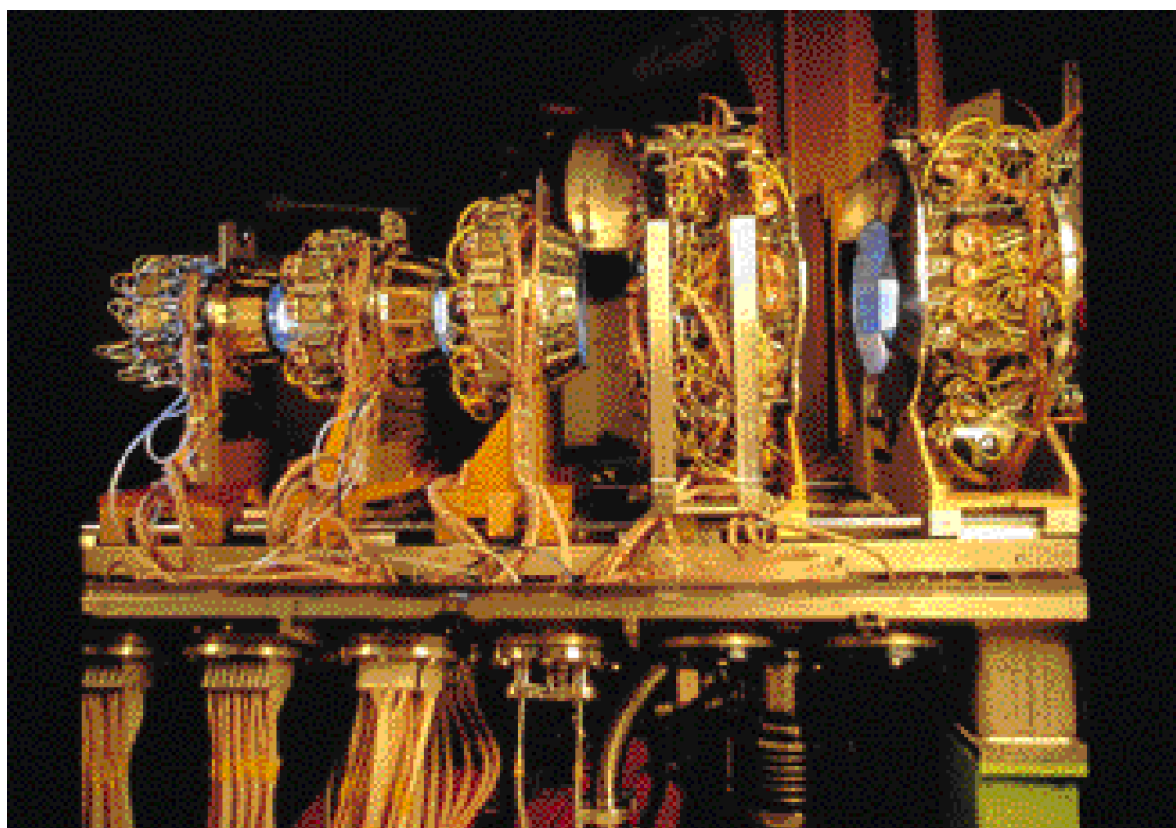
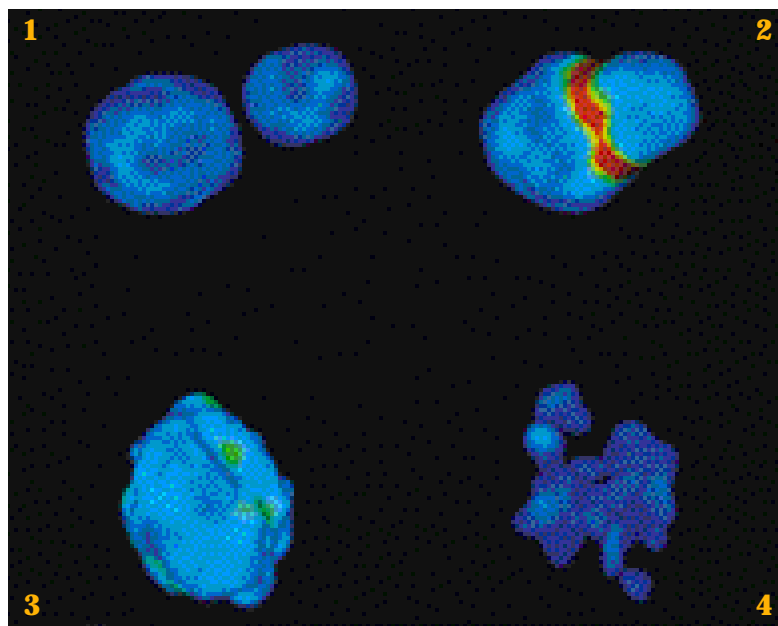
piques de transport basées sur l'équation de Boltzmann nucléaire sont en cours et devraient permettre d'identifier la nature de l'instabilité responsable de la cassure des noyaux chauds.

Les perspectives de ces études vont dans deux directions:

- prolonger le programme avec des faisceaux stables de noyaux lourds à plus haute énergie vers la frontière entre les domaines nucléonique et hadronique;
- explorer l'influence du degré de liberté supplémentaire qu'est le rapport du nombre de neutrons et de protons dans le noyau (isospin), en utilisant des faisceaux de noyaux instables produits, par exemple, par Spiral et Sissi, au Ganil.

Simulation d'une collision nucléaire frontale (Cu + Ta à 32 MeV/nucléon) menant à la fragmentation du système. Les calculs sont basés sur l'équation de Boltzmann

appliquée à la physique nucléaire.
 1. Phase d'approche.
 2. Contact.
 3. Compression du système.
 4. Expansion et fragmentation.
 Calculs: groupe Vision/Ganil.



*Indra, couvrant 90 % de l'espace, est capable de détecter simultanément et de caractériser sans ambiguïté (en charge et énergie) jusqu'à 40 ou 50 produits chargés issus d'une collision nucléaire. Pour ce faire, les techniques classiques de détection ont été poussées à leurs limites, tandis que l'électronique associée a été spécialement développée en utilisant les techniques de pointe minimisant coût, encombrement et connexions.
 © Ganil/
 J.M. Enguerrand.*

De la sphère au ballon de rugby : la superdéformation des noyaux

Comment un noyau qui a pris la forme d'une ellipsoïde sous l'effet d'une très grande vitesse de rotation se désexcite-t-il? Pourquoi deux noyaux superdéformés de masses voisines peuvent-ils émettre des rayonnements gamma d'énergies proches ou même identiques? Telles sont les questions auxquelles le détecteur Eurogam 2 apporte des éléments de réponse importants.

Depuis plusieurs dizaines d'années, des noyaux sont produits et étudiés dans des réactions nucléaires auprès d'accélérateurs de particules. Par le biais des rayonnements gamma qu'ils émettent lorsqu'ils sont ainsi formés dans des conditions très éloignées de celles de leur état fondamental, on peut étudier leur organisation interne et avoir accès aux propriétés des interactions qui existent entre les nucléons qui les composent.

On a constaté, par exemple, qu'à très grande vitesse de rotation, les noyaux qui sont très souvent sphériques dans leur état fondamental changent de forme sous l'action des forces d'inertie qui s'exercent sur eux. Celles-ci sont les mêmes que celles qui s'exercent sur tous les systèmes en rotation dans l'Univers (planètes, étoiles, vents). C'est alors un véritable challenge pour les modèles du noyau de reproduire ces évolutions et de comprendre les réorganisations de nucléons sous-jacentes.

La désexcitation des noyaux superdéformés

Une des formes de noyaux les plus rares et les plus exotiques connues à ce jour est celle d'un ballon de rugby. Le noyau est dit superdéformé (SD). S'il a été possible dès la découverte des premiers noyaux SD, il y a une dizaine d'années, de démontrer qu'ils reviennent à la fin de leur vie à une forme proche de la sphéricité, il a été impossible par contre d'identifier les rayonnements gamma émis durant le changement de forme. Cela était d'autant plus gênant que seule l'identification de ces rayonnements gamma pouvait permettre non seulement de comprendre le mécanisme du changement de forme brutal que subit le noyau mais aussi de mesurer les propriétés quantiques des états superdéformés du noyau telles que l'énergie d'excitation, le spin et la parité. Cette brique manquante dans la description des noyaux SD a donc des conséquences importantes sur leur compréhension et c'est pourquoi un effort important a été consacré à la recherche de ces transitions de lien.

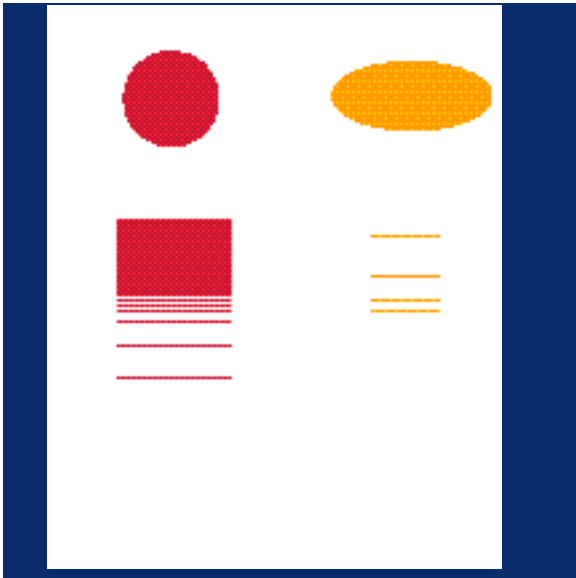
Ces transitions de lien ont été identifiées récemment dans deux cas seulement sur la centaine de noyaux SD répertoriés à ce jour, dans des expériences exploitant les deux multidétecteurs gamma, Gammasphère aux États-Unis et Eurogam 2, le multidétecteur franco-anglais en France. En effet, dans les noyaux de mercure et de plomb de masse 194, on a détecté quelques-uns des rayonnements

gamma de grande énergie émis pendant le changement de forme du noyau dont l'intensité représente quelques dix millièmes de celle de tout le rayonnement émis dans la réaction. Il a fallu la grande sélectivité des spectromètres atteinte aujourd'hui pour isoler ces « brindilles » noyées dans un spectre d'émission touffu et complexe. Ces transitions ont permis de mesurer pour la première fois des énergies d'excitation d'états SD, quantités directement comparables aux prédictions des modèles.

Pour des raisons encore mal comprises, seuls les rayonnements

Le détecteur Eurogam.
© CNRS/Ch. Munch.





Représentation schématique de la décroissance d'un noyau superdéformé vers un noyau de forme sphérique.

gamma de grande énergie, émis par le noyau SD lors de son retour à une forme sphérique, sont favorisés, ce qui a permis leur identification. Une explication avancée a été que les probabilités de ces transitions de lien sont régies par une loi qui refléterait la nature statistique (chaotique?) du processus de désexcitation. Ces transitions de lien discrètes ne seraient alors observables que dans de rares cas isolés.

Cela expliquerait pourquoi, depuis bientôt deux ans, malgré les efforts importants consentis par des équipes du monde entier, aucun nouveau cas de mise en évidence de transitions de lien entre états superdéformés et ceux à faible déformation du noyau n'a été enregistré. De nouvelles expériences sont prévues pour mieux comprendre ce qui se joue précisément lors de la transition de forme du noyau SD.

Les bandes identiques

L'étude détaillée des bandes SD effectuée avec le multi-compteur Eurogam 2 s'est révélée de façon générale extrêmement riche en phénomènes divers qui n'avaient pas été prévus. Parmi ceux-ci, le plus frappant est venu de l'étude des bandes dites identiques. Dans bon nombre de noyaux de masses voisines, on observe des bandes de désexcitation dont les énergies des transitions gamma sont reliées par une relation algébrique très simple, quasiment quantifiée. Dans certains cas, on peut aller jusqu'à une parfaite égalité des énergies de transition comme cela a été observé pour les noyaux ^{151}Tb et ^{152}Dy . Dans d'autres, il existe simplement une très grande similitude (variation relative inférieure à quelques millièmes) des moments d'inertie des deux noyaux. Or, la théorie, selon des considérations macroscopiques, prévoit des différences dix fois plus importantes, du fait de la dépendance en $A^{5/3}$ (A étant la masse du noyau) du moment d'inertie. Dans la région des noyaux de mercure, thallium et plomb, des études très fines, basées sur la méthode des alignements de spin, très sensible à toute variation du moment d'inertie,

ou bien sur le rapport des modes de désexcitation gamma de types magnétique et électrique ont permis d'identifier les configurations des nucléons de valence responsables de ce phénomène de bandes identiques.

Certains niveaux d'énergie jouent un rôle primordial dans l'explication de ce phénomène. Sous l'effet conjugué du terme spin-orbite, de la forte déformation et de la grande fréquence de rotation du noyau, des niveaux de nombre quantique principal N (par exemple, dans un modèle de type oscillateur harmonique) se décalent et se retrouvent au milieu de niveaux de nombre quantique principal plus faible d'une ou deux unités, ce qui leur vaut le nom d'orbitales «intruses». Une condition nécessaire pour l'apparition du phénomène d'identité entre deux bandes est que les configurations de leurs orbitales intruses soient les mêmes. Des mesures précises de vies moyennes d'états superdéformés par la méthode de l'effet Doppler ont permis de déterminer les moments quadrupolaires électriques d'un certain nombre de bandes identiques. Comme dans le cas du moment d'inertie, cette quantité est régie par la position des orbitales intruses du noyau; les bandes identiques possèdent également le même moment quadrupolaire.

Ces découvertes expérimentales sur le phénomène de bandes identiques donnent des informations extrêmement précises sur les orbitales des nucléons situées au voisinage du niveau de Fermi. Elles imposent des contraintes sévères sur les modèles théoriques utilisés pour décrire ces noyaux très déformés à grande vitesse de rotation.

Pour en savoir plus :

A. Lopez-Martens, F. Hannachi, A. Korichi et al., Single step links of the superdeformed band in ^{194}Pb : a measure of the absolute excitation energy, spin and parity of the superdeformed states, *Physics Letters B* 380 (1996) 18-23.

B. Haas, Identical superdeformed bands, *Rog. Part. Nucl. Phys.* 38 (1997) 1.

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : CENBG ; CSNSM ; IPN, Lyon ; IPN, Orsay ; IReS ; ISN.

Plasma de quarks et de gluons: un nouvel état de la matière ?

L'expérience NA50 a-t-elle mis en évidence un signe de l'existence du plasma de quarks et de gluons, un nouvel état de la matière où quarks et gluons ne seraient plus confinés au sein des nucléons?

Les résultats récents, obtenus au Cern par mesure de la probabilité de survie du méson J/ψ dans des interactions plomb-plomb avec des faisceaux de plomb d'une énergie de 158 GeV, le suggèrent et sont en cours d'étude détaillée.

La mise en évidence d'une transition de phase de la matière de son état ordinaire à l'état de plasma de quarks et de gluons, QGP en abrégé, a fait l'objet d'un effort soutenu de la part des physiciens qui utilisent, au Cern, des faisceaux d'ions plomb ultrarelativistes de 158 GeV d'impulsion par nucléon. L'IN2P3 est très présent dans cet effort au travers, en particulier, des cinq équipes françaises qui participent à l'expérience NA50. C'est dans les interactions d'ions lourds ultrarelativistes que l'on pense pouvoir créer les conditions nécessaires à la formation du QGP. C'est aussi dans l'étude de ce type d'interactions qu'apparaissent d'importantes difficultés expérimentales. On produit un nombre considérable de particules lors de réactions complexes qui sont suscep-

tibles de brouiller les signaux que l'on cherche à mettre en évidence.

Pour surmonter ces difficultés, l'expérience NA50 a donc choisi de se spécialiser dans l'étude d'un phénomène rare mais très bien caractérisé, la production du méson J/ψ dans les interactions plomb-plomb. Le méson J/ψ est un état lié formé du quark charmé et de son antiquark. Dans un QGP où quarks et gluons, normalement liés entre eux, sont devenus libres, un tel état lié ne peut exister. La mesure de la probabilité de survie du méson J/ψ constitue donc un signal théoriquement idéal pour détecter la formation du QGP.

La production du J/ψ est mesurée grâce à l'identification des deux muons caractéristiques de l'un de ses modes de désintégration. L'appareillage est donc essentiellement constitué d'un spectromètre à muons. La présence d'un absorbeur de hadrons le rend peu sensible aux très nombreuses particules produites dans l'interaction et facilite donc la détection spécifique des muons. La quantité étudiée, la probabilité de survie du J/ψ , est le nombre de J/ψ détectés rapporté au nombre de collisions élémentaires nucléon-nucléon. La mesure est faite en fonction du paramètre d'impact de la réaction plomb-plomb que l'on déduit de la mesure de l'énergie des particules secondaires émises dans la réaction.

Les premières données collectées durant la campagne de 1995 montraient déjà une probabilité de survie anormalement faible par rapport aux extrapolations que l'on pouvait faire à partir de mesures similaires réalisées avec des interactions soufre-uranium. De plus, l'écart par rapport au comportement normalement attendu augmentait lorsque le paramètre d'impact de la réaction diminuait. La campagne de mesure de 1996 s'est efforcée d'améliorer et d'approfondir les observations de la première expérience. Bien qu'encore préliminaires, les résultats obtenus avec les données les plus récentes sont donc plus précis et confirment clairement les premières observations. Ils suggèrent, de surcroît, un changement soudain de cette probabilité de survie à partir d'une certaine valeur de la densité d'énergie de l'interaction. Cette discontinuité du taux de survie doit maintenant être étudiée en détail. Sa confirmation éventuelle mettrait en difficulté toute explication du phénomène observé qui ferait abstraction d'une modification brutale des propriétés de la matière.

Le détecteur de l'expérience NA50 auprès du supersynchrotron à protons du Cern.
© Cern.



Pour en savoir plus :

J/ψ and Drell-Yan cross-sections in Pb-Pb interactions at 158 GeV/c per nucleon, Physics Letters B410 (1997) 327-336.

Anomalous J/ψ suppression in Pb-Pb interactions at 158 GeV/c per nucleon, Physics Letters B410 (1997) 337-343.

Site Web: <http://www.cern.ch/NA50/>

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : LPNHE, Palaiseau; IPN, Orsay; IPN, Lyon; LPC, Clermont-Ferrand; IReS; LAPP.

Remerciements

Introduction

Hubert Flocard

Faits marquants

Wolfgang Mittig

Olivier Sorlin

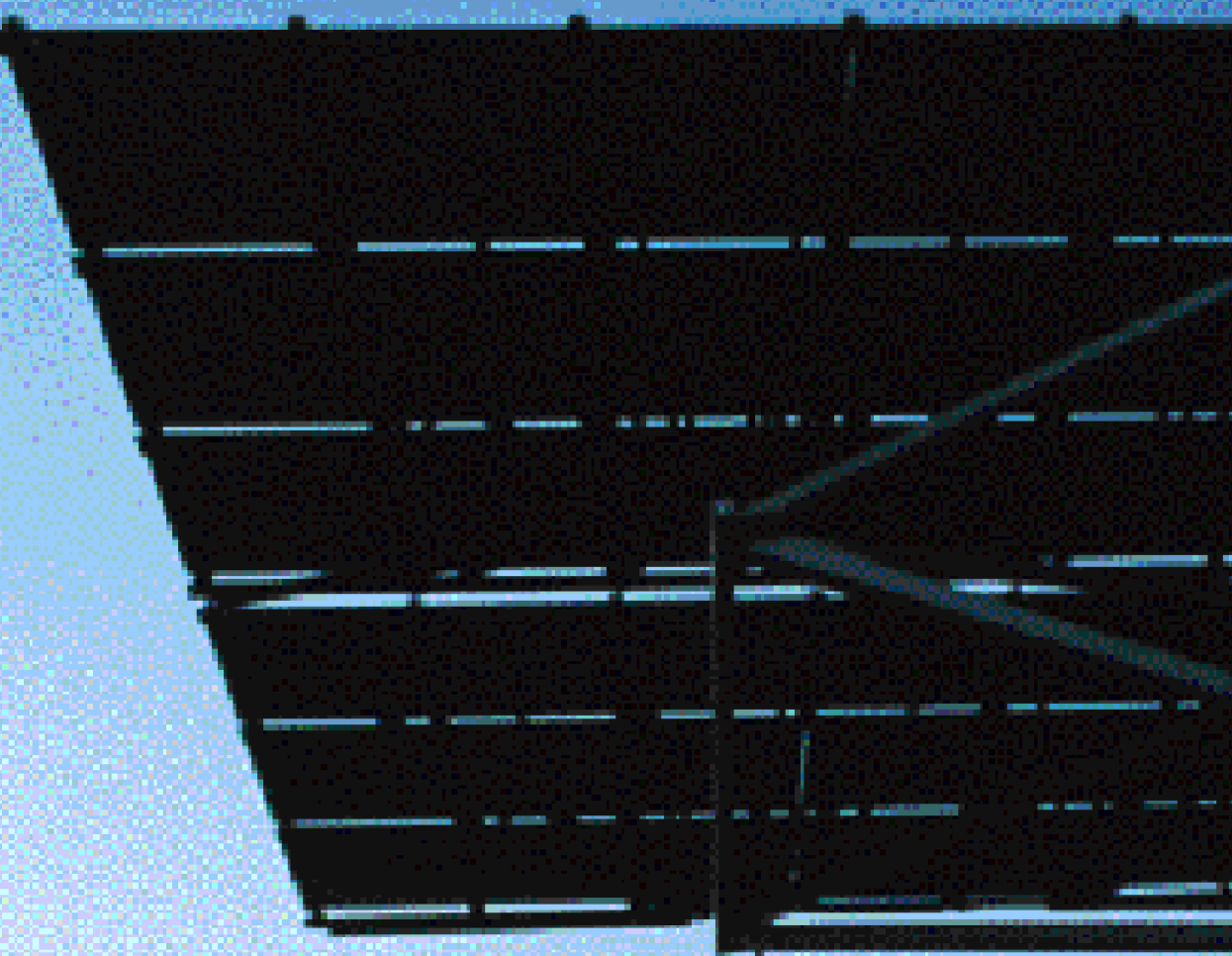
Maurice Morjean

Dominique Durand

Fazia Hannachi

Bernard Haas

Louis Kluberg



*Télescope CAT:
observation
des gamma cosmiques
dès l'énergie de 200
GeV. Vue de la caméra
de 600
photomultiplicateurs
portée à 6m au-dessus
du miroir. Vue de trois
héliostats et de la tour
solaire. Dans le lointain
vue de la chaîne des
Pyrénées espagnoles.
© CNRS/L.Médard.*



Champs, particules et noyaux dans l'Univers

Les phénomènes physiques mis en œuvre actuellement dans l'Univers font de celui-ci un laboratoire avec des échelles de distance, de temps et d'énergie inaccessibles sur Terre. Leur observation permet d'apporter des informations nouvelles sur la physique subatomique, et les outils de celle-ci permettent, en ouvrant de nouvelles astronomies, d'améliorer la connaissance de l'Univers.

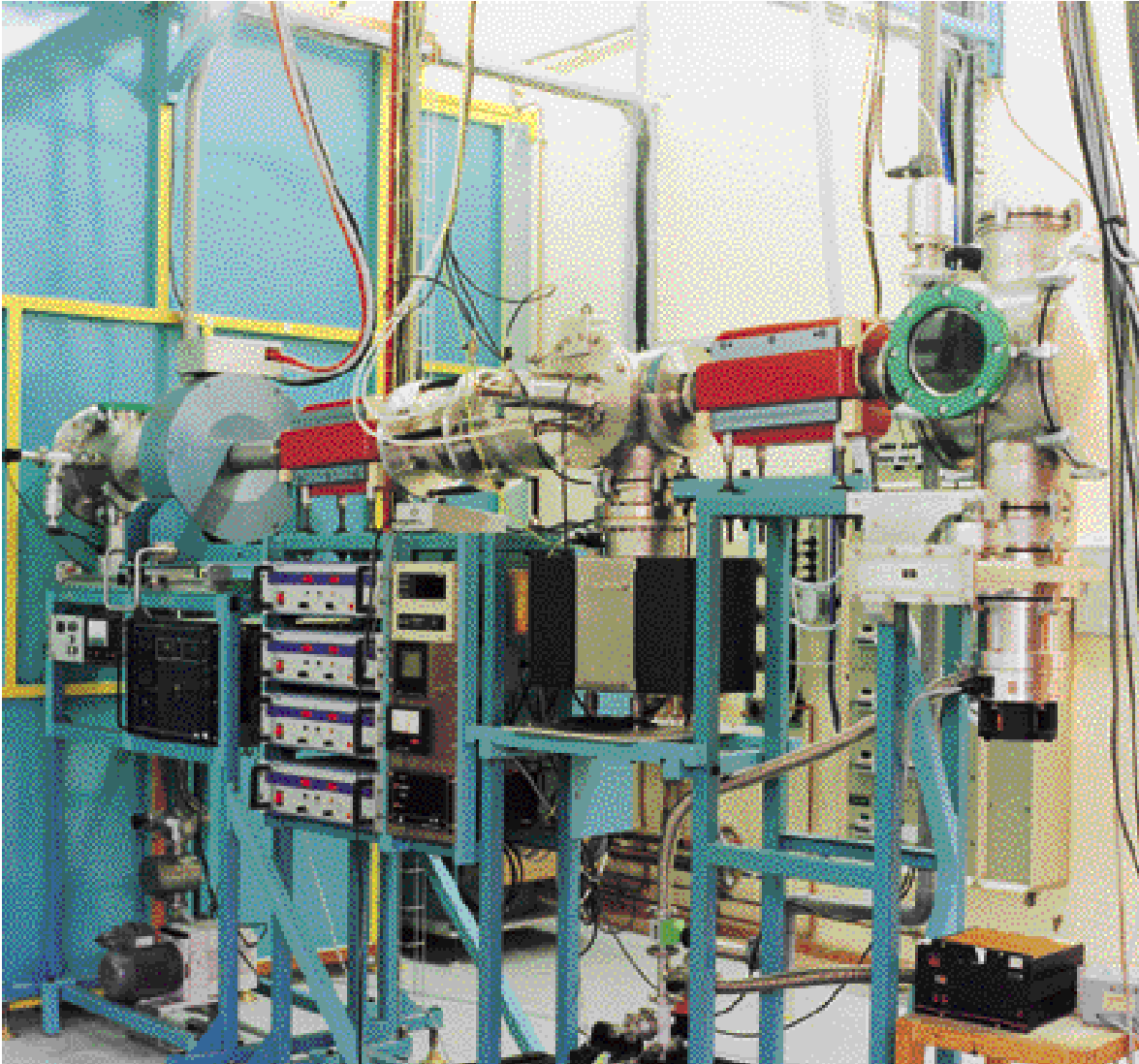
L'Univers primordial a mis en jeu des énergies bien supérieures encore, et son étude, ainsi que celle de l'Univers dans son ensemble, permet d'aborder des domaines complètement vierges. Cette approche associe intimement les concepts et les observations de la physique subatomique et ceux de l'astrophysique.

Cette thématique aux frontières de plusieurs disciplines s'est fortement développée sur le plan mondial depuis une dizaine d'années, et l'IN2P3 y a contribué de façon tout à fait significative, avec un budget d'autorisations de programmes (hors Virgo) multiplié par cinq de 1992 à 1997.

Phénomènes violents de l'Univers contemporain

La détermination des sites et du mécanisme d'accélération du rayonnement cosmique de haute énergie est une des grandes questions ouvertes de ce domaine. Un rôle important y est joué par les objets denses et compacts tels que les étoiles à neutrons, trous noirs, et noyaux actifs de galaxies (AGN). L'étude du rayonnement cosmique au sens large (particules chargées, photons gamma et neutrinos) nous apporte des informations uniques sur les conditions extrêmes régnant au sein de ces objets. A basse énergie, ils ne peuvent être étudiés que dans l'espace, mais à haute énergie, où le flux est très faible, il faut disposer de grandes surfaces collectrices et utiliser l'atmosphère ou l'océan comme de vastes détecteurs.

Dans ce but, une action de R&D a été conduite à l'IN2P3 depuis 1995 pour mettre au point des éléments clés du projet international Auger visant à la détection du rayon-



Ce dispositif expérimental, composé de Papap, petit accélérateur pour les astroparticules, et du détecteur Soleno, va permettre d'effectuer des mesures à très basse énergie qui préciseront la dépendance en énergie de la réaction, cruciale pour l'extrapolation aux énergies solaires.
© R. Gash.

nement cosmique aux énergies ultimes de 10^{20} eV (plusieurs joules pour une seule particule!) et dont les mécanismes conventionnels d'accélération ne peuvent expliquer l'origine.

L'étude des photons cosmiques offre l'avantage de donner un accès direct à leur source d'émission (ils ne sont pas déviés par les champs magnétiques). L'IN2P3 a développé, avec le support d'EDF et de la région Languedoc-Roussillon, deux instruments innovants sur le site de l'ancienne centrale électro-solaire Thémis dans les Pyrénées-Orientales, pour abaisser au maximum le seuil en énergie des détecteurs au sol. Le détecteur CAT, construit de 1994 à 1996, a observé dès 1997 plusieurs sources galactiques et extragalactiques, et en particulier une éruption spectaculaire de l'AGN Markarian 501 avec des variations fortes et rapides de l'émission de photons gamma au-dessus du seuil de 200 GeV. La construction d'un second détecteur nommé Céleste a été lancée en 1996 et devrait bientôt s'achever; elle permettra d'abaisser le seuil au voisinage de 50 GeV.

Vers
un détecteur
sous-marin
de neutrinos
cosmiques
de haute
énergie

Pour observer des sites d'accélération à des distances cosmologiques, il faut détecter les neutrinos qu'ils émettent car ceux-ci n'interagissent que faiblement avec le milieu traversé. Mais la faiblesse de ces interactions rend également leur détection très difficile et impose le recours à un détecteur très massif. Un vigoureux programme de R&D nommé **Antarès** a été entrepris depuis 1996, en collaboration avec le Dapnia du CEA et l'appui d'océanologues de l'Insu et de l'Ifremer. Son objectif est de démontrer la faisabilité d'un grand détecteur sous-marin, situé à plusieurs kilomètres de profondeur, et utilisant l'eau de mer comme milieu détecteur pour les muons produits dans les interactions des neutrinos.

Plus proche de nous, le Soleil constitue une source intense de neutrinos de basse énergie utilisable pour l'étude de leurs propriétés et en particulier de leurs oscillations éventuelles. L'IN2P3 a conduit depuis 1994 des mesures par accélérateur de la production du bore 8 à des énergies de quelques centaines de keV, proches des **conditions stellaires**. Une bonne connaissance de cette réaction nucléaire, qui est à l'origine de la production d'une partie des neutrinos solaires, est essentielle pour interpréter le déficit de neutrinos constaté par plusieurs expériences. Il serait aussi important de disposer d'un spectre en énergie de ces neutrinos, et un projet de R&D nommé **Hellaz** est en cours depuis 1996 pour développer une technique de détection appropriée.

Le soleil :
un laboratoire
pour la physique
des neutrinos
page86

Cosmologie et matière noire

De nombreuses observations astrophysiques ont montré que la matière visible optiquement ne constituait qu'une faible fraction de la masse totale de l'Univers. La recherche et l'identification de la masse cachée, ou matière noire, sont donc une question essentielle non résolue aujourd'hui.

Une possibilité est qu'elle soit constituée de neutrinos massifs ou d'autres particules massives interagissant faiblement (les Wimps) qui trouvent naturellement leur place dans les théories de supersymétrie, et qui seraient piégées dans les halos des galaxies. Une telle recherche expérimentale a été entreprise par la collaboration **Edelweiss** qui utilise des détecteurs bolométriques dans un environnement de basse radioactivité au Laboratoire souterrain de Modane. De 1994 à 1997, les physiciens ont pu acquérir la maîtrise d'une technique de double détection (ionisation et chaleur) offrant un bon rejet du bruit de fond et rendant possible le lancement d'un programme de plus grande ampleur ayant une sensibilité adaptée au signal recherché.

Une autre approche consiste à rechercher la matière noire sous la forme de naines brunes, étoiles de trop faible masse pour être le lieu de réactions thermonucléaires. La

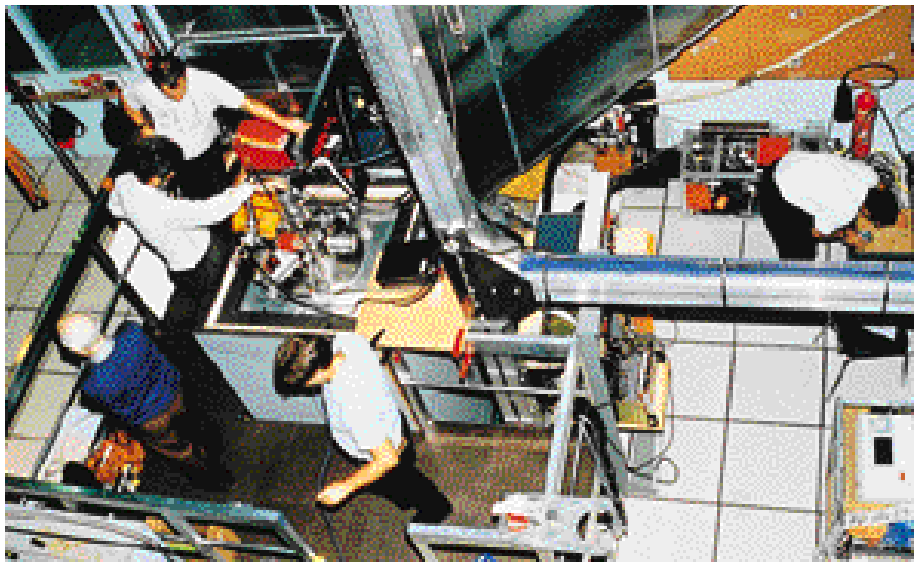
Matière noire:
comment
détecter
des particules
faiblement
interactives ?
page82

méthode de détection utilisée est basée sur le phénomène de microlentille gravitationnelle et nécessite la surveillance systématique de millions d'étoiles par un télescope optique automatisé. La phase 2 du programme Eros a été lancée en 1994 et est en phase d'exploitation depuis 1996 sur le site de l'ESO à La Silla au Chili. Elle a déjà permis l'observation de plusieurs candidats dont l'analyse se poursuit. En parallèle, une méthode permettant d'utiliser des étoiles non résolues optiquement a été mise au point par la collaboration Agape. Ces efforts dans le traitement massif des images permettent également la détection de supernovae qui ouvre la voie à une mesure des paramètres fondamentaux de la cosmologie.

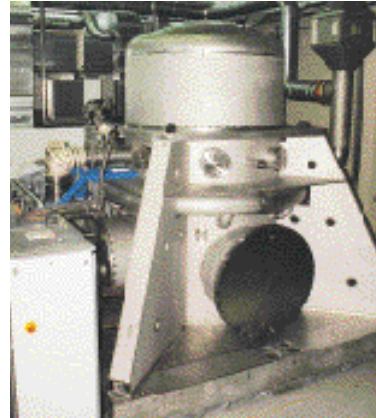
En 1997, l'IN2P3 a également commencé la préparation du futur programme spatial Planck Surveyor dont l'objectif est une mesure précise des paramètres fondamentaux de la cosmologie. Celle-ci sera obtenue par l'analyse des fluctuations du rayonnement micro-onde cosmique primordial à 3K, au moyen de bolomètres.

Enfin, l'absence apparente d'antimatière primordiale dans l'Univers pose la question du rôle de la violation de la symétrie CP aux premiers instants de la synthèse des protons et des neutrons. Pour rechercher les anti noyaux dans le rayonnement cosmique, après le programme Artémis pratiquement achevé, l'IN2P3 a participé en 1997 à la phase 1 du programme spatial international AMS en préparant la première mise en orbite d'un spectromètre magnétique.

*Expérience Edelweiss
au Laboratoire
souterrain de Modane.
© CNRS.*



*La tour de Virgo
en construction
au LAPP.
Crédit: IN2P3.*



Ondes gravitationnelles

L'observation directe des ondes gravitationnelles, attendue depuis les prédictions d'Einstein, est le premier objectif du programme Virgo conduit par le CNRS et l'INFN dans le cadre d'un accord signé en juin 1994. La méthode interférométrique choisie pour détecter des variations relatives de la métrique de l'espace-temps de l'ordre de 10^{-21} doit permettre de détecter les ondes gravitationnelles émises par des explosions de supernovae ou la coalescence de systèmes binaires compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) jusqu'à une distance typique de 100 mégaparsec.

L'IN2P3 s'est fortement engagé dans cette activité où il a pris des responsabilités importantes à la fois dans les développements technologiques, la construction du détecteur, et dans la préparation du programme scientifique. Il a été particulièrement impliqué dans les études de dégazage conditionnant la qualité de l'ultra vide nécessaire, et conduisant, en 1995, au choix de la technologie des tubes à vide de 3 km, ainsi que, en 1997, dans la préparation et le suivi du marché des modules de ces tubes. Il a aussi développé la technologie des miroirs de très haute qualité indispensables au projet, et pour lesquels un ensemble de salles blanches de classe 1 a été réalisé en 1996 et 1997. Une première tour de suspension de ces miroirs a été testée sous vide depuis 1995, pour mettre au point les procédures de manipulation de ces miroirs ainsi que le banc de détection du signal de sortie de l'interféromètre. Enfin, de nombreux développements logiciels ont été conduits, tant pour le contrôle commande que pour l'acquisition des données et pour la simulation numérique de l'ensemble du système et de ses asservissements. La construction des infrastructures sur le terrain de Cascina en Italie a commencé en avril 1996 et les premiers équipements y seront installés en 1998.

D'où viennent les rayons gamma cosmiques de haute énergie ?

Parmi l'ensemble des rayonnements qui nous viennent du cosmos, seuls les rayons gamma qui se propagent en ligne droite car ils ne sont pas chargés peuvent renseigner sur leur lieu d'émission. La détection au sol par effet Cerenkov permet d'observer des sources émettrices de rayons gamma de très haute énergie : c'est l'objectif de l'expérience CAT installée auprès de l'ancienne centrale solaire Thémis.

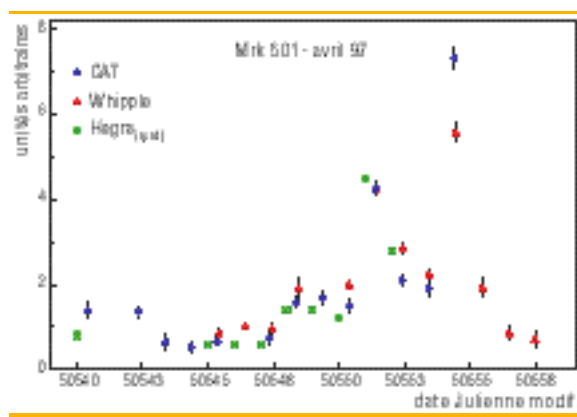
L'étude des phénomènes astrophysiques de très haute énergie est importante à bien des titres : recherche de l'origine des rayons cosmiques ; compréhension des mécanismes d'accélération à l'œuvre dans l'Univers ; modélisation des objets astrophysiques (pulsars, trous noirs stellaires, restes de supernovae, noyaux actifs de galaxie). Les satellites consacrés à l'astronomie gamma explorent aujourd'hui la gamme d'énergie allant de 100 keV à 20 GeV environ, mais, au-delà, les surfaces de détection des appareils embarqués sont insuffisantes pour faire face aux flux de plus en plus faibles de rayons gamma. On doit alors travailler à partir du sol en utilisant l'atmosphère comme un gigantesque calorimètre : en effet, un rayon gamma engendre dans la haute atmosphère une

cascade d'électrons, de positons et de gamma secondaires ; les particules chargées de cette grande gerbe émettent par effet Cerenkov, si elles sont suffisamment énergétiques, de la lumière visible ou ultra violette que l'on peut détecter au sol. Cependant, ces cascades sont la plupart du temps produites par des rayons cosmiques chargés électriquement dont les trajectoires dans la galaxie sont très irrégulières. Seuls les rayons gamma qui se propagent en ligne droite permettent de faire de l'astronomie, mais ils sont noyés dans un bruit de fond qui est resté réhibitoire pendant près de trente ans. C'est seulement à la fin des années 80 qu'ont été mis au point des moyens efficaces de sélection de ces précieux rayons gamma. L'un d'eux consiste à former l'image de la gerbe dans le plan focal d'un grand miroir collecteur et à l'analyser avec une batterie de photodétecteurs rapides : c'est la technique d'imagerie, mise en œuvre initialement à l'observatoire Whipple aux États-Unis.

De 1994 à 1996, un groupe français a construit, sur le site de l'ancienne centrale solaire Thémis (Pyrénées-Orientales), un télescope d'imagerie Cerenkov dont le miroir fait 5 m de diamètre et dont la caméra est constituée de 600 photomultiplicateurs. L'expérience, baptisée CAT (pour «Cherenkov Array at Themis») comprend, outre le télescope, les installations des expériences Asgat et Thémistocle, qui complètent utilement le nouvel instrument. Bien que disposant d'un miroir plus petit que celui du télescope de l'observatoire Whipple, le nouveau télescope compense ce handicap par une meilleure résolution temporelle. Cette qualité permet non seulement de mieux caractériser les gerbes dues aux rayons gamma, mais aussi de reconstruire la direction du rayonnement pour chaque événement ; on arrive ainsi à localiser la source à la minute d'arc près avec une centaine de gerbes observées, précision nettement meilleure que celle des expériences en satellite.

En 1997, l'expérience CAT a observé plusieurs sources susceptibles d'émettre des rayonnements gamma de très haute énergie de 250 GeV à près de 10 TeV. Trois objets ont été détectés : la Nébuleuse du Crabe et les noyaux actifs de galaxies Markarian 421 et Markarian 501. Cette dernière source a eu, entre février et octobre 1997, un

Avril 1997 : les données de trois expériences d'observation de Markarian 501 - Whipple en Arizona, Hegera, expérience germano-espagnole aux Canaries, et CAT - sont en excellent accord.





*Le télescope CAT :
observation
des gamma cosmiques
de 200 GeV.
Vue du miroir depuis
la plate-forme d'accès
à la caméra
dans le hangar.
© CNRS/L.Médard.*

comportement extraordinaire avec une série d'éruptions pouvant conduire d'une nuit à l'autre à des variations d'intensité de près d'un ordre de grandeur. Le phénomène éruptif lui-même, également observé à d'autres époques sur Markarian 421, semble caractériser une classe particulière de noyaux actifs de galaxie susceptibles d'émettre aux très hautes énergies. Des campagnes communes d'observation de tels objets dans différents domaines de longueur d'onde, des ondes radio aux rayons gamma, sont maintenant programmées pour mieux les modéliser. Bien que le nombre de sources détectées dans ce domaine des très hautes énergies soit encore faible, on constate que le panorama n'est pas celui qu'on escomptait par simple extrapolation de données des satellites. L'expérience CAT devrait contribuer dans les prochaines années à ce nouveau chapitre de l'astrophysique.

Pour en savoir plus :

A. Barrau et al., Nucl. Instr. and Meth.; S. Le Bohec et al., Nucl. Instr. and Meth. (Preprints disponibles sur le site Web).
Site Web: <http://xxx.lpthe.jussieu.fr/find/astro-ph>
Laboratoires français de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : CENBG ; LPNHE, Palaiseau; LPNHE, Paris; PCC.
Groupe de physique fondamentale, université de Perpignan.
CNRS/Insu : CESR, Toulouse.
CEA/DSM : Dapnia.

Matière noire: comment détecter des particules faiblement interactives ?

L'existence de particules massives et faiblement interactives - les Wimps - dans le halo des galaxies constitue l'une des hypothèses qui visent à expliquer la nature de la matière noire de l'Univers. Pour tenter de les observer directement, un détecteur appelé bolomètre a été installé dans le Laboratoire souterrain de Modane, à l'abri des rayonnements cosmiques et dans un environnement très faiblement radioactif.

En dépit des preuves multiples de l'existence de matière invisible dans l'Univers, on ne connaît encore que très peu de choses sur sa nature, sa quantité et sa distribution. Dans les modèles astrophysiques les plus récents, il est envisagé que la masse cachée de l'Univers soit suffisamment importante pour que les forces d'attraction gravitationnelle finissent par contrarier son expansion. A l'échelle des galaxies (et, *a fortiori*, de notre galaxie), on a montré qu'il existe de la matière noire baignant la galaxie sous forme d'un halo. Des particules, appelées Wimps (Weakly Interacting Massive Particles), pourraient constituer une fraction importante de ce halo. Le grand attrait de cette hypothèse est que de telles particules sont effectivement prévues par les modèles supersymétriques de la physique des particules.

La collaboration Edelweiss s'est donné pour but la détec-

tion directe des Wimps.

Le taux attendu d'interaction des Wimps avec la matière étant inférieur à un événement par jour et par kilo de détecteur, il faut placer celui-ci dans un environnement protégé des rayons cosmiques et très faiblement radioactif. C'est la raison pour laquelle l'expérience Edelweiss est actuellement installée au Laboratoire souterrain de Modane, sous une protection rocheuse de 1700 m, permettant de diminuer la quantité de muons cosmiques d'un facteur supérieur à un million. Le détecteur est en outre entouré de plomb pour le protéger de la radioactivité de l'environnement. La mesure et la sélection de matériaux d'extrêmement basse radioactivité pour la construction du détecteur et de son cryostat sont un défi quotidien.

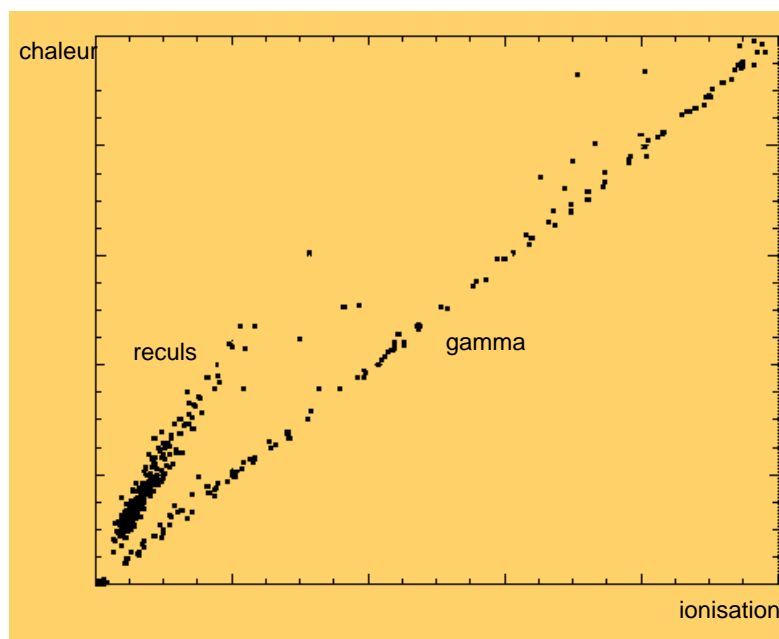
Le détecteur de Wimps est un bolomètre, composé d'un cristal de germanium de 70 g placé à très basse température (environ 10 mK). Lorsqu'une particule Wimp interagit avec le bolomètre, elle fait reculer un noyau du cristal. La conséquence de ce recul est la production simultanée d'un signal de chaleur dû à une élévation de température du cristal et d'un signal d'ionisation dû à la formation de paires électron-trou.

Cette double détection permet de distinguer les reculs de noyaux produits par le Wimp recherché des reculs d'électrons produits par des photons gamma de la radioactivi-

té résiduelle: on parle de discrimination. Cette méthode est la seule qui permette de «sortir» le signal Wimp du bruit de fond qui, sans ce rejet actif et quels que soient les blindages, resterait toujours prépondérant.

Le développement de ce détecteur par la collaboration Edelweiss a demandé plusieurs années de travail. Il a fallu rassembler en un seul détecteur les performances d'un détecteur à ionisation en germanium qui fonctionne habituellement à des tensions de plusieurs milliers de volts et à une température de 77 K et celles d'un détecteur bolométrique capable de détecter des élévations de température de l'ordre du microkelvin à

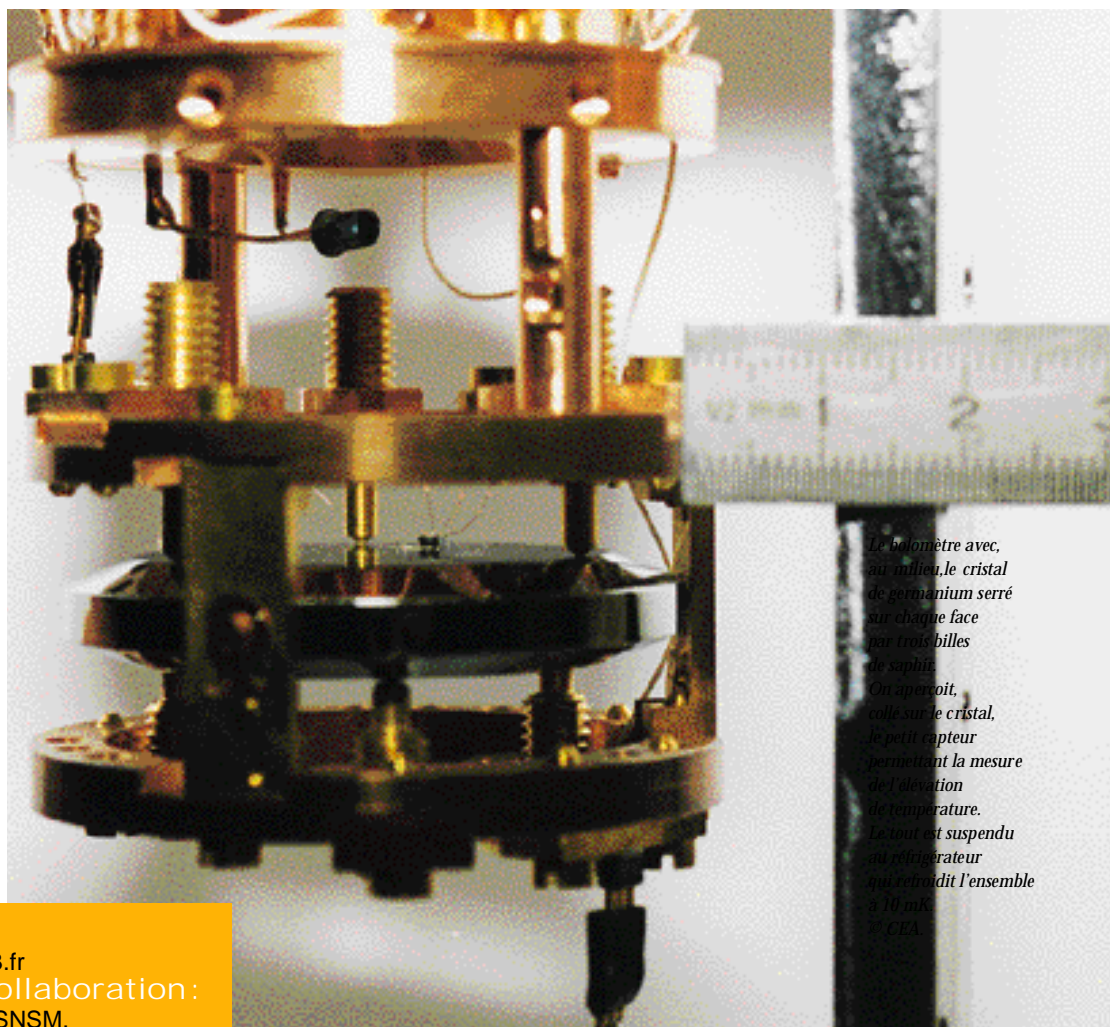
Discrimination entre des reculs de noyaux et des reculs d'électrons (gamma). Les événements gamma sont produits par une source radioactive et les reculs sont induits par des neutrons qui simulent des Wimps.



des températures de fonctionnement de quelques dizaines de millikelvin. La qualité de la discrimination obtenue récemment est telle qu'il est possible de rejeter plus de 99 % des événements indésirables, ce qui situe ce détecteur parmi les meilleurs du domaine. Seule une équipe américaine (collaboration CDMS) possède un détecteur de ce type, mais il n'est pas encore installé en site souterrain.

Pour mettre en évidence des particules qui interagissent aussi faiblement avec la matière, il est clair qu'il faut augmenter la masse des détecteurs. Les développements en cours doivent permettre la mise en œuvre d'une centaine

de bolomètres ionisation-chaueur de 100 à 300 g. Cette nouvelle étape qui nécessite la construction d'un nouveau cryostat de 100 l de volume utile sera opérationnelle en 2000 et devrait permettre de révéler des candidats Wimps. En parallèle, le futur accélérateur LHC du Cern doit apporter des informations complémentaires sur les caractéristiques des particules supersymétriques. Il restera ensuite à valider ces candidats par des expériences encore plus ambitieuses qui signeront leur nature cosmologique.



*Le bolomètre avec, au milieu, le cristal de germanium serré sur chaque face par trois billes de saphir. On aperçoit, colle sur le cristal, le petit capteur permettant la mesure de l'élévation de température. L'ensemble est suspendu au réfrigérateur qui refroidit l'ensemble à 10 mK.
© CEA*

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://lyoinfo.in2p3.fr>

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : IPN, Lyon ; CSNSM.

CNRS/Insu : IAP.

CNRS/SPM : CRTBT.

CEA/DSM : Dapnia ; Drecam.

Matière noire et recherche d'étoiles naines

La matière sombre qui compose probablement plus de 90 % de la matière de l'Univers est-elle constituée, au moins en partie, par des objets massifs compacts? C'est ce que s'efforcent de mettre en évidence deux expériences: Eros et Agape.

Si Eros a observé, par effet de microlentille gravitationnelle, des événements compatibles avec des objets massifs, il a pu exclure la présence d'objets légers dans le halo de notre galaxie. Le programme se poursuit en ajoutant d'autres directions d'observation à celle du nuage de Magellan. Agape recherche l'effet de lentille sur des étoiles non résolues de la galaxie d'Andromède.

De nombreuses observations liées à l'étude de la dynamique des galaxies et des amas de galaxies suggèrent l'existence de quantités énormes de matière sombre qui ne peut être vue directement par les moyens habituels. En particulier, les grandes vitesses observées pour le gaz et les étoiles loin du centre de notre Galaxie (la Voie Lactée) ne peuvent être expliquées que si l'on admet la présence d'un halo de matière noire englobant la Galaxie. Le halo représenterait une masse totale de cinq à dix fois celle de la matière visible, constituée d'étoiles, de gaz et de poussières.

La nature de cette matière sombre n'est pas encore connue. Elle pourrait être constituée de particules massives, plus ou moins exotiques, prédites dans le cadre de théories supersymétriques par exemple, ou plus simplement de matière ordinaire (protons et neutrons). Dans cette dernière hypothèse, il existe plusieurs candidats naturels: naines brunes - étoiles ayant une masse inférieure à 0,08 masse solaire (valeur critique en dessous de laquelle ne peut s'allumer le feu thermonucléaire) -, naines blanches - cadavres d'étoiles - ou encore trous noirs de faible masse.

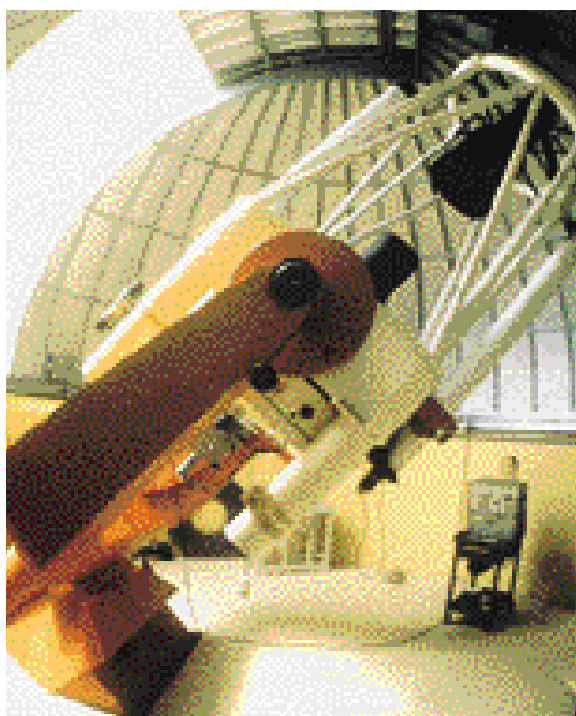
C'est ainsi que, depuis le début des années 90, la collaboration Eros (Expérience de recherche d'objets sombres) s'est lancée à la recherche de naines brunes, parallèlement à d'autres équipes (Macho, Ogle...). La difficulté est liée à la très faible probabilité d'observer par effet de microlentille gravitationnelle (voir ci-contre) un évé-

ment dû aux objets du halo: on s'attend à observer de l'ordre d'un événement pour quelques millions d'étoiles surveillées pendant un an. La tâche est d'autant plus difficile qu'il faudra distinguer les effets de lentille des variations naturelles de la luminosité des étoiles variables. La proximité des nuages de Magellan (deux petites galaxies satellites de la nôtre visibles depuis l'hémisphère sud) en fait les cibles idéales pour la recherche de naines brunes.

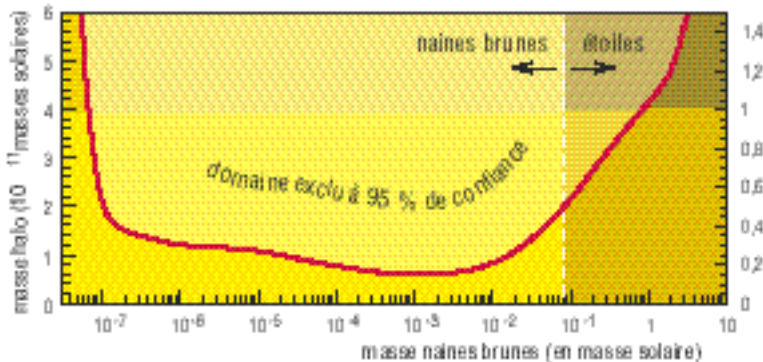
Jusqu'en 1995, le groupe Eros a surveillé quelques quatre millions d'étoiles du grand nuage de Magellan, à l'aide de photographies sur plaques, prises au foyer d'un télescope à grand champ de Schmidt installé à l'European Southern Observatory à La Silla, au Chili. Par ailleurs, une caméra de 16 CCD de 579 x 400 pixels chacun, installée au foyer d'un télescope dédié à La Silla a été utilisée pendant cette même période pour surveiller finement un nombre plus réduit d'étoiles des nuages de Magellan. Ce deuxième volet de l'expérience a permis d'être très sensible aux objets légers (moins d'un millième de masse solaire).

Si quelques événements compatibles avec des objets relativement massifs (quelques dixièmes de masse solaire) ont été observés par Eros et Macho vers les nuages de Magellan, l'absence de signal compatible avec les objets

Le Marly, télescope de 1m de l'expérience Eros2 sur le site chilien de l'Observatoire européen de l'hémisphère sud (ESO). L'objectif est la recherche de la matière cachée de notre galaxie sous forme d'étoiles avortées.
© CNRS.



La courbe donne, à 95% de niveau de confiance, la contribution maximale au halo galactique des objets de la masse donnée en abscisse (exprimée en masses solaires ou en fraction de halo standard).



légers permet d'exclure la présence d'objets plus légers dans le halo de notre galaxie.

Le succès de la technique mise en œuvre par Eros et les autres expériences pour sonder la structure galactique a incité plusieurs groupes à proposer des programmes d'observation plus ambitieux ou complémentaires. Ainsi, depuis juillet 1996, le groupe Eros exploite un nouveau dispositif installé à La Silla. Celui-ci comporte un télescope automatisé de 1 m de diamètre, associé à deux caméras comportant chacune 8 CCD de 2048 x 2048 pixels, représentant un total de 64 millions de pixels. Le programme scientifique poursuivi par Eros comporte plusieurs volets dont la recherche d'effets de lentille dans différentes directions (vers les nuages de Magellan, le centre galactique ainsi que vers les bras spiraux de la galaxie). Les analyses préliminaires ont déjà révélé un candidat à l'effet de lentille vers le petit nuage de Magellan (SMC) et trois candidats dans la direction des bras spiraux. Eros poursuit aussi une recherche systématique de supernovæ à des distances intermédiaires (décalage vers le rouge compris entre 0,05 et 0,2) pour la mesure du paramètre de densité de l'Univers. Plus d'une vingtaine de supernovæ ont déjà été détectées. Les supernovæ de type Ia (SNIa) sont des naines blanches qui explosent lorsqu'elles atteignent une masse critique par accréation de matière. Les supernovæ sont des objets très brillants, ayant une luminosité absolue relativement uniforme, comparable à celle d'une galaxie. Elles sont donc utilisées comme chandelles standard en cosmologie pour

sonder la géométrie de l'Univers. En effet, l'étude de l'évolution de la luminosité apparente des supernovæ en fonction du décalage vers le rouge permet de contraindre la géométrie de l'Univers, et donc les valeurs du paramètre de densité et de la constante cosmologique.

Agape (Andromeda Galaxy and Amplified Pixels Experiment) est une autre expérience de recherche d'objets massifs compacts. Il s'agit de rechercher l'effet de lentille dans un champ d'étoiles non résolues. Cette technique est particulièrement adaptée à la recherche d'effet de lentille sur des cibles trop lointaines pour que les étoiles puissent être résolues individuellement. Plusieurs campagnes d'observation de la galaxie d'Andromède (M31) ont été menées à partir de l'observatoire du pic du Midi, dans les Pyrénées. Les résultats des analyses sont encourageants et le groupe cherche actuellement à mettre sur pied un programme d'observation plus ambitieux.

L'effet de microlentille gravitationnelle, prédit par la relativité générale, peut être utilisé pour révéler l'existence d'objets massifs dans le halo galactique.

Un tel objet, passant près de la ligne de visée d'un astre situé en arrière-plan, dévie le faisceau lumineux et produit plusieurs images déformées de la source: c'est l'effet de lentille gravitationnelle. Pour des objets peu massifs (jusqu'à quelques masses solaires) se situant dans le halo galactique, les différentes images ne peuvent être séparées à l'aide des instruments habituels. L'effet se traduit par une augmentation transitoire du flux lumineux en provenance de l'astre, produit par le mouvement relatif source-lentille.

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://www.lal.in2p3.fr/EROS>

Laboratoires français des collaborations :

Eros CNRS/IN2P3 : LAL ; PCC.

CNRS/Insu : Institut d'astrophysique de Paris ; Observatoire de Paris ; Observatoire de Marseille.
CEA/DSM : Dapnia.

Agape CNRS/IN2P3 : PCC.

CNRS/Insu : Institut d'astrophysique de Paris ; Observatoire de Midi-Pyrénées (Bagnères de Bigorre et Toulouse).

CEA/DSM : Dapnia.

Le Soleil : un laboratoire pour la physique des neutrinos

La mesure du flux de neutrinos émis par le Soleil peut apporter des informations essentielles sur la physique de cette particule et notamment sur son éventuelle masse. La détermination très précise de la section efficace de la réaction du proton sur le béryllium 7 est une mesure cruciale car les neutrinos formés dans cette réaction sont détectés dans toutes les expériences de neutrinos solaires.

L'étude du Soleil par la mesure du flux de neutrinos qu'il émet a été une expérience pionnière du domaine de l'astrophysique des particules. Il est apparu très vite que ces expériences pouvaient aussi apporter des informations essentielles sur la physique du neutrino lui-même, *via* la mise en évidence d'oscillations entre les différentes familles (neutrinos électronique, muonique et tauique) et donc du caractère massif de ces particules. L'interprétation de ces expériences repose sur la connaissance des flux de neutrinos de différentes énergies émis par le Soleil. Parmi ceux-ci, les neutrinos les plus énergétiques : ceux formés dans la réaction ${}^7\text{Be} + p \rightarrow \gamma + {}^8\text{B} \rightarrow$

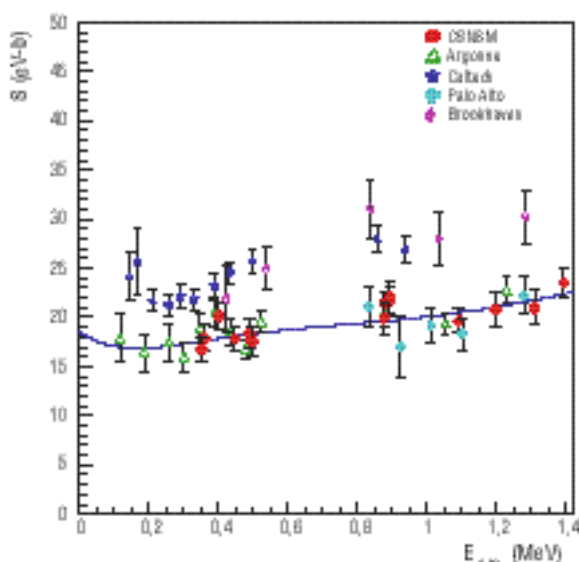
la section efficace de la réaction des protons avec le béryllium 7 est devenue une mesure cruciale à laquelle sont consacrés de nombreux travaux théoriques et expérimentaux à travers le monde. La méthode la plus fiable pour déterminer cette section efficace aux énergies solaires consiste à la mesurer de façon directe jusqu'aux plus basses énergies possibles (quelques dizaines de keV), puis à l'extrapoler. Bien que difficile techniquement, c'est la meilleure méthode pour réduire les incertitudes liées aux modèles nucléaires.

Pour effectuer la mesure de cette section efficace, nous avons choisi d'utiliser des cibles radioactives de ${}^7\text{Be}$ (activités de 10 et 30 mCi) bombardées par un faisceau de protons. Deux séries de mesures indépendantes, utilisant des cibles et des détecteurs différents, ont été effectuées entre 0,35 MeV et 1,4 MeV auprès de l'accélérateur Van de Graaf de 4 MV du Centre d'études nucléaires de Bordeaux. L'une des difficultés de l'expérience provenait de l'utilisation de cibles radioactives qui, outre leur fabrication délicate, sont sources d'un bruit de fond particulièrement gênant dû à l'émission très intense d'un rayonnement gamma de 480 keV. Ce problème, rendu encore plus aigu par la faible valeur de la section efficace à mesurer, a été maîtrisé grâce à l'utilisation d'un ensemble de détecteurs à barrière de surface très mince (30 μm).

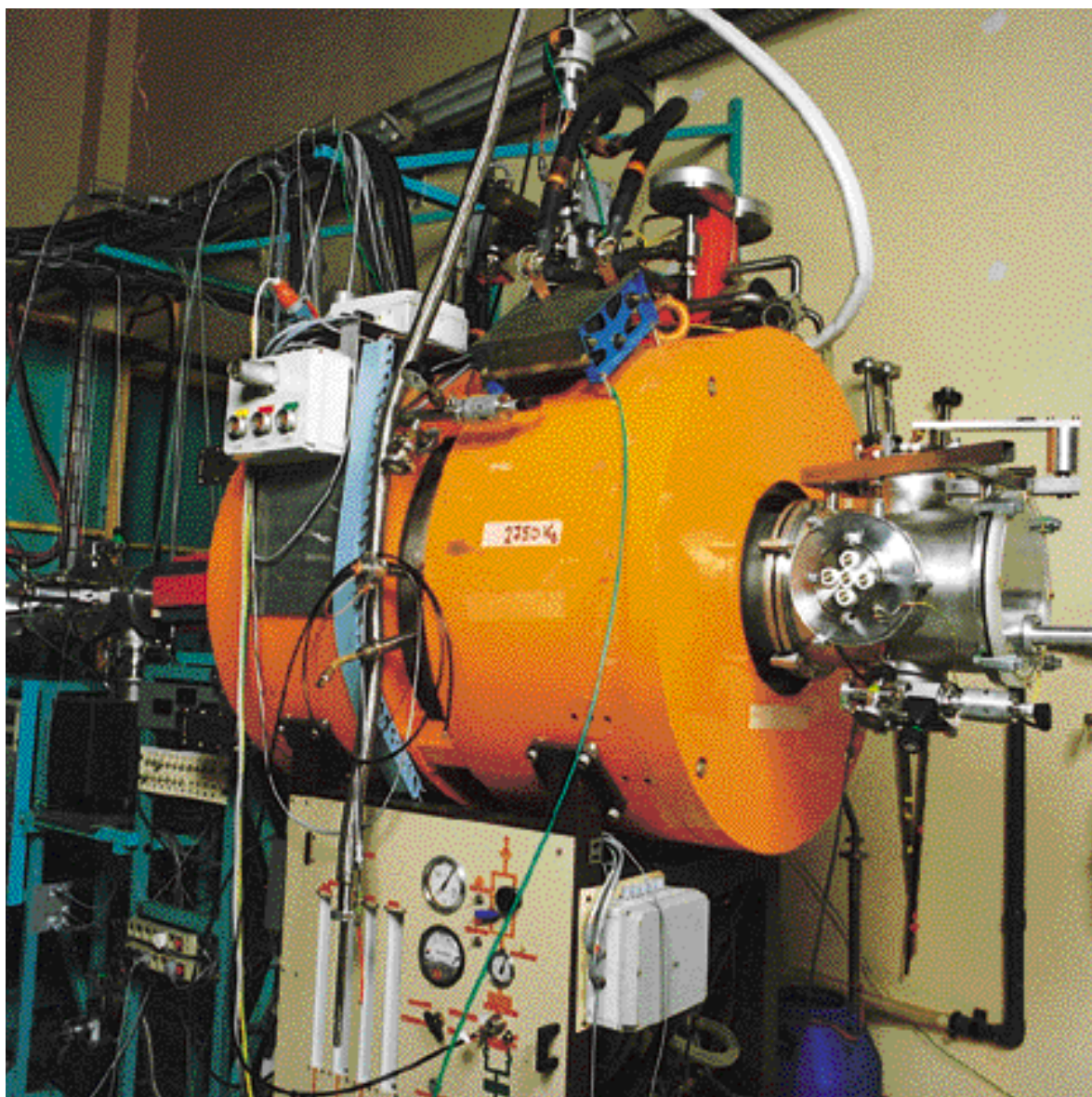
Plus de trois mois de prises de données avec un faisceau très stable ont permis d'obtenir des résultats en très bon accord dans deux séries de mesures indépendantes effectuées avec des cibles et des détecteurs différents. Ces résultats, les premiers après ceux d'Argonne en 1983, réduisent significativement les incertitudes et sont en bon accord avec deux des mesures effectuées précédemment à Argonne et Palo Alto; ils sont cependant incompatibles avec celles de Caltech et Brookhaven.

L'expérience sera prolongée prochainement par des mesures à très basse énergie. D'ores et déjà, l'ensemble de ces résultats, extrapolés aux énergies solaires, a pour conséquence de réduire, sans l'éliminer, le désaccord entre les flux de neutrinos solaires mesurés et ceux prédits par les modèles stellaires.

Comparaison entre les mesures effectuées au CSNSM et celles de quatre laboratoires américains.



${}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$, jouent un rôle privilégié car ils sont détectés par toutes les expériences de mesure des neutrinos solaires et sont même dominants dans des expériences telles que Super-Kamiokande au Japon ou SNO au Canada. Pour ces raisons, la détermination très précise de



*Le spectromètre solénoïde supraconducteur Soleno est associé à l'accélérateur Papap pour l'analyse de réactions nucléaires d'intérêt astrophysique.
© IN2P3/H.Thurel.*

Pour en savoir plus :

F. Hammache, G. Bogaert, P. Aguer, C. Angulo, S. Barhouni, L. Brillard, J.F. Chemin, G. Clavier, A. Coc, M. Hussonnois, M. Jacotin, J. Kiener, A. Lefebvre, J.N. Scheurer, J.P. Thibaud, E. Virassamynäiken, Phys. Rev. Lett. 80, 928 (1998).

Laboratoires de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : CSNSM ; CENBG ; IPN, Orsay.

Virgo, pour la détection des ondes gravitationnelles

L'antenne franco-italienne Virgo, en cours de construction près de Pise, a pour objectif de détecter directement les ondes gravitationnelles prédites par Einstein dans sa théorie de la relativité générale. En liaison avec d'autres antennes, elle pourrait aussi ouvrir une nouvelle voie d'exploration de l'Univers. Pour réaliser un projet aussi ambitieux, les physiciens doivent relever un véritable défi technologique.

L'objectif de l'expérience Virgo est de mettre en évidence, de façon directe, l'existence des ondes gravitationnelles émises, selon les prédictions de la théorie de la relativité générale, par plusieurs sources cosmiques. L'intérêt d'une telle mise en évidence est multiple: non seulement elle conforterait la théorie de la relativité générale mais, surtout, elle ouvrirait une nouvelle voie d'exploration de l'Univers, car les ondes gravitationnelles proviendraient de sources très denses et très éloignées. Le rayonnement gravitationnel peut être conçu comme une fluctuation de la courbure de l'espace, ce qui produit des variations relatives et anisotropes (ΔL) des distances (L) entre «masses libres». Le principe de l'expérience Virgo est de mesurer par interférométrie la variation relative ($\Delta L/L$) avec un grand interféromètre de Michelson, comportant deux bras orthogonaux de 3 km dans lesquels un miroir renvoie la lumière une cinquantaine de

fois de façon à atteindre une longueur équivalente de 150 km. Grâce à la taille de l'interféromètre, à l'augmentation de la puissance lumineuse disponible, à l'utilisation d'une isolation sismique particulièrement évoluée et à la maîtrise de nombreux bruits «techniques», l'expérience Virgo sera sensible sur une large gamme de fréquence, de quelques hertz à 10 kHz; on pourra par exemple mesurer un rapport $\Delta L/L$ de 10^{-21} pour un signal durant une milliseconde, soit environ trois ordres de grandeur de mieux que les détecteurs actuels.

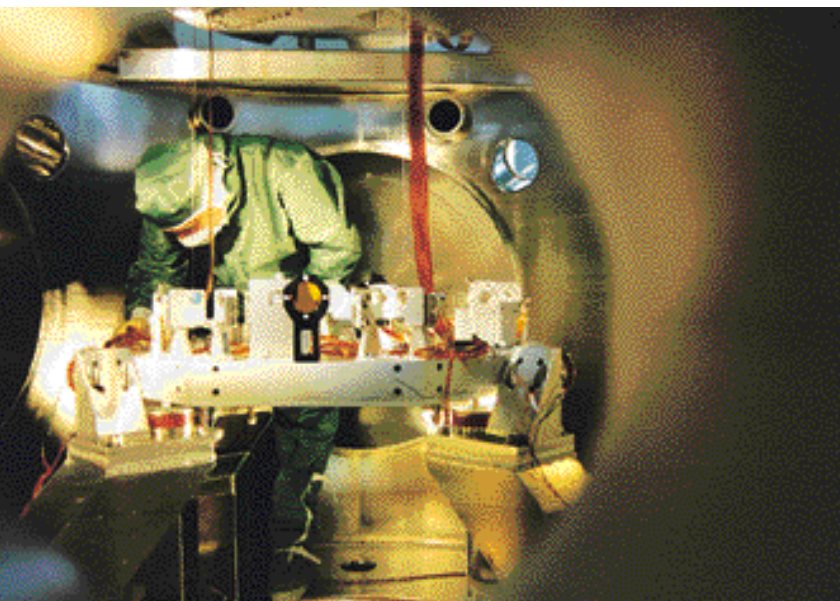
La période 1994-1997 a été celle de la fin des études techniques et du démarrage de la construction de Virgo. Ce projet franco-italien implique à des degrés divers quatre départements du CNRS dont l'IN2P3, qui y joue un rôle important grâce à trois laboratoires qui ont en charge de nombreuses responsabilités, en particulier pour le système à vide, les parties optiques, l'électronique et les logiciels de l'expérience.

Un travail très important a été fait ces dernières années pour atteindre les objectifs et performances nominales du détecteur. C'est particulièrement le cas pour la réalisation de miroirs de grande taille à très faibles pertes où une équipe de l'Institut de physique nucléaire de Lyon a développé des techniques de nettoyage, de dépôts et de métrologie (cf. p.89). D'autre part, la nécessité d'obtenir des pressions résiduelles extrêmement faibles (10^{-9} mb) dans les 6 km de tube à vide de 1,2 m de diamètre des bras de l'interféromètre a conduit à d'importantes études de dégazage au Laboratoire de l'accélérateur linéaire (cf. p.90). Le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux réalise la partie centrale des enceintes à vide qui abrite les miroirs ainsi que les suspensions et les systèmes d'optique de sortie de l'interféromètre tandis que les dispositifs optiques d'entrée vont être construits au LAL. La majorité des systèmes de contrôle et des logiciels de l'expérience sont également réalisés par ces deux laboratoires.

Sur le site de Cascina, près de Pise, les travaux d'infrastructure ont commencé à la fin 1995 avec la construction des bâtiments de la partie centrale de l'interféromètre. L'achèvement de cette partie de l'interféromètre en 1999 permettra d'entreprendre les premiers tests de Virgo en parallèle avec la construction des bras de l'interféromètre, qui doit s'achever en 2002.

Les miroirs de Virgo

Réglage du banc optique de sortie dans une des enceintes à vide de l'interféromètre.
Crédit: IN2P3.



Pour atteindre la sensibilité nécessaire à la détection des ondes gravitationnelles, les miroirs de l'interféromètre doivent être parfaits. Les spécifications de diffusion et d'absorption à 1064 nm, qui doivent être inférieures à 1 partie par million, ont été atteintes sur des miroirs 100 mm de diamètre réalisés par la technique de Dual Ion Beam Sputtering (DIBS). Les paramètres

du front d'onde, aptitude à transmettre ou réfléchir une onde optique sans la déformer, est cruciale dans le cas des miroirs de grandes dimensions Virgo.

Pour contrôler cette planéité, une méthode expérimentale a été imaginée: elle consiste à ajouter à travers un masque spécifique, là où cela est nécessaire, une infime quantité de silice (10 à 700 Å). Le retard de phase induit par cette couche permet de gommer toutes les bosses du front d'onde, et l'efficacité de la correction est suivie par interférométrie.

Pour ce faire, un robot piloté fonctionnant sous vide a été développé au laboratoire. Il permet d'explorer une surface de 100 x 100 mm. Les paramètres du front d'onde, mesurés avant correction, sont traités par un logiciel évolué. Celui-ci va déterminer automatique-

ment les zones du miroir à corriger (les bosses) ainsi que la quantité locale de silice à déposer. Il génère un fichier qui sera transmis au logiciel de pilotage du robot pour exécution de la correction. Cette méthode de traitement correctif, indépendante de la longueur d'onde, a été validée à 633 nm sur des miroirs de 80 mm de diamètre: le front d'onde passe ainsi de 6 à 1,5 nm. La précision de la correction est limitée par la qualité de l'interféromètre ayant permis la saisie des paramètres du front d'onde initial.

L'extrapolation aux grands miroirs, travaillant à 1064 nm, ne devrait pas poser de difficultés insurmontables, dans la mesure où la réalisation du nouvel équipement de dépôt sera conduite avec un soin extrême.

Interféromètre :

Front d'onde d'un miroir de 80mm de diamètre à 633 nm avant et après traitement correctif.

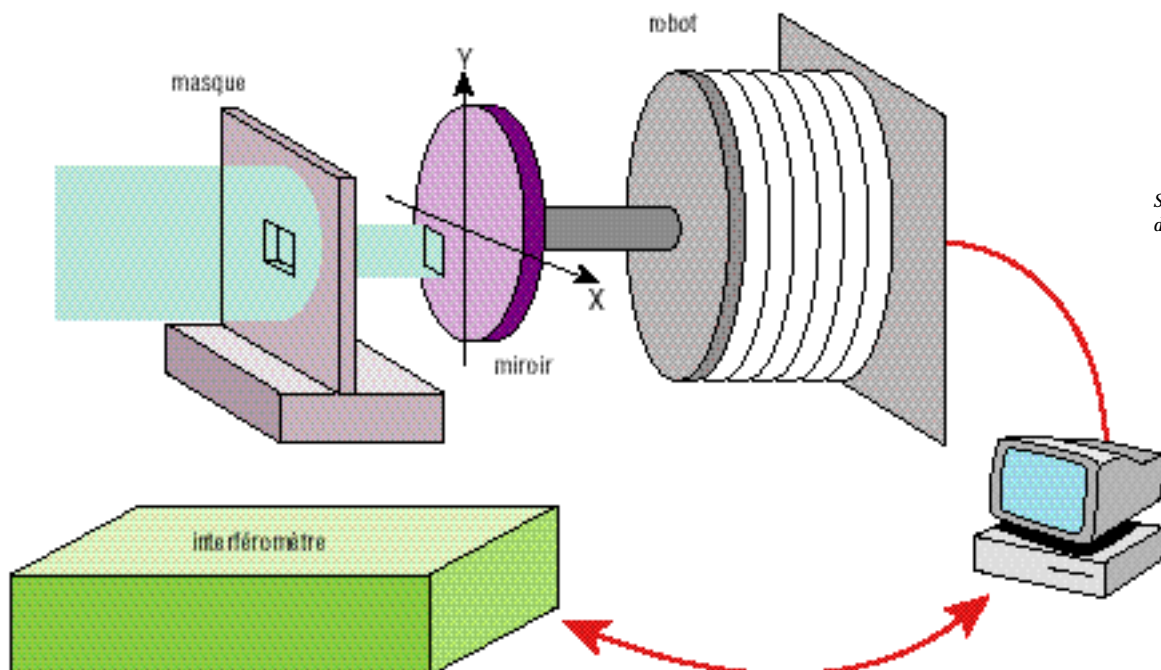
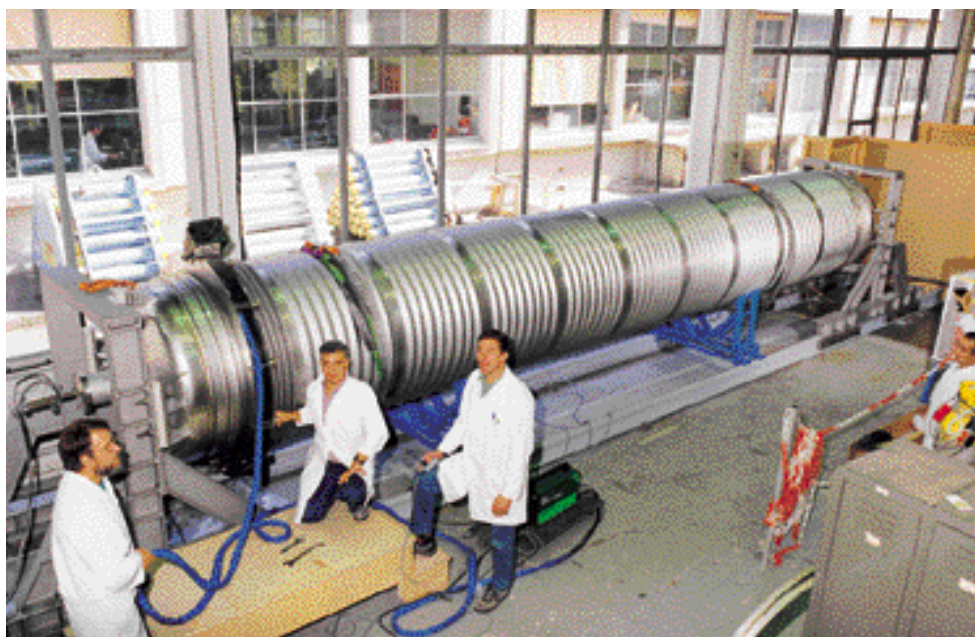


Schéma de principe du traitement correctif.



*Le tube à vide pour l'interféromètre de Virgo.
© CNRS.*

vers un vide extrême des tubes

Dans l'expérience Virgo, le très grand interféromètre de Michelson comporte deux bras de 3 km de long. Le vide est requis dans l'installation afin de diminuer les fluctuations d'indice liées à la présence de molécules résiduelles, l'une des sources de bruit dans l'expérience. Les deux bras, composés de tubes modulaires de 15 m de longueur et de 1,2 m de diamètre, représentent une surface à dégazer de 23000 m². Pour réaliser ce vide, des stations de pompage de vitesse unitaire 2000 l/s, et régulièrement espacées de 300 m, seront installées.

Les spécifications initiales de pressions résiduelles - 10⁻⁷ mbar pour l'hydrogène, 10⁻⁸ mbar pour les autres gaz - ont été abaissées d'un facteur 100 en vue d'une amélioration future d'un ordre de grandeur de la sensibilité de Virgo et afin de mettre son fonctionnement à l'abri d'effets secondaires.

Une approche de réalisation à caractère industriel, mais de qualité poussée, a été développée à Orsay ces dernières années. Des enceintes prototypes de 8 m de long ont été réalisées à partir de dix tronçons d'épaisseur 2 mm raccordés par des soudures TIG. Après assemblage, l'enceinte subit un nettoyage à la lessive alcaline, délivrée par un jet à 60 °C et 100 bars. Il est suivi d'un triple rinçage à l'eau de ville puis à l'eau déminéralisée et d'un séchage par panneaux radiants. Après avoir soudé des fonds bombés aux extrémités de l'enceinte, celle-ci est pompée et étuvée à 150°C durant 110h pour éliminer la vapeur d'eau et les

traces d'hydrocarbures en surface.

Un premier prototype a permis d'atteindre un taux classique de dégazage pour l'hydrogène de 3 x 10⁻¹² atomes/s/cm². Un second prototype réalisé avec des tôles totalement dégazées sous vide à 950 °C a permis de réduire ce taux d'un facteur 100. Le premier prototype a été ensuite porté à 400 °C ± 10 °C dans l'air durant 38 h et donné un taux de dégazage ultime de 1,1 x 10⁻¹⁵ atome/s/cm² pour l'hydrogène, grâce, semble-t-il, au dégazage des nombreuses soudures.

Cette performance autorise Virgo à tableur sur un taux de dégazage industriel de 5 x 10⁻¹⁴ atomes/s/cm² lors de la réalisation des bras de l'interféromètre.

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://www.pg.infn.it/virgodoc/>

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : IPN, Lyon; LAL; LAPP.

CNRS/SPM : Laboratoire de spectroscopie en lumière polarisée, Paris.

CNRS/SPI : Lasers optiques, Orsay.

INFN, Italie : Laboratoires à Florence, Frascati, Naples, Perugia, Pise, Rome.

Remerciements

Introduction

Gérard Fontaine

Faits marquants

Bernard Degrange

Daniel Drain

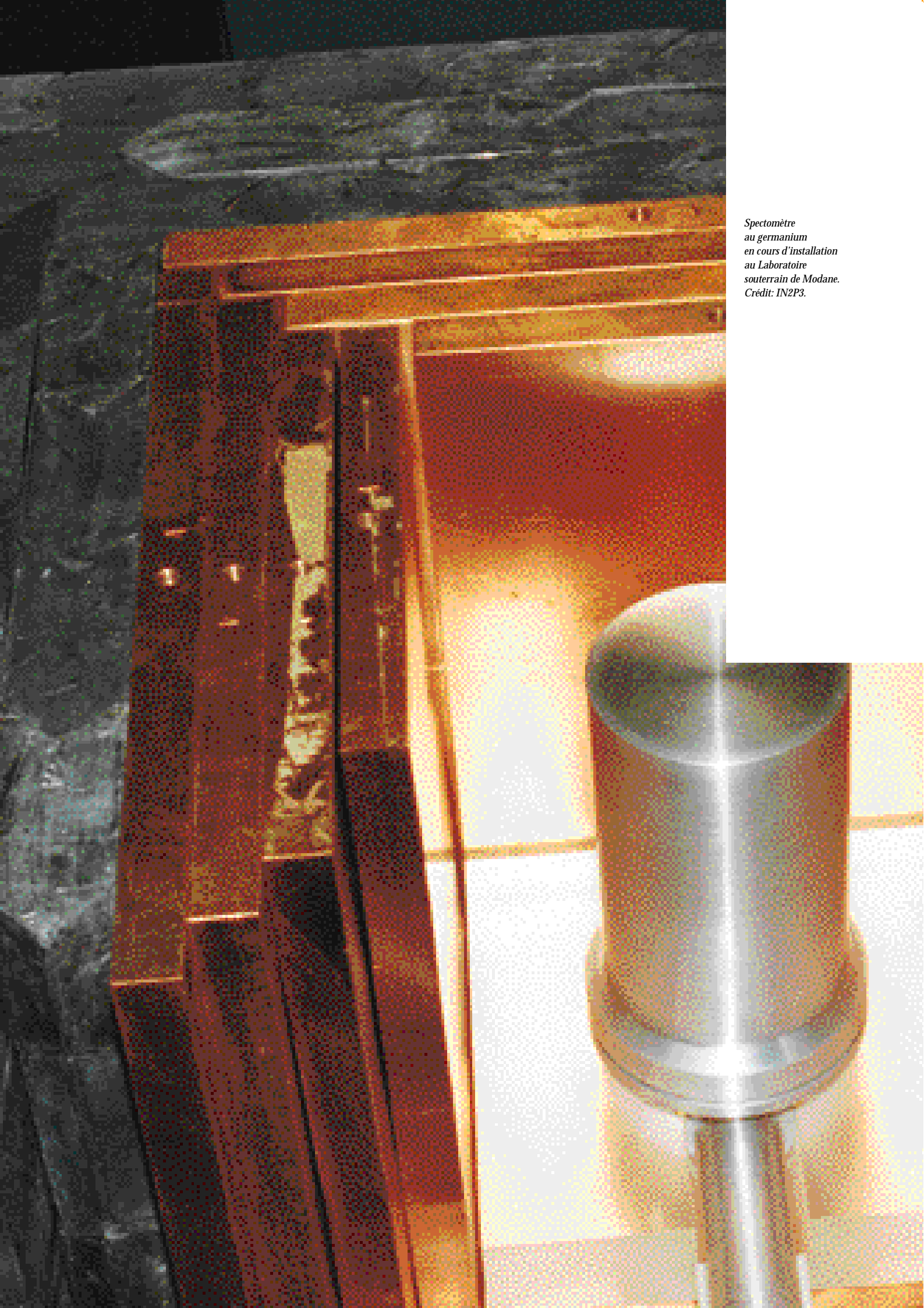
Reza Ansari

Anne Lefebvre

Benoît Mours

Jean-Marie Mackowski

André Reboux



*Spectromètre
au germanium
en cours d'installation
au Laboratoire
souterrain de Modane.
Crédit: IN2P3.*

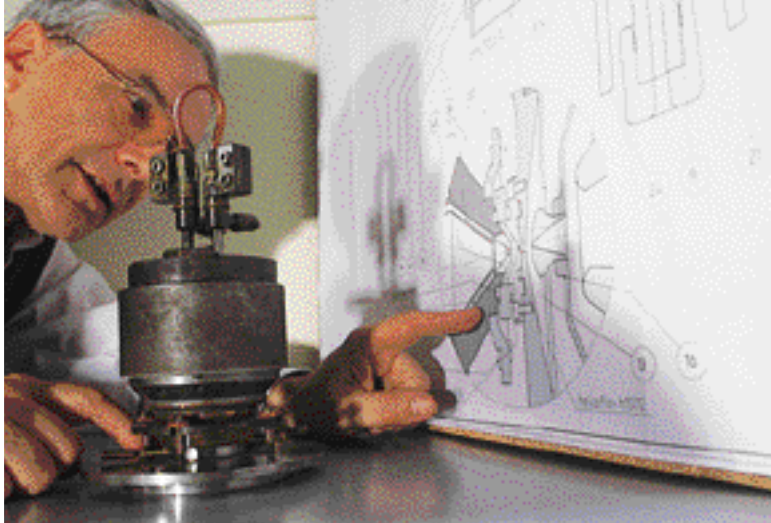
Recherches interdisciplinaires

C'est principalement avec les départements des Sciences physiques et mathématiques, des Sciences chimiques, des Sciences de la Vie et de l'Institut national des Sciences de l'Univers que l'IN2P3 a collaboré dans des programmes de recherche interdisciplinaires. Certains de ces programmes s'attaquent à des problèmes relevant de la recherche fondamentale. D'autres, cherchent à fournir des réponses à certaines demandes de la société.

Collisions agrégats-matériaux

Autour du tandem d'Orsay, depuis quelques années, s'est mis en place un programme visant à étudier la physique des collisions entre des agrégats de natures diverses et des matériaux. Ce programme intéresse la physique nucléaire non seulement parce qu'il met en œuvre des technologies maîtrisées par notre discipline dans les domaines de la construction de sources d'ions, de l'accélération et de la détection mais aussi parce qu'il concerne une classe de systèmes dont la dynamique présente des caractéristiques communes avec celle des noyaux : les systèmes dits mésoscopiques qui, à l'instar des noyaux, sont des assemblages comportant de quelques dizaines à quelques centaines de composants élémentaires. L'expérience décrite plus loin a pour but d'analyser les forces de cohésion et les modes de dissociation d'agrégats de natures variées lorsque après accélération, on les fait entrer en collision avec de la matière. Simultanément, une composante de ce programme concerne l'exploration des modifications de structures parfois profondes induites dans les matériaux par de telles collisions.

Interaction
d'agrégats
rapides
avec la matière
page 96



Source d'ions pulsés dans le projet Genepi, pour l'étude des réacteurs hybrides. © CNRS/L.Médard.

Éléments rares et faibles radioactivité

Les compétences de l'IN2P3 ont aussi été mises en œuvre dans des techniques de spectrométrie de masse par accélérateur au Tandétron permettant la mesure de très faibles quantités d'isotopes spécifiques tels que le béryllium 10 ou l'aluminium 26 pour des études relevant principalement des sciences de la Terre. La période récente a été marquée par le développement et la mise en service d'une ligne d'ions lourds permettant d'étendre cette méthode d'analyse ultrasensible à des éléments beaucoup plus lourds tels que l'iode 129, particulièrement intéressant pour l'océanographie et l'étude de la migration des déchets radioactifs dans l'environnement.

Nouvelles perspectives interdisciplinaires au Tandétron page 104

La détection des très faibles radioactivités à Modane page 106

Le Laboratoire souterrain de Modane, créé pour accueillir des expériences de physique nécessitant un très faible bruit de fond, et donc un environnement protégé de la radioactivité naturelle, offre la possibilité d'y conduire des mesures de grande sensibilité concernant l'environnement. Il est ainsi possible d'y mesurer couramment des traces de radioactivité au niveau de 10^{-3} Bq/kg alors que la radioactivité naturelle du corps humain est de 50 Bq/kg.

L'instrumentation nucléaire et les sciences du vivant

L'amélioration constante des performances de l'instrumentation nucléaire peut, dans certains cas, trouver une application au bénéfice des sciences du vivant. Deux exemples, décrits plus loin, montrent tout l'intérêt d'une association étroite entre biologistes et physiciens des laboratoires de l'IN2P3. Les premiers ont défini la problématique et ses contraintes afin d'encadrer les solutions techniques qu'élaborent les seconds. Dans un cas, une équipe d'Orsay utilise la détection de rayonnements gamma en coïncidence pour proposer une solution alternative à la tomographie par émission de positons dans certaines études *in vivo*. Dans un autre, une méthode d'imagerie microscopique dont la résolution se situe au niveau des éléments de la cellule: membrane, cytoplasme, noyau, et qui permet une mesure simultanée de la répartition de plusieurs éléments dans le milieu biologique, a été mise au point auprès de la microsonde installée sur l'accélérateur Van de Graaf du Centre d'études nucléaires de Bordeaux.

Nouvelles approches pour l'étude du cerveau chez le rongeur page 102

Un microfaisceau d'ions pour l'exploration de la cellule page 100

L'aval du cycle électronucléaire

La cinématique inverse : une méthode originale appliquée à la transmutation
page 99

L'Institut a aussi engagé des compétences spécifiques, aussi bien scientifiques que techniques, au service de programmes visant à répondre aux préoccupations de la société française sur l'aval du cycle électronucléaire. Ainsi a été développée une méthode originale permettant une mesure à la fois rapide et analytique des quantités d'éléments et d'isotopes produits par les réactions nucléaires induites par impact d'un faisceau de protons énergétiques sur divers matériaux. Les résultats de ce programme fourniront des contraintes pour les spécifications de sûreté de la cible d'un futur réacteur nucléaire sous-critique assisté par accélérateur. Un tel réacteur fait partie des options envisagées pour transmuter, et donc détruire, les produits de haute activité et à vie longue produits par le parc électronucléaire actuel.

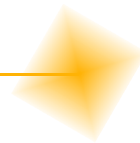
Les activités de radiochimie conduites dans les laboratoires de l'IN2P3 contribuent aussi au programme de recherche national sur le sort des déchets du cycle. Par exemple, des résultats prometteurs ont été obtenus sur des matrices solides à base de phosphates : elles pourraient assurer une plus grande sûreté et pérennité de l'entreposage des produits de haute activité que la solution à base de verres actuellement retenue par l'industrie nucléaire.

Des céramiques pour le conditionnement de certains déchets nucléaires
page 98

Dès 1997, la mise en place des programmes interdépartementaux a modifié le régime de fonctionnement de certaines activités interdisciplinaires. En effet, pour celles qui relèvent déjà de programmes acceptés par la Direction du CNRS - recherches liées à l'aval du cycle ou en biologie -, l'évaluation est effectuée, et le niveau de financement est décidé au sein de ces programmes. En ce qui concerne les activités qui ne sont pas encore prises en compte dans un programme interdépartemental, l'Institut entend œuvrer pour qu'elles acquièrent une telle reconnaissance au niveau du CNRS. En attendant, il continue à leur accorder un soutien dans des conditions similaires à celles qui ont permis leur naissance.

Par ailleurs, les activités théoriques qui sont pertinentes pour les disciplines de l'IN2P3 sont pour le moment gérées par le département des Sciences physiques et mathématiques. L'Institut va travailler à la mise en œuvre d'une coordination de l'évaluation : il pourra ainsi, par un soutien sous forme de dotations sur des projets de recherche spécifiques, continuer à manifester son intérêt pour un support théorique fort aux sciences expérimentales dont il a la charge.

Interaction d'agrégats rapides avec la matière



Les états d'ionisation d'agrégats de carbone, accélérés et projetés contre une cible solide, ont été mesurés après la traversée de la cible. L'état d'ionisation moyen des constituants d'agrégats est plus faible que celui de l'atome isolé.

Les conséquences de l'évolution de l'état d'ionisation du projectile sur le pouvoir d'arrêt et l'énergie déposée dans le solide par excitation électronique sont importantes pour comprendre les mécanismes de dépôt et de transfert d'énergie dans le solide et vers la surface.

Des agrégats et des molécules, accélérés à des énergies de quelques dizaines de MeV et projetés contre une cible solide, déposent dans la matière, par excitation électronique, des densités d'énergie supérieures à celles déposées par des ions ayant une énergie de l'ordre du GeV. L'impact de ces projectiles conduit à la formation de traces géantes dans le solide, de cratères en surface dont le volume est de cent à mille fois plus important que celui créé par des ions. L'émission ionique qui résulte de ces impacts est augmentée dans des proportions semblables. L'émission d'agrégats et de molécules complexes de la cible est favorisée. Ces effets sont d'autant plus spectaculaires que le nombre d'atomes dans l'agrégat est élevé.

Lors de l'impact d'un projectile polyatomique sur une cible solide, les électrons de valence de l'agrégat incident sont expulsés pendant la traversée des premières couches du solide. Les constituants ainsi ionisés sont soumis à une force de répulsion coulombienne et, au cours de leur progression dans le milieu solide, sont diffusés par collisions élastiques sur les atomes de la cible. L'effet conjugué de ces deux phénomènes produit un éclatement de l'agrégat au cours de sa pénétration dans la cible, ce qui conduit à la disparition progressive des effets spécifiques induits par la proximité spatiale des atomes.

Pour connaître exactement l'énergie cédée au milieu par ces projectiles, on a mesuré l'énergie perdue par chaque atome au cours de la traversée de la cible, la charge

moyenne et la distance entre les constituants. Ces données apportent des informations sur les effets cohérents induits par la proximité des éléments du projectile lors de la traversée du solide. Elles peuvent être obtenues simultanément grâce au détecteur à localisation LAG-1, développé à l'IPN d'Orsay pour étudier la cinématique des ions primaires (issus du projectile) et secondaires (éjectés de la cible), et qui a été conçu pour déterminer des distributions angulaires et identifier les ions par temps de vol lorsque de nombreuses particules sont émises.

Les distributions d'états de charge ont été mesurées entre 1 et 4 MeV pour le carbone et pour les constituants d'agrégats (C_3 , C_5 , C_8 , C_{10}). L'état d'ionisation moyen des constituants des agrégats est plus faible que celui de l'atome isolé. Cet écart croît avec le nombre de constituants pour atteindre 25 % pour le C_{10} et diminue avec l'épaisseur de la cible pour s'annuler après plus de 250 nm de matière traversée. Les largeurs des distributions spatiales des constituants sont également mesurées avec LAG; leur évolution en fonction de l'épaisseur de la cible permet de suivre l'importance relative de la répulsion coulombienne entre les constituants ionisés et de la diffusion élastique multiple sur les atomes de la cible. L'analyse de ces résultats permettra de mieux comprendre l'évolution de l'état d'ionisation du projectile et ses conséquences sur le pouvoir d'arrêt et l'énergie déposée dans le solide par excitation électronique.

Pour en savoir plus :

A. Brunelle, S. Della-Negra, J. Depauw, D. Jacquet, Y. Le Beyec, M. Pautrat, Ch. Schoppmann, Nucl. Instr. Meth. B125 (1997) 207.

S. Della-Negra, Images de la Recherche, Département Sciences physiques et mathématiques et Sciences chimiques, juin 1997, p. 38.

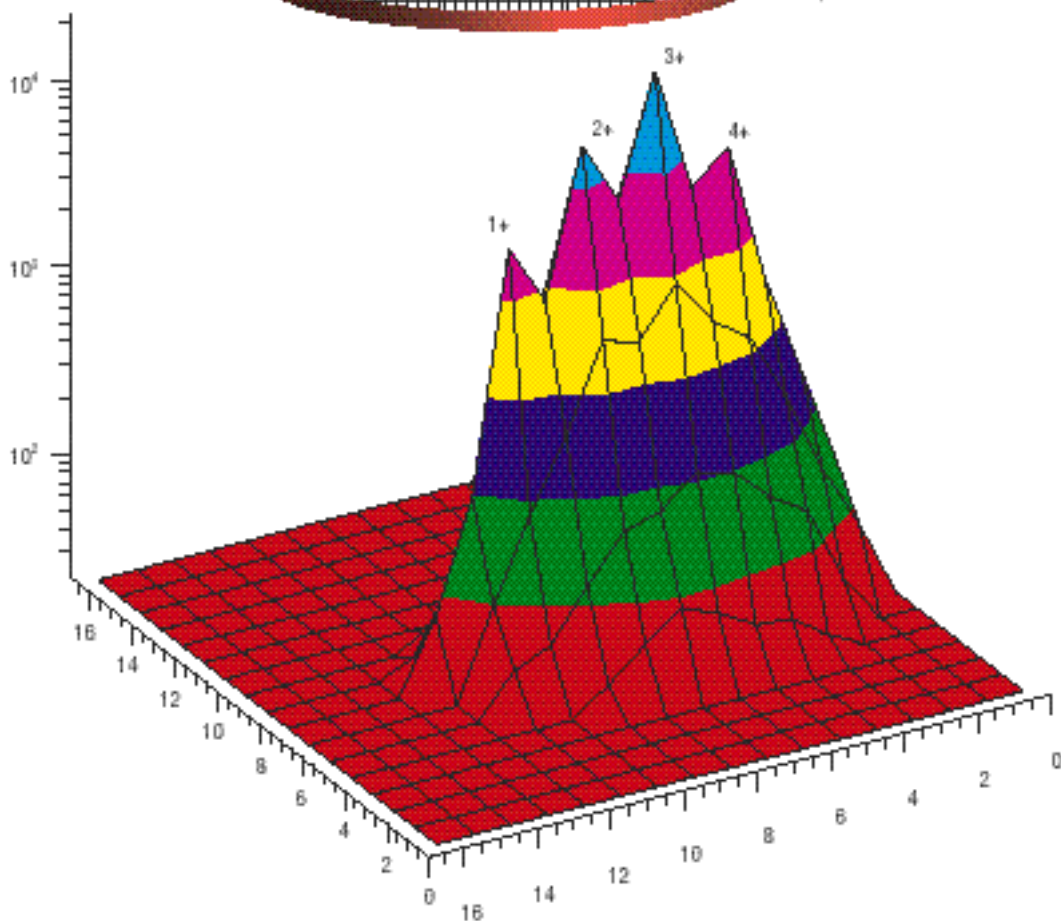
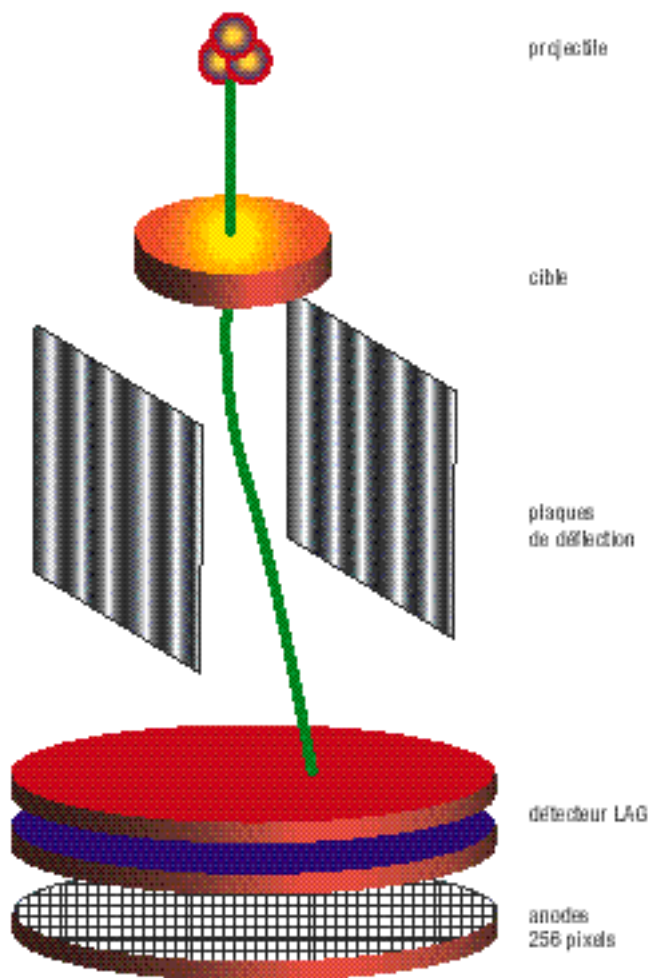


Schéma du dispositif expérimental. Le détecteur LAG-1 est composé de deux galettes de microcanaux et d'un plan d'anodes constitué de 256 pixels. La diaphonie entre pixels est inférieure à 10^4 . Il est possible de mesurer 256 temps de vol simultanément avec un temps mort par voie inférieure à 20 ns et une résolution temporelle de 200 ps. L'analyse en charge est effectuée par une déviation électrostatique entre deux plaques suivie d'un petit temps de vol de 250mm. Ce dispositif simple permet d'obtenir une information complète pour des agrégats de plusieurs dizaines d'atomes traversant des cibles d'épaisseurs comprises entre 10 et 200 nm. Ce détecteur permet aussi d'obtenir la multiplicité et la distribution angulaires des espèces ioniques secondaires émises d'une surface.

Sur ce schéma est donné un exemple de la réponse du détecteur lorsqu'un carbone ionisé de 2 MeV traverse une feuille de carbone de 25 nm.

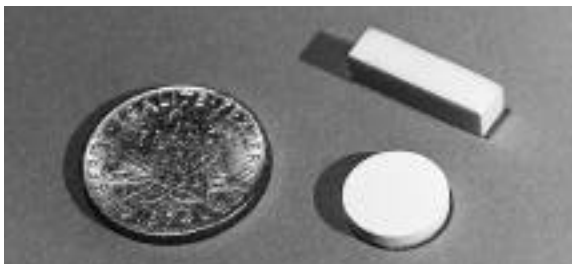
Des céramiques pour le conditionnement de déchets nucléaires

La question du conditionnement des déchets nucléaires se pose à tous les pays qui utilisent cette forme d'énergie dans leurs centrales. Des céramiques à base de phosphate de thorium ont été synthétisées; elles retiennent bien les actinides tétravalents et présentent une excellente résistance à la corrosion par l'eau, facteur essentiel pour le stockage à long terme.

Les réacteurs nucléaires, qu'ils fonctionnent avec de l'oxyde d'uranium (UOX) ou bien un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium (MOX), produisent des déchets radioactifs. Pour le futur, dans le premier cas, il est préconisé de séparer les produits de fission des actinides mineurs (neptunium, américium, curium) suivant un retraitement poussé des combustibles usés, dans le second cas, on sera conduit à récupérer du plutonium à composition isotopique dégradée. Dans ces conditions, il est clair qu'en dehors des produits de fission, le conditionnement des déchets restants, que sont les actinides, mérite d'être examiné.

A l'heure actuelle, la méthode de conditionnement prédo-

Pièces frittées de matrices phosphates.
© IPN, Orsay.



minante est la vitrification quelle que soit la nature chimique des déchets mais d'autres procédés pourraient voir le jour, notamment l'emploi de céramiques lorsqu'il s'agit d'un type spécifique de déchets comme les actinides. D'ailleurs, l'utilisation de céramiques est envisagée par divers pays, en particulier par les États-Unis pour stocker le plutonium militaire provenant du désarmement.

Dans ce domaine des céramiques, des chercheurs de l'IPN d'Orsay se sont inspirés de la composition chimique de certaines roches naturelles très âgées (jusqu'à 2 milliards d'années) qui, depuis leur formation, ont toujours contenu des radioéléments comme l'uranium et le thorium, pour concevoir un nouveau matériau. Ils ont ainsi synthétisé le phosphate-diphosphate de thorium

(PDT). Ce composé n'a pas d'analogue naturel mais il est connu que le thorium est bien retenu dans des roches à base de phosphates. Ils ont pu montrer que, dans le PDT, les ions du thorium tétravalent peuvent être substitués par d'autres ions d'actinides tétravalents comme l'uranium, le neptunium, le plutonium et conduire à la formation de solutions solides dans lesquelles le pourcentage maximal de substitution est respectivement de 75 % pour l'uranium, 50 % pour le neptunium et 40 % pour le plutonium. L'américium et le curium, ions trivalents plus gros que le thorium, ne s'insèrent pas dans le PDT. Leur comportement a été simulé en utilisant l'ion trivalent du gadolinium: l'insertion de ce dernier ne se fait pas dans une solution solide comme pour les actinides tétravalents, mais conduit à un système biphasé PDT et phosphate de gadolinium.

L'étude de la résistance à la corrosion par l'eau des matrices (phénomène de lixiviation) est essentielle car une détérioration par l'eau de matrices au sein d'un lieu de confinement pourrait provoquer des pollutions de nappes phréatiques voisines dues à une fuite de radioactivité. Les résultats relatifs au taux de lixiviation du PDT sont meilleurs au moins d'un facteur 10, comparés à ceux d'autres matériaux de confinement pressentis pour être utilisés avec les mêmes objectifs.

Une matrice de confinement de la radioactivité telle que le PDT ne saurait être utilisée sous forme pulvérulente, c'est pour quoi ses aptitudes au frittage pour obtenir des pastilles compactes ont été étudiées. Dans les conditions du milieu industriel (pression à froid de 5 tonnes par cm^2 puis chauffage à une température de 1250 °C pendant 12 heures), les chercheurs ont pu montrer que la céramisation est possible.

La suite de ce programme de recherche vise l'étude, dans des conditions artificielles et en accéléré, de la tenue sous rayonnements de cette matrice pour un scénario qui correspondrait à un entreposage de quelques siècles ou un stockage à beaucoup plus long terme.

Pour en savoir plus :

N. Dacheux, R. Podor, V. Brandel, M. Genet, *Journal of Nuclear Materials*, 252 (1998) 179.

La cinématique inverse : une méthode originale appliquée à la transmutation

La possibilité de transmutation des éléments radioactifs résultant de la fission de l'uranium dans les réacteurs nucléaires est au cœur des recherches actuelles sur l'aval du cycle électronucléaire. Cette transmutation pourrait se faire dans des réacteurs nucléaires sous-critiques, alimentés en neutrons par un accélérateur. La cinématique inverse est une méthode originale appliquée ici à l'étude des réactions induites par des protons accélérés (spallation) et qui fournissent les neutrons destinés au réacteur.

Les réacteurs nucléaires hybrides, c'est-à-dire pilotés par un accélérateur de haute intensité, font l'objet aujourd'hui de nombreuses recherches depuis l'impulsion donnée par Carlo Rubbia il y a quelques années. Ces réacteurs, qui sont susceptibles d'incinérer des déchets à vie longue et de fonctionner à partir de filières moins polluantes que celles basées sur le couple uranium-plutonium, pourraient révolutionner le problème de la production énergétique à partir de la fission nucléaire.

Pour détruire des déchets radioactifs, les «transmuter», il faut leur faire capturer des neutrons dans un réacteur. Cependant, un cœur normalement critique, c'est-à-dire entretenant une réaction en chaîne, s'accommode mal d'une forte proportion de déchets en particulier d'actinides, car il devient instable. Seul un cœur sous-critique permet de travailler avec des concentrations élevées. Il faut alors faire appel à une source externe de neutrons pour entretenir les réactions de fission. C'est là qu'intervient l'accélérateur de particules qui fournit ces neutrons par l'intermédiaire de réactions induites par des protons de 1 GeV sur une cible d'un élément lourd tel que le plomb (réaction de spallation).

Dans la définition des conditions de fonctionnement d'un système hybride, la connaissance des produits issus de la spallation, les «débris» de la réaction, est déterminante car ces produits sont radiotoxiques, ils interviennent dans les phénomènes de corrosion et les aspects thermiques. Un inventaire fiable de ces isotopes est donc nécessaire.

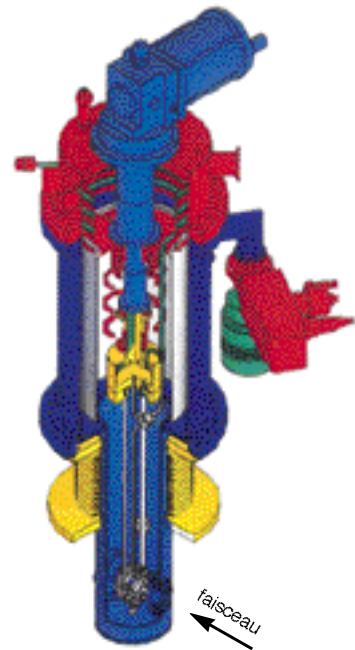
La mesure des sections efficaces de ces produits de spalla-

tion a été entreprise par une méthode originale : la cinématique inverse. Cette méthode d'étude de la fission de l'uranium et de noyaux exotiques a trouvé ici un débouché particulièrement opportun. Au lieu de bombarder une cible de plomb avec des protons de 1 GeV, on provoque des collisions entre des noyaux de plomb accélérés à 1 GeV/nucléon (à GSI) et les protons au repos contenus dans une cible d'hydrogène liquide qui a été construite au laboratoire national Saturne. Les produits de réaction animés de grandes vitesses sont détectables et identifiables.

Par rapport aux méthodes spectroscopiques classiques qui mesurent des productions cumulées après décroissance radioactive, on obtient ici un inventaire avant décroissance, ce qui est crucial pour comparer avec les calculs théoriques et évaluer l'activité apportée par les périodes courtes.

L'expérience de mesure de ces sections efficaces, placée dans le cadre du programme Gédéon (Gestion des déchets par des options nouvelles), est assurée par une collaboration européenne. Les prises de données effectuées à GSI ont débuté avec un faisceau d'or à 800 MeV/nucléon. L'étude de la spallation de l'uranium 238 et du plomb à 1 GeV/nucléon par des protons et des deutons a ensuite été réalisée. Dans le cas de l'or, si les calculs actuels reproduisent bien l'allure des distributions isotopiques, leur prédiction quantitative n'est pas satisfaisante.

Des mesures à énergie de bombardement moins élevée sont prévues (300 à 600 MeV/nucléon), ainsi que l'étude de la spallation sur le fer qui joue un rôle central dans les matériaux de structure et pourrait entrer dans la composition de la «fenêtre» d'entrée du faisceau.



Vue éclatée de la cible d'hydrogène liquide.

Laboratoires de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : IPN, Orsay; CENBG,
CEA/DSM : Dapnia.
Allemagne : GSI, Darmstadt.

Un microfaisceau d'ions pour l'exploration de la cellule

La microsonde nucléaire du Centre d'études nucléaires de Bordeaux est utilisée pour des études pharmacologiques, notamment le dosage et la cartographie de la distribution d'agents anticancéreux au sein de la cellule. La mise au point d'une nouvelle technique d'imagerie permet de produire des cartes en trois dimensions de la densité cellulaire avec une très bonne résolution pour des objets de diamètre inférieur à 200 μm . On accédera ainsi à des informations plus précises sur le statut physiologique de micrométastases ou de micronodules tumoraux.

L'irradiation par microfaisceau peut également s'avérer très utile dans l'analyse des risques liés à l'exposition aux très faibles doses d'irradiation.

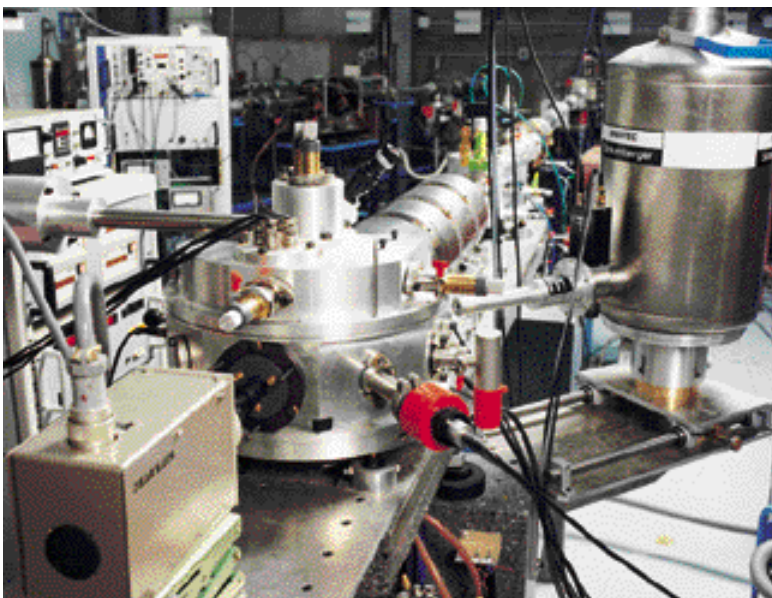
Les informations expérimentales sur la teneur en éléments-trace et leur répartition à l'échelle de la cellule sont encore insuffisantes. Les domaines d'étude concernés sont pourtant très nombreux : la biologie moléculaire par le biais des métaux-trace essentiels (Fe, Cu, Zn), la toxicologie et l'environnement pour la détection des éléments lourds (Pb, Cd, Hg) et la pharmacologie. C'est dans le cadre de cette dernière thématique que s'inscrivent les développements réalisés autour de la microsonde

nucléaire du Centre d'études nucléaires de Bordeaux (CENBG). Pour l'analyse chimique élémentaire appliquée à des études de pharmacologie d'agents anticancéreux, la fluorescence X induite par particule chargée est en effet une des rares techniques à présenter une sensibilité qui permette de révéler la distribution intracellulaire de certaines drogues. C'est particulièrement vrai pour des agents comme le cisplatine, un anticancéreux largement employé en clinique dans le traitement des tumeurs des voies aériennes supérieures, et au sein duquel un atome de platine joue un rôle de marqueur naturel. La possibilité de doser et cartographier les distributions subcellulaires de telles molécules et surtout de mettre en évidence leurs effets sur la distribution en métaux-trace a permis d'aborder l'étude des mécanismes de résistance aux substances anticancéreuses par comparaison de lignées cellulaires tumorales humaines sensibles et de leurs sous-lignées rendues résistantes. D'autre part, la microanalyse à l'échelle des tissus a permis de valider les progrès réalisés dans l'optimisation de certains modes d'administration comme la chimiothérapie intrapéritonéale ou intratumorale.

Dans le domaine du MeV, les ions de faible masse sont peu destructifs et particulièrement sensibles à la densité de la matière qu'ils traversent. Ainsi, en mesurant la perte en énergie des ions transmis à travers des cellules entières isolées, on peut réaliser des cartographies bidimensionnelles révélant leur structure interne.

Une évolution de cette technique d'imagerie par densitométrie fonctionnelle maintenant sur la ligne microfaisceau de l'accélérateur Van de Graaf du CENBG. L'originalité de la méthode, basée sur le principe de tomographie, réside dans sa capacité à produire des cartes en trois dimensions de la densité cellulaire. Elle est basée sur une reconstruction numérique à l'aide d'algorithmes analytiques dérivés des scanners médicaux à rayons X. Cette technique de tomographie est actuellement la seule à pouvoir résoudre des objets de si petite taille (diamètre inférieur à

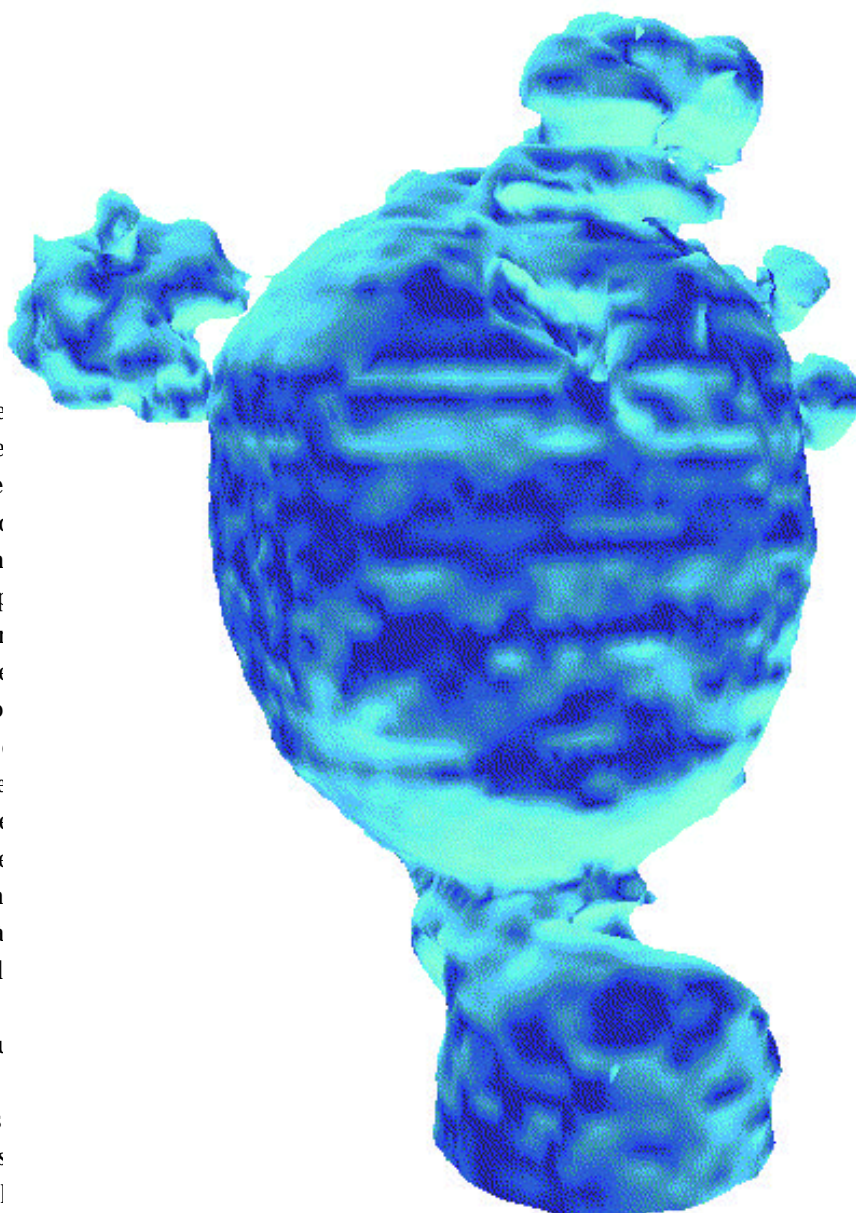
La microsonde nucléaire de Bordeaux.
Crédit: IN2P3.



200 μm) et ce, avec une résolution spatiale de l'ordre du micromètre. Ses performances dans l'analyse structurale d'échantillons de faibles dimensions ont pu être validée sur des cellules humaines issues, soit isolées soit sous forme de sphaéroïdes. En fait, ce développement n'est que la phase d'un programme de recherche qui vise à l'analyse chimique de la cellule par microscopie tomographique. La technique de tomographie utilise des modèles de culture cellulaire comme celui des sphéroïdes ou des cellules employées dans divers domaines de la recherche, et mieux à même de refléter le comportement des micrométastases ou micronodules. Ce programme passe par le développement d'une tomographie tridimensionnelle par fluorescence.

Les premières analyses ont déjà eu lieu sur des cellules de structure interne simple. L'irradiation de cellules individuelles présente un potentiel important pour l'estimation des risques associés à de faibles doses d'irradiation, risques qui sont encore peu connus. L'hypothèse selon laquelle les radionucléides pourraient véhiculer les effets à long terme sur la santé reste à vérifier au niveau des doses ultimes. L'expérimentation à l'échelle cellulaire est la seule voie possible pour mettre en évidence la réponse d'une cellule isolée à une très faible dose d'irradiation, voire l'exposition à une seule particule ionisante.

La ligne microfaisceau est en cours d'équipement afin de délivrer des ions isolés en faisceau extrait, avec une précision latérale de l'ordre de quelques micromètres. Ce dispositif peut permettre d'aborder des études très diverses: inactivation cellulaire aux très faibles doses, radiosensibilité des différents organites cellulaires, aide au développement de modèles pour l'étude des mécanismes de dommage de l'ADN.



Tomographie d'une cellule tumorale ovarienne humaine: reconstruction tridimensionnelle de la structure externe (diamètre de la cellule 60 μm).

Pour en savoir plus :

M. Bara, A. Guiet-Bara, Ph. Moretto, Nuclear microprobes in biology and medicine, (editors), Cell. Mol. Biol. (special issue) 42 (1), 1996, 1-134.
Y. Llabador, Ph. Moretto, Applications of nuclear microprobes in the life sciences, World scientific, Singapour, New Jersey, Londres, Hong Kong, 1998, 1-287.

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : CENBG.

Université de Bordeaux : Réactions nucléaires à moyennes et hautes énergies.

Inserm : Faculté de médecine (unité 94/08), Dijon.

CEA/DSV : Laboratoire de radiotoxicologie, Bruyères-le-Châtel.

Institut Gustave-Roussy :
Unité de radiobiologie et service de radiothérapie, Villejuif.

Nouvelles approches pour l'étude du cerveau chez le rongeur

Mieux comprendre le fonctionnement du cerveau implique de relier les études comportementales et neurobiologiques. L'expérimentation *in vivo* sur le petit animal, grâce au développement d'une méthode originale de tomographie d'émission, permet de jeter un pont entre approches aux niveaux macroscopique et moléculaire, et apporte une ouverture nouvelle dans ce champ de recherches.

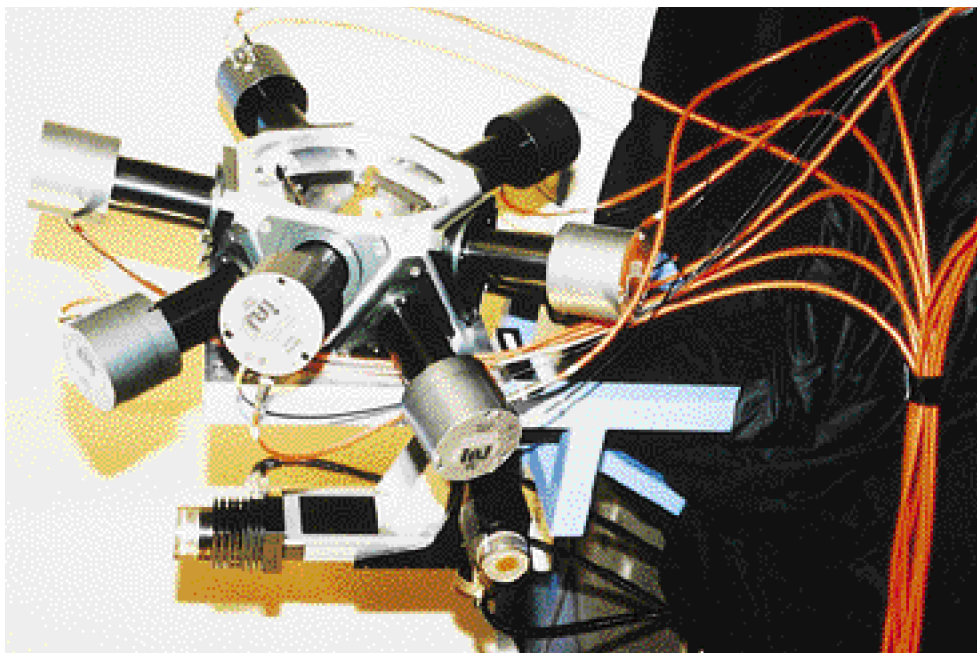
L'exploitation intensive de toutes les techniques de la biologie moléculaire *in vitro* en neurobiologie et en neuropharmacologie a fait accomplir de grands progrès à notre connaissance «microscopique» du cerveau. A l'opposé, les études comportementales permettent d'accéder aux fonctions intégratrices supérieures du cerveau - connaissance «macroscopique» - sans donner facilement accès à l'aspect moléculaire sous-jacent. Pour jeter un pont entre ces deux aspects hiérarchiquement séparés du fonctionnement cérébral, il est nécessaire de dévelop-

per des moyens d'investigation moléculaires *in vivo*. Si la tomographie d'émission est une méthode qui a fait ses preuves dans le domaine clinique, l'expérimentation *in vivo* sur le petit animal, pour des recherches en biologie ou en médecine, est restée pendant longtemps à un niveau extrêmement rudimentaire du fait de l'absence de systèmes d'imagerie adaptés. Depuis le début des années 90, d'importants efforts ont porté sur l'adaptation des méthodes de tomographie d'émission classiques mais quelques systèmes seulement sont actuellement exploités. Le Tomographe haute résolution (Tohr), développé par le groupe Interface physique-biologie à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay, est basé sur une approche originale qui prend en compte, dès l'élaboration de son principe, les contraintes spécifiques liées aux recherches en neurobiologie chez le petit animal, afin d'atteindre à terme une résolution spatiale inférieure au millimètre.

Dans son principe, Tohr est un compteur de radiation qui ne voit qu'une région très limitée de l'espace (point focal). C'est cette région de quelques millimètres cubes, délimitée par un collimateur focalisant à grand angle solide, qui sera associée à un élément de volume (voxel) de l'image finale. L'image tridimensionnelle est obtenue en balayant le point focal sur la région à analyser. L'originalité de Tohr porte sur deux points: le premier consiste à ajouter à la collimation mécanique une colli-

imation électronique en utilisant des marqueurs radioactifs qui émettent plusieurs photons non corrélés angulairement; on détecte alors les photons (X ou γ) en coïncidence - ce qui explique l'utilisation d'un collimateur à grand angle solide - et on améliore ainsi la sélectivité spatiale du système. Le second concerne la réalisation du collimateur qui détermine essentiellement les performances de Tohr: des empilements de plaques de tungstène homothétiques usinées chimiquement permettent d'obtenir les caractéristiques adéquates.

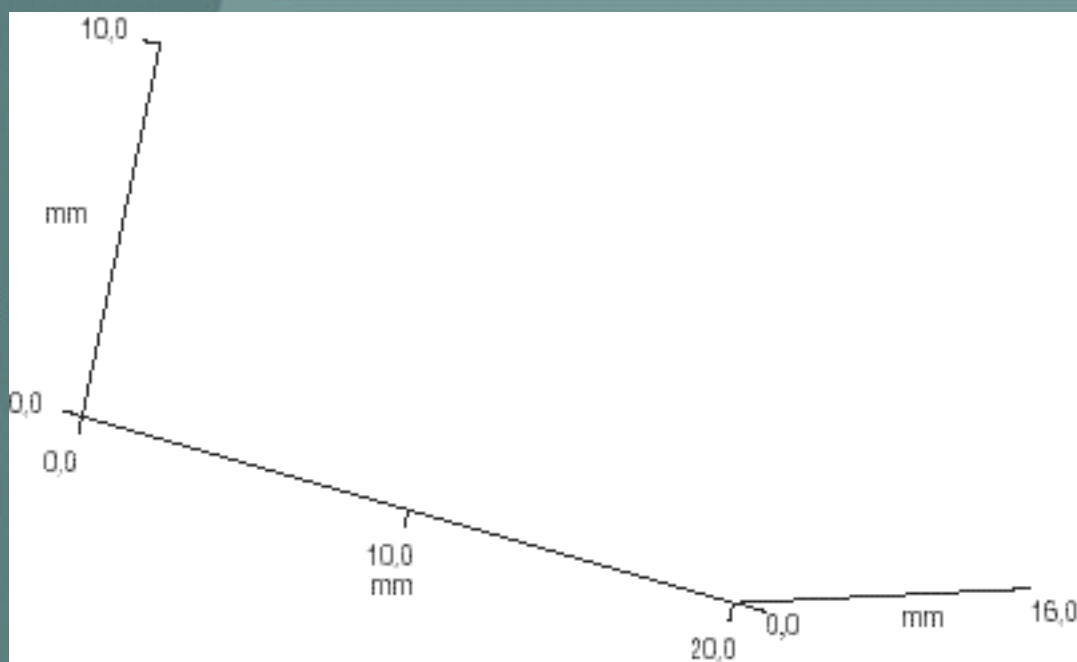
Un premier prototype de Tohr, possédant une résolution de 1,4 mm est en cours d'achèvement. D'ores et



Vue générale de Tohr: ce prototype est composé de dix modules portant chacun un collimateur.
© IN2P3/F. Planche.

déjà, les performances du prototype sont conformes aux prévisions numériques et des premiers essais d'imagerie des traceurs du système de recapture de la dopamine chez le rat ont démarré en collaboration avec le Service hospitalier Frédéric-Joliot à Orsay. Ces expériences ont fourni les premières données cérébrales *in vivo*.

per des moyens d'investigation moléculaires *in vivo*. Si la tomographie d'émission est une méthode qui a fait ses preuves dans le domaine clinique, l'expérimentation *in vivo* sur le petit animal, pour des recherches en biologie ou en médecine, est restée pendant longtemps à un niveau extrêmement rudimentaire du fait de l'absence de



Représentation tridimensionnelle de l'activité mesurée *in vivo* dans la tête d'un rat après injection d'un traceur radioactif (épidépride marqué à l'iode 123). Ce traceur se fixe spécifiquement dans une région du cerveau appelée striatum. La surface visualisée correspond à 70 % de l'activité maximale mesurée sur toute l'image. On retrouve principalement l'activité dans le striatum (les deux lobes vers le centre). Deux autres régions apparaissent également: une, en dehors du cerveau, correspond aux fosses nasales et une autre, vers la droite, à l'arrière du cerveau, correspond à différentes zones cérébrales identifiées par imagerie *ex vivo*.

Plusieurs développements instrumentaux permettront dans un futur proche de réaliser des expériences avec détection de deux photons (possibilité d'un multimarquage) et d'aborder les nouvelles expériences *in vivo* envisagées: études d'agents neuroprotecteurs sur des modèles de maladies neurodégénératives, études sur l'hybridation *in vivo* de sondes antisens et études de la diffusion de molécules injectées intracébralement couplées à des mesures électrophysiologiques. A plus long terme et au-delà des utilisations immédiates, ces recherches conduiront à des modèles expérimentaux de plus en plus sophistiqués qui pourraient donner accès, *in vivo* chez le petit animal, à des processus fondamentaux tels que l'activité enzymatique et l'activation cérébrale.

Pour en savoir plus :

Y. Charon, P. Lanièce, R. Mastripolito, R. Siebert, H. Tricoire, L. Valentin, Quantitative nuclear imaging in biology, Annales de Physique (1997), vol. 22, pp.1-60.

L. Ploux, Développement et applications de Tohr, un système original de tomographie d'émission adapté au petit animal, thèse IPNO-T-97-13.

Brevets CNRS:

Tomographe haute résolution pour l'imagerie sur des petits animaux, Brevet n° 95 07345.

Collimateurs haute résolution, Brevet n° 95 12508.

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : Groupe Interfaces physique-biologie, IPN, Orsay.

Université Paris VII : Groupe modélisation physique et interface biologie.

CEA : Service hospitalier Frédéric-Joliot, Orsay.

CNRS/SDV : Laboratoire de neurobiologie de l'apprentissage et de la mémoire, Orsay.

Nouvelles perspectives interdisciplinaires au Tandétron



Le Tandétron, un accélérateur électrostatique couplé à un spectromètre de masse, est utilisé pour l'analyse de très faibles quantités de produits radioactifs à vie longue. Une nouvelle ligne d'ions lourds étend largement les capacités du système et les premières applications à l'iode 129 ont déjà montré tout leur intérêt en océanographie et dans l'environnement.

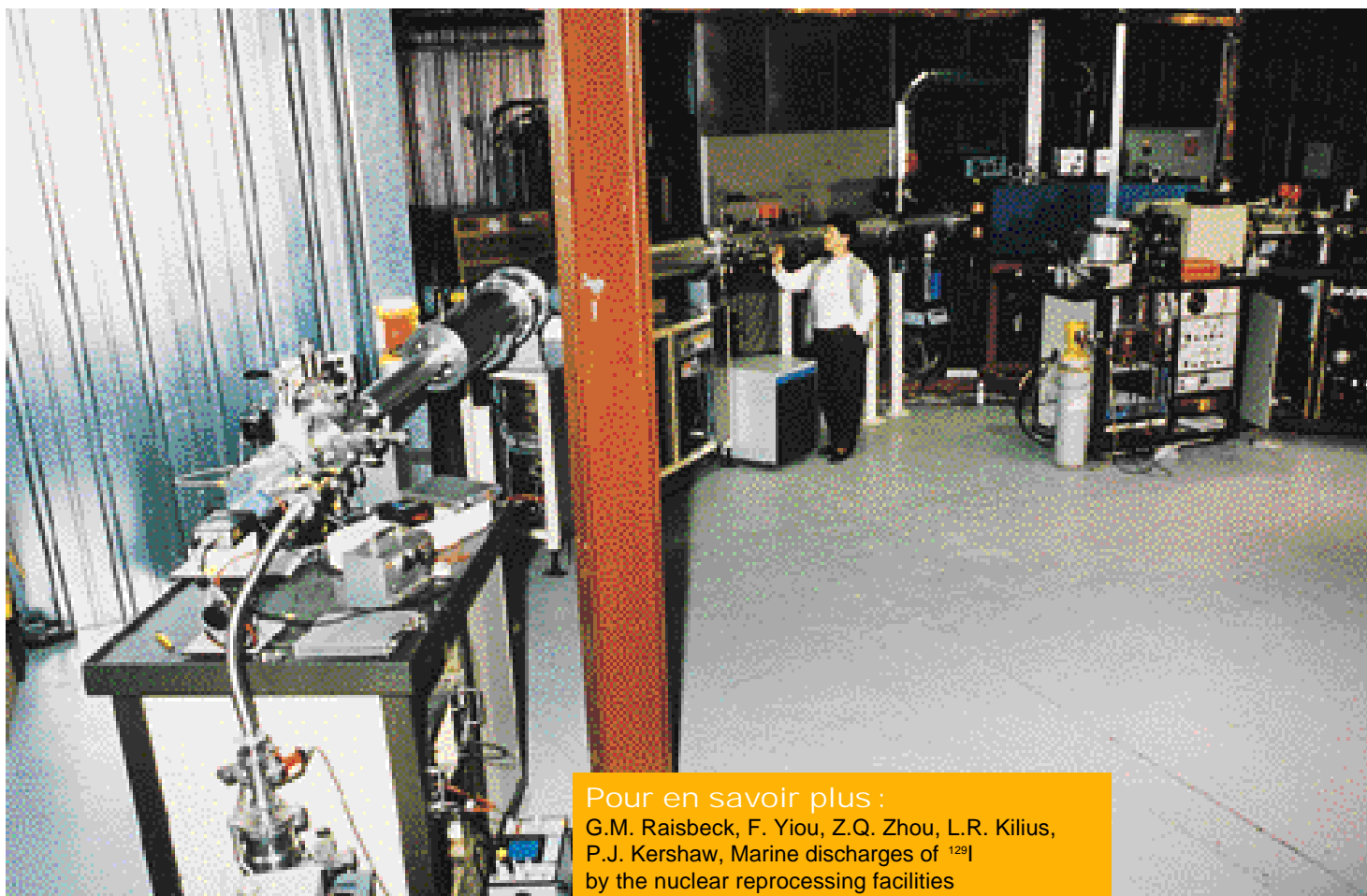
Le Tandétron, petit accélérateur électrostatique capable de mesurer, par la technique dite de spectrométrie de masse par accélérateur (SMA), de très faibles quantités d'isotopes stables ou radioactifs de période longue, s'est doté, depuis l'été 1996, d'une nouvelle ligne d'ions lourds, qui devrait permettre en principe l'analyse de tous les isotopes du tableau de Mendeleiev, ouvrant ainsi largement son champ d'étude.

Cet instrument, géré par le CNRS (IN2P3 et Insu) et par le CEA dans le cadre d'un groupement de recherche, est installé à Gif-sur-Yvette. Jusqu'à la mise en service de la ligne d'ions lourds, il servait à la détection d'isotopes relativement légers à période longue (béryllium 10, carbone 14, aluminium 26) avec lesquels il a déjà obtenu des résultats remarquables dans des domaines très divers. La technique SMA, qui permet de séparer et d'identifier les atomes de même masse (isobare) et de même numéro atomique (isotope), est en effet très nettement supérieure aux techniques classiques de comptage radioactif pour les éléments dont la période est longue.

Une des premières utilisations de cette ligne a été consacrée à l'iode 129 de période 16 millions d'années. L'élimination de l'interférence due au xénon 129 est réalisée dans la source d'ions de l'accélérateur tandis que les molécules de masse 129 sont décomposées lors de leur passage au centre de l'accélérateur. La séparation isotopique entre l'iode 129 et l'iode 127 est obtenue à un niveau supérieur à 10^{13} .

L'iode 129, du fait de sa longue période radioactive, a des effets radiologiques négligeables, mais peut se révéler un traceur extrêmement intéressant dans plusieurs domaines de l'environnement et de la santé. Rejeté dans la mer par les usines de retraitement du combustible nucléaire de la Hague et de Sellafield (en Grande-Bretagne), il a été utilisé comme traceur océanographique. Il est en effet soluble dans l'eau et se conserve dans l'océan où il va suivre tous les mouvements océaniques et permettre ainsi leur étude. Si d'autres isotopes de périodes plus courtes rejetés par ces usines, comme le césium 137 (30 ans) ou l'antimoine 125 (2,7 ans), sont étudiés depuis de nombreuses années, la diminution continue des quantités rejetées nécessite des volumes d'eau de plus en plus grands (plusieurs centaines de litres) surtout quand on s'éloigne des sources. Par contre, la SMA, avec sa sensibilité qui permet de mesurer à peine 10 millions d'atomes, offre la possibilité de détecter l'iode 129 dans une goutte d'eau de la Manche ou de la mer d'Irlande, et dans un litre d'eau dans tout l'Atlantique Nord et l'océan Arctique, une région qui joue un rôle clé dans la circulation globale de l'océan. C'est ainsi que le projet européen Esop-2 a pour objectif l'étude de la formation d'eau profonde dans la mer du Groenland et son écoulement à travers le détroit du Danemark.

D'autres applications de l'iode 129 concernent la dispersion des produits de fission nucléaire dans l'environnement lors des accidents nucléaires ou des décharges autorisées ou clandestines. Ainsi, à partir de mesures d'iode 129 effectuées dans la région de Tchernobyl après l'accident, on a pu évaluer l'impact d'autres isotopes de l'iode, à vie courte (iode 131,8 jours), dont le lien avec le cancer de la thyroïde observé chez l'enfant est maintenant admis. Dans le même ordre d'idées, des mesures d'iode 129 sont actuellement en cours dans des sédiments du fleuve Ob et la mer de Kara pour préciser les décharges d'iode radioactif provenant de l'ex-Union soviétique.



La sensibilité extrême de la SMA, développée auprès de la ligne d'ions lourds du Tandétron, a permis d'ouvrir toute une gamme de nouvelles applications de l'iode 129. Il est possible maintenant d'envisager la détection d'autres isotopes radioactifs de période longue tels que les actinides, le technétium 99, le calcium 41, ce qui conduirait à de nouveaux axes de recherche dans les domaines de l'environnement, des sciences de la terre et des sciences de la vie.

Pour en savoir plus :

G.M. Raisbeck, F. Yiou, Z.Q. Zhou, L.R. Kilius, P.J. Kershaw, Marine discharges of ^{129}I by the nuclear reprocessing facilities of La Hague and Sellafield, Radioprotection, 32, C2, 91-96, 1997.

F. Yiou, G.M. Raisbeck, Z.Q. Zhou, L.R. Kilius, ^{129}I in the Mediterranean sea, Radioprotection, 32, C2, 105-108, 1997.

Collaborations :

CNRS/IN2P3 : CSNSM.

Programme européen : European Sub-polar Ocean Program (Esop II).

Biélorussie : Laboratoire de radioécologie de l'air, Minsk .

Norvège : Institut des techniques de l'énergie, Kjeller.

Grande-Bretagne : Ministère de l'Agriculture, Lowestoft.

États-Unis : Institution océanographique, Woods Hole.

*Vue générale du Tandétron, avec sa nouvelle ligne d'ions lourds.
© CNRS/IN2P3/
J. Pennec.*

La détection des très faibles radioactivités à Modane

Physique des neutrinos, recherche de matière noire : pour détecter des particules qui ont si peu d'interactions, il faut se placer dans un laboratoire souterrain, à l'abri des rayonnements cosmiques.

Il faut aussi s'affranchir au maximum de la radioactivité. Les spectromètres gamma bas bruit de fond installés à Modane permettent de mesurer des taux de radioactivité de cinq ordres de grandeur inférieurs à ceux d'une radioactivité naturelle moyenne.

Qu'elles soient liées aux études des propriétés du neutrino (double désintégration bêta, oscillations, neutrinos solaires) ou aux recherches sur la nature de la matière noire dans l'Univers (scintillateurs ou bolomètres), ces expériences de physique ont toutes en commun de rechercher un signal rare et de basse énergie (de quelques keV à environ 3 MeV), donc dans le domaine d'énergie de la radioactivité naturelle. Elles ne peuvent être entreprises que si les trois conditions suivantes sont réunies :

- être placées dans un laboratoire souterrain suffisamment profond pour diminuer ou supprimer tout effet du rayonnement cosmique et des neutrons associés ;
- être entourées d'un blindage passif (Pb, Cu, eau, paraffine) suffisamment effectif pour atténuer les flux de rayonnements γ et de neutrons de l'environnement ;
- être construites avec des matériaux «ultrapurs» du point de vue de leur teneur en isotopes radioactifs.

En fait, tout matériau peut être considéré comme radioactif - avec, bien sûr, des teneurs variables - car il peut contenir des isotopes naturels (^{40}K , U, Th, Ra et leurs des-

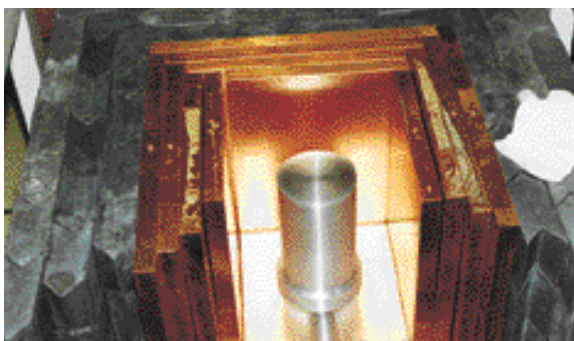
endants), des isotopes cosmogéniques (créés par le rayonnement cosmique tels que ^3H , ^7Be , ^{14}C , ^{54}Mn ...), des isotopes provenant d'activités humaines (^{60}Co , ^{137}Cs ...). D'autre part, si le taux moyen de radioactivité naturelle se situe autour de 10 becquerels par kg (^{226}Ra), les contraintes de bruit de fond des expériences de physique en laboratoire souterrain imposent des taux de trois à cinq ordres de grandeur plus faibles suivant le rôle et la disposition du matériau dans le détecteur.

Des activités aussi faibles ne sont actuellement mesurables, par technique non destructive, que par spectrométrie gamma à ultrabas bruit de fond. Développée depuis quelques années au Laboratoire souterrain de Modane (LSM), cette technique vise à construire des spectromètres au germanium de grand volume (400 cm³ ou plus) et de bruit de fond le plus faible possible. Cela impose la construction de cryostats spéciaux à partir de matériaux sélectionnés, la réalisation de blindages performants en plomb (on utilise du plomb très peu radioactif provenant de navires romains retrouvés lors de fouilles archéologiques!) et en cuivre de haute pureté, et des dispositifs spéciaux antiradon, antineutrons. Aujourd'hui, une sensibilité de 10⁻³ Bq/kg peut aisément être obtenue au Laboratoire de Modane avec un échantillon de quelques centaines de grammes et une quinzaine de jours de comptage. La limite ultime de sensibilité se situe autour de 10⁻⁴ Bq/kg. Cette activité limite correspond à une concentration d'environ 10⁻¹⁸ g/g de ^{226}Ra .

Réalisés en collaboration avec le Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette et un industriel français, ces détecteurs bas bruit de fond sont maintenant disponibles commercialement et largement utilisés dans d'autres disciplines, notamment pour le contrôle de l'environnement, l'océanographie et la géologie.

Spectromètre germanium en cours d'installation au LSM.

Le cristal de germanium (400 cm³) est maintenu sous vide dans un cryostat d'aluminium de très haute pureté, visible au centre de la photo. Le blindage est constitué, de l'extérieur vers l'intérieur, de 15 cm de plomb standard et de 10 cm de cuivre pur. L'espace entre le cuivre et le cryostat est comblé par environ 6 cm de plomb archéologique. Crédit: IN2P3.



Pour en savoir plus :

R. Gurriaran, Développement de la spectrométrie γ ultrabas bruit de fond au Laboratoire souterrain de Modane. Application aux décroissances double bêta, thèse, Bordeaux I, 1996.

Laboratoires travaillant dans le domaine des faibles radioactivités :

CNRS/IN2P3 : CENBG.

CNRS/CEA : ex-Centre

des faibles radioactivités, Gif-sur-Yvette.

Remerciements

Introduction

Hubert Flocard

Gérard Fontaine

Faits marquants

Serge Della-Negra

Michel Genet

Laurent Tassan-Got

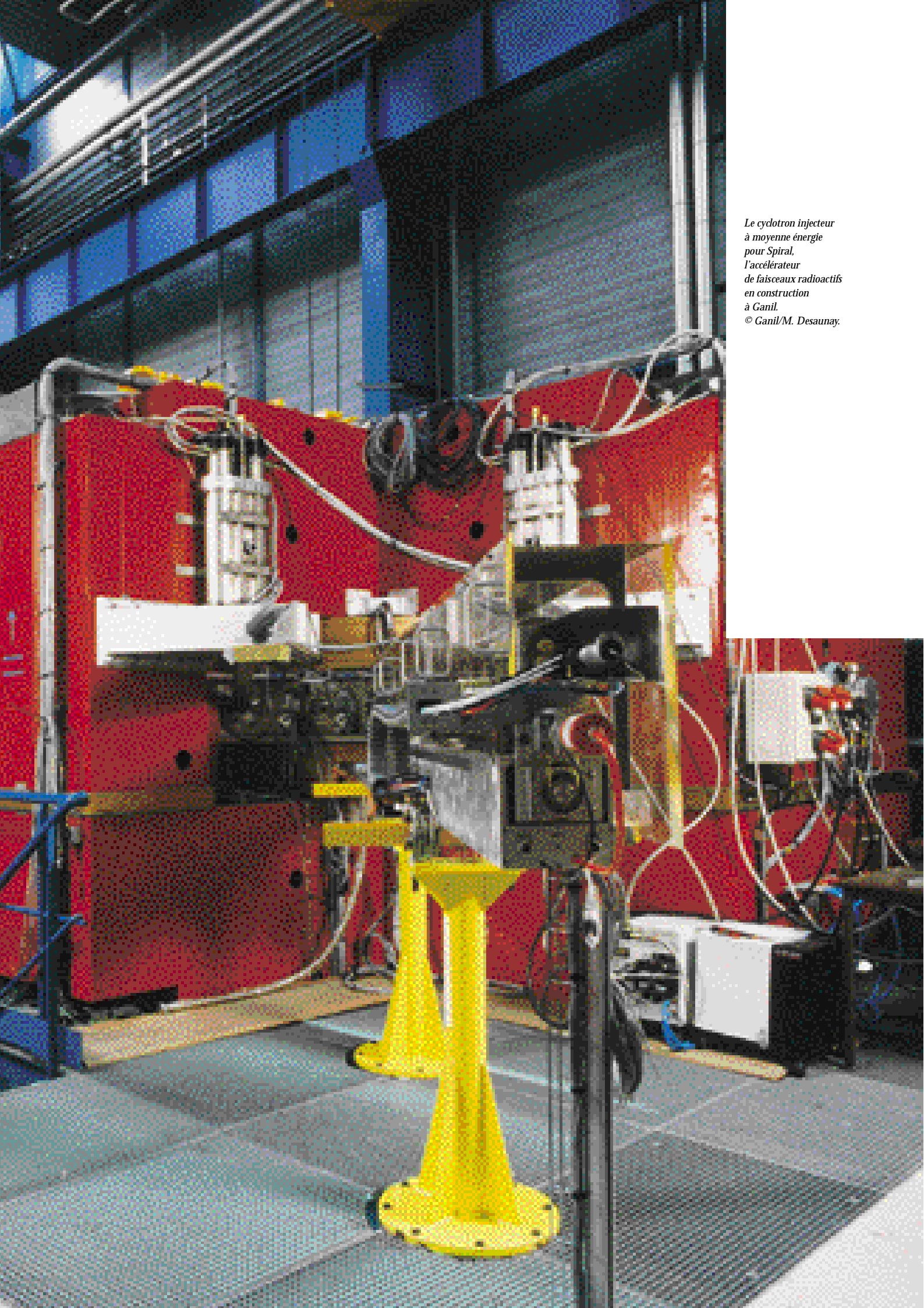
Philippe Moretto

Roland Matrippolito

Françoise Yiou

Grant Raisbeck

Philippe Hubert



*Le cyclotron injecteur
à moyenne énergie
pour Spiral,
l'accélérateur
de faisceaux radioactifs
en construction
à Ganil.
© Ganil/M. Desauy.*

Technologie des accélérateurs et des détecteurs

A l'IN2P3, le terme « instrumentation » caractérise aussi bien les accélérateurs de particules que les détecteurs. Chacun de ces deux domaines comprend une variété importante de technologies possibles. Le spectre d'intervention dans l'instrumentation des physiciens et personnels techniques de l'IN2P3 est donc extrêmement étendu. La lecture des faits marquants, pour la période considérée, le démontre aisément : cela va de l'aimant d'Agor, pièce mécanique extrêmement précise de 350 tonnes au micro-circuit pipe-line analogique de 26 mm², intégrant 25 000 transistors en technologie DMILL et dont le poids n'atteint pas le gramme.

De plus, cette variété importante dans les réalisations de l'Institut doit se conjuguer avec le fait que l'Institut fonctionne en ingénierie distribuée dans laquelle les compétences sont réparties dans tous les laboratoires, sans qu'il y ait réellement de pôle de compétences.

Les deux exemples cités ci-dessus représentent les extrémités du spectre des technologies utilisées dans l'IN2P3. Ce rapport d'activité reprend, thème par thème, les domaines d'intervention de nos ingénieurs et techniciens.

Agor tient
ses promesses
page 112

Des circuits
électroniques
durcis aux
radiations
page 133

La mécanique

Aujourd'hui les pièces mécaniques, notamment hors des standards, ne peuvent être conçues qu'avec des calculs de structure et thermiques d'une extrême sophistication. Bien évidemment, cela demande que les ingénieurs IN2P3 concernés maîtrisent les codes aux éléments finis nécessaires. Au cours des quatre dernières années, un nombre croissant d'ingénieurs s'est familiarisé avec ces codes, et le calcul de structure est maintenant une technique standard dans l'Institut.

La cryogénie

L'instrumentation cryogénique du LHC
page 121

Elle est indispensable car les accélérateurs supraconducteurs fonctionnent soit à 4,2 K (hélium liquide), soit à 1,8 K (hélium superfluide) : l'Institut conduit avec le CEA une collaboration dans ce domaine. La cryogénie est aussi nécessaire pour les calorimètres à argon liquide des détecteurs dans lesquels la participation de l'Institut est primordiale et pour les bolomètres où la température doit descendre à quelques millikelvin. L'IN2P3 a renforcé son potentiel de conception dans ce domaine en créant un véritable pôle de compétence dans un laboratoire car les investissements à faire et la charge de travail en cryogénie n'impliquent pas une distribution de cette activité dans tout l'Institut.

Les sources d'ions ou d'électrons

Des ions radioactifs monochargés aux ions multichargés
page 120

Leur maîtrise est essentielle au bon fonctionnement et surtout à l'amélioration des performances des accélérateurs. Un tel équipement comprend lui-même un grand ensemble de techniques : vide, magnétisme, hyperfréquences. Les faisceaux exotiques demandent, pour leur part, des développements importants de sources multiétages où l'ion est d'abord ionisé une fois, puis épluché dans une source à résonance cyclotronique électronique : l'efficacité de ces sources est directement liée au rendement général de l'accélérateur.

Selpo :
une source d'électrons polarisés
page 119

Candela, un petit accélérateur aux impulsions de courant ultrabrèves
page 114

Les dispositifs d'accélération des particules

L'accélération de particules par laser dans un plasma
page 118

Les plus connus, mais pas forcément les plus simples, consistent à envoyer une onde haute fréquence de puissance dans des cavités « chaudes » ou supraconductrices avec tous les problèmes posés par l'extraction des modes parasites et l'entrée de la puissance HF dans la cavité. Là encore un grand nombre de technologies sont mises en œuvre, notamment des connaissances en métallurgie. L'IN2P3 a aussi montré la possibilité d'accélérer les particules par des champs électriques créés par battement d'onde entre deux lasers. Enfin, pendant la période couverte par ce rapport, l'Institut, en collaboration avec le CEA, a mené à bien un projet d'accélérateur : Spiral, accélérateur de faisceaux radioactifs, délivre ses premiers faisceaux en 1998.

Un injecteur pour les accélérateurs du futur
page 115
Cavités supraconductrices pour accélérateurs
page 116

Les détecteurs (capteurs)

Les technologies mises en œuvre sont là aussi très diverses, mais on peut voir quatre grandes voies de développement :

Les chambres gazeuses à micropistes
page127

- les détecteurs du type multiplication dans des champs électriques dont la chambre proportionnelle multifils est un exemple déjà ancien. Ces détecteurs sont maintenant soit du type chambre à trous (Micromegas, GEM, CAT), soit du type microgap (MSGC, MGC, etc.) mais la mise au point de micropistes sur des substrats isolants reste une difficulté. L'Institut a travaillé sur ces types de détecteurs dans les quatre dernières années;

Développement de détecteurs pour Alice
page122

Les détecteurs à pixels
page 131

- les détecteurs à pixels directement inspirés des technologies microélectroniques;

Les absorbeurs du calorimètre à argon liquide d'Atlas
page 124

- les cristaux scintillateurs pour lesquels l'obtention de matériaux de qualité constante, tenant aux radiations et pas trop fragiles, a été un grand défi technologique, aujourd'hui presque résolu;

Un cristal de tungstate de plomb pour le calorimètre électromagnétique de CMS
page125

- les détecteurs à liquide (argon liquide) dont la volonté d'augmenter l'efficacité pose aussi des problèmes complexes de mécanique et de thermique.

L'électronique

Elle constitue une technologie clé des expériences en physique subatomique. Il faut en effet conjuguer des caractéristiques très éloignées comme l'immunité aux radiations, les dimensions les plus petites possibles pour être au plus près du détecteur, ce qui implique des circuits intégrés, de grandes vitesses (40 MHz en écriture pour les détecteurs du LHC) avec une dynamique de 16 bits si possible, et un niveau de bruit extrêmement faible. Ces circuits électroniques peuvent être analogiques ou numériques et requièrent un personnel de très haut niveau pour leur mise au point. Au cours de ces dernières années, il y a donc eu une augmentation très importante des compétences du personnel technique de l'IN2P3 dans ce domaine des circuits intégrés et particulièrement des Asic analogiques.

Des circuits électroniques durcis aux radiations
page133
L-neuro: un circuit intégré imitant les réseaux de neurones
page136

Bien d'autres technologies devraient être citées ici, plus proches des instruments. La période concernée par ce rapport d'activité a vu un renforcement de la compétence des personnels dans ces domaines avec un accroissement progressif et voulu des tâches de conception au détriment des tâches de production.

Agor tient ses promesses

Agor, petit cyclotron supraconducteur aux caractéristiques originales, est le fruit d'une collaboration scientifique et technique exemplaire entre physiciens néerlandais et français. Depuis son premier faisceau, délivré à Orsay en 1994, il a été démonté puis réinstallé à Groningue. Avec le spectromètre magnétique BBS, la physique a démarré à l'été 1996 et depuis lors, l'accélérateur a délivré de nombreux faisceaux d'ions dans d'excellentes conditions de reproductibilité et de fiabilité.

Le 12 avril 1994, l'accélérateur Agor délivre son premier faisceau à l'Institut de physique nucléaire (IPN) d'Orsay. Baptisé Agor, pour Accélérateur Groningue-Orsay, il est l'aboutissement d'un projet né en 1985 d'une conjonction d'intérêts entre physiciens néerlandais et français. L'accord signé en 1986 entre le FOM (Foundation for Fundamental Research on Matter) et l'IN2P3 prévoyait un financement néerlandais de 100 MF et une construction par des physiciens et ingénieurs français de l'IPN d'Orsay qui avaient proposé le concept de cet accélérateur. Il a été effectivement construit à un coût et dans des délais très proches de ceux convenus dans cet accord.

De 1986 à 1994, le groupe de projet de 30 à 50 personnes environ a conçu, construit et testé ce cyclotron supraconducteur (le premier en Europe) aux caractéristiques ori-

ginales. De petite taille (4,4m de diamètre, 3,6 m de hauteur), peu gourmand en énergie (1 MW installé), il est le seul de ce type au monde capable de fournir toute la gamme des faisceaux d'ions, des plus légers (l'hydrogène) aux plus lourds (uranium), dans une très large gamme en énergie (200 MeV pour les protons et 6 MeV par nucléon pour les ions lourds) grâce à un champ magnétique intense et variable de 4 à 1,7 teslas fourni par des bobines supraconductrices en Nb-Ti refroidies à 4 K.

Un mois après le premier faisceau, débute le démontage des 350 tonnes d'acier usiné et des dizaines de sous-systèmes de l'accélérateur qui doit être transporté et réassemblé sur son site d'exploitation définitif, le laboratoire du Kernsfysich Versneller Institute (KVI) à Groningue (Pays-Bas). Cette opération complexe et délicate, prévue de longue date, se passe sans incident et dix-huit mois plus tard, en octobre 1995, Agor est à nouveau opérationnel au KVI et son premier faisceau de particules alpha à 200 MeV est produit avec des paramètres de l'accélérateur identiques à ceux obtenus précédemment.

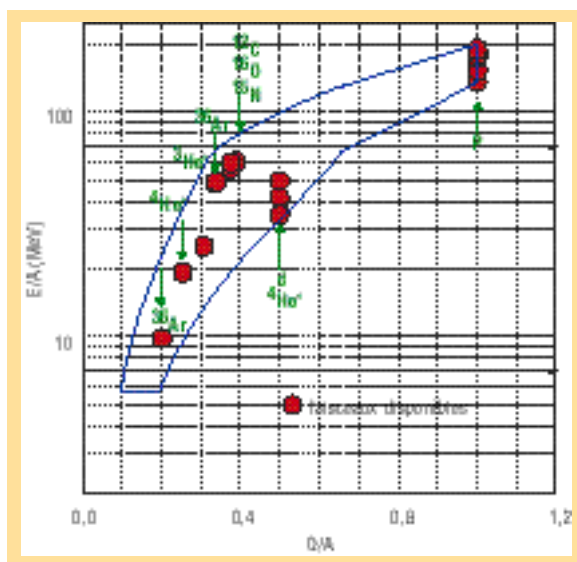
Les six premiers mois de l'année 1996 sont consacrés à la mise au point fine de tous les sous-systèmes, à la mise en service des lignes optiques de conduite, aux diagnostics de faisceau vers le hall expérimental et au développement des nouveaux faisceaux d'ions nécessaires aux premières expériences de physique.

Durant la même période (1994-1996), les physiciens du KVI et de l'IPN d'Orsay préparent et réalisent l'instrument expérimental principal de la nouvelle installation: un spectromètre magnétique à grande acceptance en impulsions BBS. Le plan focal de BBS sera équipé de détecteurs à fils construits par l'équipe française.

La physique démarre à l'été 1996, grâce à la disponibilité d'un faisceau de protons polarisés de 190 MeV. Dès les premières semaines d'exploitation, Agor tient toutes ses promesses en délivrant ce faisceau dans des conditions très proches des limites supérieures fixées dans le cahier des charges initial.

L'inauguration officielle du démarrage du programme scientifique d'Agor a lieu le 16 janvier 1997 à Groningue. Au cours de cette même année, de nombreux faisceaux nouveaux ont été accélérés et utilisés par les physiciens avec une variété d'ions (proton, deuton, hélium, ^{16}O , ^{15}N , ^{36}Ar) à d'autres énergies, démontrant que le diagramme

Énergie en fonction du rapport de la charge (Q) à la masse (A), des ions accélérés par Agor entre juin 1996 et décembre 1997. 15 faisceaux ont été produits depuis des protons à 190 MeV jusqu'à ^{36}Ar à 10 MeV/n. Les limites d'Agor sont indiquées par le trait continu bleu.





*Le cyclotron, supraconducteur Agor à Groningue.
© Picture Report.*

opérationnel prévu peut être atteint. Dans cette première année d'exploitation, les performances d'Agor sont plutôt prometteuses. L'efficacité d'injection, la transmission et l'extraction des ions sont excellentes. Il existe un excellent accord entre les paramètres calculés de l'accélérateur et les valeurs mesurées expérimentalement, ce qui permet un développement très rapide de nouveaux faisceaux. La reproductibilité dans le temps de ces résultats est très bonne.

Deux campagnes de mesures d'environ dix jours chacune, avec un faisceau de particules alpha de 200 MeV, ont permis de valider la détection du plan focal de BBS et d'étudier les états nucléaires géants dans le continuum.

Les statistiques de temps disponible pour la physique pour cette première année montrent que sur les 6000 heures programmées, 36 % ont été utilisées pour la physique, 15 % pour la maintenance et 14 % pour le développement. Le taux de panne est passé de 38 % avant l'été 1997 à 7 % durant le dernier mois de l'année.

Tous ces éléments montrent que le laboratoire du KVI dispose maintenant avec Agor d'un accélérateur performant et de plus en plus fiable, à la pointe des connaissances techniques du domaine. Une installation qui ne manquera pas de se faire remarquer dans le réseau européen des machines de physique nucléaire.

Pour en savoir plus :

Site Web:

[http://www.kvi.nl/disk\\$1/agorcalc/www/agorhome.htm](http://www.kvi.nl/disk$1/agorcalc/www/agorhome.htm)

Laboratoires de la collaboration:

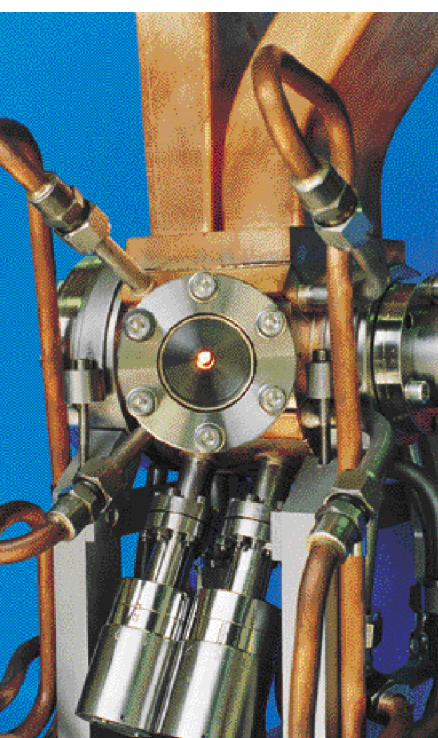
CNRS/IN2P3: IPN, Orsay.

Pays-Bas: KVI, Groningue.

Candela, un petit accélérateur aux impulsions de courant ultra-brèves

Un laser femtoseconde pour produire des impulsions de courant d'électrons ultra-brèves, un fort champ électrique accélérateur, telles sont

les caractéristiques de Candela, un petit accélérateur qui peut trouver en particulier des développements en chimie, pour les cinétiques ultrarapides.



Canon RF avec hublot
d'entrée du laser.
Crédit: IN2P3.

Candela est un petit accélérateur dont la caractéristique principale est d'avoir un canon radio-fréquence (RF) déclenché par un laser femtoseconde afin de produire des impulsions de courant d'électrons ultrabrèves. L'autre caractéristique, non moins importante, est le fort champ électrique accélérateur sur l'axe du canon pour limiter les effets de charge d'espace à très fort courant crête.

L'année 1995 a été marquée par les premières expériences de faisceau dans les conditions suivantes :

- un champ accélérateur moyen de l'ordre de 70 MV/m dans les deux cellules du canon RF. Bien que de précédents essais aient montré la possibilité d'atteindre 100 MV/m, il est apparu ensuite plus raisonnable

de fonctionner nettement plus bas pour limiter le courant dit «d'obscurité» dû à l'émission de champ sur les parois;

- un laser femtoseconde (300-500 fs) opérationnel dans l'UV avec des impulsions de l'ordre de 150 μ J. Le laser est asservi au pilote HF pour fournir des impulsions stables dans le temps;

- une photocathode dite «imprégnée», comme celles utilisées dans les canons thermo-ioniques avec un rendement quantique proche de 10^{-3} et une durée de vie de l'ordre de 10 heures, avec la possibilité de régénérer les propriétés initiales en quelques minutes par chauffage à 800 degrés. Au cours de ces essais, la charge maximale produite et accélérée a été de 2 nC par impulsion.

Les années 1995 et début 1996 ont été pour l'essentiel

consacrées à la mise en œuvre de l'instrumentation de faisceau nécessaire à la caractérisation des performances de Candela:

- mesureur d'émittance du faisceau appelé «pepper-pot» et son système d'acquisition à partir d'une caméra CCD;

- mesureur de longueur des paquets: il comprend un cristal qui, sous l'impact du faisceau d'électrons, produit un rayonnement Cerenkov. Ce dernier est transporté sur la fente d'une caméra à balayage de fente dont la résolution temporelle est d'environ 2 ps;

- mesure de la dispersion en énergie du faisceau derrière l'aimant dipolaire d'analyse suivi d'une fente et d'un mesureur de courant.

Cette campagne de mesures systématiques a permis de valider le concept de Candela et de mettre en évidence des défauts de stabilité, tels que des fluctuations et des dérives lentes de la phase entre laser et champ RF. Un effort particulier a donc été entrepris du point de vue des asservissements. Parallèlement, des modifications ont été apportées à la détermination des paramètres du transport de faisceau après la sortie du canon pour optimiser le flux de photons de lumière Cerenkov et donc la sensibilité de la mesure de longueur des paquets. Cette campagne s'est arrêtée à la mi-1997 à cause d'un incident qui s'est produit dans le canon et qui a nécessité un nettoyage particulier de la surface interne des cellules accélératrices, un changement de la cathode et un reconditionnement du canon en radio-fréquence.

Cependant, au vu des résultats expérimentaux, la réalisation du projet Elyse, pour des études de cinétique ultrarapide en chimie, apparaît comme une application directe du développement de Candela. Cette réalisation, qui devrait durer deux ans, permettra d'une part le passage d'un dispositif expérimental à un prototype pour des applications diverses, qui pourrait à terme faire l'objet d'un transfert de technologie, et d'autre part le maintien d'une expertise utile aux développements en cours et à venir pour les collisionneurs linéaires de très hautes énergies.

Pour en savoir plus :

Ch. Travier, Étude, réalisation et expérimentation d'un canon hyperfréquence déclenché par un laser subpicoseconde (Candela), thèse, Orsay, 1995.

Un injecteur pour les accélérateurs du futur

Pour préparer la prochaine génération des accélérateurs linéaires d'électrons, le projet TTF, Tesla Test Facility, est en cours d'installation à Desy, à Hambourg. Son but: valider le concept d'un accélérateur à une énergie de 10^{12} eV. Les laboratoires français ont été chargés de la conception et de la construction de la première phase de l'injecteur.

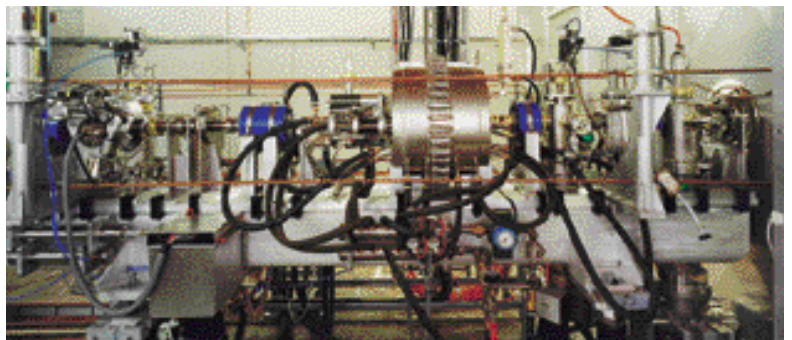
L'ambition de la prochaine génération des accélérateurs linéaires d'électrons est d'atteindre le teraélectron-volt (10^{12} eV), ce qui n'est pas sans poser de redoutables défis technologiques. Dans le but de valider le concept d'un accélérateur baptisé Tesla (Tera Electron-volt Superconducting Linear Accelerator), le laboratoire Desy, à Hambourg, est à l'origine d'une collaboration internationale pour construire le Tesla Test Facility (TTF). Cet accélérateur comprend un injecteur d'électrons de 10 MeV, trois cryomodules de 12 m de long comportant chacun un empilage de huit cavités supraconductrices à 1,3 GHz et une aire d'analyse à haute énergie pour mesurer les propriétés du faisceau accéléré. Dans cette collaboration, les laboratoires français se sont chargés d'étudier et de construire l'injecteur nécessaire pour les premiers essais de faisceau de l'accélérateur TTF.

L'injecteur se compose d'un canon à électrons thermioniques de 250 keV, d'un prégroupéur subharmonique (216,7 MHz), d'une cavité de « capture » supraconductrice et son cryostat associé, d'un spectromètre pour vérifier les caractéristiques du faisceau d'électrons, et enfin, d'une ligne de transport pour adapter le faisceau à l'accélérateur TTF. L'injecteur est entièrement équipé de dispositifs d'analyse du faisceau auxquels s'ajoute un système informatique permettant le contrôle complet de ces opérations.

Après la période d'étude en 1993, les différents sous-ensembles de l'injecteur ont été construits en 1994/1995. En avril 1995, le canon haute tension fournit un premier faisceau à 250 keV lors de ses essais en France, puis l'installation de l'injecteur sur le site de Desy commença en janvier 1996. La cavité supraconductrice, dernière pièce de l'injecteur à être livrée à Hambourg, est du même type que celles utilisées sur l'accélérateur TTF. Des mesures

dans un cryostat horizontal à Desy ont montré qu'elle pouvait accepter des gradients accélérateurs supérieurs à 20 MeV/m. La cavité a alors été installée dans son cryostat (Cryocap) à Orsay et, après des essais couronnés de succès tant en cryogénie qu'en puissance RF, elle a été envoyée à Desy en décembre 1996. La réception de l'injecteur au complet a eu lieu en 1997. La première accélération à travers la cavité de capture, achevée extrêmement rapidement, a été suivie d'une intense période de réglage des phases et amplitudes des cavités RF pour optimiser les performances de l'injecteur. Des mesures ont ensuite été faites pour vérifier que les caractéristiques du faisceau 0ances de l'injecteur, l'installation du premier des cryomodules de 12 m a été réalisée au printemps 1997. Le premier faisceau a été accéléré à travers le module le 29 mai: le gradient moyen pour les cavités est de 16,7 MeV/m, alors qu'initialement on souhaitait atteindre 15 MeV/m. Des études systématiques sur l'accélérateur TTF seront effectuées en 1998. Les deuxième et troisième modules devraient pouvoir être installés avant la fin 1998.

*La ligne 250 keV
de l'injecteur de TTF
avec sa cavité
de pré-groupement.
© Desy.*



Pour en savoir plus :

T. Garvey et al., First Beam Tests of the TTF Injector, Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference (Vancouver).

Site Web: <http://tesla.desy.de/>

Laboratoires français de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : LAL ; IPN, Orsay.

CEA/DSM : Dapnia.

Cavités supraconductrices pour accélérateurs

La prochaine génération d'accélérateurs pour la physique des hautes énergies sera vraisemblablement celle des collisionneurs linéaires. Il y a là quelques défis technologiques à résoudre: les cavités supraconductrices peuvent apporter des solutions performantes.

Pour deux raisons, le LHC, actuellement en construction au Cern, est sans doute le dernier collisionneur circulaire en physique des hautes énergies. En effet, les pertes d'énergie liées au rayonnement synchrotron d'une part, la nature composite des protons d'autre part font que les recherches s'orientent plutôt vers la conception d'un collisionneur linéaire électron-positon: linéaire pour éviter le rayonnement synchrotron, électron-positon car ces collisions ont l'avantage de conduire à des interactions plus aisées à interpréter.

Dans une première phase, on vise une énergie de collision de 500 GeV dans le centre de masse pour atteindre 1 TeV dans une seconde phase.

Plusieurs projets d'accélérateurs, dont les principes sont basés soit sur des cavités en cuivre soit sur des cavités supraconductrices, sont actuellement dans une phase de R&D à travers le monde: NLC, soutenu par les États-Unis et le Japon, Clic au Cern, et le projet Tesla promu par Desy à Hambourg. Ce dernier projet met en œuvre des cavités supraconductrices à 1,3 GHz.

Depuis quatre ans, des laboratoires de l'IN2P3/CNRS et de la DSM/CEA se sont associés pour conduire des actions de R&D dans ce domaine. La réalisation d'une installation de test et de démonstration de faisabilité, TTF (Tesla Test Facility), à Hambourg, qui a débuté en 1993, se poursuit actuellement. Ces laboratoires ont pris

en charge l'étude et la réalisation de l'injecteur de TTF comportant une cavité supraconductrice en niobium dont la réalisation a été confiée à la société française Cerca. Cet injecteur, testé au début de 1997, a fonctionné à 17 MV/m.

D'autres programmes de R&D sont en cours également dans ces laboratoires en vue d'améliorer les composants critiques des accélérateurs: coupleurs de puissance et cavités en niobium.

Cependant, si au cours de ces dernières années, les performances concernant les gradients accélérateurs n'ont cessé de s'améliorer pour atteindre aujourd'hui 25 MV/m, le coût de fabrication des cavités reste à un niveau de prix élevé. Un effort technologique est actuellement en cours dans le but essentiel de diminuer le coût de réalisation: essais d'hydroformage, de formage à chaud, de techniques de projection plasma de cuivre sur des tôles minces en niobium...

Ces recherches ne bénéficient pas uniquement à la mise au point d'accélérateurs linéaires d'électrons ou de positons; elles peuvent aussi s'appliquer aux accélérateurs linéaires de protons à forte intensité. On peut en voir ainsi des applications, notamment pour le traitement des déchets nucléaires, aux réacteurs sous-critiques qui mettent en œuvre également des cavités supraconductrices en niobium. Bien que la forme et la fréquence de ce type de cavités soient différentes de celles qui concernent les collisionneurs e^+e^- , les développements technologiques concernant la mise en forme de tubes de niobium sans soudures ou de projection plasma pourront être d'un grand intérêt pour ces accélérateurs de protons.

L'objectif de la collaboration pour les trois années à venir est de rechercher les meilleures solutions pour réaliser des cavités supraconductrices performantes à la fois sur le plan des forts gradients et sur le plan économique.

Cavité supraconductrice
9 cellules 1,3 GHz.
Crédit: IN2P3.



Laboratoires de la collaboration:
CNRS/IN2P3: IPN, Orsay; LAL.
CEA/DSM: Dapnia.

Elfe à Desy : une synergie nécessaire dans la construction d'accélérateurs



La nécessité de disposer d'accélérateurs toujours plus performants, tant en physique nucléaire qu'en physique des particules, conduit les physiciens à optimiser leurs efforts. C'est ce que recouvre la proposition d'utiliser les installations du Deutsches Elektronen-synchrotron (Desy) en Allemagne, où deux projets pourraient être associés: Elfe, accélérateur à faisceau continu d'électrons, et Tesla, collisionneur électron-positon. Un groupe d'étude composé de physiciens européens a évalué très positivement le projet Elfe à Desy.

L'idée du projet Elfe (Electron Laboratory for Europe) à Desy est de produire des faisceaux continus d'électrons de 15 à 30 GeV pour l'étude de la structure du nucléon, en tirant parti de deux installations majeures qui pourraient exister auprès de cette installation allemande dans les prochaines années: l'anneau à électrons de 30 GeV du collisionneur circulaire électron-proton déjà en fonctionnement (Hera) et le linac (accélérateur linéaire) du collisionneur linéaire électron-positon Tesla de 500 GeV, actuellement à l'étude dans le cadre d'une collaboration internationale.

Dans ce but, il a été suggéré d'utiliser Hera comme anneau de lissage pour transformer en faisceau continu le faisceau lentement pulsé qui pourrait être délivré par une fraction du linac de Tesla, alors employé comme injecteur. Une telle possibilité tient au fait que le linac fonctionne avec un faible cycle utile (0,4 %) en mode collisionneur et qu'il est donc disponible pour une autre utilisation durant les 200 ms environ qui séparent les trains d'électrons accélérés jusqu'à 250 GeV.

Le principe de la solution proposée est le suivant: des paquets d'électrons, produits à une cadence de 10 Hz par Tesla, sont accumulés dans Hera durant 800 μ s grâce à un procédé d'injection multitours. Puis, une fois stocké, le faisceau est lentement extrait en 100 ms environ en utilisant une optique non linéaire qui induit une instabilité contrôlée du mouvement des électrons (extraction résonante). L'opération est renouvelée quand l'anneau est vidé. En 1995, suite aux recommandations du comité NuPECC (Nuclear Physics European Collaboration Committee), un groupe d'étude composé de physiciens européens a

été mis en place afin d'analyser la faisabilité de l'injection du faisceau de Tesla dans Hera et d'évaluer les performances du faisceau extrait en termes d'émission, de dispersion en énergie et de cycle utile.

Ce groupe de travail a pu trouver des solutions à plusieurs questions particulièrement importantes comme la structure optique de l'anneau, la méthode d'injection et d'extraction, le système de cavités radio-fréquences ou encore l'optimisation de la structure en temps du faisceau. Le contrôle des instabilités cohérentes du faisceau de 150 mA qui doit être stocké dans Hera a semblé délicat mais possible, moyennant l'installation de systèmes de contre-réaction semblables à ceux qui sont développés pour les besoins des usines à beauté auprès de Slac aux États-Unis et de KEK au Japon.

Les résultats de simulation de l'extraction ont montré qu'il était possible de délivrer un faisceau de 30 μ A avec un cycle utile voisin de 85 % dans une gamme d'énergie de 15 à 25 GeV. La résolution en énergie à 15 GeV a été estimée à environ 10^{-3} en supposant que toutes les imperfections de la machine puissent être corrigées. Les questions relatives à l'implantation du linac dans l'environnement de Hera n'ont été qu'effleurées mais des solutions réalistes ont néanmoins été envisagées. Au terme de son travail, le groupe d'étude a donc conclu qu'il était possible d'utiliser Hera en association avec Tesla pour produire des faisceaux d'électrons satisfaisant les exigences du programme expérimental du projet Elfe.

Pour en savoir plus :

The machine project for Elfe at Desy, in Proc. of the Second Elfe Workshop on Hadronic Physics, Saint-Malo, France, 23-27 September, 1996, Nucl. Phys. A622 (1997), n° 1, 2.

Laboratoires impliqués dans l'étude du projet Elfe à Desy :

CNRS/IN2P3 : ISN.

CNRS/CEA : LNS.

CEA/DSM : Dapnia.

Allemagne : Desy, Hambourg;

Université de Bonn.

Pays-Bas : NIKHEF, Amsterdam.

Italie : INFN, Frascati.

L'accélération de particules par laser dans un plasma



De nouvelles méthodes d'accélération qui permettraient de réaliser des accélérateurs plus puissants et plus compacts sont à l'étude: l'accélération dans un plasma par battement d'ondes ou par sillage laser semblent particulièrement prometteuses.

La salle d'expériences au Laboratoire des solides irradiés (SESI) à Palaiseau. De gauche à droite, le spectromètre à électrons, l'enceinte d'interaction électron-laser et l'enceinte à vide du système compresseur d'impulsions. Au premier plan, les miroirs dirigeant le faisceau laser vers l'enceinte de compression.
© CNRS/
G. Matthieussent.

Dans les accélérateurs de particules actuels, les champs électriques sont limités, entre autres par des problèmes de claquage, à des valeurs inférieures à 100 MV/m. Pour réaliser des accélérateurs plus compacts il est nécessaire de savoir produire des champs électriques beaucoup plus élevés. Les lasers de puissance actuels permettent de produire des champs électriques nettement supérieurs à 100 GV/m; malheureusement le caractère transverse de ces ondes ne permet pas de les utiliser efficacement pour l'accélération. Un plasma, par contre, est capable de convertir une partie de ce champ transverse en un champ longitudinal de charge d'espace, une onde plasma, susceptible d'accélérer des particules relativistes. Deux mécanismes ont été proposés, il y a déjà une quinzaine d'années: le battement d'ondes et le sillage. Dans les deux cas, la séparation entre les électrons et les ions du plasma est due à la force pondéromotrice qui, dans un champ électromagnétique inhomogène, pousse les électrons vers les zones de champ faible en laissant sur place les ions beaucoup plus lourds. Un plasma possède une fréquence d'oscillation propre, qui ne dépend que de sa densité; si l'on excite cette fréquence, la perturbation de densité électronique se propage sous forme d'ondes progressives à une vitesse de phase proche de la vitesse de la lumière. Le champ électrique longitudinal qui en résulte dépasse largement le GV/m et peut accélérer des particules déjà relativistes, injectées en phase avec cette onde. Les deux effets ont été validés expérimentalement dans plusieurs laboratoires à travers le monde, et en particulier par une équipe pluridisciplinaire de l'École polytechnique. Le battement d'ondes produit une force périodique dont la fréquence est égale à la différence des fréquences des ondes incidentes émises par deux faisceaux lasers de longueurs d'ondes proches qui sont envoyés dans un plasma. En contrôlant soigneusement la densité du gaz formant le plasma, on obtient un transfert résonant de l'énergie laser vers le plasma.

Dans le cas du sillage laser, la force pondéromotrice est induite par l'enveloppe d'une impulsion laser ultra-courte: le front avant de l'impulsion pousse les électrons vers l'avant et le front arrière vers l'arrière. L'efficacité maximale est obtenue quand la durée de l'impulsion est de l'ordre d'une demi-période plasma: inférieure à la picoseconde pour des plasmas de densité 10^{17} e/cm³.

L'accélération par sillage, excitant l'onde plasma par une impulsion laser courte et unique, est plus simple par son principe, et plus efficace que la méthode par battement. Cependant elle nécessite une puissance laser plus élevée et des impulsions extrêmement courtes, ce qui n'a pu être réalisé qu'avec l'apparition des lasers à impulsions femtosecondes de puissance.

À l'École polytechnique, le faisceau laser est «transporté» sur une distance de 200 m dans un tube sous vide vers la salle d'expérience où se trouve la source d'électrons relativistes, un accélérateur Van de Graaf d'énergie 3 MeV. La lumière est focalisée dans le gaz par une lentille ou un miroir parabolique, et il se forme un cylindre de plasma de 100 μ de diamètre pour une longueur d'environ 5 mm. L'expérience de battements, effectuée en 1994-1995, a permis d'observer un gain d'énergie des électrons de 1,4 MeV. Celle de sillage, effectuée en 1997, a fourni quant à elle 1,6 MeV. Les champs électriques correspondants sont de l'ordre de 1,5 GV/m.

Ces expériences, ainsi que d'autres effectuées notamment à l'Université de Californie à Los Angeles avec des lasers à CO₂, ont donc pu démontrer l'effet d'accélération par plasma.

Tous ces résultats, très reproductibles, constituent en quelque sorte la première génération. On peut espérer un gain d'énergie beaucoup plus important en utilisant une injection d'électrons mieux adaptée, et en augmentant la longueur du plasma grâce au phénomène d'autofocalisation récemment mis en évidence. L'attention se porte également sur la perspective d'obtenir des accélérateurs fournissant une intensité élevée et un faisceau de bonne qualité angulaire.

Pour en savoir plus :

Site Web: <http://polhp5.in2p3.fr:8000/grpexp/>
Laboratoires de la collaboration :
CNRS/École polytechnique : LULI, LPGP,
LPNHE, LSI (CEA-CNRS).
Grande-Bretagne : Blackett Laboratory,
Imperial College, Londres.

Selpo : une source d'électrons polarisés

Une source d'électrons polarisés, basée sur un processus d'ionisation d'atomes d'hélium métastables polarisés par pompage optique, a été mise au point. Son fonctionnement en continu, sa mise en œuvre simple la rendent très attractive pour un accélérateur d'électrons en continu et, dans un avenir plus proche, pour l'expérience de violation de la parité à Mayence.

Dans le cadre du projet d'accélérateur européen d'électrons, il s'avérait nécessaire de développer une source d'électrons polarisés. Dans ce contexte, mission a été confiée à l'Institut de physique nucléaire d'Orsay de développer une source transportable.

Les concepts de source utilisés jusqu'alors fournissaient des taux de polarisation supérieurs à 65% mais pour des courants de l'ordre du nanoampère. A cette époque (en 1989), deux nouveaux processus nettement plus prometteurs commencent à fournir des intensités supérieures au microampère :

- la photo-émission de couches semi-conductrices composites, notamment d'arséniure de gallium, irradiées en lumière rouge polarisée circulairement. La polarisation est théoriquement limitée à 50 % par dégénérescence des niveaux supérieurs de la bande de valence et la source nécessite un ultravide lointain. La R&D est développée à Stanford, Mayence, Bonn, Palaiseau et Zürich;

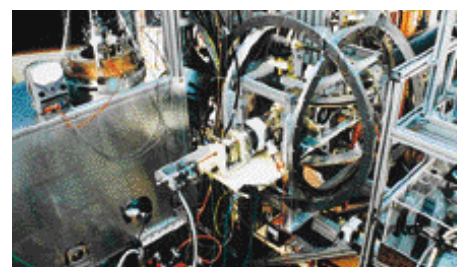
- l'ionisation d'atomes d'hélium métastables polarisés par pompage optique à partir d'une lumière infrarouge polarisée circulairement. La polarisation peut atteindre 100 % avec une technologie simple. Seule, l'université Rice de Houston développe ce concept.

Une collaboration très fructueuse s'installe alors entre l'université Rice pour la conception de source, le laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure pour le laser et le Laboratoire de la matière condensée de l'École polytechnique pour le polarimètre. Dès 1991, les premiers électrons polarisés sur Selpo (Source d'électrons polarisés d'Orsay) sont obtenus.

Dans cette source, un jet d'hélium ultrapur est injecté au moyen d'une tuyère dans l'axe d'une cavité à micro-ondes résonant à 2,45 GHz. La puissance HF est ajustée pour produire un minimum d'espèces chargées et un maximum d'états métastables triplets. La postdécharge

s'étend dans l'espace grâce à l'entraînement visqueux du jet d'hélium par un ensemble de pompage puissant jusqu'à une zone d'induction magnétique très homogène. Le pompage optique se fait dans cette zone au moyen d'un laser utilisant un barreau de LNA (un verre dopé au néodyme et à l'hexa-aluminate de lanthane et de magnésium). Son faisceau est séparé en deux directions: dans l'une, la lumière polarisée circulairement est injectée parallèlement à l'induction, dans l'autre, la lumière polarisée linéairement est injectée perpendiculairement. Ce double pompage permet théoriquement d'obtenir des atomes polarisés à 100 %; dans la pratique on obtient des taux supérieurs à 90 %. Les électrons polarisés sont libérés par une réaction d'ionisation induite par une cible gazeuse de CO₂ qui, de surcroît, permet une thermalisation des électrons émis. Ceux-ci sont extraits et transportés par une ligne optique électrostatique vers l'utilisation. En 1994, Selpo a fourni des intensités jusqu'à 150 μ A et des polarisations entre 85 % à 1 μ A et 53 % à 150 μ A. L'émittance est proche de 0,5 π mm.mrad et la dispersion en énergie inférieure à 0,25 eV. Son fonctionnement strictement continu, sa mise en œuvre simple et ses excellentes qualités de routine rendent ce type de source bien adapté à un accélérateur continu. C'est pour ces raisons qu'il est prévu de l'utiliser à Mayence dans les expériences sur la violation de la parité, en collaboration avec les physiciens d'Orsay. Selpo a été reconditionnée et placée dans une plate-forme de 100 kV et l'ensemble fonctionne depuis mai 1997. Les intensités extraites atteignent maintenant le milliampère, grâce au remplacement de la tuyère initiale générant le jet d'hélium par une série de tubes capillaires. Les mesures de polarisation faites par diffusion sur une cible d'or et comptage par des détecteurs au silicium sont en cours. Les mesures d'émittance à fort courant se feront en collaboration avec Mami. Après un test de 200 heures de fonctionnement ininterrompu, l'ensemble devrait être livré à Mayence en septembre 1998.

*Vue d'ensemble
de la source d'électrons
polarisés.
© IN2P3/F. Planche.*



Pour en savoir plus :

J. Arianer, S. Cohen, S. Essabaa, R. Frascaria, O. Zerhouni, Nucl. Instr. Meth. A382 (1996) 371-378.

Site Web: <http://www.ipn.in2p3.fr>

Des ions radioactifs monochargés aux ions multichargés

L'accélération de faisceaux d'ions lourds radioactifs implique, pour être efficace, que ces ions soient multichargés.

Comment augmenter l'état de charge d'un ion radioactif? Une méthode développée récemment apporte des résultats remarquables.

Lorsqu'ils sont extraits de leur source de production, les ions radioactifs sont généralement dans l'état de charge 1^+ mais, pour qu'ils soient accélérés efficacement par un cyclotron, ils doivent passer à un état multichargé n^+ . Cette transformation est d'un intérêt capital pour réaliser l'accélération de faisceaux d'ions lourds radioactifs dans une gamme d'ions et d'énergie permettant de couvrir un large champ de recherche en physique du noyau. Le rendement d'une telle transformation conditionne directement l'intensité des faisceaux radioactifs accélérés, paramètre essentiel pour la réalisation de nombreuses expériences.

Initiée en 1993 dans le cadre du projet Piafé (pour la production d'ions radioactifs avec des neutrons rapides de réacteur) à l'Institut des sciences nucléaires de Grenoble, puis développée dans le cadre d'un programme général de R&D, une méthode originale de capture directe du faisceau d'ions 1^+ par le plasma d'une source de résonance cyclotronique électronique (ECR) a été mise au point. Des résultats remarquables ont été obtenus, avec des ren-

dements de l'ordre de 5% sur un état de charge n^+ donné, aussi bien sur des ions d'éléments gazeux que condensables. Le développement technologique de cette méthode fait désormais l'objet d'une convention avec le Ganil pour la mise en œuvre du projet Spiral de faisceaux radioactifs.

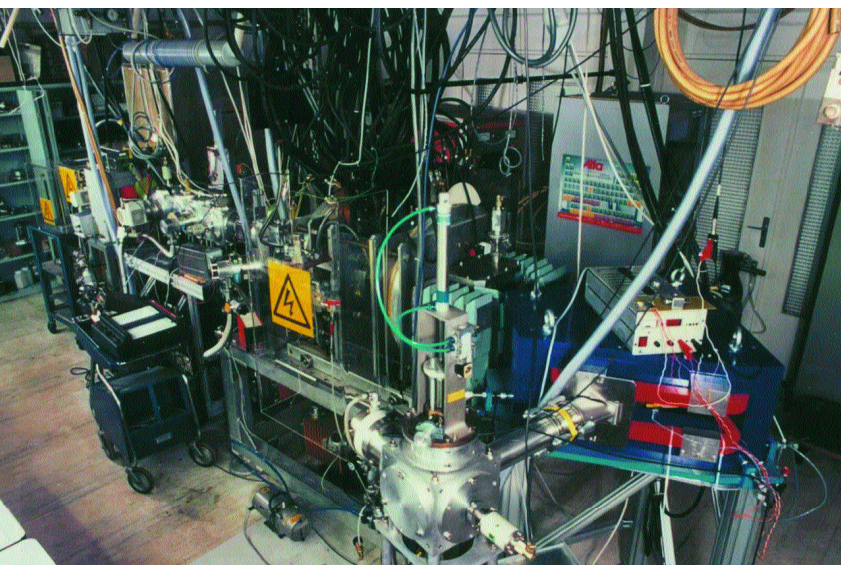
Le principe de la méthode consiste à injecter axialement un faisceau d'ions 1^+ , d'énergie environ 15 keV et transporté le long d'une ligne au potentiel nul, dans une source ECR dont la chambre à plasma est alors portée à un potentiel de 15kV ajustable: l'ajustement de ce potentiel permet de réaliser une décélération électrostatique brutale des ions jusqu'à des énergies thermiques autorisant leur capture par le plasma en vue de leur multi-ionisation. L'injection des ions 1^+ est réalisée «par l'arrière» (côté opposé à l'extraction des ions n^+) à travers un tube mis à la masse.

La validation expérimentale de la méthode a consisté à injecter divers faisceaux d'ions 1^+ d'éléments stables (d'une part, des éléments «condensables» dont le rubidium et le zinc, d'autre part, des gaz rares comme l'argon, le krypton, le xénon) dans une source ECR de 10 GHz du type Minimaños. Un faisceau de rubidium a aussi été injecté dans une source ECR de 10 GHz du type Caprice. La nature des ions mais aussi les caractéristiques d'émission et de dispersion en énergie des faisceaux 1^+ injectés sont des paramètres importants de la méthode: à ce titre le faisceau de rubidium (délivré par une source à ionisation de surface) est un faisceau de référence.

Les mesures ont porté d'une part sur le rendement en particules, défini par le rapport des intensités des faisceaux d'ions 1^+ et n^+ , et d'autre part sur le «temps de réponse» de la transformation, observé en pulsant le faisceau 1^+ .

Les temps de réponse sont de l'ordre de 100 ms; ils dépendent de l'état de charge n^+ ainsi que de la densité du plasma. Ces valeurs sont tout à fait convenables, eu égard aux périodes radioactives des noyaux dont l'accélération est envisagée.

Système d'augmentation de charge à base de sources d'ions de type ECR. De gauche à droite: la source 1^+ (de type quelconque), l'analyse de la source 1^+ , la ligne d'injection dans la source n^+ , la source Minimaños 10GHz et son analyseur de charge. Crédit: IN2P3.



Laboratoires de la collaboration:
CNRS/IN2P3 : ISN.
CNRS/CEA : Ganil.

L'instrumentation cryogénique du LHC

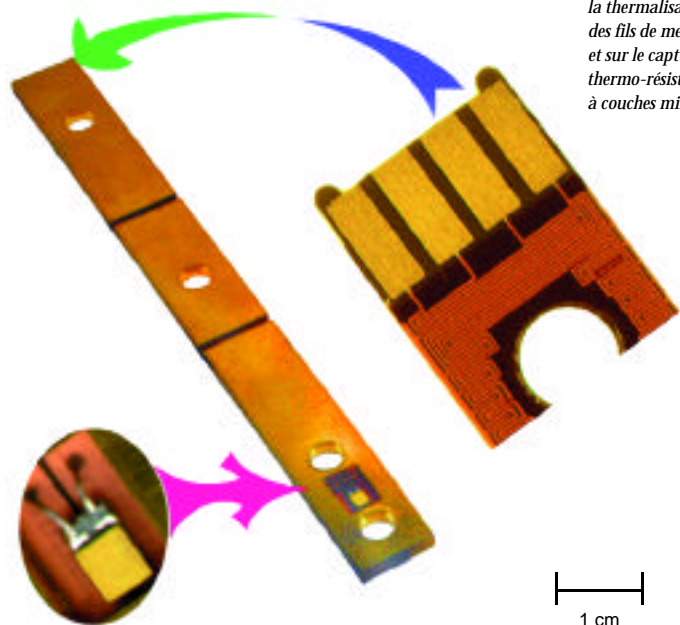
Le protocole de collaboration signé en février 1996 par le Cern, le CEA et le CNRS pour la construction du LHC a prévu une participation des deux organismes français à l'instrumentation cryogénique de l'accélérateur.

L'Institut de physique nucléaire d'Orsay a pris en charge la mesure de température qui doit être réalisée entre 1,8 et 1,9 K avec une précision de ± 5 mK.

Depuis le début de 1996, une équipe de l'Institut de physique nucléaire d'Orsay collabore étroitement avec le département de cryogénie du Cern dans un programme d'étude sur les capteurs cryogéniques, et en particulier sur les thermomètres qui seront installés dans le futur accélérateur. Près de 10 000 thermomètres seront implantés dans les aimants supraconducteurs (1600 dipôles et quadripôles répartis sur l'anneau de 27 km) et dans les équipements cryogéniques associés. Leur rôle est essentiel pour le contrôle et le diagnostic de ces composants, refroidis par la circulation d'hélium superfluide pressurisé, dont la température, comprise entre 1,8 et 1,9 K, doit être mesurée avec une précision de ± 5 mK.

Après une période initiale d'étude pour la validation du principe de mesure par contact des masses froides des aimants, une première version de thermomètre a été fabriquée en présérie et est utilisée actuellement sur les aimants prototypes. En parallèle, différentes études se sont poursuivies pour choisir les capteurs définitifs qui doivent répondre à des critères stricts de reproductibilité, stabilité et tenue au rayonnement. En 1997, une des principales activités du groupe a consisté à analyser la réponse de plusieurs centaines de capteurs «candidats» à un flux intense de neutrons, accumulant une dose comparable à dix ans de fonctionnement de la machine. Ce programme d'irradiation a été effectué à l'Institut des sciences nucléaires de Grenoble avec une installation cryogénique construite dans le cadre des activités liées au détecteur Atlas et au LHC.

La calibration des capteurs cryogéniques constitue le volet essentiel du programme car tous les capteurs devront être testés et calibrés avant le montage final sur les aimants. Les techniques et les procédures de calibration, ainsi que les équipements nécessaires, sont en cours d'étude. A partir d'un premier prototype construit au Cern, un cryostat spécial a été mis au point. Équipé d'un bloc de calibration couvrant toute la gamme de température de 1,6 K à 300 K, et permettant d'effectuer des paliers de calibration contrôlés à ± 1 mK, ce cryostat est en cours de construction à Orsay. La campagne de calibration des thermomètres de série doit commencer à la fin de 1998. Toutes les données de la calibration, du suivi de fabrication et du montage des capteurs cryogéniques seront stockées dans une base de données dont la première version est en cours de test.



Thermomètre cryogénique LHC. Détails sur la thermalisation des fils de mesure et sur le capteur thermo-résistif à couches minces.

Pour en savoir plus :

Sites Web:

<http://ipnweb.in2p3.fr>

<http://www/lhc01.cern.ch/lhc/Welcome.html>

Développement de détecteurs pour Alice

Autour des expériences Alice au Cern et Star à Brookhaven, une activité intense de R&D se développe pour la conception et la réalisation des détecteurs. Présentés ici, Micromegas, pour la détermination des trajectoires de muons, et les détecteurs au silicium à micropistes, permettant la reconstruction des traces et l'identification des particules, sont étudiés au laboratoire Subatech.

Micromegas

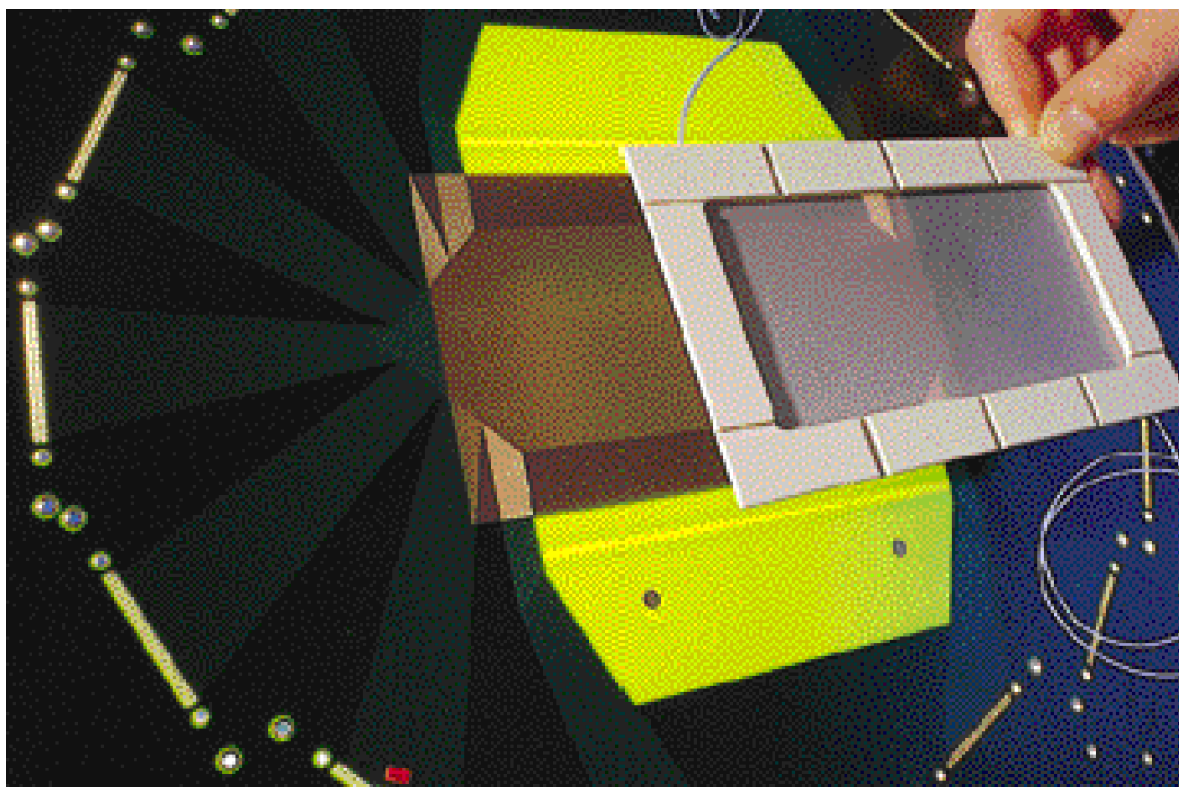
Lorsque le détecteur Alice fonctionnera auprès du LHC au Cern pour étudier les collisions d'ions lourds ultra-relativistes, le nombre de particules produites sera de plusieurs dizaines de milliers. Pour analyser de tels événements, il faut des détecteurs de trajectoires supportant de hauts flux et ayant une bonne résolution spatiale. Imaginé par Georges Charpak et Yannis Giomataris, Micromegas est un détecteur répondant à ces exigences et pour lequel une activité de R&D a été entreprise au laboratoire Subatech de Nantes.

Ce détecteur gazeux fonctionnant en mode proportionnel

est constitué d'un plan de pistes de cuivre, d'espaceurs isolants, d'une microgrille de nickel, et d'une feuille de mylar aluminisé portées respectivement à des potentiels de -600 et -1000 V. Au passage d'une particule, des électrons primaires sont produits dans les 3 mm de gaz (argon/gaz carbonique ou argon/isobutane) séparant le mylar et la microgrille puis sont dirigés vers la grille par le champ électrique. La faible distance (100 μ) séparant la microgrille du plan de pistes permet d'obtenir un champ de 60 kV/cm dans lequel le nombre d'électrons primaires est multiplié par 1000. Les électrons sont ensuite collectés sur le réseau de pistes (de largeur 100 μ , avec une distance interpistes de 80 μ).

Depuis septembre 1996, un groupe de travail étudie la réalisation d'un détecteur Micromegas de grande dimension. A l'issue d'une collaboration avec des industriels locaux spécialisés dans la réalisation de circuits imprimés, plusieurs prototypes ont été construits au laboratoire. De nombreux tests de gaz et de grille ont été effectués afin d'étudier l'efficacité du détecteur. Puis une électronique frontale de lecture des pistes, composée de préamplificateurs, de circuits de mise en forme et d'un multiplexeur

Détecteur de particules
Micromegas.
Microgrille de nickel
(pas de 50 μ m)
et micropistes dorées
(pas de 180 μ m).
© CNRS/L.Médard.



(Gassiplex), a été ajoutée au dispositif. En juin 1997, un test a été réalisé au synchrotron à protons du Cern avec un faisceau de pions de 3 GeV/c, et un dispositif de trajectographie composé de trois détecteurs Micromegas de $6 \times 13 \text{ cm}^2$ avec lesquels une résolution spatiale de $43 \mu\text{m}$ a été atteinte. Les résultats obtenus permettent d'envisager la réalisation d'un prototype de 1 m^2 en 1998.

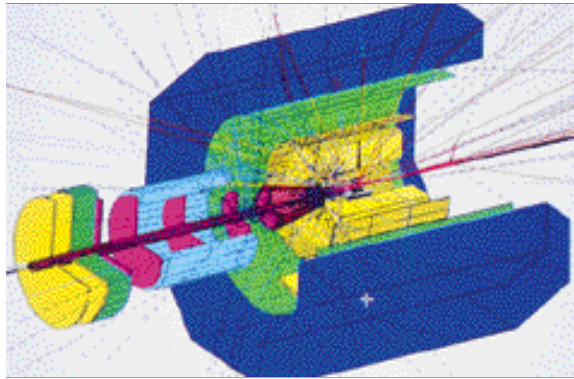
Des détecteurs au silicium à micropistes

Dans le cadre de la participation de Subatech aux grandes collaborations internationales dans le domaine des collisions d'ions lourds ultrarelativistes - Star à Brookhaven et Alice au Cern - une activité de R&D autour des détecteurs au silicium à micropistes permettant la reconstruction des trajectoires et l'identification des particules a été lancée depuis avril 1996.

Ce type de détecteur est constitué, sur toute sa surface, d'un réseau de jonctions PN, ayant la forme de pistes parallèles distantes d'une centaine de microns. Généralement, le substrat du détecteur est de type N et les pistes sont de type P. Dans le cas où les deux faces sont actives, la seconde face est équipée de pistes de type N^+ . En mode de fonctionnement normal, les jonctions PN sont polarisées en inverse jusqu'à ce qu'il n'y ait plus aucun porteur libre dans le détecteur. Quand une particule chargée traverse le détecteur, elle interagit avec la matière et dépose de l'énergie sous forme de paires électrons-trous. Ces charges sont dérivées par le champ électrique et collectées sur les pistes de chaque face. Une électronique de lecture, de type amplificateur de charge à bas bruit, équipant le détecteur permet de mesurer l'énergie déposée, ce qui rend possible l'identification de la particule en question.

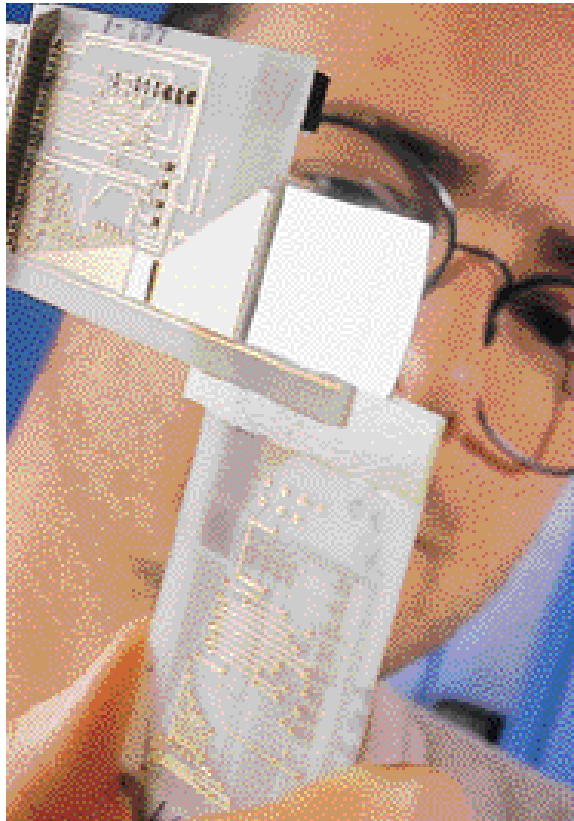
Pour construire l'ensemble de détection, les chercheurs et ingénieurs font appel à des technologies de pointe: fibres de carbone pour les supports des détecteurs, microélectronique pour la conception d'un circuit intégré spécifique, technologies MCM (modules multi puces) pour les connexions entre les détecteurs et l'électronique de lecture, électronique de pointe pour la gestion et le contrôle de l'ensemble du système, fibres optiques pour le transfert rapide des données.

L'objectif est de construire un ensemble de détection



Vue générale du détecteur Alice.
© Cern.

d'une surface de 1 m^2 qui, en 2000, sera installé dans le détecteur Star, auprès de l'accélérateur RHIC à Brookhaven aux États-Unis, et un de 6 m^2 pour équiper l'expérience Alice auprès du LHC qui démarrera en 2005.



Détecteur au silicium à micropistes (double face à 90 degrés) et circuit de lecture.
© CNRS/L.Médard.

Pour en savoir plus :

Sites Web:

<http://www-subatech.in2p3.fr/Sciences/>

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

<http://www.rhic.bnl.gov/star/starlib/doc/www/star.html>

<http://www.rhic.bnl.gov/star/starlib/doc/www/star.html>

Laboratoires de la collaboration :

Micromegas :

CNRS/IN2P3 : Subatech, Nantes; IReS, Strasbourg.

CEA/DSM : Dapnia.

Détecteurs au silicium à micropistes :

Subatech, Nantes; IReS, Strasbourg; LEPSI, Strasbourg.

Les absorbeurs du calorimètre à argon liquide d'Atlas

*Système
de radiographie
du plomb installé
sur le laminoir.
Crédit: IN2P3.*



Les nouvelles découvertes espérées auprès du LHC sont intimement liées aux performances des détecteurs.

Cela passe par exemple par une très grande homogénéité de l'épaisseur des plaques de plomb qui constituent les absorbeurs du calorimètre électromagnétique du détecteur Atlas. Une méthode de mesure extrêmement précise de cette épaisseur vient d'être mise au point au LPNHE de Paris.

La détection de la désintégration du boson de Higgs en deux photons ou en quatre électrons, un des objectifs majeurs du LHC, impose au calorimètre électromagnétique à argon liquide du détecteur Atlas de mesurer l'énergie des photons avec une très bonne précision. Une condition essentielle à l'obtention de cette précision est de disposer d'un calorimètre dont la réponse soit la plus uniforme possible: l'écart toléré entre deux régions différentes du calorimètre doit être inférieur à 0,7 %.

Les écarts de réponse entre deux régions peuvent avoir de multiples causes:

- des irrégularités de montage des absorbeurs du calorimètre: ceux-ci sont des sandwiches de plomb, de composite colle-fibre de verre, d'inox, le tout plié en forme d'accordéon; ils sont destinés à absorber l'énergie des particules incidentes et à générer un nombre élevé de particules secondaires à partir de celles-ci;
- la différence de comportement de l'électronique associée, d'un canal à l'autre;
- des variations de température de l'argon;
- des inhomogénéités de l'épaisseur du plomb utilisé pour fabriquer les absorbeurs du calorimètre.

Cette dernière cause est considérée comme une des plus dangereuses, et le but, lors de la construction du détecteur, est de maintenir sa contribution à l'inhomogénéité en dessous de 0,3 %. Cela impose d'utiliser des feuilles de plomb dont l'épaisseur, de l'ordre du millimètre, soit constante à mieux que 1 % près. Aucun fabricant ne s'est avéré capable de réaliser de telles performances - le meilleur est capable d'arriver à 3 %, aussi des ingénieurs du laboratoire de physique nucléaire et hautes énergies de Paris VI/VII ont eu l'idée de mettre au point un système de suivi et de mesure des plaques de

plomb destinées au détecteur, permettant de collecter le maximum d'informations sur l'épaisseur du plomb. Ces informations peuvent ensuite être utilisées pour construire le détecteur le plus homogène possible, en mettant à profit le fait qu'un absorbeur un peu trop «fin» et un absorbeur un peu trop «épais», situé juste à côté, produisent à eux deux presque la même réponse au passage d'une particule que deux absorbeurs «moyens».

La première étape de ce système de suivi est un système de radiographie en ligne mis en œuvre directement auprès du laminoir, en Allemagne. Il a été conçu, assemblé et testé en collaboration étroite avec le CEA-Damri, concepteur des jauges et constructeur de la source de rayons X. Outre l'appareillage de mesure proprement dit, le système de mesure par rayons X met en œuvre un marqueur par jet d'encre. Le marqueur inscrit régulièrement, sur la bande de plomb en cours de défilement, des chiffres qui nous permettent, après découpe des plaques de plomb, d'associer à chaque plaque de plomb les mesures par radiographie qui ont été effectuées alors qu'elle défilait devant la source de rayons X. En effet, la vitesse de défilement de la bande de plomb n'est pas asservie à la source de rayons X, et il faut un moyen d'assurer la correspondance entre un morceau de plomb donné et les mesures auxquelles il a donné lieu. Il est à noter que la précision de chaque mesure est de l'ordre de 5 μ .

Après la découpe, les épaisseurs des plaques de plomb sont à nouveau déterminées avec une plus grande précision (2 à 3 μ par point), à l'aide d'une table de mesure automatisée, équipée d'une tête de mesure à ultrasons. La tête de mesure est basée sur un capteur industriel, adapté de manière à assurer un appui aussi reproductible que possible sur le plomb, et donc une très bonne résolution en épaisseur. Là aussi, l'appareillage inclut un système de marquage, destiné à assurer l'identification certaine de toutes les plaques de plomb tout au long de leur circuit durant les opérations de fabrication des absorbeurs, dès lors qu'elles sont mesurées.

Laboratoires de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : LPNHE, Paris.
CEA/Département d'analyse et
de métrologie des rayonnements
ionisants.

Un cristal de tungstate de plomb pour le calorimètre électromagnétique de CMS

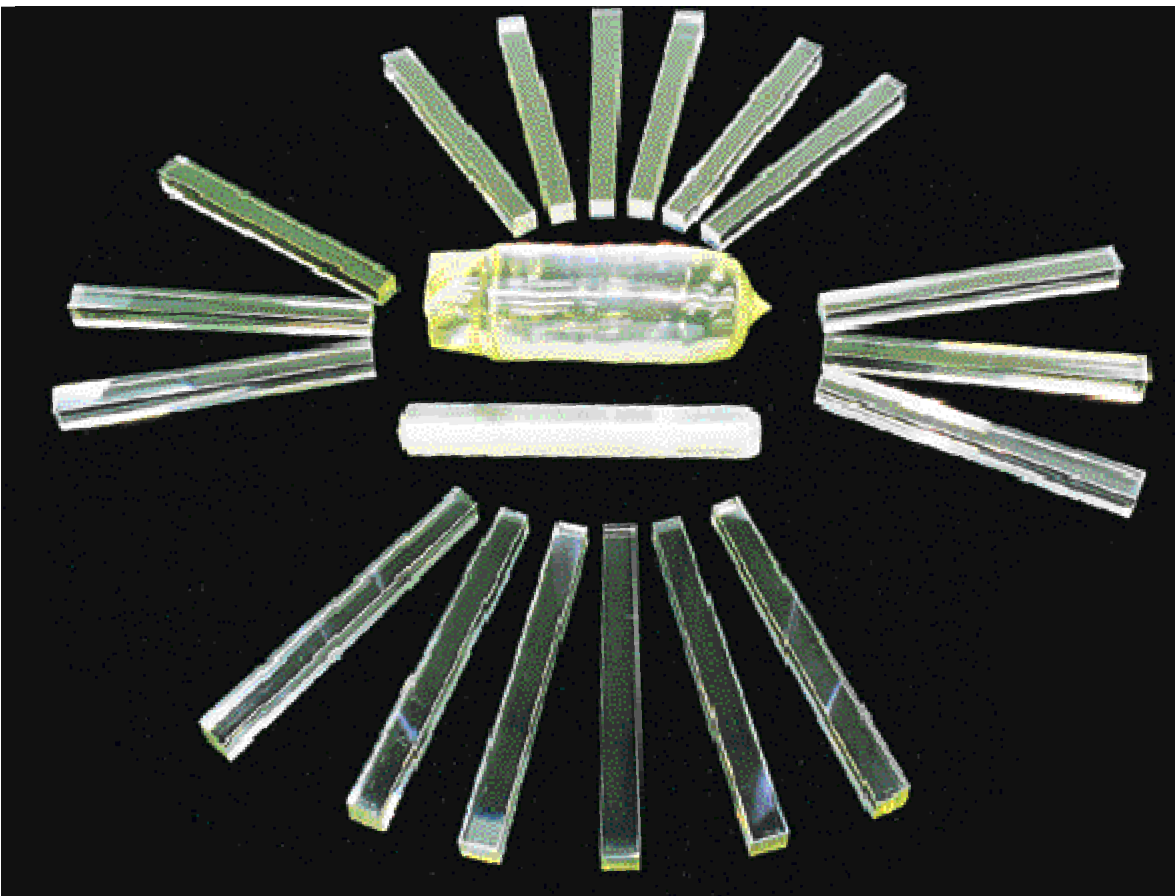
Le tungstate de plomb a été choisi par la collaboration CMS comme élément de base du calorimètre électromagnétique, notamment à cause de sa grande rapidité de réponse, de sa densité élevée, de sa tenue aux radiations et de sa faible longueur de radiation qui permet de construire des calorimètres très compacts.

Le cristal scintillant de tungstate de plomb est maintenant un composant essentiel pour la calorimétrie électromagnétique de précision. Initialement présenté comme milieu détecteur potentiel par un chercheur de l'institut de Karkhov à la conférence « Crystal Clear » de Chamonix à l'automne 1992, il a été développé dès l'hiver suivant par une équipe pluridisciplinaire comportant des physiciens des hautes énergies du LAPP et de l'IHEP de Serpukhov (Russie) associés à des physiciens du solide

spécialistes des cristaux de l'INP de Minsk (Biélorussie), en étroite collaboration avec un producteur industriel potentiel, par l'intermédiaire du département de recherche et développement du « Technochemicalplan » de Bogoroditsk en Russie.

Les nouveaux collisionneurs comme le LHC, qui doivent travailler dans des conditions exceptionnellement difficiles de fréquence de collisions et de taux de radiations élevés, impliquent de nouveaux besoins en matière de rapidité d'émission de lumière. Il a donc fallu trouver un milieu actif scintillant capable de fournir suffisamment de lumière en un temps relativement court, de résister aux radiations et dont la production soit économiquement viable.

Le cristal scintillant de tungstate de plomb est connu depuis quarante ans environ par les physiciens du solide mais les premières évaluations montrant son intérêt pour la physique des hautes énergies datent de 1993. Le choix de ce cristal comme élément de base du calori-



*Cristaux de tungstate
de plomb.
Crédit: IN2P3.*

mètre électromagnétique par la collaboration CMS, en fin d'année 1994, a conduit à un regroupement des équipes sur ce projet. Les recherches fondamentales se sont intensifiées ainsi que la mise au point des technologies permettant une production industrielle capable d'assurer une qualité constante et uniforme des paramètres essentiels: rapidité et intensité de la quantité de lumière, qualité mécanique et précision de l'usinage, transmission optique optimale.

Le tungstate de plomb est un cristal dont la rapidité est largement due à un phénomène de «quenching» à la température ordinaire. La quantité de lumière de scintillation qu'il émet est environ dix fois supérieure à la lumière Cerenkov produite par les verres au plomb mais son temps de décroissance est aussi plus élevé. Comparé au BGO (oxyde mixte de bismuth et de germanium) utilisé dans la calorimétrie de précision ces dernières années, il présente un temps d'émission bien plus court de la lumière (30 ns au lieu de 300) et une meilleure tenue aux radiations; en outre, sa densité élevée et sa faible longueur de radiation permettant de construire des calorimètres très compacts rendent son intérêt évident pour les nouveaux collisionneurs.

Fabriqué à partir d'un mélange d'oxydes relativement courants, il possède plusieurs centres luminogènes dont l'ajustement en proportion permet d'adapter en partie le pic d'émission du spectre global. La suppression de centres luminogènes trop lents à émettre leur lumière, dont l'apparition était due notamment à la présence de molybdène, a permis de produire des cristaux qui émettent 90 % de la lumière en moins de 30 ns. Par ailleurs, le contrôle des impuretés et des conditions de croissance a permis d'améliorer de façon importante la transparence des cristaux depuis 1995, en particulier à des longueurs d'onde supérieures à 400 nm où a lieu l'émission lumineuse.

En 1997, des progrès décisifs ont été faits dans la compréhension des mécanismes responsables des dommages causés par les radiations. Celles-ci agissent plutôt sur la transparence des cristaux du fait de la présence de défauts spécifiques de la matrice cristalline apparus au cours du processus de croissance: création de centres de couleur ou de trous. Le contrôle soigné des conditions de croissance et de stoechiométrie a permis de maîtriser les premiers types de défauts tandis que le dopage additionnel

avec des ions pentavalents tels que le niobium et trivalentes comme le lanthane a permis de contrôler les seconds. Grâce à un programme d'étude systématique des effets des radiations gamma sur les paramètres technologiques des cristaux, on a pu fixer les meilleures conditions de production: un dispositif expérimental fonctionne auprès de l'irradiateur gamma Cocase à Saclay et un dispositif d'irradiation GIF est en cours d'installation au Cern pour permettre les investigations de contrôle au cours de la production dont les premières phases doivent démarrer à l'été 1998.

Enfin, il apparaît que le tungstate de plomb n'est pas seulement un cristal utile pour les hautes énergies (quelques centaines de GeV) mais qu'il convient aussi à la calorimétrie électromagnétique dans une gamme d'énergie de quelques dizaines de MeV, en utilisant des photomultiplicateurs et en prenant avantage de l'augmentation de lumière avec l'abaissement de la température de fonctionnement du cristal à 2,5 °C.

Pour en savoir plus :

V. G. Baryshevski et al. Nucl. Instr. Meth. A322 (1992) 231-234.

J.P. Peigneux, Nucl. Instr. Meth. A351 (1994) 197-200.

A. Fyodorov, M. Korzhik et al. Radiation Measurements, Vol 26, n°1 (1996) 107-115.

Laboratoires de la collaboration : CNRS/IN2P3 : Lapp.

Biélorussie : INP, Minsk.

Russie : IHEP, Serpukhov.

CEA/DSM : Dapnia.

Les chambres gazeuses à micropistes

Nouvelle génération de détecteurs, les chambres gazeuses à micropistes seront utilisées à grande échelle dans l'expérience CMS auprès du LHC au Cern.

Une chambre gazeuse à micropistes (MSGC pour MicroStrip Gas Chamber) est constituée de deux plans d'électrodes dans une enceinte à gaz: le plan de dérive est une électrode uniforme, le substrat est un réseau de pistes alternées, d'anodes et de cathodes. En fonctionnement, les tensions électriques appliquées au plan de dérive et aux pistes de cathodes font migrer les électrons produits par une particule incidente vers les anodes, où leur nombre est multiplié. La répartition du signal, collecté sur chaque anode à travers un circuit d'amplification, localise l'impact, transversalement aux pistes. Une résolution de 40μ est atteinte avec un réseau de périodicité de 200μ .

L'objectif principal des programmes de R&D est de fabriquer des détecteurs capables de fonctionner dix ans sous le flux des particules produites au LHC. La configuration et la qualité de réalisation des substrats sont deux critères de réussite. L'Institut de physique nucléaire de Lyon et l'Institut de recherche subatomique de Strasbourg travaillent depuis 1993 sur plusieurs aspects de la mise en œuvre de ces détecteurs: amélioration de la fiabilité, mesure de deux coordonnées, optimisation de l'électronique de lecture et intégration dans l'expérience. L'effort décrit ici a porté sur la conception et la fabrication de la brique élémentaire du détecteur: le substrat. L'IPN de Lyon a défini, en collaboration avec IBM-Corbeil, des détecteurs qui sont des variantes de chambres gazeuses à micropistes, où les cathodes sont rapprochées des anodes et isolées électriquement par des rubans de polyimide. Originalités: la réduction de l'interpiste facilite l'écoulement des charges positives, le polyimide permet la passivation des bords imparfaits des pistes. Deux configurations ont été réalisées sur des substrats de silicium de 5 pouces de diamètre. Dans le premier modèle (SGC pour Small Gap Chamber), les cathodes et les anodes sont dans un même plan, les rubans de polyimide recouvrent l'interstice entre les pistes ainsi que leur lisière. Dans le second modèle (MGC-2D pour MicroGap Chamber à 2 dimensions), les anodes sont situées sur les

rubans de polyimide à $3,5 \mu$ au-dessus des cathodes. Celles-ci forment un réseau croisé à 3 degrés. La lecture des deux types de pistes fournit autant de coordonnées. Les prototypes des deux modèles ont été testés au laboratoire avec des rayons X et sur faisceaux d'accélérateurs. Les gains atteints et la stabilité de fonctionnement ont montré la validité de l'approche à faible interpiste. Le test effectué dans un faisceau hadronique de très haute inten-

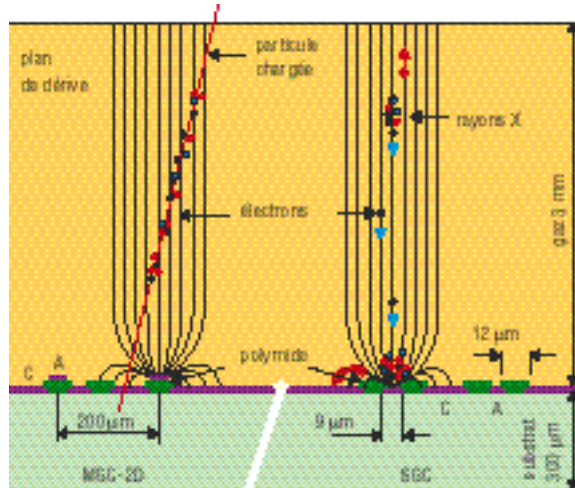


Schéma de principe du détecteur gazeux à micropistes.

sité ($5 \times 10^3/\text{mm}^2/\text{s}$) a démontré la bonne tenue des SGC dans les conditions du LHC. Il a été observé que le couplage capacitif introduit par la lecture des cathodes limite la tension applicable aux MGC-2D. De meilleurs résultats pourraient être obtenus en remplaçant le substrat de silicium par du verre. Le programme se poursuit pour aboutir à une fabrication industrielle des détecteurs à faible interpiste, sur des verres de 8 pouces de diamètre.

Pour en savoir plus :

Sites Web:

[http://www.cern.ch/CERN/Divisions/PPE/](http://www.cern.ch/CERN/Divisions/PPE/DetectorUnit/Groups/GDD/J)

[DetectorUnit/Groups/GDD/J](http://www.cern.ch/CERN/Divisions/PPE/DetectorUnit/Groups/GDD/J)

<http://CMSFRANCE.IN2P3.FR/>

J. F. Clergeau et al., Performance of three variants of MicroGap Chambers Nucl. Instr. Meth., A392 (1997) 140.

V. Chorowicz et al., Performance of a Small Gap Chamber Nucl. Instr. Meth., A401 (1997) 238.

Vers un détecteur sous-marin de neutrinos cosmiques de haute énergie



L'étude des neutrinos cosmiques de haute énergie offre un double intérêt, tant dans le domaine de l'astronomie que dans celui de la physique fondamentale et de la cosmologie. Le projet Antarès a pour but de démontrer qu'il est possible de construire un détecteur sous-marin susceptible d'apporter des informations nouvelles sur ces particules et d'ouvrir une voie vers l'astronomie neutrino.

Électriquement neutres et interagissant très faiblement avec la matière, les neutrinos ne peuvent être détectés qu'indirectement. Le projet Antarès s'est fixé pour objectif de détecter les interactions qui produisent un muon, particule chargée électriquement, très pénétrante à ces énergies et dont la trajectoire est quasiment alignée avec celle du neutrino. Le détecteur, placé au fond de la mer, observe les neutrinos qui interagissent après avoir traversé la Terre. Les muons formés dans cette interaction provoquent dans l'eau de mer un sillage de lumière Cerenkov. La mesure temporelle du développement de ce sillage lumineux permet de reconstruire la direction du muon et donc celle du neutrino avec une précision meilleure que le degré. On peut donc pointer vers l'objet céleste d'où le neutrino est issu. La Terre sert de cible pour les neutrinos et de filtre pour bloquer toutes les autres particules. La mer est utilisée comme milieu révélateur du sillage lumineux des muons mais aussi comme filtre pour réduire le flux du rayonnement cosmique secondaire produit dans la haute atmosphère terrestre. Pour toutes ces raisons, le détecteur sera une matrice tridimensionnelle de capteurs de lumière (photomultiplicateurs) couvrant un volume effectif de l'ordre de 1 km³ à quelques milliers de mètres de profondeur. Avec un tel détecteur, il devrait être possible de détecter entre 100 et 2000 événements d'interaction de neutrinos cosmiques par an et d'ouvrir ainsi l'ère de l'astronomie neutrino. Mais avant de se lancer dans la construction d'un détecteur de cette taille, il faut passer par différentes étapes de validation du concept du détecteur et de son déploiement en eau profonde. Ainsi, un programme de R&D de trois ans visant à démontrer la faisabilité d'un grand télescope à neutrinos sous-marin a été initié en 1996. De nombreuses études

(évaluation des sites, tests de photomultiplicateurs, développements en technologies marines, mécanique et électroniques, simulations informatiques) sont à l'œuvre. Ce programme aboutira à l'immersion, fin 1999 au large de Toulon par 2300 m de profondeur, d'un démonstrateur constitué d'au moins deux lignes de détection distantes d'environ 100m. L'interconnexion des lignes avec le câble électro-optique chargé d'acheminer les données à terre sera effectuée *in situ* par un submersible. Chaque ligne est constituée de 16 à 25 paires de modules optiques (photomultiplicateurs de 20 cm de diamètre, placés dans des sphères de verre pour les protéger de la pression environnante) distantes de 15 m. L'ensemble est également équipé d'une instrumentation permettant de mesurer la position de chaque module optique à 20 cm près.

Une des premières étapes concerne le choix du site: celui-ci est, bien sûr, assujéti à des considérations pratiques de logistique mais surtout aux qualités optiques de l'eau et la profondeur du site. Afin de mener à bien ces évaluations, des lignes de mouillage autonomes comportant des instruments ont été installées au large des côtes varoises et corses. Ceux-ci permettent de mesurer *in situ* le bruit de fond lumineux lié à la radioactivité naturelle de l'eau de mer et à la bioluminescence des créatures qui vivent dans les profondeurs, la sédimentation et la biosalissure des surfaces optiques qui provoque une perte de transmittivité, la transparence de l'eau de mer pour déterminer l'atténuation et la diffusion de la lumière.

La mesure du bruit de fond lumineux permet d'optimiser, en connaissance de cause, les systèmes électroniques de déclenchement et d'acquisition des données. Les tests à longue durée sont effectués pour étudier la perte de transmittivité: après plus de six mois, celle-ci se stabilise à quelques %. Enfin, une première immersion d'un dispositif permettant de mesurer *in situ* la réponse d'un module optique en fonction de sa distance à une source lumineuse a eu lieu en novembre 1997. Les données sont en cours d'analyse mais la longueur d'atténuation semble conforme à nos attentes. L'utilisation en 1998 d'une source de lumière en mode pulsé va permettre de distinguer entre les composantes d'absorption et de diffusion. Les grandes étapes du démonstrateur sont, en 1998, l'immersion d'une première ligne équipée de 32 sphères de verre (dont 8 contiendront des photomultiplicateurs) et

d'un grand nombre de systèmes de mesures mécaniques et, en 1999, les déploiement et récupération d'une seconde ligne équipée de 32 à 50 modules optiques et identique aux lignes d'un détecteur de grande taille ($1/10 \text{ km}^3$). La connexion avec la première ligne et le câble sera faite au fond par un submersible de l'Ifremer. Les procédures de déploiement et récupération (points cruciaux dans la réalisation d'un détecteur sous-marin) seront ainsi validées. A partir de là, le projet devrait évoluer vers un détecteur d' $1/10$ de km^3 , première étape vers un observatoire sous-marin de très grande taille. L'architecture de ce dispositif aura été optimisée à l'aide de simulations informatiques, et le site qui l'accueillera sera choisi en fonction du programme d'évaluation déjà en cours.



Récupération d'une ligne autonome instrumentée pour la mesure de la bioluminescence, immergée sur le site Antarès au large des côtes varoises par 2500m de fond. On distingue deux «modules optiques» et le système d'acquisition dans leurs sphères en verre résistant à la pression.
© Antarès/CEA.

Pour en savoir plus :

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

Laboratoires de la collaboration :

CNRS/IN2P3 : Centre de physique des particules de Marseille.

CNRS/Insu : Institut Grassendi; Observatoire de Marseille; Laboratoire d'astronomie spatiale ;

Observatoire de Haute-Provence;

Centre d'océanologie de Marseille.

CEA/DSM : Dapnia.

Ifremer.

Espagne : Instituto de Fisica Corpuscular à l'université de Valence.

Grande-Bretagne : universités d'Oxford et de Sheffield.

Support matériel, logistique et technique: France Télécom Câble, CSTN, CTME, flotte de l'Insu.



En route pour le déploiement d'une ligne autonome instrumentée pour la mesure de la bioluminescence et des courants.
© Antarès/CEA.

Détection de lumière Cerenkov dans l'expérience Babar de violation de symétrie

La collaboration Babar, dont le but est de s'attaquer dès 1999 à l'étude approfondie de la violation de la symétrie CP dans le système des mésons beaux, a choisi le Dirc (Detection of Internally Reflected Cerenkov light) comme instrument d'identification des particules.

L'objectif de l'expérience est de contribuer à l'exploration des relations encore mystérieuses entre matière et antimatière.

Le Dirc est un compteur de photons Cerenkov d'un type nouveau, où les barres de quartz utilisées comme milieu de production de la lumière Cerenkov servent également au transport de la lumière - par réflexions internes multiples sur les faces des barres - vers les tubes photomultiplicateurs chargés de la détecter. A chaque type de particules (électron, muon, pion, kaon ou proton), correspond une image différente, ce qui permet de les reconnaître dans toute la gamme d'énergie accessible à Babar.

L'intérêt du Dirc pour cette application est le grand nombre de photons détectés par trace (entre 20 et 60) et l'augmentation de ce nombre de photons pour les traces vers l'avant, les plus énergétiques dans Babar, donc celles nécessitant la mesure la plus précise. De plus, bien que de conception nouvelle, le Dirc n'est constitué que de matériaux classiques et bien maîtrisés: quartz, tubes photomultiplicateurs et eau pure (milieu choisi pour améliorer la transmission optique entre ces deux éléments).

Les équipes françaises impliquées dans le Dirc aux côtés de leurs collègues américains ont joué un rôle majeur dans la mise au point et la construction de ce détecteur. Un prototype de grande échelle a été exposé au faisceau du synchrotron à protons du Cern en 1995 et 1996 afin de

valider en détail les performances de ce type de compteur. Les résultats ont été très satisfaisants et ont montré la parfaite adéquation du Dirc aux tâches importantes qui l'attendent dans Babar: la séparation pion-kaon sera au moins de 4 écarts types sur toute la gamme d'énergie utile, la résolution temporelle meilleure que 2 ns, l'atténuation lors de la propagation de la lumière dans les barres de quartz de 5 m de long, inférieure à 4 % par mètre.

La construction du Dirc est maintenant pratiquement terminée. Les laboratoires français avaient sous leur responsabilité l'ensemble du système de détection de la lumière et de toute l'électronique. Les 10752 tubes photomultiplicateurs sont maintenant montés sur les douze secteurs. Avec la chaîne d'électronique complète, ils sont tous partis pour Stanford où le détecteur sera monté à l'automne 1998. D'ici à quelques mois donc, ce détecteur original et robuste pourra, espérons-le, contribuer de façon décisive à l'exploration des relations encore mystérieuses entre matière et antimatière.

Pour en savoir plus :

R. Aleksan et al., Nucl. Instr. Meth. A397 (1997) 261.

Laboratoires de la collaboration :
CNRS/IN2P3 : LAL ; LPNHE, Paris ; LPNHE,
Palaiseau.

CEA/DSM : Dapnia.

États-Unis : Stanford Linear

Accelerator Center, Lawrence Berkeley National
Laboratory.

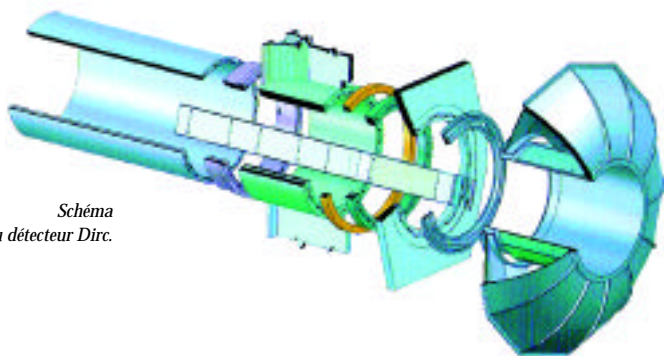


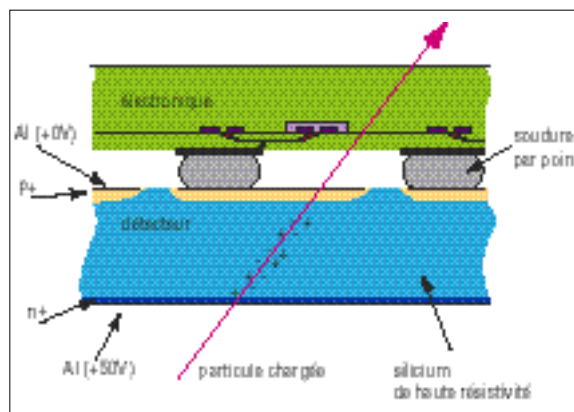
Schéma
du détecteur Dirc.

Les détecteurs à pixels

D'abord dans l'expérience Delphi, puis maintenant pour les grands détecteurs du LHC, les détecteurs à pixels apportent des solutions complètement novatrices car, en donnant, avec une grande précision, le point de passage de particules en deux dimensions, ils simplifient beaucoup la reconstitution des trajectoires: un point crucial pour analyser des événements qui produisent des centaines de particules.

Les détecteurs à pixels sont constitués par des matrices de micro-damiers (pixels) d'environ $100\ \mu\text{m}$ de côté. Chaque microdamier est un élément de détection. Il est connecté à sa propre chaîne électronique d'amplification, sélection d'amplitude et de stockage. Une sérieuse difficulté de fabrication de ces détecteurs est de réaliser ces circuits sur une surface aussi petite que celle du microdamier. Un ensemble de plusieurs milliers de pixels est associé à un système de lecture sélective, c'est-à-dire capable de sélectionner les pixels qui ont une information intéressante et de stocker leur adresse dans une mémoire. Le substrat détecteur est, en général, constitué par du silicium à haute résistivité. Il est possible d'intégrer au moins une partie de l'électronique d'entrée (amplificateurs et comparateurs) dans la plaquette de silicium du détecteur elle-même (détecteur monolithique), mais on ne peut alors dépasser une surface de l'ordre du centimètre carré. Pour réaliser de grandes surfaces de détection, il est plus facile de fabriquer une plaquette de silicium qui ne comporte que les diodes de détection (en silicium à haute résistivité) et de rapporter, en soudure par points, des petites plaquettes qui comportent les circuits électroniques. La plaquette de diodes est alors très simple et peut dépasser $10\ \text{cm}^2$, elle recevra une dizaine de plaquettes d'électronique pour constituer un ensemble de 50000 à 100000 pixels. C'est sur ce principe (détecteur hybride) qu'ont été fabriqués les détecteurs à pixels de l'expérience Delphi installée sur le LEP au Cern, et que sont proposées les couches internes de détection des expériences Atlas et CMS pour le LHC au Cern.

Les détecteurs à pixels de Delphi équipent les parties avant et arrière du détecteur de vertex. Dans ces régions, la densité de particules est très grande: les pixels donnant le point de passage des particules directement en deux dimensions et sans ambiguïté simplifient beaucoup la reconstitution des trajectoires. Les plaquettes sont installées sur deux couronnes qui viennent s'imbriquer dans les couches cylindriques de détecteurs silicium à pistes du détecteur de vertex. La couverture angulaire est ainsi augmentée de 20 degrés, ce qui constitue un avantage appréciable pour la physique au LEP à 200 GeV. C'est le premier détecteur à pixels installé sur un collisionneur. Les contraintes de ce type d'expériences sont multiples: espace réduit, épaisseur de matière minimale, accès limités aux arrêts de longue durée. Le nombre total de pixels est considérable (plus d'un million), mais le nombre de pixels touchés par événement est faible (moins de cent). Il est donc indispensable de ne lire que les pixels touchés. Cela nécessite tout d'abord un seuil commun pour les comparateurs d'amplitude de tous les pixels. Cela étant, chacun des pixels, dès qu'il sera touché, se signalera de lui-même en fermant un interrupteur. Le circuit de lecture n'encodera que les adresses des pixels qui se seront ainsi signalés. Pour obtenir une efficacité voisine de 100 %, il importe que le seuil soit inférieur à la plus faible charge déposée par une particule au minimum d'ionisation, soit environ 12000 électrons pour $300\ \mu$ de silicium (la valeur la plus probable étant de 24000 électrons). C'est certainement la plus grande difficulté pour la conception du circuit analogique des cellules. Cela nécessite non seulement un bruit électronique faible, ce qui est facile puisque les pixels, de petite surface, ont une

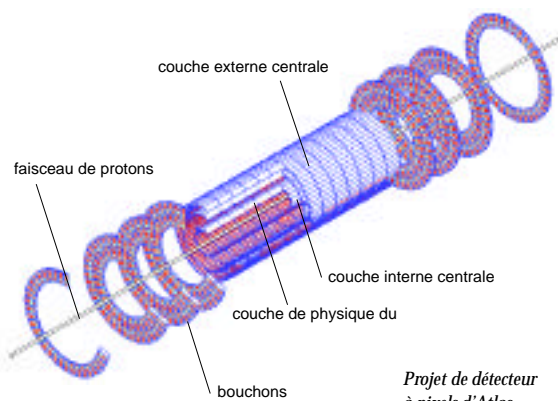


Principe du détecteur à pixels.

capacité très faible, mais aussi des caractéristiques de gain et de comparateur très voisines d'un pixel à l'autre, pour plus d'un million de pixels. Une autre difficulté importante est la connexion point par point du circuit électronique à la plaquette de détection. On utilise pour cela la technique dite de « bump bonding » qui consiste à déposer une bille de soudure sur chaque damier métallique de contact des pixels du détecteur par des méthodes de lithographie; ensuite, on appose le petit circuit électronique en faisant correspondre chacun de ses contacts d'entrée aux billes de soudures du détecteur, et on chauffe. La fabrication de la plaquette de détection ne présente pas de difficultés particulières, les pixels sont des diodes sur un substrat de silicium à haute résistivité comme pour les détecteurs à strips classiques. Cependant, dans le cas de Delphi, nous avons intégré les bus de lecture dans le substrat du détecteur afin de réduire l'épaisseur de matière.

Le projet de détecteur à pixels pour l'expérience Atlas est encore plus ambitieux, non seulement par sa dimension (150 millions de pixels sur plus d'un mètre carré), mais aussi par les sévères contraintes (radiations et marquage en temps) imposées par la haute luminosité attendue au LHC. Le circuit électronique doit être fabriqué en technologie très résistante aux radiations. C'est pourquoi la technologie DMILL (voir l'article correspondant) a été développée aussi activement dans le cadre de ce projet. La fréquence de collision au LHC sera de 40 MHz, et l'acquisition des données se fera en continu. Il faudra donc que le système de lecture des pixels sélectionne non seulement les pixels touchés, mais uniquement ceux qui sont touchés au cours de l'événement qui a donné un signal de déclenchement. Cette sélection doit se faire en moins de 25 ns. Trois prototypes de circuits réalisant de telles fonctions ont été fabriqués, dont deux en technologie DMILL. Ces circuits ont été testés en faisceau avec succès. Des prototypes aux dimensions finales ont été fabriqués au deuxième trimestre 1997. Le détecteur doit être entièrement terminé vers la fin de l'année 2003.

Détecteur à pixels de Delphi en cours de montage. Entièrement installé depuis le mois d'avril 1997. L'ensemble prend des données avec une efficacité moyenne de 96,5%. © Cern.



Projet de détecteur à pixels d'Atlas.

Pour en savoir plus :

C. J. Kenney et al., A prototype monolithic pixel detector, Nucl. Instr. Meth. A342 (1994) 59-77.

P. Delpierre et al., Large scale pixel detectors for Delphi at LEP200 and Atlas at LHC, Nucl. Instr. Meth. A342 (1994) 233.

Site Web:

http://marpix1.in2p3.fr/Pixel/cppm_pixel.html

Des circuits électroniques durcis aux radiations

La résistance aux radiations de l'électronique des détecteurs actuels de la physique des hautes énergies sera tout à fait insuffisante pour les grandes expériences du futur collisionneur LHC.

La technologie DMILL devrait permettre de construire des instruments capables de résister à la dose gigantesque de radiations qui seront émises par les faisceaux de protons. Trois projets en cours de développement pour les détecteurs Atlas et CMS sont présentés ici.

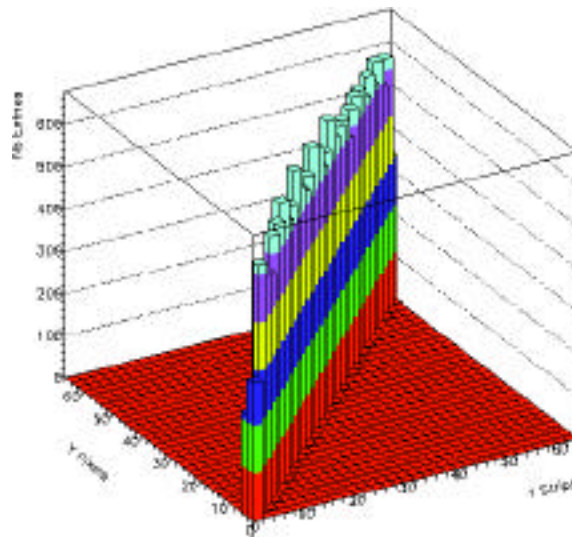
Électronique pour pixels

Le sous-détecteur Pixel du détecteur Atlas auprès du LHC, subdivisé en éléments de quelques dizaines de micromètres carrés, est composé de deux parties: une partie active de détection et une partie de traitement. Dans l'environnement du LHC, les détecteurs à pixels, très proches du faisceau, doivent être durcis aux radiations ionisantes et aux neutrons: pour la couche à 11 cm de ce détecteur, la dose prévue est de l'ordre de 2,5 Mrad et 10^{14} neutrons par cm^2 et par an. Aucune technologie standard ne peut résister à ces conditions sur dix ans. Le Centre de physique des particules de Marseille, très impliqué dans le projet Pixel, s'est très fortement investi dans les technologies durcies, notamment dans celle qui a été développée au Leti en relation avec la division militaire du CEA et Thomson: DMILL (Durci-Mixte sur Isolant Logico-Linéaire).

Les premiers travaux ont d'abord été orientés vers la caractérisation de cette technologie, c'est-à-dire l'analyse des composants élémentaires (transistors de différentes tailles et de différents types) sachant que DMILL permet d'associer des transistors CMOS, NPN et PJFET. Le déroulement des opérations a été le suivant: tracé des caractéristiques des transistors en sortie de fonderie; irradiation par neutrons à Grenoble auprès de Sara et par protons à Saclay au laboratoire Saturne; tracé des caractéristiques des transistors après irradiation et analyse des résultats.

En parallèle à ce travail de caractérisation, le CPPM a participé à la conception de circuits intégrés «full-custom» mixte analogique/numérique. Les premiers cir-

cuits réalisés dans ces technologies étaient composés de briques élémentaires d'une matrice de détection du projet de détecteur Pixel: l'amplificateur de charge, le discriminateur, le buffer. Ces circuits élémentaires ont subi, comme les transistors, des irradiations, ce qui a permis de faire des choix d'architecture et de valider la bonne tenue aux radiations des technologies employées.



Projet Lepton: corrélation entre la position des points d'impact donnée par l'adresse des pixels et la position des trajectoires des particules donnée par l'adresse des strips du télescope de faisceau. On voit que cette corrélation est parfaite.

Après cette phase de validation, des circuits plus complexes ont vu le jour: matrice de pixels avec système de lecture permettant de dater l'événement. La première matrice, qui porte le nom de Hadron, est composée de 8 colonnes de 15 pixels. Associée à un détecteur par «bump-bonding» ou «flip-chip» afin de participer à des tests faisceaux au Cern, elle a constitué une première en technologie durcie DMILL.

A la suite de ces résultats, des matrices de plus grandes tailles, intégrant au maximum les fonctionnalités du détecteur, ont été produites avec les contraintes de la taille de la cellule élémentaire ($50 \times 400 \mu$). La matrice Lepton, composée de 12 colonnes de 63 pixels, devenait déjà représentative d'un circuit final. Son fonctionnement a été validé à 40 MHz, fréquence de fonctionnement du LHC. Le circuit Muon, avec une surface de l'ordre de 80 mm^2 comportant 14 colonnes de 156 pixels, a permis de se faire une idée des difficultés rencontrées aussi bien avec les outils de conception et de vérification que sur les rendements de la technologie en fonderie.

Toutes les phases de fonderie de ces circuits, en technolo-

gie DMILL, se sont déroulées au Leti. La fabrication a ensuite été transférée chez un industriel. Le premier circuit s'appelle Marebo, il comporte 12 x 63 pixels comme Lepton mais permet de travailler avec des détecteurs n⁺/n qui ont une meilleure tenue aux radiations.

Grâce à ce travail, l'architecture développée par Marseille en technologie DMILL est celle qui a été retenue par la collaboration Pixel pour le démonstrateur. La prochaine étape, en 1998, consiste en la finalisation d'un circuit de 18 colonnes de 160 pixels, soit une surface proche du cm² avec plusieurs millions de transistors en technologie durcie DMILL.

Le pipe-line analogique

Parmi le très grand nombre d'événements dû au fort taux de collisions dans le futur collisionneur LHC, très peu seront réellement intéressants pour la physique. Il sera donc nécessaire de filtrer fortement les données sans créer de temps mort. La solution choisie pour la lecture du calorimètre électromagnétique d'Atlas consiste à mémoriser les informations du front-end sous forme analogique avant conversion numérique.

L'échantillonnage et le stockage du signal se font toutes les 25 ns dans l'attente du trigger de niveau I qui déclenche la lecture de cinq échantillons sur les événements les plus intéressants. Cela permet une réjection de 99 % de la quantité de données à convertir ainsi qu'un

relâchement sur le temps de conversion et donc une réduction très importante des contraintes et du nombre de convertisseurs analogiques-numériques nécessaires.

Cette mémoire analogique est un circuit intégré «full-custom». La dernière version, conçue en technologie DMILL, est constituée de 25000 transistors MOS et occupe une surface de 5,3 mm x 5,5 mm pour 12 canaux de stockage des signaux provenant d'un amplificateur de mise en forme. Chaque canal est composé d'amplificateurs permettant la lecture et l'écriture ainsi que de 144 cellules mémoires. Ces dernières sont des capacités commandées par des interrupteurs MOS.

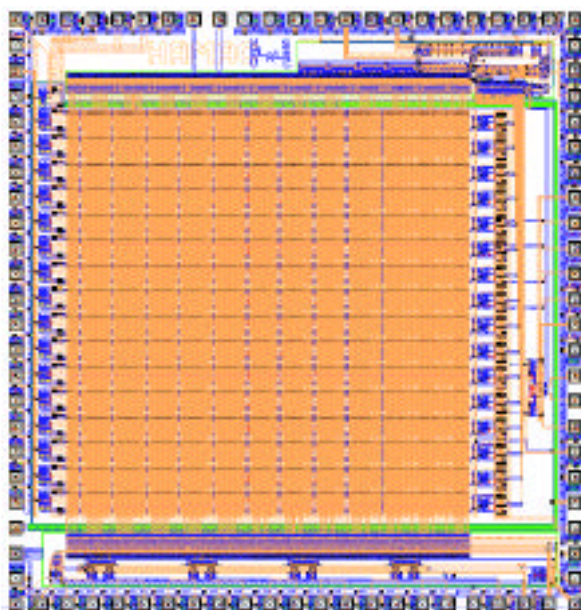
Ce circuit est destiné à être plongé dans un environnement qui peut subir des taux de radiation de l'ordre de 29krad par an, un flux de neutrons de 10¹² neutrons par cm² et par an et dont le cahier des charges exige une tenue à 100 krad par an. Cela explique le choix de la technologie DMILL, spécifiquement développée pour répondre aux contraintes sévères des détecteurs du LHC. Elle intègre des transistors NPN, CMOS et PJFET, possède deux niveaux de métallisation et deux niveaux de polysilicium et présente des caractéristiques très proches des technologies BiCMOS standard actuelles.

Les performances de la mémoire atteignent actuellement 13 bits de dynamique avec écriture (40 MHz) et lecture (5 MHz) simultanées. Sa consommation est faible, de l'ordre de 200 mW. De plus l'irradiation d'une des versions DMILL du circuit a prouvé sa tenue à des niveaux de 10 Mrad. Cette mémoire satisfait donc pleinement aux requêtes d'Atlas mais plus généralement à celles de la physique des hautes énergies.

Électronique de lecture pour détecteurs micropistes

La seconde grande expérience de physique des hautes énergies prévue au futur collisionneur LHC est l'expérience CMS. La partie centrale du détecteur comporte des détecteurs micropistes au silicium d'une part et gazeux d'autre part. Le passage d'une particule chargée dans ces détecteurs induit sur les pistes un signal électrique qui est conditionné par un circuit électronique et qui permet de calculer les coordonnées spatiales du point de passage. La succession des coordonnées permet de reconstruire la trajectoire de la particule chargée. Il est prévu que

Mémoire analogique pour la calorimétrie d'Atlas - technologie DMILL.

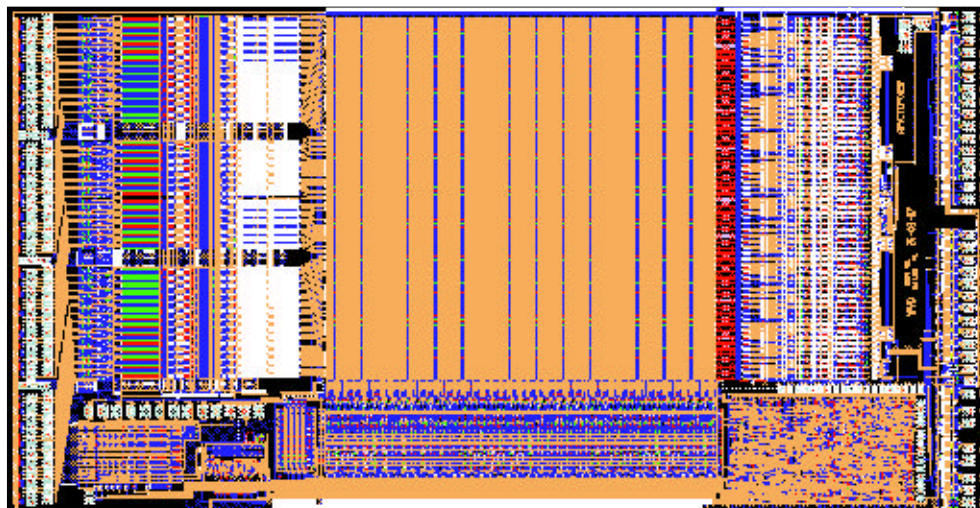


quelques millions de pistes de détection seront associées à autant de canaux électroniques rassemblés par 128 voies dans des circuits intégrés. Comme pour l'ensemble des détecteurs du LHC, la tenue aux radiations de l'électronique est un critère essentiel du choix de la technologie de fabrication.

Alors que la technologie CMOS standard est limitée à des taux de radiation de l'ordre de 100 kRad (correspondant à environ un mois de fonctionnement du LHC), la technologie sub-micronique DMILL 0,8 μm a été mise à disposition des concepteurs. Les circuits fabriqués dans cette technologie peuvent être irradiés jusqu'à des doses de 10 MRad. C'est avec cette technologie que deux circuits intégrés (Filtres et APVD) de lecture de détecteurs micropistes ont été conçus à l'IN2P3 en collaboration avec le CEA et le laboratoire britannique de Rutherford.

Ces circuits doivent conditionner de très faibles signaux de charge (environ 20000 électrons) dans des temps de quelques dizaines de nanosecondes. Outre leur tenue aux radiations, ils doivent donc avoir un niveau de bruit inférieur à 1500 électrons afin d'avoir un rapport signal sur bruit acceptable. Le nombre considérable de circuits impose par ailleurs une très faible dissipation, de l'ordre du mW par canal. Chaque canal comporte un circuit amplificateur et de mise en forme et les valeurs analogiques en sortie du circuit sont multiplexées à 20 MHz sur une seule sortie analogique en courant. Chaque circuit intégré de 128 voies comporte en outre différents blocs de contrôle, de génération des tensions, des courants et des impulsions de tests.

Le cœur du circuit est constitué par une mémoire et un processeur analogique fonctionnant sur un mode original de déconvolution. La mémoire analogique permet l'échantillonnage des signaux mis en forme à la fréquence de croisement des faisceaux (40 MHz) avec une dissipation statique nulle. Les échantillons correspondant aux trois dernières microsecondes sont stockés et une commande externe permet de conserver ceux qui correspondent à un événement intéressant. Ceux-ci sont alors trai-



Topographie du circuit APVD.

tés par le processeur analogique qui travaille à une fréquence inférieure (1 MHz) et dont le traitement mathématique équivaut à une mise en forme rapide tout en gardant les niveaux de puissance dissipée et de bruit dans les limites imposées.

Pour en savoir plus :

DMILL/Site Web:

<http://www.temic.de/semi/nt/ams/dmill/dmill002.htm>

Pixel/Site Web:

<http://marpix1.in2p3.fr/Pixel/cppm/pixel.html>

Pipe-line analogique/Site Web:

<http://atlasinfo.cern.ch/GROUPS/LIQARGON/TDR/>

Détecteurs micropistes/Site Web:

<http://www-lepsi.in2p3.fr/>

Laboratoires de la collaboration :

DMILL :

CEA (DAM, DSM et Leti), Thomson et IN2P3 (représenté par le CPPM) au sein d'un consortium de développement de DMILL.

Pixel :

CPPM (CNRS/IN2P3), université de Bonn.

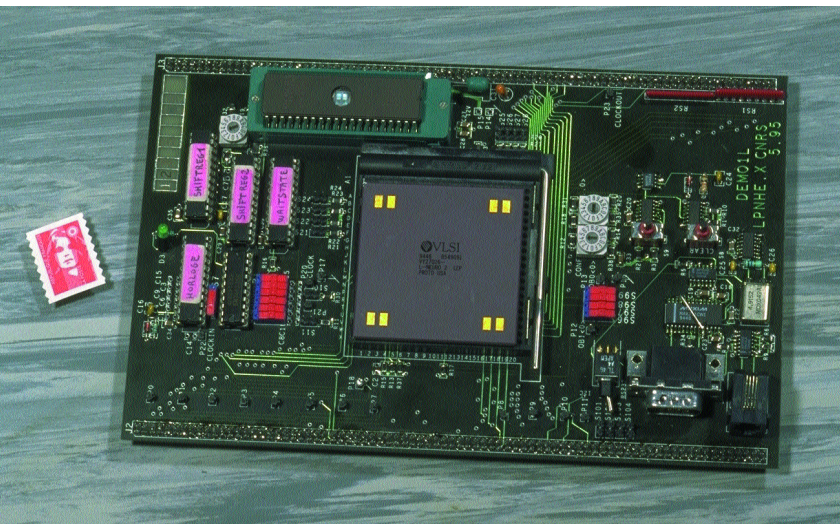
Pipeline analogique :

LAL (CNRS/IN2P3), Dapnia (CEA/DSM) et Nevis Labs (université de Columbia).

Détecteurs micropistes :

Lepsi (CNRS/IN2P3), Leti (CEA), Rutherford Laboratory (Grande-Bretagne).

L-neuro: un circuit intégré imitant les réseaux de neurones



Deux équipes, l'une du laboratoire de l'École polytechnique, l'autre de la société Philips, ont collaboré à la mise au point d'un composant électronique au traitement parallèle le plus massif possible. Sa conception est basée sur la problématique neuronale d'identification ou de tri d'éléments après apprentissage. Ce composant a servi de banc d'essai pour le système de sélection des événements dans l'expérience CMS.

Chacune des deux grandes expériences qui vont être installées auprès du LHC au Cern implique la conception d'un détecteur qui doit extraire, stocker et traiter une masse d'informations gigantesque, ce qui constitue un défi technologique. Ainsi CMS (Compact muon solenoid) comportera 83000 cristaux et fournira 83000 signaux à mesurer 40 millions de fois par seconde. Sachant que moins d'un événement seulement sur 1000 est intéressant pour la physique, une solution consiste à sélectionner les événements à la volée, donc à reconnaître et décider 40 millions de fois par seconde si l'événement est à garder ou non pour son étude ultérieure. La traduction matérielle de cette solution serait de construire des dispositifs électroniques observant en permanence les signaux et les analysant globalement (une sorte de traitement d'images défilant à 40 MHz).

Le laboratoire de physique nucléaire des hautes énergies à l'École polytechnique, en collaboration avec une équipe de recherche de la société Philips, a conçu et fabriqué un composant électronique prototype destiné au traitement parallèle le plus massif possible. Pour cela, les deux équipes ont envisagé la possibilité de traiter le problème au moyen de circuits intégrés imitant les réseaux de neurones. Après avoir exploré la problématique neuronale (identification ou tri d'éléments après apprentissage), elles ont focalisé leur travail sur les capacités de connectivité, de traitement parallèle et de fonctionnement en mode pipe-line du composant.

Celui-ci, baptisé L-neuro, a servi de banc d'essai lors d'études portant sur la conception du système de sélection des événements dans l'expérience CMS (événements comportant des électrons ou des photons isolés).

Le L-neuro est un composant numérique multiprocesseur. En entrée, 12 unités de calcul travaillent en parallèle sur des données 16 bits arrivant de l'extérieur sur 12 bus, constituant ainsi un vecteur à 12 composantes. Ensuite, une unité de calcul travaille sur ce vecteur, permettant d'en extraire des caractéristiques telles que la somme des composantes ou la composante la plus grande, par exemple. Avant la sortie du circuit, une dernière unité arithmétique et logique permet de faire des calculs sur 32 bits. Quelques chiffres donnent une idée de la quantité d'électronique intégrée sur chaque «puce»: 417000 portes logiques, soit environ 2 millions de transistors sur une surface de silicium de 216 mm². La technologie utilisée est l'une des plus récentes: CMOS 0,6 μ. Le boîtier protégeant la puce comporte 299 broches. Ces études se poursuivent actuellement en mettant à profit l'apparition sur le marché de circuits intégrés programmables à très haute densité d'intégration et présentant des centaines de points d'accès.

Collaboration :

LPNHE, École polytechnique; Laboratoire de recherche Philips.

De l'informatique centralisée à l'informatique distribuée

Le passage d'un ordinateur central à une organisation en fermes de stations caractérise l'évolution du Centre de calcul de l'IN2P3 au cours de ces dernières années.

Des évolutions liées à celles de l'informatique mais nécessitées aussi par les besoins considérables de calcul qui vont se développer avec les prochaines grandes expériences de la physique des hautes énergies.

Les besoins informatiques de l'IN2P3 découlent naturellement des besoins de la physique qui s'y fait: les moyens de calcul sont nécessaires dès la conception de l'expérience et jusqu'à l'analyse des données collectées. A l'origine, il faut des moyens importants en IAO pour concevoir les détecteurs, les accélérateurs et les systèmes d'acquisition. Puis, la phase de simulation, élément essentiel pour la compréhension du comportement des composants de l'expérience, nécessite une forte puissance CPU, largement aussi importante que celle requise pour l'analyse; en revanche, cette phase n'a pas besoin de forts

taux d'entrées/sorties. Enfin, l'analyse des données va consommer une forte puissance de calcul, associée à des moyens importants de stockage des données: un détecteur complexe peut générer jusqu'à 1 méga-octet par événement, et le LHC produira 10^8 événements par seconde dans chaque détecteur.

Le Centre de calcul est, à plusieurs titres, l'outil indispensable pour le dépouillement des données des expériences. Il va trouver sa place essentiellement comme serveur de calcul intensif à haute disponibilité et comme lieu unique de stockage des données brutes issues des sites expérimentaux. Sa vocation est aussi de fournir aux physiciens et ingénieurs un environnement de travail centralisant tous les logiciels nécessaires (développés par les expériences ou commerciaux, bases de données...) communs aux différents laboratoires, ainsi qu'un support humain et une expertise au niveau des moyens informatiques de la discipline. Pour ces raisons, le Centre de calcul demeure indispensable en complément de l'informatique des laboratoires.

L'évolution des systèmes informatiques a fait migrer le Centre de calcul d'un ordinateur central - mainframe



*L'archivage des données d'expériences au Centre de calcul de l'IN2P3.
Crédit: IN2P3.*

IBM sous VM - vers un assemblage de stations, communément appelé ferme, et utilisant le système Unix. Cette migration découlait du souci de réduire le coût du calcul et d'offrir un système plus performant et plus souple. Contrairement au mainframe, les fermes de stations sont plus facilement reconfigurables en fonction des besoins: on peut ajouter de nouvelles machines dans une ferme ou les faire passer d'une ferme vers une autre. On peut dédier certains ensembles à des tâches spécifiques et, par là même, augmenter la qualité et l'efficacité du service (batch, interactif, I/O intensif, calcul intensif comme la simulation...). D'autre part, l'avènement des applications clients-serveurs et des interfaces homme/machine graphiques s'accommode infiniment mieux de ce type d'informatique et offre une meilleure adéquation avec l'équipement des laboratoires. L'augmentation du débit des réseaux permet ainsi de répartir l'intelligence d'une application entre les ordinateurs du Centre et les stations dans les laboratoires. Les moyens importants de stockage: robots 3480/3490, RedWood, DLT dont la mise en œuvre avait commencé avec le mainframe, ont été entièrement réadaptés au système Unix.

Le Centre de calcul a défini son informatique en plusieurs fermes spécialisées, basées sur des stations de travail IBM et HP: Basta, ferme de station orientée calcul (calculs sans IO, simulation); Anastasie, fortement couplée à Dataserv et orientée pour des taux élevés d'entrées-sorties; Bahia pour l'accueil interactif des utilisateurs; Sioux pour les déports de processus interactifs comme l'analyse graphique; Dataserv, serveurs de disques et serveurs de bandes. De plus, de nombreux serveurs spécialisés apportent les fonctionnalités nécessaires au travail collaboratif: serveurs de mail, serveurs Web, serveurs de news, serveurs d'annuaires...

Cet ensemble de machines est interconnecté, en fonction des débits, sur différents segments du réseau local constitués d'Ethernet, d'ATM et de FDDI. La connectivité entre les laboratoires et le Centre de calcul est passée en grande partie du réseau Phynet au réseau académique national: Renater. Une connexion à 4 Mbits/s relie le Centre de calcul de l'IN2P3 au Cern et c'est via cette connexion que la discipline est reliée aux États-Unis (1 Mbit/s sur la liaison transatlantique).

Le Centre de calcul étudie actuellement la mise en place de fermes de stations sur d'autres plate-formes, comme des PC utilisant des systèmes Unix du domaine public (Linux) ou des systèmes propriétaires comme Windows NT. Un effort important va continuer sur le stockage des données et leur accès: en effet, les expériences vont successivement apporter des quantités croissantes de données à analyser. Ainsi, chaque grande expérience du LHC écrira de l'ordre de 10^{15} octets par an de données brutes.

Remerciements

Introduction

François Dupont

Faits marquants

Sydney Galès

Joël Le Duff

Terence Garvey

Jean Marini

André Tkatchenko

Philippe Miné

Joël Arianer

Pascal Sortais

Tomas Junquera

Lionel Luquin

Stéphane Bouvier

Philippe Schwemling

Jean-Pierre Peigneux

Didier Contardo

François Montanet

Guy Wormser

Pierre Delpierre

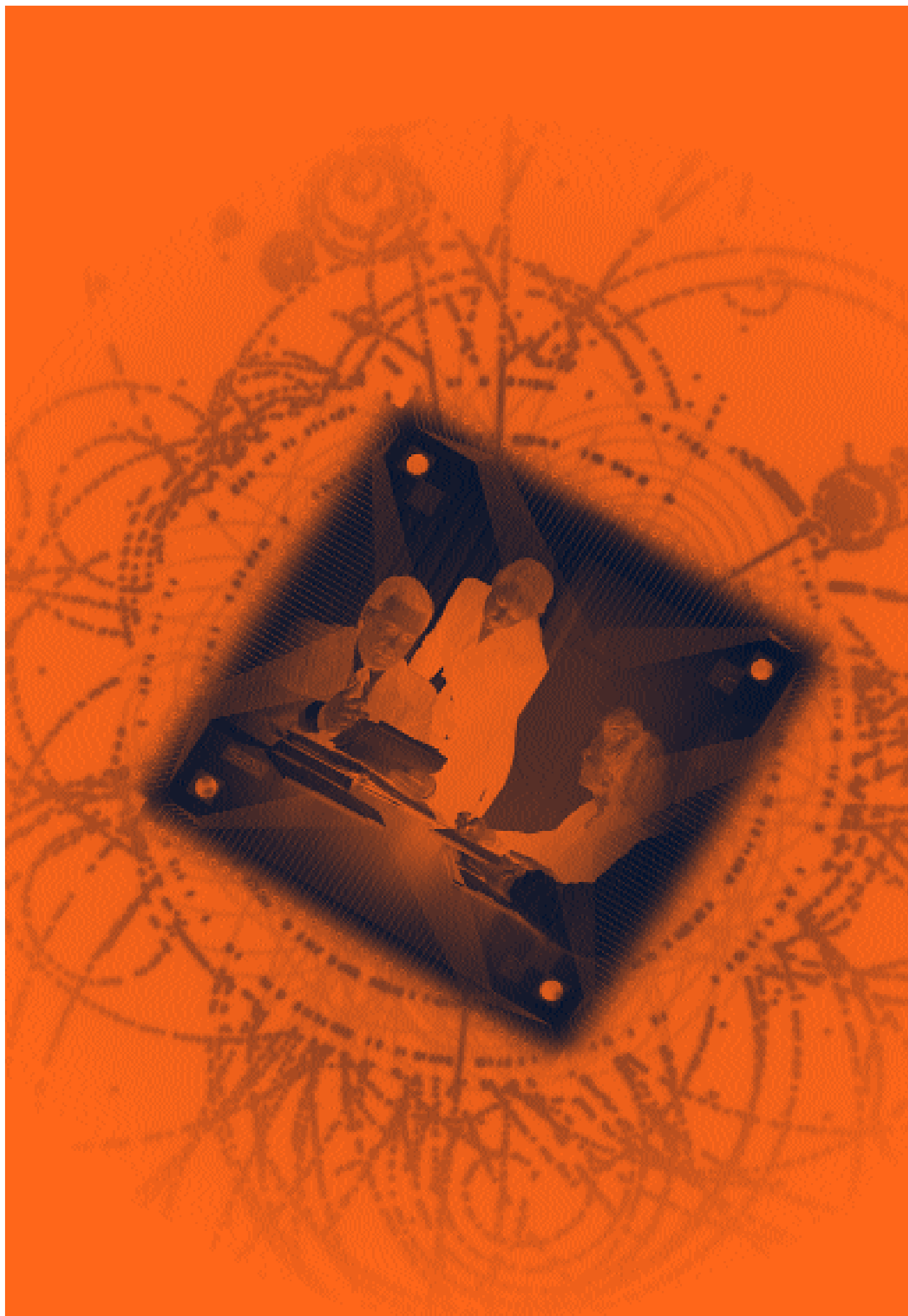
Rémy Potheau

Christophe de la Taille

Jean-Daniel Berst

Pierre Matricon

Daniel Charnay





Partenariats

**LES RELATIONS
AVEC LES PARTENAIRES UNIVERSITAIRES**
page 142

LES RELATIONS INTERNATIONALES
page 144

L'AVAL DU CYCLE ÉLECTRONUCLÉAIRE
page 147

LA DIFFUSION DES RESSOURCES TECHNOLOGIQUES
page 150

LA COMMUNICATION
page 152

L'IN2P3 et l'Enseignement supérieur

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. Ce processus définit un contrat de quatre ans entre le CNRS et un ou plusieurs établissements d'enseignement supérieur. Il établit, pour chaque unité reconnue par les deux (ou plus) partenaires, son statut, sa composition (personnel chercheur, enseignant chercheur et technicien) et les données matérielles (locaux et moyens récurrents) que lui garantissent les signataires du contrat. Le territoire national a été divisé en quatre zones dont la contractualisation se fait année après année. A ce jour, trois zones se sont engagées dans la contractualisation. Bien que les contrats de la dernière (région parisienne à l'exception de Paris intra-muros) ne doivent être signés qu'en 1998, le texte qui suit, pour simplifier la présentation, anticipe sur les résultats prévisibles de la négociation qui lui correspond.

L'existence de relations étroites de l'IN2P3, quasi structurelles, avec l'université est antérieure à son intégration au CNRS en 1982. Elles résultent en quelque sorte de l'acte fondateur de l'Institut. En effet, prenant en compte les spécificités de ces disciplines, et en particulier le 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. En conséquence, avant même la contractualisation, l'intégration des laboratoires de l'Institut dans le tissu universitaire était l'état de fait. Cela se marquait par l'absence d'unité exclusivement universitaire travaillant dans nos disciplines, l'existence d'une majorité d'unités mixtes (UMR) dans l'ensemble des laboratoires de l'IN2P3 et par la présence d'un fort contingent de chercheurs universitaires dans tous les laboratoires, y compris ceux qui avaient le statut d'unité propre du CNRS (UPR).

Toutefois, l'IN2P3 a saisi la contractualisation comme un moyen de renforcer plus encore ces liens déjà forts. C'est ainsi qu'à l'issue du processus, l'ensemble des laboratoires situés sur des campus universitaires seront devenus des UMR fonctionnant selon les procédures élaborées en commun par le CNRS, la Conférence des présidents d'université et la Direction de la recherche du MENRT. La situation sera alors la suivante: sur les 18 laboratoires de l'Institut, tous seront devenus des UMR à l'exception du laboratoire national Ganil qui ne relève pas d'un campus universitaire et qui, lors de sa fondation, a été doté du statut de groupement d'intérêt économique (GIE). En

particulier, trois UPR (à Annecy-le-Vieux, Strasbourg puis Orsay) seront devenues des UMR. Trois laboratoires auront toutefois un statut de contractualisation un peu distinct. Il s'agit des UMR dont les contrats ont été signés avec l'École polytechnique et le Collège de France, d'une part, et, d'autre part, de l'UMR Subatech pour laquelle l'IN2P3 est entré dans une structure de partenariat triple avec l'université de Nantes et l'École des Mines.

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 nos domaines. Du coup, l'implantation universitaire de l'IN2P3 est réduite et inhomogène; elle est localisée dans la région parisienne et quelques métropoles régionales. Cette concentration, motivée par des exigences d'efficacité, se paye d'une restriction du champ géographique de diffusion des sciences de l'Institut. Nombreux sont les campus où elles sont enseignées par des physiciens qui, par la nature de leur activité, peuvent difficilement rester informés des développements récents en physique nucléaire et des particules. Pour y remédier, l'IN2P3 s'est doté d'un chargé de mission dont la tâche est d'établir des contacts avec les universités où nous sommes absents pour leur proposer des modules d'enseignement à base de conférences données par des physiciens des laboratoires de l'Institut. Ce processus de «reconquête» scientifique doit bien sûr être conduit en coordination étroite avec l'université hôte et, en particulier, s'intégrer harmonieusement au programme d'enseignement qu'il entend compléter et enrichir.

L'action internationale de l'IN2P3

Au cours des dernières années, la structuration de la recherche scientifique a conduit à modifier les méthodes de mise en œuvre de la coopération internationale et à privilégier la mise en place d'actions pluriannuelles. L'IN2P3 a adopté ce type d'actions qui assure que la dimension internationale accompagne la politique scientifique de l'Institut dans ses grands axes prioritaires et ses programmes.

Ainsi, depuis 1994, 27 programmes internationaux de coopération scientifique (Pics) ont été initiés par l'IN2P3 pour soutenir des collaborations avec des équipes étrangères sur la base d'un équilibre des moyens humains et/ou financiers. Avec un pourcentage de 60 %, principalement dû à la Russie, l'Europe centrale et orientale est particulièrement présente dans ce type d'actions. Le Maroc et, plus récemment, les États-Unis s'ouvrent également à ce mode de coopération.

Répartition géographique des Pics initiés de 1994 à 1997

Europe de l'Ouest	5
Europe centrale et orientale	16
Asie	1
Alena (États-Unis, Canada, Mexique)	2
Moyen-Orient, Maghreb	3

La collaboration franco-roumaine Tonnerre relative à la construction et à l'utilisation de l'ensemble de détection pour neutrons de radioactivité fait partie des Pics qui reçoivent actuellement un financement spécifique. Il en est de même pour l'expérience CAT d'astronomie gamma initiée par le Laboratoire de physique nucléaire des hautes énergies à l'École polytechnique sur le site de l'ancienne centrale solaire EDF Thémis (dans les Pyrénées-Orientales), et à laquelle participent les chercheurs tchèques de l'université Charles de Prague.

Deux Pics franco-américains soutiennent les échanges de chercheurs relatifs à deux projets scientifiques importants, l'un consacré à l'étude de la physique hadronique avec des expériences à réaliser auprès de l'accélérateur Cebaf récemment mis en fonction au Thomas Jefferson National Accelerator Facility (TJNAF) en Virginie, l'autre consacré au projet Graal en collaboration avec le laboratoire de physique des solides de l'université de Syracuse.

Des collaborations franco-marocaines se développent grâce à deux autres Pics : l'une avec l'université d'El Jadida permet à des universitaires marocains de participer, à



*Signature
d'une convention
de jumelage
à l'occasion du
vingtième anniversaire
de l'accord
de coopération IN2P3-
Laboratoires polonais.
© CNRS/N. Tiget.*

Strasbourg, aux expériences réalisées sur le multidétecteur gamma Eurogam; l'autre avec le

Laboratoire de physique nucléaire de Casablanca et l'université Mohamed V de Rabat devrait ouvrir la porte du Cern aux chercheurs marocains grâce à leur participation à la mise au point d'éléments du détecteur Atlas.

Le Pics relatif à l'exploitation du détecteur Démon (Détecteur modulaire de neutrons) a permis aux équipes franco-belges de réaliser une série d'expériences auprès de plusieurs accélérateurs pour étudier la matière nucléaire à travers l'analyse de collisions violentes.

Dans le cadre de l'interdisciplinarité, un Pics réunissant des théoriciens et des expérimentateurs a permis d'étendre à des groupes russes la collaboration franco-japonaise dédiée au développement de programmes informatiques permettant le calcul automatique des grandeurs physiques mesurées en hautes énergies. Un autre Pics France-Belgique-Espagne, relatif à l'astrophysique des rayons gamma et nucléosynthèse associée, illustre la collaboration entre des physiciens nucléaires et des astrophysiciens de l'Insu dans ce domaine. De même, un Pics franco-russe dédié aux interactions ions-plasma a bénéficié d'un soutien du département des Sciences pour l'ingénieur du CNRS.

A l'occasion du vingtième anniversaire de l'accord de coopération IN2P3-laboratoires polonais, une convention de jumelage a été signée fin décembre 1994 pour développer la collaboration engagée en physique nucléaire auprès du Vivitron de Strasbourg et en particulier avec le multidétecteur Eurogam. Un avenant actuellement en cours de signature permettra de soutenir cette action jusqu'en l'an 2000. Prochainement, l'IN2P3 devrait aussi développer cette collaboration avec l'Italie dans le cadre d'un Laboratoire européen associé (LEA).

L'Institut a parallèlement poursuivi sa politique de conventions avec des partenaires privilégiés et favorisé la venue de visiteurs étrangers. Chaque année, il accueille entre 80 et 100 chercheurs (post-doc ou confirmés) de nationalité étrangère pour des séjours de longue durée afin de mener à bien, en collaboration, un programme de recherche défini. De plus, environ 200 chercheurs viennent annuellement dans les laboratoires de l'IN2P3 pour des séjours de courte durée qui s'inscrivent dans le cadre

de programmes conjoints, régulièrement examinés en comités mixtes. Une réflexion a ainsi été menée dernièrement sur les accords de coopération entre l'IN2P3 et la Russie afin de développer des partenariats de qualité sur des thèmes d'intérêt commun. Un effort a également été fait en faveur des collaborations avec la République tchèque: le volume d'échanges déterminé par l'accord initial a été doublé pour favoriser le développement des programmes.

La dimension internationale de l'IN2P3 en 1997

≈ 80 chercheurs étrangers (post-doc ou confirmés)

380 mois d'accueil = 7,54 MF

14 conventions bilatérales d'échange, 17 Pics, 1 jumelage

306 dossiers = 200 mois = 2,60 MF

Ressources propres contrats communautaires

6,90 MF

Qu'il s'agisse des possibilités de financement, des modalités de séjour et d'accueil, ou des accords spécifiques à l'Institut, les informations internationales sont disponibles sur le site Web de l'IN2P3. Il est également possible, à partir de ce site, d'établir des liens avec d'autres sites spécialisés lorsque les financements ne relèvent pas directement de l'Institut. Une mise à jour des actualités internationales est effectuée régulièrement et certains formulaires de coopération sont d'ores et déjà accessibles même si un effort reste encore à faire pour améliorer le processus et éviter la transmission papier.

Par ailleurs, pour résoudre au mieux les questions liées au transport des marchandises entre les laboratoires et les sites d'expérimentation, l'IN2P3 a créé une cellule de logistique internationale, directement rattachée au service des affaires internationales depuis le 1^{er} janvier 1996. Cette cellule, délocalisée au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules, a pour vocation de prendre en charge tout problème technique ou administratif d'échange ou de logistique relevant d'achats ou de ventes effectués à l'étranger. Ainsi, la cellule peut assurer tout échange de matériels entre un laboratoire IN2P3 et son partenaire étranger, tout transport national, intra-ou extracommunautaire, tout affrètement particulier et toute opération d'import-export. Elle a également une mission de conseil pour les opérations douanières et pour la fiscalité des échanges.

L'IN2P3 et l'aval du cycle électronucléaire

Le contexte historique et les motivations

La mission première de l'IN2P3 est de développer et de coordonner les recherches en physique nucléaire et physique des particules. Cela n'exclut pas, bien au contraire, qu'il exerce également des activités de recherche de nature interdisciplinaire ou appliquée, en réponse à des demandes émanant aussi bien d'autres secteurs de la recherche que de secteurs économiques et, plus généralement, de la société. Aussi, l'IN2P3 ne pouvait, dans le nouveau contexte créé par l'adoption de la loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, rester à l'écart d'une problématique qui correspondait effectivement à une véritable demande sociale, et dans laquelle il est à même de s'inscrire, avec les autres acteurs de la recherche concernés que sont notamment le CEA et l'Andra. En effet, la mise en place de solutions de gestion des déchets radioactifs relève, pour une large part, de disciplines scientifiques telles que la radiochimie, la physique nucléaire expérimentale et théorique ainsi que l'instrumentation qui leur est normalement associée. Ces disciplines entrent tout à fait dans le champ de compétence de l'Institut et sa spécificité, qu'il partage avec l'ensemble du CNRS, peut être décisive, dès lors que des solutions envisagées pour la gestion des déchets à vie longue et à haute activité nécessiteront, pour être pleinement validées, des travaux de recherche de base, éventuellement à caractère fondamental, ou que l'on explorera de nouvelles pistes.

C'est pourquoi la direction de l'IN2P3 décidait d'instituer en juin 1993 le programme Pracen (Programme de recherche sur l'aval du cycle électronucléaire), une structure de financement et de concertation portant sur trois thèmes de recherche que certaines équipes de l'Institut étaient à même de prendre en charge. Le premier - Études radiochimiques liées aux conditions physico-chimiques des stockages en surface et en profondeur des déchets, ainsi qu'à la séparation de certains radioéléments à vie longue - se rattachait à l'activité en radiochimie, et trouva son épauvement dans la création en 1995 du groupement de recherches Practis (Physico-chimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces) qui regroupe des équipes appartenant à l'IN2P3 et au département des Sciences chimiques du CNRS ainsi qu'à la Direction du cycle du combustible du CEA. Les deux autres thèmes - Mesures de radioactivité dans les déchets et dans l'environnement; Acquisition de données nucléaires, et développement des accélérateurs, en relation avec la transmutation nucléaire - se réfèrent aux diverses expertises de l'IN2P3, le premier dans la détection des très faibles activités (spectrométrie de masse par accélérateur; systèmes de détection gamma et X à très bas bruit de fond) et le second

Des céramiques
pour le
conditionnement
de certains
déchets
nucléaires
page98

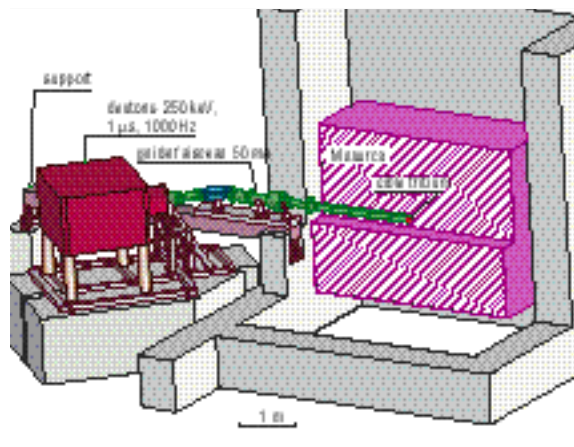


Schéma de principe de la source Genepi.

dans le domaine des systèmes hybrides d'incinération de déchets ou de production d'énergie, couplant un accélérateur de haute intensité à un réacteur sous-critique. Ce thème majeur de l'axe 1 devait être traité à partir de 1997 dans un nouveau GDR appelé Gédéon (Gestion des déchets par des options nouvelles), constitué entre CEA, CNRS et EDF au début de 1997.

L'objectif de Pracen visant à identifier les thèmes scientifiques et les équipes de recherche à l'IN2P3 et à assurer un premier financement a été atteint dès 1995 pour les thèmes traités par Practis et vers la fin de 1996 pour les autres. Par ailleurs, diverses instances extérieures (ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques, Commission nationale d'évaluation) et EDF (en ce qui concerne les hybrides) demandaient que les recherches sur l'aval du cycle électronucléaire fassent l'objet d'une programmation et d'une collaboration étroite entre les deux acteurs principaux de la recherche CEA, CNRS. Pour ces deux raisons, Pracen, qui n'était qu'une entité IN2P3, fut supprimé à la fin de 1996, et les deux GDR, Practis et Gédéon, devenaient les uniques structures où se déroulent désormais les activités de recherches de l'IN2P3 relatives au cycle électronucléaire. Depuis 1997, ces deux GDR sont regroupés avec Forpro (Formations profondes) dans le programme Pace (Programme pour l'aval du cycle électronucléaire) du CNRS. Ce programme fait donc intervenir plusieurs départements et devra prochainement englober Nomad (Nouveaux matériaux pour les déchets), un nouveau GDR «Matériaux» pour les conditionnements de déchets. Notons que cette thématique est également abordée par des radiochimistes de l'IN2P3.

Le groupement de recherches Gédéon

La convention signée au début de 1997 entre les trois partenaires de Gédéon, et en voie d'élargissement à Framatome, prévoit que les recherches sur les options innovantes concerneront les systèmes hybrides d'une part et le thorium d'autre part. En effet, on assiste, depuis 1989 au plan international, à un renouveau d'intérêt pour le rôle que pourraient jouer de tels systèmes, éventuellement chargés au thorium, dans le domaine de l'incinération des corps à vie longue contenus dans les combustibles irradiés des réacteurs (produits de fission à vie longue tels que l'iode 129 ou le tech-



Expérience de transmutation à Saturne. En sortie du château de plomb, l'aimant (vert) sépare particules neutres et chargées de haute énergie; l'analyse est faite par le spectromètre (rouge), la chambre à fils et l'hodoscope (à l'arrière). Les bombardes (jaunes) abritent les compteurs de neutrons pour les particules de basse énergie.
© CEA.

nétium 99, transuraniens tels que le plutonium et les actinides mineurs), voire dans celui de la production d'énergie nucléaire sûre, propre, non proliférante et abondante (c'est le concept d'amplificateur d'énergie proposé par Carlo Rubbia).

L'étude des systèmes hybrides concerne en premier lieu celle de l'accélération de très haute intensité. En effet, un réacteur sous-critique de 3000 MWth capable de fissionner jusqu'à 800 kg de transuraniens par an doit être alimenté par les neutrons que produit un faisceau de protons de l'ordre de 1 GeV et de plusieurs dizaines de mA dans une cible lourde (plomb, tungstène) de spallation. Le projet Iphi d'une tête d'accélérateur linéaire de 100 mA et 10 MeV, mené avec la Direction des sciences de la matière du CEA, s'inscrit aujourd'hui dans cette perspective.

La physique de la cible de spallation constitue le deuxième thème. Les caractéristiques des neutrons émis (nombre, distributions en angle et en énergie) établissent les performances du système en terme, d'incinération, de radioprotection et de dommages aux matériaux constituant les structures. Par ailleurs, la connaissance des résidus de spallation créés dans la cible est indispensable pour évaluer le risque radiologique et la chaleur dégagée à long terme, ainsi que, dans le cas d'une cible en métal liquide, les phénomènes de corrosion et de fragilisation des aciers en contact (expériences en cinématique inverse menées à GSI. Enfin, un programme de mesures de données nucléaires, entrepris à Louvain, Uppsala et Groningue par des équipes de l'IN2P3, permet d'améliorer les codes de spallation et de transport qui simulent l'ensemble de ces caractéristiques.

Troisième volet enfin, l'étude neutronique des configurations sous-critiques entreprises par des équipes de la Direction des réacteurs nucléaires du CEA et de l'ISN de Grenoble sur le réacteur Masurca de Cadarache. L'IN2P3 contribue fortement à cette voie de recherche par la construction de la source Genepi de neutrons pulsés de 14 MeV, la conception de détecteurs à hélium 3 et une forte présence dans la prise des données.

Ces études de base doivent se poursuivre, comme celles relatives aux matériaux, et fournir le socle de connaissances de base indispensables pour la réalisation éventuelle d'un démonstrateur hybride de 200 MWth, pour lequel le MENRT a pris l'initiative de constituer un groupe de travail regroupant tous les partenaires de Gédéon. L'objectif de ce groupe est de définir un cahier des charges général, d'identifier les principales options techniques de base, de proposer un calendrier et d'inscrire la démarche dans une perspective européenne. Un rapport devrait être produit d'ici à la fin du premier semestre 1998.

La cinématique inverse : une méthode originale appliquée à l'aval du cycle électronucléaire
page99

La diffusion technologique

L’Institut de recherche fondamentale, l’IN2P3 est conduit, par la nature même de ses expériences à développer ses propres outils, instruments de très haute technologie. Il peut représenter ainsi un réservoir de compétences pour des entreprises de différentes natures. C’est pourquoi, au cours de la période couverte par ce rapport, l’IN2P3 a mené une action importante afin de renforcer son action de diffusion technologique. Il l’a fait dans des domaines où des collaborations existaient déjà mais son action porte ses fruits à partir de 1998 où de réelles percées dans ce domaine sont réalisées. Quelques exemples en sont donnés ici.

La thérapie des tumeurs cancéreuses par les protons

C’est une technique connue et expérimentée depuis plus de vingt ans, mais qui n’a jamais réussi à percer pour beaucoup de raisons dont l’une est le coût élevé des machines destinées à cette application. Deux voies de développement sont possibles : soit mettre au point des types d’accélérateurs très nouveaux, capables de délivrer des protons de 250 MeV d’énergie et de 300 nA d’intensité dans une émittance raisonnable, soit apporter des innovations substantielles dans le domaine des cyclotrons pour en descendre drastiquement les coûts de construction. L’IN2P3 a décidé d’abandonner la première voie, bien qu’elle ait été reconnue prometteuse, car les moyens à mettre en œuvre pour déboucher sont au-delà de ce que l’Institut peut dégager. La deuxième voie est explorée par l’IN2P3 en collaboration avec la société Pantechnik ; son objectif est de produire un avant-projet suffisamment détaillé afin de pouvoir faire des propositions commerciales à des clients éventuels.

La mesure de la radioactivité dans l’environnement

Il existe une demande de plus en plus forte de mesures de radioactivité de la part des grands organismes confrontés aux problèmes de gestion des déchets, ainsi que des collectivités locales. Ces mesures ont fait partie de l’activité de plusieurs laboratoires de l’IN2P3 dans les années passées, et le laboratoire Subatech est en pointe dans ce domaine. Une action a été engagée en 1997 pour organiser un réseau de tous les laboratoires concernés dans le même temps que l’Office de protection contre les rayonnements ionisants (Opri) les soumettait à des tests d’intercomparaison. Cette procédure constitue le premier pas vers une reconnaissance de la qualité des mesures.

La microélectronique

Le GIP C4I (Centre de compétences en conception de circuits intégrés), s'est constitué en 1992 sur la base d'un partenariat entre le CNRS et un groupement d'industriels, afin de valoriser des travaux de laboratoires de l'IN2P3 en microélectronique. Les résultats prometteurs accumulés au cours de ses quatre premières années d'existence ont conduit à renouveler ce GIP en 1996. Son activité concerne la livraison de circuits microélectroniques pour un nombre assez important de clients compte tenu de la structure existante, dans des domaines d'activité très divers. Une des sociétés clientes de C4I travaille dans le domaine de l'automobile où les problèmes de qualité, de fiabilité sont d'une autre dimension que pour le reste de l'industrie.

Les sources d'ions

Il s'agit là d'un domaine dans lequel la diffusion technologique s'est faite à travers une société dédiée, la société Pantechnik qui s'appuie sur Eurisys Mesures. Cette société a des accords de recherche avec l'IN2P3 concernant le domaine des sources d'ions lourds mais a su faire en interne des développements dont le succès commercial est affirmé. Pantechnik a en effet des clients dans le monde entier : Suède, Japon, États-Unis.

L'aval du cycle électronucléaire

Ce point est plus particulièrement développé dans l'article précédent. Notons cependant que le développement d'accélérateurs de haute intensité (projet Iphi) destinés principalement aux systèmes hybrides est un axe important de l'activité de diffusion technologique de l'IN2P3.

Enfin, un certain nombre de contrats de recherche existent entre les laboratoires de l'IN2P3 et les industriels. Ces contrats sont du type contrats de recherche à objectifs partagés (Crop). Le total du chiffre d'affaires annuel généré par ce type de contrat est cependant assez faible (4 MF). Cela peut s'expliquer en partie par le fait qu'il n'entre pas dans les objectifs de l'Institut de faire de réels développements technologiques, mais que sa démarche est de pousser les technologies existantes à leur limite pour réaliser les instruments (accélérateurs et détecteurs) dont il a besoin. De ce fait, les contrats industriels de l'Institut concernent soit l'application de technologies nouvelles, utilisées dans les laboratoires, dans des entreprises qui n'ont pas encore franchi ce pas, soit le développement d'axes de recherche, notamment en chimie nucléaire, dont les applications sont importantes aujourd'hui dans le traitement des déchets.

La communication, l'information scientifique et technique

La communication des résultats scientifiques, la diffusion de l'information scientifique et technique font partie des missions de tout organisme de recherche fondamentale. Pour le CNRS en particulier, ce rôle a été précisé explicitement dans le décret de 1982. Comme tous les départements scientifiques, l'IN2P3 participe à cette tâche : communication interne au sein de l'Institut, notamment par la publication de la *Lettre du Département*; information des médias, ce qui implique une veille scientifique active; communication vers le grand public, terme qui recouvre une grande diversité d'actions. Quelques événements ou actions phares, décrits ici, illustrent l'activité de communication de l'IN2P3 au cours de la période 1994-1997.

Les 25 ans de l'Institut

De même que pour les individus, les anniversaires apparaissent souvent dans la vie d'une organisation comme une sorte de borne : on s'arrête un instant pour réfléchir sur l'action passée et porter son regard sur le présent et vers l'avenir. L'IN2P3 n'y a pas dérogré en fêtant ses 25 ans en 1996. Cet anniversaire a donné lieu à plusieurs réalisations : un livre, une exposition, un film.

L'ouvrage *25 ans de recherche à l'IN2P3 : la science, les structures, les hommes* a apporté divers éclairages sur l'action de l'Institut : les évolutions scientifiques, les aspects plus politiques des relations avec les autres organismes en Europe et notamment le Cern, l'histoire d'une institution singulière, et enfin l'analyse d'une organisation sociologique tout à fait particulière dans le monde de la recherche.

L'exposition *Sur les traces de l'invisible* s'adresse à un public moins spécialisé. Elle décrit, à travers trente-quatre panneaux, des instruments et des expériences interactives, ce que sont les principaux thèmes et interrogations de la physique d'aujourd'hui dans les domaines nucléaire et corpusculaire. Présentée au Palais de la Découverte en novembre 1996, elle est itinérante depuis lors. Après Caen, Bordeaux et Grenoble en 1997, elle doit être présentée à Orsay, Lyon et Strasbourg en 1998.

Un montage vidéo de quinze minutes *Vingt-cinq ans d'intimité avec la matière* a été réalisé. Il permet de donner une vision concise des principales préoccupations de l'Institut et offre ainsi un outil de présentation à la disposition des laboratoires ou à destination des jeunes.





Deux manifestations se sont déroulées: l'une plus institutionnelle en avril, à la date anniversaire de la création de l'Institut, l'autre, en novembre au Palais de la Découverte, plus festive, à l'occasion de l'inauguration de l'exposition et de la publication du livre.

Le Centenaire de la découverte de la radioactivité

Autre anniversaire: celui du Centenaire de la découverte de la radioactivité célèbre de 1996 à 1998 la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896 et celle du radium par Pierre et Marie Curie en 1898. De très nombreuses manifestations ont été organisées sous le patronage du Haut Comité pour le centenaire, présidé par Georges Charpak et Maurice Tubiana. L'IN2P3 a apporté son soutien au Haut Comité; plusieurs laboratoires de l'Institut ont très activement participé aux comités régionaux et se sont fortement impliqués dans l'organisation de manifestations au niveau régional, notamment par la présentation de conférences dans les lycées et collèges, ainsi que pour le grand public.

Les conférences Nepal

Soucieuse de son devoir de participation à la formation des jeunes, en tant qu'organisme de recherche fondamentale, la Direction de l'IN2P3 a souhaité que les chercheurs collaborent massivement à une action de conférences dans les lycées. Un petit groupe de travail réunissant sept physiciens a donc été constitué à l'automne 1995 pour mettre sur pied un ensemble de conférences types destinées à présenter quelques-uns des grands programmes actuels ou des grands projets de l'Institut. Ce groupe, qui s'est doté du nom de Nepal (Noyaux et particules au lycée), a achevé la préparation de cinq conférences au début de l'année 1997: synthèse des éléments et destin des étoiles; qu'est-ce que la masse? le projet LHC; le neutrino, particule fantôme; le LEP, une machine à remonter le temps; la structure du proton. Cette proposition a recueilli un avis très positif de l'Inspection générale de physique-chimie et de la Direction des lycées et collèges, et a débuté au troisième trimestre de l'année scolaire 1996-1997. Elle s'est poursuivie au cours de l'année scolaire 1997-1998 et devrait prendre encore davantage d'ampleur dans l'avenir par la mise au point de nouvelles conférences et une action forte d'information vis-à-vis des lycées.



L'action des laboratoires

Les actions de communication locales et l'échange avec le bureau de la communication de l'IN2P3 sont assurés par un correspondant dans chaque laboratoire de l'Institut. La plupart des laboratoires sont particulièrement actifs dans l'organisation de manifestations à l'occasion de «Science en fête». Deux actions, à l'automne 1997, méritent une attention particulière pour leur originalité. A Caen d'une part, le lancement d'un «Café des images» avec présentation d'un film et débat a eu un tel succès que l'opération se poursuit, parallèlement aux «Bars des sciences» organisés dans le cadre de la Société française de physique, très fréquentés eux aussi. A Lyon d'autre part, a été présentée, sur le modèle des conférences de consensus danoises, une «conférence citoyenne» portant sur le thème «Rayonnement ionisant: ami ou ennemi?». L'organisation de ce type de conférences est maintenant reprise à un niveau national par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. L'expérience lyonnaise a servi en quelque sorte de prototype.

Démocrite 2: la nouvelle base documentaire de l'IN2P3

C'est au cours de l'année 1996 qu'a été entamée l'évolution de la base documentaire Démocrite qui regroupe en réseau les bibliothèques des laboratoires de l'IN2P3, et dont l'évolution était rendue nécessaire par le changement de la plate-forme informatique (passage à Unix). C'était également l'occasion de la transformer afin d'assurer une meilleure adéquation aux besoins des utilisateurs et aux demandes des documentalistes. La mise en place informatique a été confiée à un groupe de projet du Centre de calcul de l'IN2P3. Le nouveau produit, baptisé Démocrite 2, accessible sur le Web à partir de Netscape, est constitué de trois bases indépendantes - le fonds documentaire, les publications, le catalogue des périodiques - qui peuvent être reliées entre elles. La base «Démocrite 2 - Fonds documentaire» fonctionne depuis août 1997. Constituée à partir de la migration des données de l'ancienne base, elle répertorie l'ensemble des fonds documentaires des bibliothèques de chaque laboratoire. Un module de prêt informatisé y est joint. Régulièrement alimentée par chaque bibliothèque, elle contient actuellement 42000 références. Elle est consultable, en accès libre avec une aide en ligne. L'année 1998 doit voir la mise en route de la base de publications et du catalogue des périodiques. Par ailleurs, l'accès aux bases de données internationales, implanté auparavant à Orsay, a été transféré au Centre de calcul, pour des raisons de facilités techniques. Le Centre gère le serveur de CD-Rom bases de données, dont la consultation est réservée aux documentalistes des laboratoires.

Remerciements

Hubert Flocard

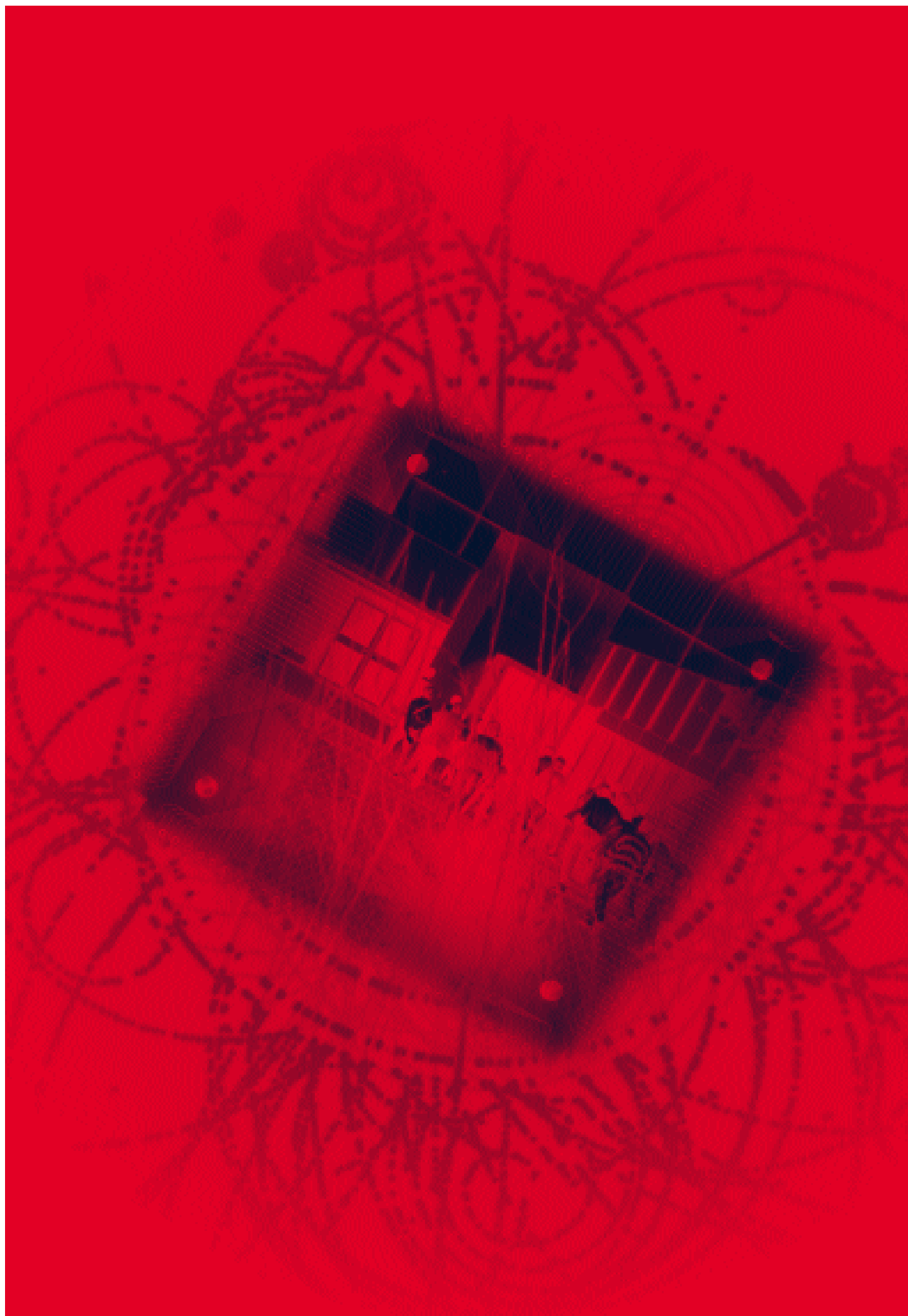
Éliane Perret

Jean-Paul Schapira

François Dupont

Geneviève Edelheit

Dominique Jarroux





Programmes et structures

LES PROGRAMMES

page 158

L'IN2P3 EN CHIFFRES

page 162

LA DIRECTION

page 164

LES LABORATOIRES

page 165

SIGLES ET ACRONYMES

page 169

Les programmes

Quarks et leptons

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

Violations de symétrie

	BABAR	SLAC	LAL, LAPP, LPNHE - Paris, LPNHE - Palaiseau	CEA/Dapnia
	CP-Lear	LEAR	CPPM, CSNSM	CEA/Dapnia
	NA48	SPS	LAL	CEA/Dapnia

Physique du neutrino

La double désintégration bêta	NEMO	LSM	CENBG, IReS, LAL, LPC - Caen	CFR (CNRS/Insu)
Les oscillations de neutrinos	NOMAD	SPS	LAPP, LPNHE - Paris	CEA/Dapnia
	CHOOZ	CHOOZ ²	LAPP, PCC	
Le moment magnétique du neutrino	MUNU	BUGEY ³	ISN	

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.

² Site aménagé avec le soutien de EDF, Société électronucléaire des Ardennes et Conseil général des Ardennes.

³ Site aménagé avec le soutien de EDF.

Physique hadronique

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs	Laboratoires IN2P3	Collaborations
La structure des hadrons				
Fonctions de structure en spin du nucléon		SLAC	LPC - Clermont	CEA/Dapnia, États-Unis
Facteur de forme T_{20} du deuton		CEBAF/TJNAF	ISN, LNS, IPNO	CEA/Dapnia, États-Unis
Facteurs de forme faibles du nucléon	PVA4	MAMI B	IPNO	Université de Mayence
Diffusion Compton Virtuelle		MAMI	LPC - Clermont	CEA/Dapnia, Université de Mayence
		CEBAF	LPC - Clermont	CEA/Dapnia, États-Unis
Structure du proton	H1	HERA	(voir <i>Quarks et leptons</i>)	

Les hadrons dans le milieu nucléaire

	SPE4II	SATURNE	LNS, IPNO	Danemark, Pologne, Russie
	HADES	GSI	LPC - Clermont, IPNO	Allemagne Espagne, Italie, Chypre, Pologne, République tchèque, Russie, Slovaquie

Les mécanismes de production et d'interaction des hadrons

Interactions dans l'état final	HARP	AmPS	ISN	Pays-Bas, États-Unis, Canada
Hadroproduction de l'étrangeté	DISTO	SATURNE	LNS	Allemagne, États-Unis, Italie, Pologne, Russie
Photoproduction de mésons	GRAAL	ESRF	IPNO, ISN	Italie, Russie

Matière nucléaire

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs	Laboratoires IN2P3	Collaborations
Structure nucléaire				
Comment interagissent les neutrons et protons dans le noyau				
effets individuels	EUROGAM	VIVITRON	CENBG, IPNL, IReS, CSNSM, IPNO, ISN	CEA/Dapnia
superfluidité	EUROBALL	LEGNARO		Europe
effets collectifs	DIAMANT			
	SAPHIR			
	BBS	AGOR	IPNO	Hollande
Noyaux exotiques				
Le degré de liberté d'isospin du champ moyen	LISE	GANIL	CENBG, CSNSM	Europe
La matière nucléaire	SPEG		GANIL, IPNL, IPNO	
et les noyaux loin de la stabilité	DEMON		IReS, LPC - Caen	
	MUST			
Les chemins de la nucléosynthèse stellaire	MISTRAL	ISOLDE		Cern

Collisions nucléaires

Physique à la barrière de Coulomb	DEMON ICARE CHARISSA	SARA VIVITRON GANIL	GANIL,IPNL,IPNO, IReS,ISN, LPC - Caen, LPC - Clermont,SUBATECH	CEA/Dapnia
Thermodynamique de la matière nucléaire, fragmentation	INDRA TAPS FOPI	GSI		CEA/Dapnia

ions lourds relativistes

Recherche du plasma quark-gluon	NA50 WA98 NA44 ALICE	SPS LHC	IPNL,IPNO, IReS, LAPP, LPC - Clermont, LPNHE - Palaiseau,SUBATECH	Cern
---------------------------------	-------------------------------	------------	---	------

Particules et noyaux dans l'Univers

Programmes	Détecteurs	Sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations
Rayons Cosmiques				
Recherches de gamma	CAT	Thémis ¹	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
Anti-matière	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	LPNHE - Paris,PCC,	Observatoire de Besançon, ENS Télécom Collaboration internationale
Neutrinos	ANTARES	Toulon	CPPM	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 (Bagnères de Bigorre,Toulouse), CNRS/Insu; CEA/Dapnia
Recherche de supernovae de type Ia	EROS et Pic du Midi	La Silla et Pic du Midi	LAL,PCC	Observatoire Midi-Pyrénées Observatoire de Paris Bureau des Longitudes
Anisotropies du rayonnement à 3K	PLANCK	Point de Lagrange L2	LAL,PCC	IAP, IAS (CNRS/Insu); CRTBT (CNRS/SPM); CEA/Dapnia; Collaboration internationale

¹ Site aménagé avec le soutien de EDF et de la région Languedoc Rousillon.

Ondes gravitationnelles

VIRGO	Cascina (Italie)	IPNL, LAL, LAPP	Italie
-------	------------------	-----------------	--------

Astrophysique nucléaire et neutrinos solaires

Astrophysique nucléaire		Accélérateurs: PAPAP (Orsay) Van de Graaf (Bordeaux)	CENBG, CSNSM IPNO
Les neutrinos solaires	HELLAZ	Gran Sasso (Italie)	PCC

Recherches interdisciplinaires

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs	Laboratoires IN2P3	Collaborations
------------	------------	---------------	--------------------	----------------

Aval du cycle électronucléaire

Recherche sur l'aval du cycle électronucléaire	MUSE TARC	SARA SPS GSI	CENBG, CSNSM, IPNL, IPNO, IReS, ISN, LPC - Caen, SUBATECH,	GDR Gédéon (CNRS, CEA, EDF - Framatome)
Migration des déchets nucléaires dans les matériaux liquides et solides				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

In vivo	TOHR		IPNO
In vitro		Microsonde nucléaire	CENBG

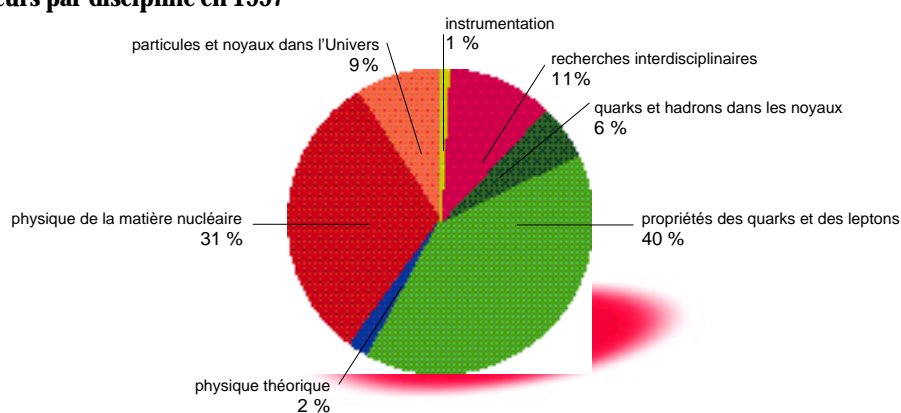
Spectrométrie de masse par accélération

	Tandétron	CSNSM	Europe
--	-----------	-------	--------

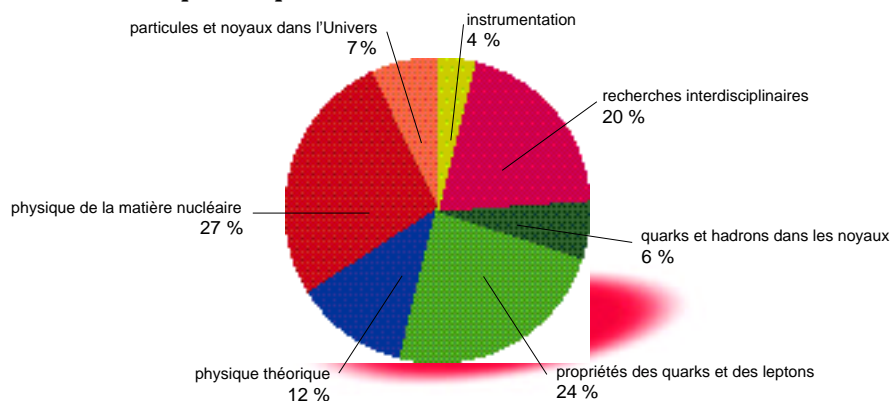
l'IN2P3 en chiffres

Les personnels

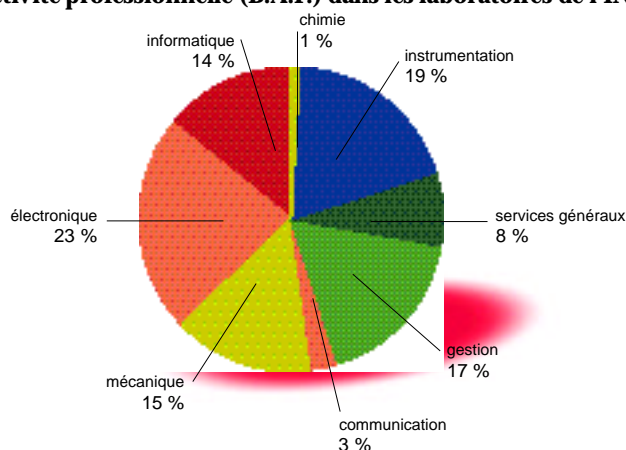
Répartition des chercheurs par discipline en 1997



Répartition des enseignants chercheurs par discipline en 1997



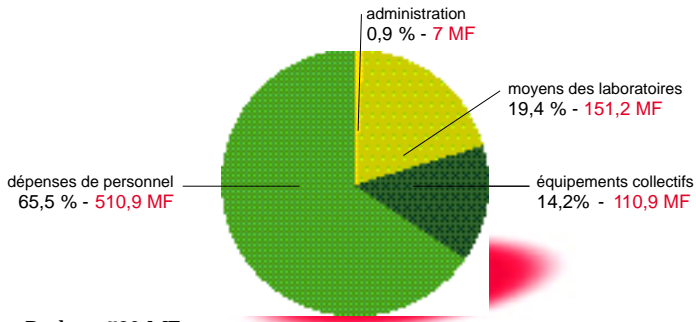
Répartition des ITA par branche d'activité professionnelle (B.A.P.) dans les laboratoires de l'IN2P3 en 1997



Le budget

Budget consolidé de l'IN2P3 en 1997

autorisations de programmes* et salaires

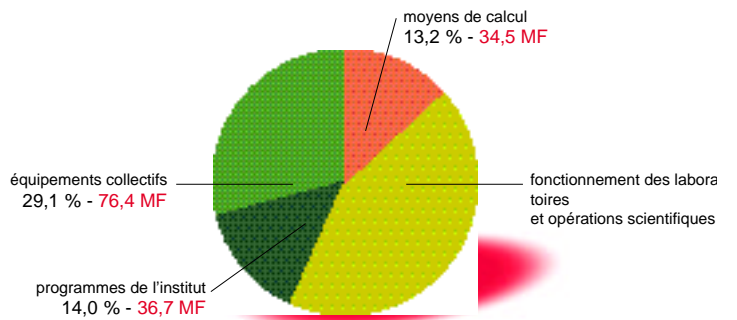


Budget : 780 MF

* Hors : politiques transversales, opérations immobilières, Virgo.

Budget 1997 de l'IN2P3

autorisations de programmes pour les moyens scientifiques

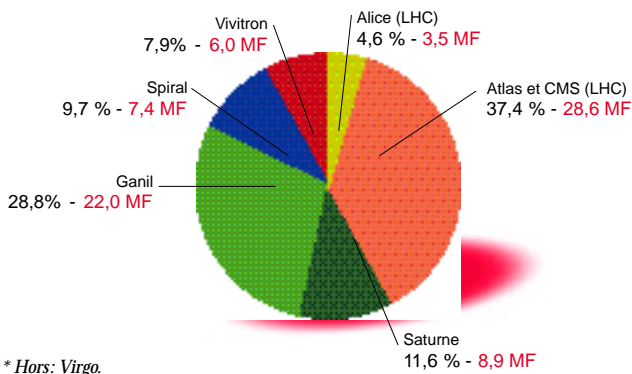


Budget : 262,1 MF

* Hors : politiques transversales, opérations immobilières, Virgo.

Répartition des crédits attribués en 1997

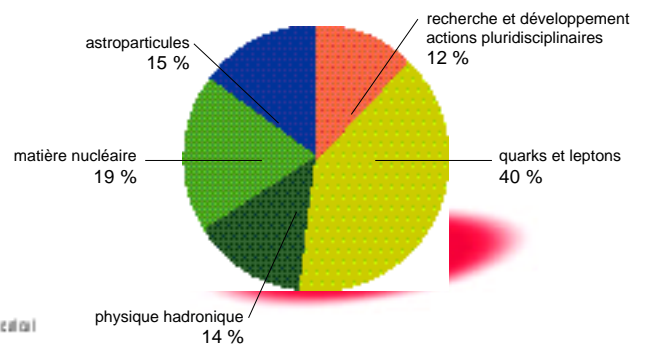
aux équipements collectifs*



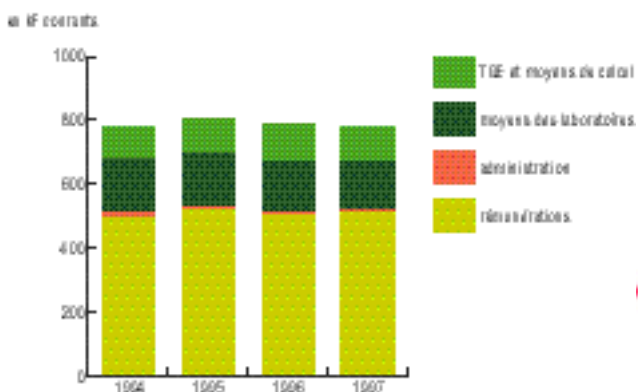
* Hors : Virgo.

Budget 1997 de l'IN2P3

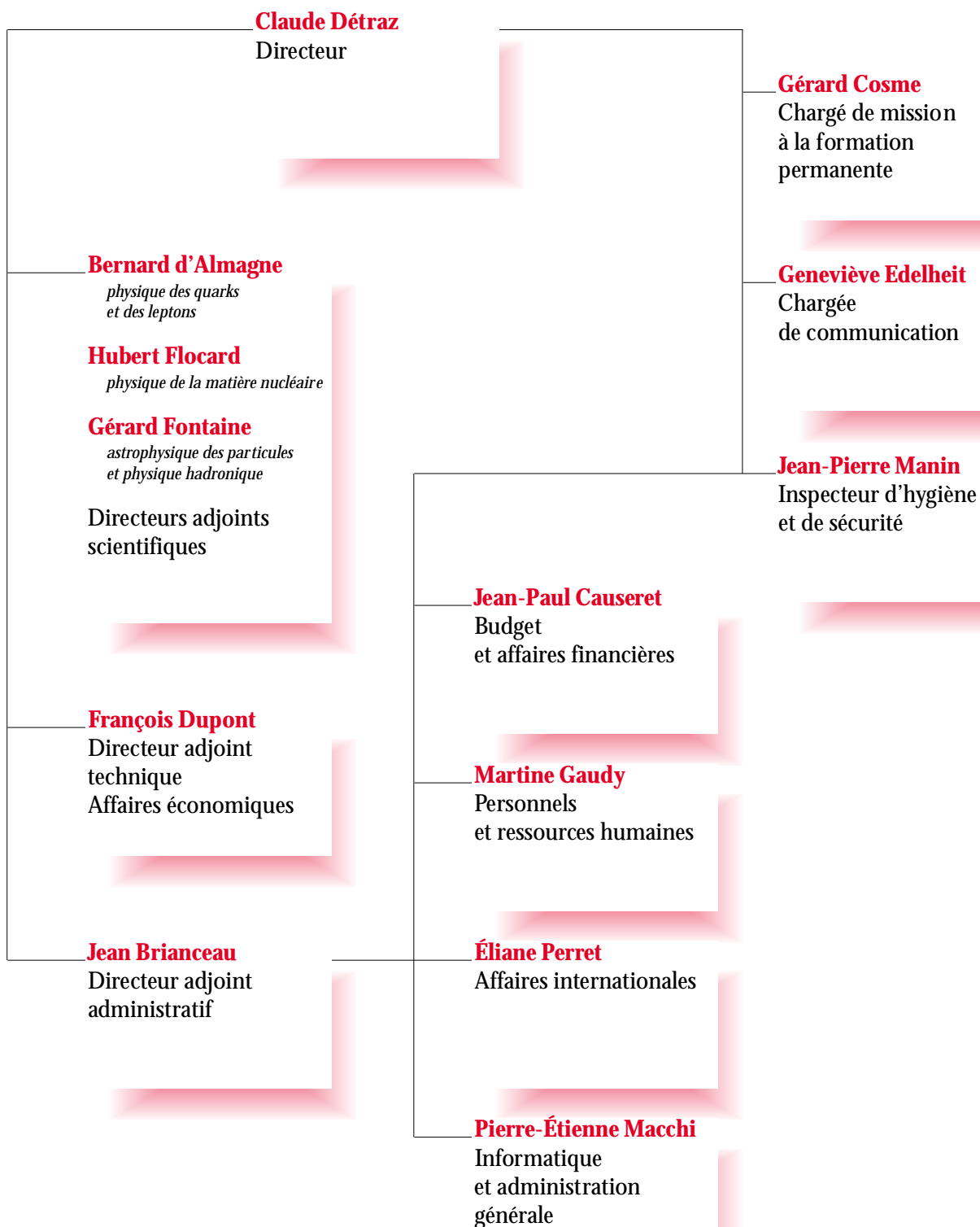
autorisations de programmes par thème de recherche



Évolution des moyens de l'IN2P3 de 1994 à 1997



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 56 89 18 00
Fax: 05 56 75 11 80

Directeur: **Pierre Aguer**

Effectifs

15 chercheurs CNRS - 22 enseignants chercheurs, 14 doctorants - 32 ITA,
12 personnels de l'Université et du rectorat, 1 ingénieur géré par l'Adera

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.

USR 6402 Centre de Calcul de l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules - CCIN2P3

29, boul. du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél. : 04 78 93 08 80
Fax: 04 78 94 30 54

Directeur: **Denis Linglin**

Effectifs

1 chercheur CNRS, 26 ITA et TPN, 12 personnes sous contrat, dont 7 sous convention CEA

Thèmes de recherche

Activité de services: 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

22 chercheurs CNRS, 9 enseignants chercheurs, 15 doctorants, 70 ITA, 2 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Physique au LEP, expérience Aleph (Cern). Violation des symétries CP, T et CPT, expérience CP LEAR (Cern)
Physique auprès du collisionneur électron-proton Hera, expérience H1 (Desy). Préparation de la physique au LHC études et réalisations pour les détecteurs du LHC, expérience Atlas (Cern). Détection de neutrinos cosmiques de haute énergie, expérience Antares. Physique auprès du collisionneur Tévatron, expérience D0 (Fermilab). Étude précise de la violation de CP et de désintégration rares au LHC, expérience LHCb (Cern).

UPR 6412 Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse - CSNSM

Université Paris 11,
Bât.104 et 108
91405 Orsay CEDEX
Tél. : 01 69 15 52 13
Fax: 01 69 15 50 08

Directeur: **Hubert Doubre**

Effectifs

32 chercheurs CNRS, 3 enseignants chercheurs, 9 doctorants, 47 ITA et TPN

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 pour la recherche fondamentale et appliquée
Préparation par implantation de matériaux nouveaux. 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 Tc, bolomètres cryogéniques, croissance sous irradiation.

JMR 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: **Daniel Guerreau**

Effectifs

26 physiciens (15 CNRS,9 CEA,2 Université),204 ingénieurs et techniciens (121 CNRS,83 CEA).

Thèmes de recherche

Grande installation destinée essentiellement à la recherche fondamentale dans le domaine de l'interaction des ions avec la matière.

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.

Principaux thèmes de recherche des équipes permanentes et des visiteurs: production et étude des noyaux exotiques, production et étude des noyaux chauds, dynamique des collisions nucléaires, physique nucléaire des ions lourds.

JMR 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

78 chercheurs CNRS,31 enseignants chercheurs,38 doctorants,320 ITA, 13 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Noyaux loin de la stabilité, déformation et haut spin,structure nucléaire par réactions. Collisions d'ions lourds et plasma quark-gluon (NA50, Alice au LHC). Physique hadronique -expérience à ESFR, CEBAF (USA), GSI (Allemagne) - Radiochimie et cycle du combustible nucléaire. Interactions-ion-matière. Interfaces physique-biologie. Physique théorique.

JMR 5822 Institut de Physique Nucléaire de Lyon - IPNL

Université Lyon I - Bât 210
43, boul. du 11 novembre 1918
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél. : 04 72 44 80 00
Fax: 04 72 44 80 04

Directeur:

Jean-Eudes Augustin

Effectifs

34 chercheurs CNRS,43 enseignants chercheurs,28 doctorants,78 ITA,18 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Physique des particules à LEP (expérience L3 et Delphi) et participation à l'expérience CMS au LHC (Cern). Plasma de quarks et de gluons (expériences NA50, CMS, Ions lourds et Alice au Cern). Matière nucléaire chaude. Noyaux superdéformés, noyaux loin de la stabilité. Recherche de matière noire non baryonique. Réalisation des miroirs de Virgo. Physique théorique: systèmes hadroniques et hautes énergies. Interaction des ions et des agrégats avec la matière. Caractérisation par faisceaux d'ions. Migration des actinides et confinement des déchets nucléaires.

JMR 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: **Bernard Haas**

Effectifs

57 chercheurs CNRS,20 enseignants chercheurs,22 doctorants,184 ITA, 4 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Physique du noyau à l'aide de réactions nucléaires au voisinage de la barrière coulombienne avec l'accélérateur Vivitron: structure de la matière dans des états extrêmes de spin et de déformation (Euroball, Gargamelle, lentille à électrons et détecteur de fragments de recul); mécanismes de réaction et de fission (Icare, Charissa, Filtre de vitesse, Demon). Noyaux exotiques et faisceaux radioactifs (Isolde, Ganil et Spiral). Chimie nucléaire (problématiques de l'aval du cycle électronucléaire),Laboratoire d'analyses et de mesures. Préparation d'expériences au LHC (CMS et Alice) et au RHIC (Star). Recherche et développement de détecteurs de traces gazeux (MSGC, MGWC) et d'électronique de lecture rapide résistante aux radiations. Physique des collisions électron-positon au LEP (Delphi). Physique du neutrino (Nemo).

JMR 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

40 chercheurs CNRS, 38 enseignants chercheurs, 18 doctorants, 102 ITA, 6 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Physique des particules: participation aux expériences Atlas du LHC et à LEP 200 (Delphi au Cern) et à D0 (Fermilab). Mesure du moment magnétique du neutrino (Munu au Bugey). Recherche d'anti-matière dans l'Univers (AMS). Physique hadronique (TJNAF/États-Unis et GRAAL à l'ESRF). Réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur et transmutation des déchets nucléaires. Structure nucléaire - Physique théorique.

UMR 6423 Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire - LAL

Université de Paris XI
Bâtiment 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

60 chercheurs CNRS, 10 enseignants chercheurs, 17 doctorants, 10 chercheurs non permanents, 268 ITA, 2 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Tests de précision du modèle standard et recherche de nouvelles particules à LEP II (Alep et Delphi au Cern) Préparation de l'expérience Atlas au Cern. Expérience D0 au Tevatron à Fermilab. Structure du proton (expérience H1 à Desy). Violation de symétrie CP (NA 48 au Cern, Babar à Slac). Physique du neutrino par recherche de désintégration double bêta Nemo. Rayons gamma cosmiques de haute énergie (expérience Céleste à Thémis). Recherche de matière noire (Eros). Détection d'ondes gravitationnelles (Virgo). Physique et technique des accélérateurs à électrons Expérience Planck.

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: **Michel Yvert**

Effectifs

49 chercheurs CNRS, 7 enseignants chercheurs, 18 doctorants, 10 visiteurs étrangers, 81 ITA

Thèmes de recherche

Expériences auprès du LEP au Cern (L3, Aleph). Expériences Atlas et CMS auprès du LHC. Violation de symétrie (Babar à Slac). Projet Virgo de détection d'ondes gravitationnelles. Recherche d'antimatière dans l'Univers (AMS). Physique du neutrino (Nomad). Physique des ions lourds ultrarelativistes. Physique théorique.

UMR 6534 Laboratoire de Physique Corpusculaire de Caen - LPC Caen

ISMRA
6, boulevard du Maréchal Juin
14050 Caen CEDEX
Tél.: 02 31 45 25 00
Fax: 02 31 45 25 49

Directeur: **Bernard Tamain**

Effectifs

9 chercheurs CNRS, 14 enseignants chercheurs, 9 doctorants, 20 ITA, 10 personnels de l'Université

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 .

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

17 chercheurs CNRS, 39 enseignants chercheurs, 14 doctorants, 32 ITA, 5 personnels de l'Université

Thèmes de recherche

Physique des quarks et leptons: expérience Aleph au Cern, projets Atlas et LHCb au LHC. Collisions d'ions lourds ultrarelativistes: expérience NA50 au SPS, projet Alice au LHC. Étude de la matière nucléaire: expérience Fopi à Darmstadt. Physique hadronique: expériences à Slac et au TJNAF (E-U); projet Elfe, expérience Hadès à Darmstadt. Physique appliquée à la géologie et l'archéologie: datation par thermoluminescence. Physique appliquée à la biologie analyse par activation neutronique et par émission induite de rayons X. 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: **Marcel Banner**

Effectifs

27 chercheurs CNRS, 16 enseignants chercheurs, 9 doctorants, 48 ITA

Thèmes de recherche

Cern: Physique des collisions électron-positon (Delphi); recherche des oscillations de neutrinos (Nomad); Physique au LHC (Atlas). Desy: Structure du proton (H1). Slac: Violation de symétrie CP (Babar). Fermilab: Expérience D0. Astroparticules à Thémis: Photons de hautes énergies dans l'univers (CAT); Programme Supernovae de mesure de paramètres cosmologiques. R&D Observatoire Auger pour l'étude des rayons cosmiques aux énergies extrêmes.

JMR 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: **François Jacquet**

Effectifs

39 chercheurs CNRS, 12 doctorants, 61 ITA

Thèmes de recherche

Tests de précision du Modèle standard (expérience Aleph, auprès du LEP au Cern). Étude de la structure interne du nucléon (détecteur H1, auprès de Hera à Desy, Hambourg). Étude de la violation de CP (expérience Babar à Slac). Recherche et développement en vue de la construction du détecteur CMS auprès du LHC au Cern. Recherche du plasma de quarks et gluons par collisions d'ions lourds ultrarelativistes (expérience NA50, SPS au Cern). Accélération par laser de particules dans un plasma (expérience ALP). Développements expérimentaux sur les photocathodes. Recherche d'antimatière dans les rayons cosmiques (expérience Artémis, Whipple Observatory, Arizona). Astronomie gamma au sol (expériences CAT et Celeste à Thémis).

JMR 6417 Laboratoire souterrain de Modane - LSM

2, rue Polset
73500 Modane
Tél. : 04 79 05 22 57
Fax : 04 79 05 24 74

Directeur: **Philippe Hubert**

Thèmes de recherche

Lieu d'expériences en environnement de très faible radioactivité et à l'abri du rayonnement cosmique.

JMR 7553 Physique Corpusculaire et Cosmologie - PCC

Collège de France
11, place Marcellin Berthelot
75231 Paris CEDEX 05
Tél. : 01 44 27 14 39
Fax : 01 43 54 69 89

Directeurs: **Pierre Bareyre**
Marcel Froissart

Effectifs

15 chercheurs CNRS, 4 enseignants chercheurs, 5 doctorants, 38 ITA, 7 ITA de l'Éducation Nationale

Thèmes de recherche

Cosmologie observationnelle: recherche de supernovae; matière noire baryonique (expérience Agape); expérience à l'Observatoire du Pic du Midi (T55); ballon pour la cosmologie (Archeops); Expérience Planck; Observatoire Auger - Rayonnement cosmique de haute énergie (Cat, Céleste). Détection de neutrinos solaires (Hellaz). Physique du neutrino à Chooz. Expérience Delphi au Cern. Physique théorique.

JMR 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: **Hans Gutbrod**

Effectifs

6 chercheurs CNRS, 14 enseignants chercheurs (Université de Nantes) et 8 enseignants chercheurs (École des Mines de Nantes), 20 ITA, 16 doctorants

Thèmes de recherche

Recherche du plasma de quarks et de gluons dans les collisions d'ions lourds ultra-relativistes. Expérience Alice au LHC: étude d'un spectromètre Dimuons; développement de détecteurs micromégas. Expériences Alice et Star (RHIC): recherche et développement sur les détecteurs à micropistes. Analyse des données des expériences NA44, WA98 au Cern-SPS. Modélisation des interactions fondamentales aux énergies ultra-relativistes, étude du plasma quark-gluon. Théorie et modélisation mathématique des phénomènes de transports dans la matière subatomique. Aval du cycle électronucléaire GDR Gédéon (données nucléaires, modélisation et simulation) des réactions p + A. Radiochimie et métrologie nucléaire.

Autres structures

UMS 6425 Musée et archives de l'Institut du Radium

Institut Curie - 11, rue Pierre et Marie Curie
75231 Paris CEDEX 05
Tél. : 01 42 34 67 49 - Fax: 01 40 51 06 36

Directeur: **Monique Bordry**

ESA 5427 Groupe de Physique fondamentale de l'Université de Perpignan - GPF

Université de Perpignan - 52, avenue de Villeneuve
66860 Perpignan
Tél. : 04 68 66 21 25 - Fax: 04 68 66 20 19

Directeur: **Christian Meynadier**

Sigles et acronymes

AGAPE - Andromeda galaxy and amplified pixels experiment : *expérience de recherches d'objets massifs compacts*

AGN - noyau actif de galaxie

AGOR - accélérateur Groningue Orsay

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*

ASIC - Application specific integrated circuit : *circuit intégré spécifique à une application*

ATLAS - A toroidal LHC apparatus : *une des expériences auprès du LHC*

BABAR : *expérience d'étude des mésons beaux à SLAC, États-Unis.*

CANDELA - Canon déclenché par laser : *accélérateur à impulsions de courant ultra-brèves*

CAT - Cherenkov array at Thémis : *réseau de détecteurs de rayonnement Cerenkov installé sur le site de Thémis*

CEA - Commissariat à l'énergie atomique

CEBAF - Continuous electron beam accelerator facility : *laboratoire américain de physique hadronique. Est devenu TJNAF en 1996*

CERN - Conseil européen pour la recherche nucléaire : *laboratoire européen de physique des particules, installé à Genève*

CESR - Centre d'étude spatiale des rayonnements : *laboratoire CNRS/Insu*

CHORUS - CERN hybrid oscillation research apparatus : *expérience de recherche d'oscillations de neutrinos au CERN*

CIRIL - Centre interdisciplinaire de recherche avec les ions lourds : *laboratoire CNRS/SPM*

CMS - Compact muon solenoid : *une des expériences auprès du LHC*

CNES - Centre national d'études spatiales

COMPASS - Common muon and proton apparatus for structure and spectroscopy : *projet d'expérience au CERN*

CPLEAR : *expérience sur la violation de CP auprès du collisionneur LEAR au CERN*

CROP - Contrat de recherche à objectifs partagés

CRTBT - Centre de recherche sur les très basses températures : *laboratoire CNRS/SPM*

DAM - Département des applications militaires : *CEA*

DAPNIA - Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée : *CEA/DSM*

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 Cerenkov pour l'expérience BABAR*

DMILL - Durci mixte sur isolant logico-linéaire : *électronique capable de résister aux radiations*

DO : *expérience auprès du collisionneur proton-proton à Fermilab États-Unis*

DRECAM - Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules : *CEA*

DSM - Direction des sciences de la matière : *CEA*

DSV - Direction des sciences du vivant : *CEA*

ECR : *source d'ions par résonance cyclotronique électronique*

EDELWEISS - Expérience pour la détection bolométrique des WIMPs en site souterrain : *recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au Laboratoire souterrain de Modane*

ELFE - an electron laboratory for Europe : *projet de faisceau continu d'électrons pour la physique hadronique*

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

ESO - European southern observatory : *observatoire européen de l'hémisphère austral*

ESRF - Electron synchrotron radiation facility : *équipement de rayonnement synchrotron à Grenoble*

EUROBALL : *détecteur, successeur d'EUROGAM*

EUROGAM - European gamma detector : *détecteur de physique nucléaire installé à Strasbourg*

FERMILAB - Fermi national laboratory : *laboratoire américain de physique des particules, installé près de Chicago*

GANIL - Grand accélérateur national d'ions lourds à Caen

GEDEON - Gestion des déchets par des options nouvelles : *Groupement de recherche CNRS/CEA/EDF/Framatome*

GDR : *groupement de recherche*

GSi - German synchrotron installation : *laboratoire allemand de physique nucléaire, à Darmstadt*

H1 : *expérience auprès du collisionneur HERA*

- HERA** - High energy ring accelerator: *collisionneur électron-proton installé à DESY - Hambourg*
- AP** - Institut d'astrophysique de Paris: *laboratoire CNRS/INSU*
- AS** - Institut d'astrophysique spatiale: *laboratoire CNRS/INSU*
- FREMER** - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
- NDRA** - Identification de noyaux par détection à résolution accrue: *multidétecteur 4π de physique nucléaire au GANIL*
- NFN** - Istituto nazionale di fisica nucleare: *institut italien de physique nucléaire et de physique des particules*
- KEK** - National laboratory high energy physics Tsukuba Japon
- KVI** - Kernfysich versneller Instituut Groningue Pays-Bas
- HEP** - Institute for high energy physics Serpukhov Russie
- NP** - Institute of nuclear problems Minsk Biélorussie
- NR** - Institute of nuclear research Kiev Ukraine
- NSU** - Institut national des sciences de l'Univers: *CNRS*
- TEP** - Institute of Theoretical and experimental physics Moscou Russie
- JINR** - Joint institute for nuclear research Dubna Russie
- EA** - Laboratoire européen associé
- EAR** - Low energy antiproton ring: *accélérateur l'antiprotons de basse énergie du CERN*
- EP** - Large electron positron collider: *collisionneur électron-positon du CERN*
- EPSI** - Laboratoire d'électronique et de physique des systèmes instrumentaux Université Louis Pasteur Strasbourg
- ETI** - Laboratoire d'électronique, de technologie et d'instrumentation: *laboratoire du CEA pour la recherche appliquée en électronique*
- HC** - Large hadron collider: *futur collisionneur proton-proton du CERN*
- LISE** - Ligne d'ions super-épluchés Ganil Caen
- L3** - une des quatre expériences du LEP
- 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*
- MENRT** - Ministère de l'Education nationale, de la recherche et de la technologie
- MICROMEGAS** - Micromesh gaseous structure: *nouveau type de détecteur de particules chargées, pouvant supporter de hauts flux*
- NEMO** - Neutrino-Molybdène: *expérience de double désintégration bêta au Laboratoire souterrain de Modane*
- NIKHEF** - Institut national néerlandais pour la physique nucléaire et la physique des hautes énergies Amsterdam Pays-Bas
- NOMAD** - Neutrino oscillation magnetic detector: *expérience d'oscillations de neutrinos au CERN*
- NuPECC** - Nuclear physics european collaboration committee: *comité européen pour la physique nucléaire*
- OPRI** - Office de protection contre les rayonnements ionisants
- PICS** - programme international de coopération scientifique
- PRACTIS** - Physicochimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces: *Groupe de recherche CNRS/IN2P3 et Sciences Chimiques et CEA/Direction du cycle du combustible*
- POLDER** - Polarimètre pour deutons de recul: *détecteur installé au TJNAF*
- 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*
- SARA** - système accélérateur Rhône-Alpes
- SDV** - Département des sciences de la vie du CNRS
- SINS** - The Andrzej Soltan Institute for nuclear studies Varsovie Pologne
- SLAC** - Stanford linear accelerator center: *laboratoire américain de physique des particules installé à l'université de Stanford États-Unis*
- SN** - Supernovæ: *phase terminale d'une étoile, où elle explose*
- SPACAL** - Spaghetti calorimeter: *calorimètre à fibres scintillantes pour l'expérience H1 à Desy*
- SPI** - Département des sciences pour l'Ingénieur du CNRS
- SPIRAL** - Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne Ganil 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*
- TAPS** - two arms photon spectrometer: *détecteur de photons pour des expériences de physique nucléaire*
- TESLA** - Tera electron-volt superconducting linear accelerator: *projet allemand de collisionneur linéaire électron-positon*
- THEMIS** - site de l'ancienne centrale solaire, construite par EDF à Targassonne près de Font Romeu Pyrénées Orientales
- TJNAF** - Thomas Jefferson National Accelerator Facility: *voir CEBAF*
- 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
- VIVITRON** - accélérateur électrostatique IReS Strasbourg
- VIRGO** - antenne gravitationnelle à Cascina, Italie
- WIMP** - Weakly interacting massive particle: *particule hypothétique interagissant faiblement, qui pourrait contribuer à la matière noire de l'Univers*
- ZEUS** - expérience auprès du collisionneur HERA, Hambourg