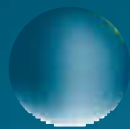




Rapport d'activité **2001 2003**

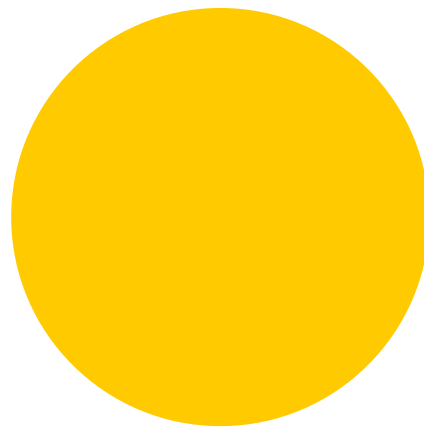


IN2P3

Institut National de Physique Nucléaire
et de Physique des Particules



Rapport d'activité 2001 2003



Institut National de Physique Nucléaire
et de Physique des Particules

Sommaire



4

AVANT-PROPOS

6

AXES STRATÉGIQUES

36

FAITS MARQUANTS SPECTACULAIRES

66

PROJETS

82

RELATIONS EXTERNES

96

PROGRAMMES ET STRUCTURES

107

SIGLES ET ACRONYMES

111

TABLE DES MATIÈRES



Avant-propos

L' Institut national de physique nucléaire et de physique des particules coordonne les programmes de physique nucléaire et des hautes énergies pour le compte du CNRS et des universités, en partenariat avec le CEA. Ces recherches ont pour but d'explorer la physique des particules élémentaires et leurs interactions fondamentales, ainsi que leur assemblage en noyaux atomiques, et d'étudier les propriétés de ces noyaux. Les instruments utilisés pour réaliser une telle exploration sont des détecteurs de particules placés

auprès de grands accélérateurs de haute énergie; ce sont aussi des instruments au sol ou embarqués observant les rayons cosmiques (astroparticules) de haute énergie, émanant de phénomènes violents observés dans l'Univers, ou les manifestations cosmologiques de la physique des particules. Ces recherches se font dans un cadre international.

Parmi les résultats les plus remarquables obtenus au cours de ces dernières années, nous devons saluer la moisson de résultats obtenus auprès du LEP, le collisionneur électron-positon du Cern. Cette moisson s'est soldée par une avancée spectaculaire de notre compréhension du monde des particules élémentaires, qu'il s'agisse de la validité du Modèle standard, de la recherche du chaînon manquant, le boson de Higgs, ou de celle de la manifestation d'une nouvelle physique au-delà du Modèle standard.

Concernant l'asymétrie entre matière et antimatière, les résultats de l'expérience Babar, installée sur l'anneau de stockage e^+e^- à Slac (Stanford, USA), ont dévoilé de nouveaux aspects de cette asymétrie et ont eux aussi mis à l'épreuve le Modèle standard, confirmant sa robustesse.

Le secteur de la physique des neutrinos est particulièrement actif, notamment sur la question de savoir si le neutrino est sa propre antiparticule. Ainsi, la construction de l'expérience Nemo, sous le tunnel de Fréjus, a été achevée.

Enfin, dans le domaine de la physique des particules, les équipes de l'IN2P3 se préparent aux expériences auprès du LHC, le futur collisionneur proton-proton au Cern, qui démarreront en 2007 et feront du Cern, pour de nombreuses années, la capitale mondiale de la physique des particules.

Il est à noter que l'ensemble des activités de physique des particules, en conjonction avec la cosmologie, permet de jeter un regard nouveau sur l'origine de la matière.

Dans le domaine de la physique nucléaire, citons plusieurs découvertes importantes:

- les découvertes au Ganil à Caen d'un nouveau type de radioactivité (« la radioactivité deux protons »), d'un nouveau noyau, doublement magique (le nickel 48), de noyaux avec des structures nouvelles (les noyaux à halo Borroméens, où deux neutrons s'éloignent du cœur du noyau formant une structure à trois corps);*
- la recherche au Ganil du « tétranutron », noyau constitué de quatre neutrons dont l'existence, si elle était confirmée, bouleverserait notre compréhension des forces nucléaires;*
- la recherche de l'hyperdéformation du noyau, qui a fait l'objet d'une expérience de très grande statistique auprès du multidétecteur gamma européen Euroball installé au Vivitron à Strasbourg; une analyse des structures collectives de ^{126}Ba a clairement mis en évidence une structure en vallée d'hyperdéformation,*
- l'étude du plasma de quarks et de gluons, qui se poursuit au SPS du Cern, au Rhic à Brookhaven et qui se prépare au Cern auprès du LHC;*



- la description du proton et des noyaux légers (deuteron, He) en termes de quarks et de gluons, qui a connu des avancées majeures avec la théorie des distributions généralisées de partons et les expériences au TJNAF aux États-Unis. Ces activités de physique nucléaire sur le proton et les noyaux exotiques apportent, en liaison avec la nucléosynthèse dans le big-bang et dans les étoiles, un regard nouveau sur l'origine des éléments.

En cosmologie, la science de l'origine de l'Univers, la découverte d'une nouvelle forme d'énergie, l'énergie noire (peut-être l'énergie du vide), est la découverte la plus spectaculaire de ces dernières années pour l'IN2P3. Cette découverte est établie par la convergence notamment des résultats provenant de l'observation des supernovæ lointaines et du fond diffus cosmologique à 2,7 K. Les équipes de l'IN2P3 ont joué un rôle de premier plan dans les deux cas. Notons aussi les magnifiques résultats sur la recherche de la matière noire sous forme de particules, obtenus dans le Laboratoire souterrain de Modane, sous le tunnel de Fréjus, et qui figurent parmi les meilleurs du monde.

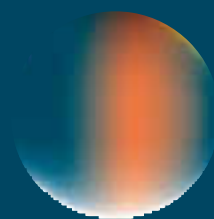
Dans le même temps, l'IN2P3 contribue fortement aux recherches sur l'observation de l'Univers avec de nouveaux messagers (neutrinos, rayons cosmiques de haute énergie, particules très massives dans l'Univers, ondes gravitationnelles), que l'on associe au domaine émergent des astroparticules qui est une des priorités du CNRS. Les premiers résultats de l'observation des rayons gamma de haute énergie avec l'observatoire Hess en Namibie apportent des réponses nouvelles sur l'origine des rayons cosmiques.

Il est à noter que tous ces domaines, physique des particules, physique nucléaire, cosmologie et astroparticules, contribuent à faire progresser la compréhension de la physique des origines de la matière, des éléments et de l'Univers, thèmes qui interpellent un très large public.

En complément, l'IN2P3, souvent en relation avec des entreprises de haute technologie, conduit des développements sur le traitement intensif des données (calculateurs mis en réseaux dans le cadre du projet Grid pour le LHC et pour lequel le Centre de calcul de l'IN2P3, le CCIN2P3, joue un rôle de premier plan), sur l'instrumentation de l'infiniment petit et de l'extrêmement rapide, et sur des techniques d'accélération. Dans le domaine de l'énergie nucléaire, l'IN2P3 a conduit plusieurs axes de recherches en amont. Ainsi, l'IN2P3 a développé le concept de réacteurs nucléaires sous-critiques couplés à des accélérateurs pour l'incinération des déchets hautement radioactifs à vie longue: un modèle a été réalisé par l'IN2P3 en collaboration avec le CEA à Cadarache. Par ailleurs, l'IN2P3 développe le concept de réacteurs à neutrons thermiques ou épithermiques au thorium, fondé sur la technologie des sels fondus pour un déploiement éventuel d'une filière produisant peu de déchets et moins proliférante: une plateforme de test est en cours de construction. D'autres ouvertures interdisciplinaires qui font appel à la physique nucléaire et des hautes énergies (imagerie médicale, traitement du cancer par des accélérateurs...) sont activement poursuivies.

Le succès des expériences repose sur la coordination de l'important potentiel d'ingénieurs et de techniciens, organisés autour de projets structurés et fédérateurs, permettant de faire émerger des idées nouvelles génératrices de retombées technologiques. Enfin, au cours de ces dernières années, l'Institut a attaché une importance particulière à la formation des jeunes, au développement de l'attractivité de ses thématiques et au transfert des connaissances et du savoir-faire instrumental des laboratoires de l'Institut vers d'autres organismes et vers le monde industriel.

Axes stratégiques





8	Physique des particules
14	Physique nucléaire et hadronique
19	Astroparticules et neutrinos
24	Aval du cycle électronucléaire
27	Développements technologiques
27	Les accélérateurs
29	Le calcul
31	Programmes pluridisciplinaires
31	Les interfaces avec les sciences de la vie
33	Le spatial
35	Enseignement



La recherche en physique des particules a pour objectif de mettre en lumière les propriétés des constituants élémentaires de la matière et des interactions qui les relient. Pour ce faire, elle est amenée à explorer les états extrêmes de la matière, de façon à saisir les principes qui sous-tendent ces propriétés. Dans cette quête, les physiciens ont été conduits au fil des ans à mettre en œuvre des collaborations de tailles croissantes pour réaliser et maîtriser des expériences impliquant des technologies de plus en plus ambitieuses auprès de complexes d'accélérateurs qui tendent à échapper aux possibilités d'une seule nation, voire d'un seul continent.

Issue d'une lente progression théorique qui a d'abord permis de comprendre l'interaction électromagnétique dans un cadre unissant la théorie des champs, la relativité restreinte et la mécanique quantique, la théorie actuelle des particules élémentaires s'est soudainement cristallisée au début des années soixante-dix pour donner naissance à ce qu'il est convenu d'appeler le Modèle standard.

C'est en 1973 que la dernière brique majeure vient s'insérer dans l'édifice: après la composante de l'interaction électromagnétique, puis celle de l'interaction faible, c'est au tour de la composante de l'interaction forte. Les physiciens deviennent alors capables de décrire, *via* une théorie des champs de Yang-Mills, les interactions entre particules de matière (les quarks, auparavant considérés simplement comme une « façon de parler », acquièrent au passage le statut de particules) et les vecteurs de cette interaction (les bosons, dénommés « gluons » pour l'interaction forte) en les dotant notamment de la liberté asymptotique que suggéraient les résultats expérimentaux obtenus au Slac et au Cern.

Une théorie de Yang-Mills est une théorie quantique des champs qui met en jeu des bosons qui, à l'encontre des photons, sont dotés de charges similaires à celles que portent les particules de matière qui y sont associées. Une telle théorie repose sur une symétrie exacte, qui plus est vérifiée localement: c'est-à-dire qu'une forme d'invariance des lois de la physique est réalisée en tout point de l'espace-temps, et ce indépendamment d'un point à un autre. Pour l'interaction forte, la symétrie est celle de $SU(3)$. La valeur locale de cette symétrie est signalée dans la terminologie par le terme d'invariance de jauge.

C'est ce même type de champs de jauge qui avait été avancé quelques années plus tôt pour rendre compte des interactions faibles et électromagnétiques pour les combiner (sans vraiment les unifier) dans la théorie électrofaible: une autre théorie de jauge de Yang-Mills fondée sur une autre symétrie, $SU(2)$, mettant en jeu (après mélange avec un champ de jauge plus simple) trois types de bosons: le photon, les bosons chargés W^+ et W^- et le boson neutre Z .

Un élément clé de l'édifice théorique est le postulat de l'existence d'un champ scalaire (mis en avant par P. W. Higgs) dont l'interaction avec les particules de matière et certains champs d'interaction (lui-même y compris) conduit à l'apparition des masses des particules élémentaires. Le mécanisme invoqué rend compte au passage des masses élevées des bosons W et Z , tout comme de la masse nulle du photon. Ce champ scalaire, dit champ de Higgs, doit posséder une propriété étonnante: pour conduire à l'apparition des masses des particules, il ne doit pas être évanescence à l'équilibre dans le vide. En l'absence de source, ce champ doit prendre

Grand calorimètre
à argon liquide
du détecteur D0.
© Collaboration D0



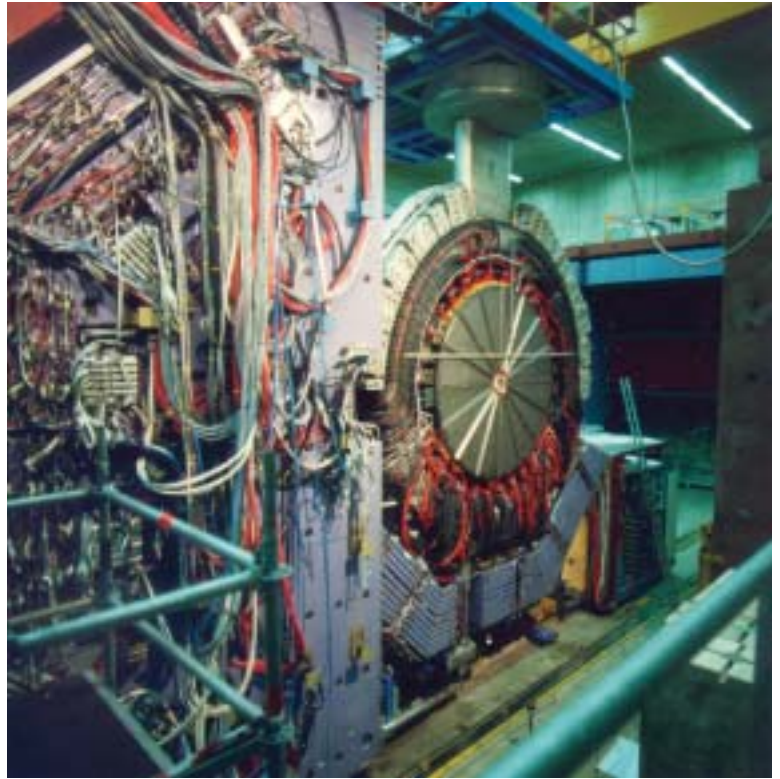
une valeur non nulle, qui échappe au pouvoir prédictif de la théorie. La valeur particulière prise par le champ de Higgs brise la symétrie de jauge; on parle de brisure de la symétrie électrofaible.

Peu après cette cascade de percées théoriques qui permet de rassembler les trois interactions dans un cadre théorique unique, les familles de leptons et de quarks prennent corps: il s'avère que pour vraiment donner lieu à une théorie quantique prédictive (le terme consacré est «renormalisable»), la théorie doit en effet être constituée d'une séquence de familles, des quadruplets, chacun composé de deux leptons (pour la première famille, le neutrino électronique et l'électron) et de deux quarks (pour la première famille, les quarks «up» et «down»).

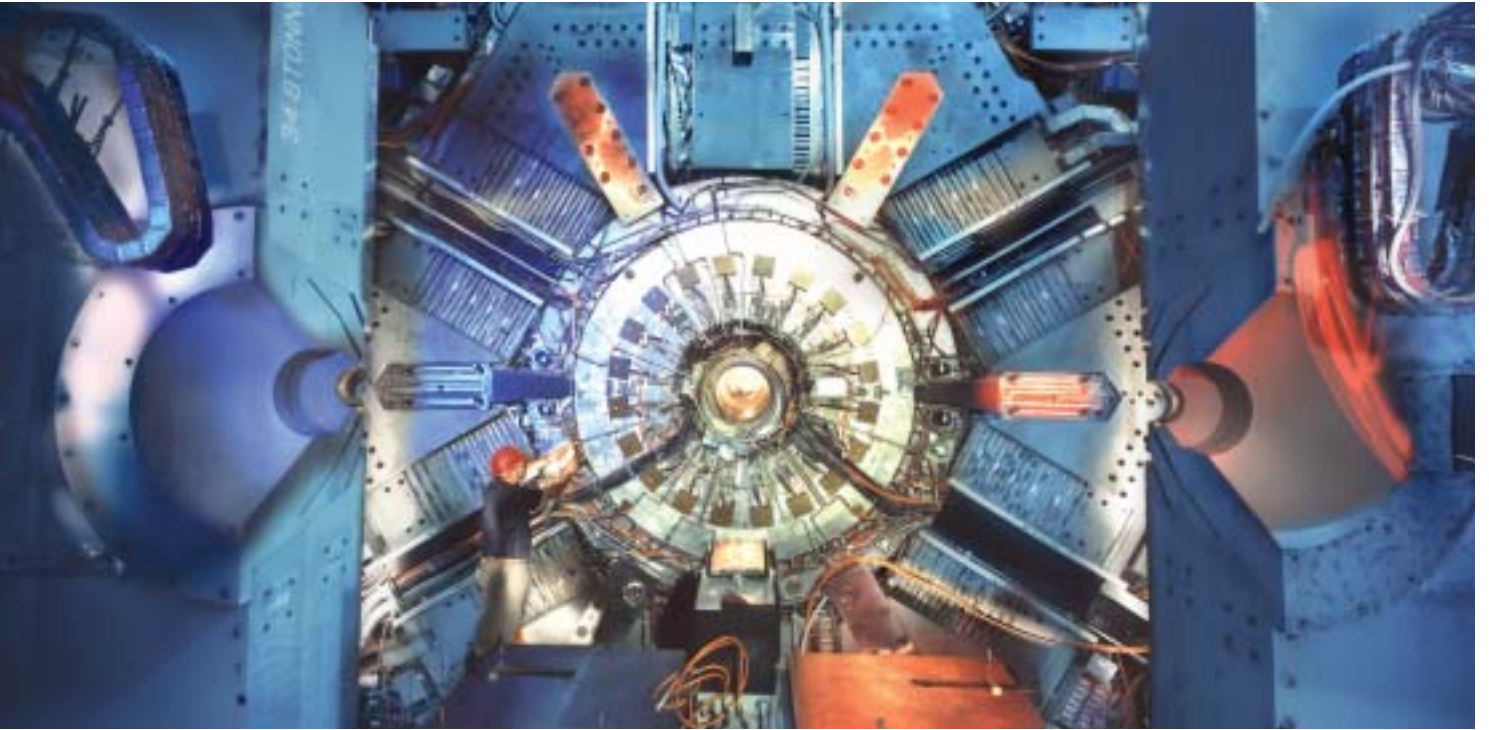
La même année 1973, avant même que la deuxième famille de leptons et de quarks ne soit expérimentalement complétée (il manque encore le quark «charmé»), deux théoriciens japonais, Kobayashi et Maskawa, remarquent que l'existence d'une troisième famille fournirait un mécanisme capable de rendre compte de la violation de CP, déjà observée dans le secteur des mésons K (dix ans auparavant)

et très tôt reconnue comme un des ingrédients essentiels à la disparition constatée de l'antimatière dans l'Univers. En effet, un mélange entre les trois familles dans le secteur des quarks (ou des leptons), comme celui déjà quantifié entre les deux premières familles de quarks par l'angle de Cabibbo, conduit mécaniquement à une violation de CP. Ce mécanisme prend la forme d'une matrice 3×3 , dite matrice CKM, selon les initiales des noms des trois physiciens cités ci-dessus. Dans la matrice CKM, une phase non nulle est responsable à elle seule de l'intégralité des phénomènes de violation de CP. Ce paradigme, alors totalement hypothétique, reste encore aujourd'hui à valider pleinement, avec l'espoir que son étude fine révélera une fissure dans l'édifice théorique manifestement incomplet du Modèle standard.

En effet, si le Modèle standard constitue un ensemble théorique très satisfaisant – il permet de rendre compte de tous les phénomènes observés en laboratoire, à ce jour –, il est difficilement acceptable en tant que tel comme cadre théorique ultime: les formes différentes prises par les trois interactions n'y découlent pas d'un principe supérieur, elles ne sont donc pas unifiées; plus grave, l'interaction gravitationnelle y est absente, car réfractaire à la quantification des champs, elle reste hors de portée du Modèle standard; l'existence de trois familles n'y reçoit aucune explication; les valeurs observées des masses, pourtant spectaculairement différentes, échappent totalement au pouvoir prédictif de la théorie; tout comme les valeurs prises par les éléments de la matrice CKM et en particulier la faiblesse du terme de violation de CP dans le secteur des quarks, etc.



*Détecteur en construction de l'expérience H1, installée auprès du collisionneur électron-proton Hera à Desy (Hambourg).
© Desy*



Détecteur Babar au
Stanford Linear
Accelerator Center
(Slac) aux États-Unis.
© Peter Ginter - Slac

De plus, et ce point est extrêmement important, les résultats obtenus par l'étude du cosmos (dans un cadre théorique totalement différent puisque c'est le royaume de l'interaction gravitationnelle) démontrent que l'Univers est constitué pour l'essentiel de substances absentes du Modèle standard: la matière et l'énergie dites «noires».

Les pistes poursuivies pour étendre le Modèle standard dans un cadre plus satisfaisant sont multiples. L'une des plus attrayantes, «Susy», met en jeu une «supersymétrie» qui supprime certains des problèmes théoriques internes au Modèle standard, prédit l'existence de nouvelles particules (dont certaines sont des candidates naturelles à la matière noire) et de nouveaux champs. Cette nouvelle symétrie offre en outre un élément permettant (semble-t-il, car la démonstration n'est pas encore acquise) d'incorporer aussi la gravitation, à terme. Mais «Susy» n'est pas la seule piste à poursuivre, loin s'en faut, comme en attestent, par exemple, les recherches destinées à dévoiler l'existence de dimensions supplémentaires aux quatre dimensions usuelles de l'espace-temps.

Après une longue période de moisson de résultats expérimentaux se déroulant bien souvent à une description théorique, avec l'avènement du Modèle standard, c'est la situation inverse qui prévaut. Mis à part des «alertes» parfois longues à s'éteindre, l'écrasante majorité des résultats expérimentaux vient compléter la validation de la théorie. Ainsi, les courants neutres (prédits par l'existence du boson Z de l'interaction électrofaible) sont observés dès 1973, au Cern. Puis, dix ans plus tard, encore au Cern, les bosons W et Z de la même interaction électrofaible sont directement produits par le collisionneur proton-antiproton SPPS,

quelques années à peine après que les premiers signes de l'existence des bosons de l'interaction forte (les gluons) ont été mis en évidence à Desy (Allemagne).

En 1989, à l'avènement des accélérateurs électron-positon géants, le LEP **1** au Cern et le SLC à Slac (USA), puis, peu après, du collisionneur électron-proton Hera à Desy, il ne manque plus que trois pièces au puzzle du Modèle standard: le neutrino de la troisième famille (celui associé au lepton «tau»); le deuxième quark de la même troisième famille (le quark «top» supermassif); et, enfin, le (ou les?) boson(s) de Higgs. Il reste aussi à vérifier que les propriétés des bosons intermédiaires – tout comme celles du boson de Higgs (mais encore faut-il d'abord le découvrir... s'il existe!) – sont bien celles décrites par la théorie.

Bien qu'aucune particule nouvelle n'ait été découverte au LEP, ce collisionneur a permis aux grandes collaborations mettant en œuvre les quatre détecteurs qu'il accueillait de valider le Modèle standard dans ses plus infimes détails. Entre autres magnifiques résultats, le LEP aura démontré que les familles sont très précisément au nombre de trois, que le neutrino «tau» est léger, comme le sont les neutrinos des deux premières familles, que le quark «top» est doté d'une masse très élevée. Par un tour de force expérimental et théorique, la masse du quark «top» sera même déterminée, par le biais des corrections quantiques de la théorie, avant

qu'il ne soit observé. Qui plus est, l'ensemble des mesures de hautes précisions confirment totalement le Modèle standard et pointent vers «un» boson de Higgs relativement léger, d'une masse aux alentours de $115 \text{ GeV}/c^2$, juste à la limite des capacités de détection du grand collisionneur. Sans oublier, entre autres prouesses touchant l'interaction forte, la démonstration expérimentale que la symétrie de Yang-Mills sous-jacente est bien la symétrie $SU(3)$ postulée en 1973, que la constante d'interaction forte est bien la même quel que soit le processus étudié (que ce soit au LEP, à Hera ou ailleurs) et que l'évolution en énergie de cette «constante» suit bien la prédiction théorique. La maîtrise de la mesure de la constante d'interaction forte est atteinte vers le milieu des années quatre-vingt-dix. Combinées aux déterminations très précises des deux constantes de couplage de l'interaction électrofaible, ces mesures semblent indiquer une unification approximative des trois forces, à très haute énergie. L'unification des forces semble même pouvoir être parfaite si une théorie comme Susy est prise en compte.

Vue interne
du calorimètre
électromagnétique
d'Atlas. © Cern





Après ces succès remarquables, qui dépassent de très loin les espoirs initiaux, l'Europe perd peu à peu le tout premier rôle qu'elle tenait depuis les années quatre-vingt: après avoir été indirectement mis en évidence par le LEP et le SLC, le quark « top » est directement observé en 1995 auprès du collisionneur Tevatron, à Fnal aux USA (avec la masse annoncée par le

LEP et le SLC) et le neutrino « tau » est mis en évidence en 2001 dans le même laboratoire.

Plus tard, le phénomène d'oscillation des neutrinos, qui établit simultanément l'existence de leurs masses et de leur mélange entre familles (analogue au mélange entre les familles de quarks à l'origine de la violation de CP), sera mis en évidence par un ensemble d'expériences dont la plus importante, SuperKamiokande, est située au Japon.

C'est également hors des frontières de l'Europe que deux expériences jumelles se lancent dans un vaste programme d'étude de la violation de CP dans le secteur des mésons B, c'est-à-dire dans un domaine où la troisième famille de quarks joue le rôle principal; il s'agit des usines à B et de leurs détecteurs, Belle, à KEK (Japon) et Babar¹, à Slac (USA). Depuis l'an 2000, dans l'attente de la mise en service du LHC au Cern, Desy reste le seul site européen actif en physique des hautes énergies. Outre sa très forte implication dans la réalisation des grands détecteurs du LHC (Atlas², CMS², LHCb² et Alice³) – et c'est bien là que se situent les enjeux principaux de la physique des particules aujourd'hui –, l'IN2P3 contribue à la poursuite de la recherche vive en physique des particules principalement à travers trois collaborations: Babar (PEP-II à Slac), DO⁴ (Tevatron, à Fnal) et H1 (Hera, à Desy). Dans le même temps, l'Institut s'est engagé dans un nouvel effort de R&D, dédié à la définition d'un détecteur qui sera placé auprès de la machine de la génération suivant celle du LHC: le collisionneur linéaire international e⁺e⁻².

La période 2001-2003 a vu prendre forme la transition entre le grand accélérateur LEP et le futur accélérateur LHC: à ce moment charnière de son histoire, il est opportun pour l'Institut de tirer les grandes leçons apportées par le LEP. Évaluer son legs est essentiel pour la prochaine machine en cours de construction, le LHC, comme pour fixer le choix de la machine de la génération suivante.

Cette période a vu le triomphe technologique des usines à B qui ont pulvérisé les pronostics les plus optimistes en délivrant près de trois fois plus de données qu'espéré, qui plus est d'une excellente qualité, aux deux détecteurs. La compétition est rude entre ces deux projets qui ont déjà accompli leur mission première (fournir une première validation du paradigme décrivant la violation de CP dans le cadre du Modèle standard) et qui tiennent le devant de la scène internationale dans le domaine de la physique des particules.

Solénoïde de l'expérience CMS: simulation de l'enfouissement de la bobine dans la culasse magnétique.
© Cern

1 Babar
La violation de CP dans tous ses états
page 39

2 Atlas, CMS et LHCb
Trois expériences auprès du futur LHC
page 41

3 Alice
La construction de l'expérience
page 47

4 DO
Les premiers résultats du Run II
page 40

5 Datagrid
Un projet de grille de calcul
page 62

6 Coupleurs de puissance pour cavités supraconductrices
page 60

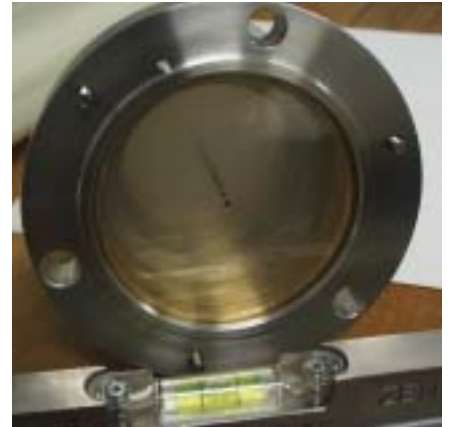
à droite, de haut en bas:

*Le système cible
de l'expérience LHCb.
© Cem*

*Structures accélératrices
supraconductrices en
niobium (projet Tesla)
qui composeront le futur
collisionneur linéaire
(ILC). © Desy*

Avant la mise en exploitation du LHC, la frontière des hautes énergies est explorée par le Tevatron à Fnal. Les équipes de l'IN2P3 ont pris une place de premier plan dans la collaboration D0: elles y préparent activement la moisson de résultats attendus dans les années qui viennent, jouant ainsi un rôle d'éclaireur pour la préparation à la physique du LHC.

Pour Babar comme pour D0, le Centre de calcul de Lyon a démontré qu'il faisait partie des meilleurs centres mondiaux en prenant dans les deux cas une responsabilité déterminante dans le calcul intensif, le stockage des grandes masses de données issues des expériences ainsi que de leurs exploitations simultanées.



Alors que les ultimes choix technologiques s'effectuent, l'Institut concentre maintenant ses forces autour de la construction des détecteurs, dans le cadre de ses multiples implications dans les collaborations. Ainsi, l'intégration des calorimètres électromagnétique et hadronique d'Atlas est largement entamée, l'électronique finale du calorimètre à cristaux de CMS a passé avec succès l'épreuve des tests en faisceau, la collaboration LHCb a procédé à une optimisation finale du détecteur alors que l'aimant prenait place dans le puits. Parallèlement, dans le cadre du projet Datagrid⁵, l'Institut se prépare à l'étape suivante: la mise en œuvre du calcul distribué du LHC grâce au futur projet LCG (LHC Computing Grid) avec pour objectif de réaliser un nœud majeur (Tier1) de la grille au Centre de calcul de Lyon.

La machine de la prochaine génération sera un collisionneur linéaire à électrons qui offrira un outil d'exploration, complémentaire du LHC, irremplaçable tant pour l'étude du mécanisme de brisure de la symétrie électrofaible que pour la compréhension de la nouvelle physique que le LHC devrait prochainement révéler. Avec un fort soutien de l'Europe, l'Institut contribue à l'effort mondial pour la conception de cette machine. Notamment, les équipes de l'IN2P3 se sont attelées à la tâche de la mise au point des coupleurs de puissance⁶ délivrant le champ hyperfréquence dans les cavités supraconductrices considérées dans les projets Tesla et X-FEL. La réalisation du (ou des ?) détecteur(s) devant être placé(s) au point de collision pose de nouveaux défis technologiques auxquels s'attaquent des équipes de l'Institut au sein de collaborations internationales de R&D.



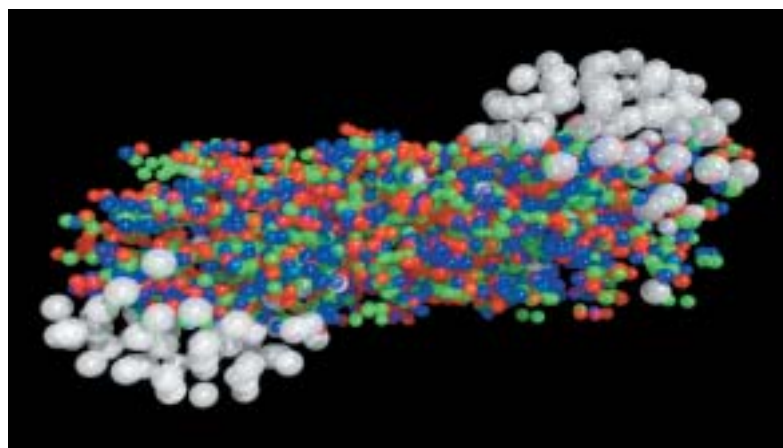
Physique nucléaire et hadronique



Sydney Galès

La physique nucléaire comprend aujourd'hui trois domaines d'étude :

- le big-bang et l'étude du plasma primordial de quarks et gluons déconfinés ;
- la structure interne et la dynamique des quarks et gluons dans le nucléon et les noyaux légers, et plus généralement la description des hadrons en termes des degrés de liberté de QCD ;
- la structure des noyaux dans leurs états extrêmes de température et de spin, mais aussi les limites d'existence des espèces « exotiques » très riches en protons ou neutrons car situées très loin de la vallée de stabilité nucléaire, des thèmes en relation étroite avec la nucléosynthèse et l'origine des éléments.



Représentation d'une collision entre deux noyaux de plomb à des énergies ultrarelativistes (TeV/nucléon). © Cern



Deux secteurs d'un prototype du détecteur VO de l'expérience Alice. © Cern

COLLISIONS D'IONS LOURDS ULTRARELATIVISTES ET NOUVEL ÉTAT DE LA MATIÈRE : LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS

Les collisions d'ions lourds ultrarelativistes constituent une sonde privilégiée pour explorer l'état de la matière nucléaire lors des premiers instants de l'Univers et mettre en évidence la transition de phase à très haute température de la matière nucléaire entre l'état de gaz de hadrons et celui d'un plasma de quarks et gluons déconfinés.

Durant la période considérée (2001-2003), cette recherche a bénéficié des trois premières campagnes de données auprès du collisionneur d'ions lourds Rhic ① mis en route récemment au laboratoire national de Brookhaven (USA).

Après avoir joué un rôle très significatif dans l'instrumentation, en particulier sur les détecteurs Star (Vertex Si, SSD) et Phénix (chambres de trace), les équipes de l'Institut se sont impliquées fortement dans l'analyse des premières expériences qui ont fourni un ensemble de résultats aussi remarquable qu'inattendu. Le fait marquant a été l'observation d'une nouvelle manifestation de la formation du plasma primordial, le «jet quenching», un effet traduisant le fait que, lors des collisions les plus énergétiques, les quarks et les gluons traversent un milieu très dense à très haute température. D'autres signatures de ce nouvel état de la matière nucléaire seront recherchées dans les prochaines prises de données.

Dans le même temps, d'autres équipes de l'IN2P3 ont préparé l'avènement de la prochaine génération d'expériences dans ce domaine auprès du plus grand collisionneur du monde, le LHC, qui entrera en fonctionnement en 2007 sur le site du Cern à Genève.

Les débris issus des collisions plomb-plomb, à une énergie beaucoup plus élevée qu'au Rhic (5 TeV au LHC, 200 GeV au Rhic), seront observés par le détecteur dédié de l'expérience phare «Alice» ② qui rassemble 1000 physiciens et ingénieurs

(50 français) issus de 80 instituts (6 laboratoires français) et de 30 pays. Dans cette gigantesque aventure, les physiciens de l'Institut ont pris des responsabilités très importantes: le détecteur de vertex au Si (ITS), le trigger V0 et le trajectographe pour les dimuons (chambres et électronique associées). Une fois la phase de R&D terminée, la production en série par l'industrie a démarré: elle devrait atteindre son rythme de croisière en 2005. Simulations et préparation de l'installation sur le site du Cern succéderont à cette phase de construction.

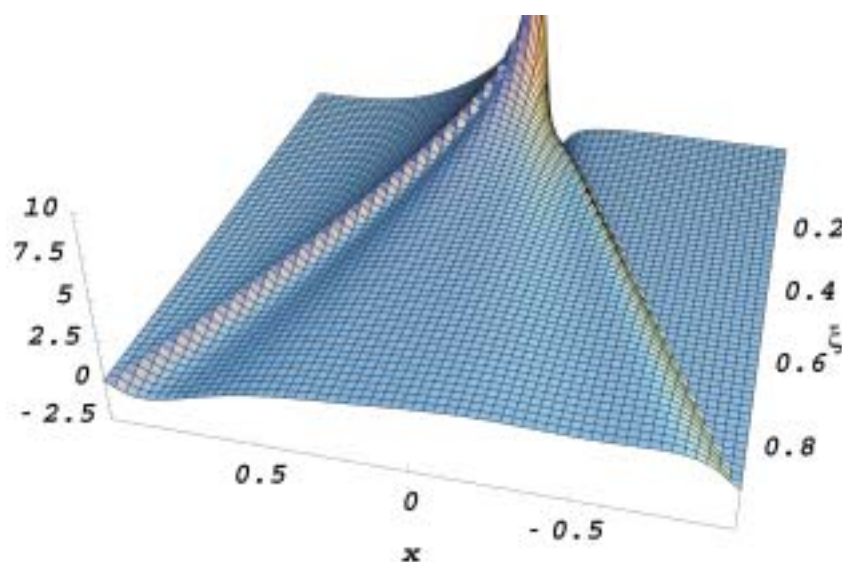
STRUCTURE DU NUCLÉON ET DES HADRONS

En physique hadronique, la description en termes de degrés de liberté de QCD (quarks et gluons) de la structure interne du nucléon et plus généralement des hadrons constitue l'enjeu majeur des expériences en cours ou programmées auprès de Mami (Allemagne) et surtout de TJNAF (USA). Ces programmes sont stimulés par l'apparition d'un nouveau formalisme théorique, les « distributions de partons généralisés » (acronyme anglais GPD³), qui unifie deux descriptions existantes: les facteurs de forme (structure spatiale) et les fonctions de structure (distribution en impulsion). Cette unification conceptuelle permet de comprendre le nucléon en tant qu'objet dynamique en trois dimensions.

Deux expériences, PVA4 (Mami) et G0 (TJNAF), ont pour objectif la mesure du contenu en quark(s) étrange(s) du nucléon, par la mesure d'une très faible asymétrie dans la diffusion élastique d'électrons polarisés sur le nucléon. La phase d'acquisition des données expérimentales est quasiment terminée et l'analyse intensive est en cours.

L'étude des GPD a démarré de manière intensive à TJNAF dans les halls expérimentaux A et B par l'étude de la diffusion Compton profondément inélastique (DVCS). Ces expériences requièrent une luminosité record du faisceau ($10^{37} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), une haute résolution cinématique et la mesure exclusive de tous les photons et hadrons de l'état final. Dans le hall B, à l'aide du détecteur Clas, la collaboration française (IN2P3 - Dapnia) a montré que ce nouveau concept était applicable dès 6 GeV. Les prochaines expériences DVCS sur le proton et le neutron, avec de nouveaux détecteurs (calorimètre à photons), se dérouleront entre 2004 et 2007.

Dans ce domaine de physique, la collaboration Hades à GSI (Allemagne) se propose de mesurer l'effet de densité du milieu nucléaire sur la masse et le temps de vie des hadrons dans la matière, par collisions d'ions lourds à des énergies de l'ordre du GeV/nucléon. L'équipe de l'IN2P3 avait la charge des chambres de tracking du détecteur Hades. La réception et la qualification du détecteur sont quasiment terminées et les premières acquisitions de données qui ont commencé fin 2003 se poursuivront en 2004.



Structure du nucléon: représentation en trois dimensions de la structure interne d'un nucléon.
© CNRS/IN2P3



Premier octant français de l'expérience G0.
© CNRS/IN2P3



STRUCTURE ET DYNAMIQUE NUCLÉAIRES : LA QUÊTE DES EXTRÊMES

Les grandes questions à résoudre en physique du noyau sont directement liées à l'exploration des limites d'existence des assemblages de protons (Z) et neutrons (N), quand on varie le rapport N/Z ou quand on accroît le moment angulaire total J du système. Exploration des limites mais aussi exploration de l'origine des éléments, lorsqu'on produit ces espèces rares et éphémères que sont les noyaux dits « exotiques » formés à l'origine dans les fournaies stellaires.

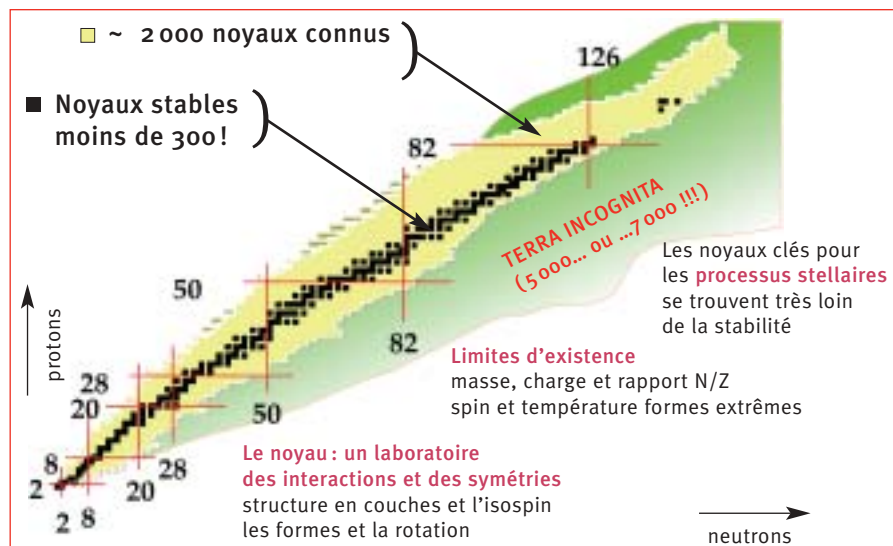
L'étude de la structure nucléaire à basse énergie (autour de la barrière 5^{-10} MeV/nucléon) se concentre sur la « recherche de phénomènes rares à la limite de la cohésion nucléaire » : très hauts spins et formes exotiques, noyaux superlourds, spectroscopie de leurs descendants immédiats (les noyaux de $Z = 100$ et au-delà), *drip-line* proton, *pairing* et noyaux $N = Z$ par réaction de fusion-évaporation.

Pour atteindre ces phénomènes rares, les communautés française mais aussi européenne ont déjà fait évoluer leurs moyens expérimentaux à travers la mise en service de trois générations successives de multidétecteurs « gamma » voyageurs qui ont pour noms Eurogam, Euroball et bientôt Agata¹. Ces instruments ont fait reculer sans cesse les limites de détection des cascades gamma, signatures élégantes de formes extrêmes dans les noyaux.

Ainsi la recherche de l'hyperdéformation du noyau (HD), Graal de la physique des hauts spins depuis sa prédiction en 1988, a fait l'objet début 2003 d'une expérience de très grande statistique auprès du multidétecteur gamma européen Euroball installé au Vivitron (Strasbourg). Une analyse des structures collectives de ^{126}Ba a permis de mettre clairement en évidence une structure en « vallée » ou « ridge » compatible avec une structure HD.

De plus, il est envisagé une structure en clusters préexistants pour expliquer la structure de tels états. Or de tels phénomènes doivent être recherchés dans des voies de réactions qui ne représentent que quelque 10^{-6} de la section efficace de fusion. C'est ainsi qu'a émergé, sous le nom d'Agata, la troisième génération de

¹ Agata
Un spectromètre
de nouvelle génération
page 75



Carte des noyaux : en noir, les noyaux stables existant dans la nature ; en jaune, les 2 000 noyaux radioactifs mis en évidence en laboratoire ces quarante dernières années ; en vert, la zone à découvrir appelée « terra incognita » où se trouvent les espèces les plus « exotiques ».

multidétecteurs gamma. Le projet européen Agata est constitué d'une boule de germanium pur avec localisation du rayonnement gamma grâce à une large segmentation du détecteur. Enfin, la spectroscopie des noyaux $N = Z$ proches de la *drip-line* proton jusqu'au noyau ^{100}Sn est aussi possible avec ces mêmes réactions et le multidétecteur Agata. Pour « la physique des noyaux loin de la stabilité », le Ganil et ses faisceaux d'ions lourds les plus intenses du monde dans leur domaine d'énergie (20-100 MeV/nucléon) ont permis la réalisation d'une première série d'expériences auprès de la nouvelle installation Spiral1. Spiral1 utilise la méthode Isol: production, par des ions lourds intenses et énergiques, de noyaux « exotiques » dans une cible épaisse de carbone, diffusion hors de la cible épaisse, ionisation dans une source d'ions puis injection et réaccélération par le cyclotron Cime. Les premières espèces exotiques ainsi produites avec des intensités de 10^3 - 10^6 particules par seconde (pps) à des énergies allant de 4 à 20 MeV/nucléon sont: $^{6,8}\text{He}$, ^{18}Ne et ^{72}Kr .



Ligne permettant de diriger le faisceau des noyaux exotiques produits par Spiral vers les salles d'expérience.
© Ganil, M. Désaunay

Une découverte importante marque la période 2001-2003 avec la mise en évidence de la radioactivité deux protons² dans le noyau de ^{45}Fe .

Une nouvelle moisson de résultats est attendue concernant l'existence ou non de systèmes neutroniques constitués de plus de deux neutrons. Le tétraneutron² fait notamment l'objet d'études détaillées par fragmentation de noyaux riches en neutrons (^{14}Be) et par réaction de transfert induite par un faisceau de ^8He .

Des noyaux légers « Borroméens³ », systèmes à trois corps dont les sous-systèmes à deux corps sont instables, ou encore possédant une structure en « clusters », sont l'objet d'intenses recherches expérimentales toujours grâce aux faisceaux d'hélium riche en neutrons ($^{6,8}\text{He}$) de Spiral1.

Avec Spiral1, seule une fraction limitée d'espèces rares (principalement des noyaux légers) est accessible à des intensités suffisantes. Il faut donc étendre considérablement la gamme des ions secondaires radioactifs disponibles, en particulier vers les noyaux moyens et lourds, riches en neutrons, tout en augmentant considérablement les intensités. Le projet Spiral2⁴ répond à ces deux souhaits.

La méthode de production choisie pour Spiral2 est la fission induite par neutrons rapides. Le projet s'inspire de la station prototype Parrne installée auprès du Tandem d'Orsay. Le driver sera constitué d'une source intense de deutons suivie d'un RFQ et d'un linéaire à cavités supraconductrices qui produira un faisceau de deutons de 5 mA à 40 MeV (200 KW). Ce faisceau sera converti en flux intense de neutrons dans un convertisseur en carbone qui produira 10^{13} fissions/s dans une cible épaisse de carbure d'uranium. Après diffusion et ionisation, on pourra disposer de faisceaux très intenses d'ions très riches en neutrons, ayant des masses situées entre 70 et 150, qui seront triés puis injectés et accélérés à des énergies autour de 6 MeV/nucléon par le cyclotron Cime. À titre d'exemple, on pourra disposer d'un faisceau de ^{132}Sn d'environ 10^9 pps. L'ensemble envisagé peut aussi se

² Deux découvertes
La radioactivité
deux protons
et le tétraneutron
page 50

³ Noyaux à halo
Borroméens
et autres structures
exotiques
page 51

⁴ Spiral2
La production et
l'accélération
de produits de fission
page 70



Sonde de Cime,
le cyclotron injecteur
de moyenne énergie
de Spiral.

© Ganil, M. Désaunay

doter d'une source très intense (1 mA) d'ions lourds qui pourront être accélérés par l'ensemble RFQ+Linac à environ 15 MeV/nucléon. Le projet est chiffré à 80 M€ (hors salaires) et pourrait être opérationnel en 2010 si un financement est disponible dès 2005. La phase d'avant-projet détaillé (APD) vient de se terminer et le groupe de projet est en cours de constitution. En conclusion, un tel projet placera le Ganil au centre du dispositif européen pour la physique des « exotiques ».

De plus, Spiral2 est l'étape intermédiaire indispensable sur la route de la machine européenne ultime du domaine Eurisol¹. Le plan à long terme (2020) de Nupecc dans ce domaine pour l'Europe repose sur le déploiement de deux installations complémentaires: l'une autour du projet Fair de GSI de production par des ions lourds relativistes intenses (1 GeV/nucléon) et l'autre avec une installation Isol de nouvelle génération.

Dix laboratoires européens sont en charge de la définition de la machine Isol qui a reçu un support financier européen dans le cadre du 5^e PCRD (2000-2003, 1,2 M€) et a pris le nom d'Eurisol. Restant dans la continuité, le 6^e PCRD a sélectionné ce projet et l'a financé (*Eurisol Design Study*, 9,5 M€). Les caractéristiques de l'installation proposée sont les suivantes.

L'accélérateur de production « driver » est un linéaire supraconducteur de protons d'énergie nominale de 1 GeV et d'intensité moyenne de 5 mA. Il pourra aussi accélérer des ions légers de $Z/A = 1/2$ (deuton, alpha, carbone). Les cibles devront supporter la dissipation de 5 MW de puissance de faisceau et pour cela il faudra s'inspirer de celles utilisées dans le domaine des sources à spallation de neutrons. Dans le domaine connexe des sources d'ions, de nombreuses R&D ont été lancées, les plus prometteuses étant celles permettant une excitation sélective des ions radioactifs par laser et le projet Alto².

Alto utilisera la fission induite par photons dans une cible d'uranium pour produire les mêmes noyaux riches en neutrons que Spiral2 à des taux de production 100 fois moins élevés. En dehors d'un programme de spectroscopie bien ciblé, Alto sera, dès 2005, un excellent banc prototype pour mesurer les taux de production, de diffusion et d'ionisation des ions rares dans des ensembles cibles-sources qui seront ultérieurement utilisés à Spiral2.

L'étude technique du postaccélérateur d'ions « exotiques » d'Eurisol, qui devra accélérer tous les ions produits jusqu'à la masse 140 à des énergies variant entre 0 et 100 MeV/nucléon, a abouti à sélectionner là encore un linéaire supraconducteur avec des sorties dans les domaines du KeV/nucléon, de 3 à 15 MeV/nucléon et de 20 à 100 MeV/nucléon (haute énergie).

On peut donc noter que le Ganil avec Spiral2 pourrait être un excellent site pour accueillir Eurisol. En effet, le linéaire de Spiral2 et l'ensemble des halls expérimentaux déjà très bien équipés sont d'excellents arguments en faveur du site français.

¹ Eurisol
Une nouvelle génération
de faisceaux radioactifs
page 72

² Alto
Un accélérateur
d'électrons pour
des faisceaux radioactifs
riches en neutrons
page 74

Astroparticules et neutrinos



Stavros Katsanevas

LE DOMAINE DES ASTROPARTICULES

Le domaine des astroparticules associe étroitement l'étude de la genèse, de la forme et de l'évolution de l'Univers à nos connaissances sur la structure de ses constituants: particules élémentaires, champs d'interaction, cordes.

L'Univers y est étudié tant dans ses aspects globaux (ses dimensions, sa géométrie, son contenu en matière et énergie [cosmologie] que dans ses points singuliers ou sites d'accélération de particules (supernovæ, noyaux actifs de galaxie, sursauts gamma, voisinage ou site de fusion d'étoiles à neutrons et trous noirs [phénomènes cosmiques de haute énergie]).

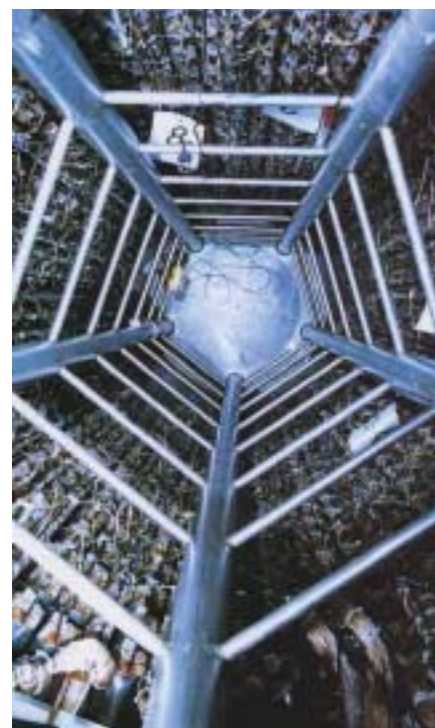
La cosmologie et les phénomènes cosmiques de haute énergie se croisent en plusieurs points le long de leur frontière commune. Ainsi, les supernovæ ont servi de chandelle standard pour mesurer l'accélération de l'Univers et, inversement, la matière noire recherchée en cosmologie pourrait être détectée de manière indirecte par les observatoires de phénomènes cosmiques de haute énergie.

La connaissance des propriétés des particules subatomiques et de leurs interactions, la physique nucléaire et la physique des particules forment, avec la théorie de la gravitation, le socle nécessaire à la compréhension de ces phénomènes cosmiques et cosmologiques.

Premiers entre les particules élémentaires, les neutrinos jouent un rôle crucial dans la nucléosynthèse primordiale et stellaire. Ils ont des implications sur la formation de grandes structures cosmologiques et pourraient être à l'origine de la brisure de symétrie entre matière et antimatière. L'expérience sur satellite Planck¹, qui mesurera avec une grande précision le fond cosmologique et les grandes structures de l'Univers, sera très sensible à la masse du neutrino. Cette même région de sensibilité est sondée par l'expérience Nemo3².

Cette dernière cherche aussi à déterminer les propriétés du neutrino par rapport à la symétrie qui transforme une particule en sa propre antiparticule. L'oscillation ou changement de saveur du neutrino (cherché par l'expérience Opera² située dans le tunnel du Gran Sasso et recevant un faisceau de neutrinos en provenance du Cern) permet de sonder également les paramètres de celui-ci. Les neutrinos constituent une sonde formidable de l'intérieur du Soleil et des explosions de supernovæ. Ils pourraient être émis par un ou plusieurs accélérateurs de particules cosmiques. On espère ainsi que la détection de neutrinos par le télescope neutrino Antares³, ou par son successeur potentiel, l'expérience

Vue autour d'un « cookie » (un opto-coupleur situé entre les fibres optiques et les photomultiplicateurs) pendant l'assemblage d'un module de la cible/détecteur de traces de l'expérience Opera.
© CNRS/IN2P3



Vue de l'intérieur de la tour centrale de l'expérience Nemo3, située au Laboratoire souterrain de Modane.
© CNRS/IN2P3

1 Planck
Un satellite pour l'étude du rayonnement de fond cosmologique
page 76

2 Nemo3, CNGS et Opera
À la recherche de la masse du neutrino
page 45

3 Antares
Un télescope sous-marin à neutrinos
page 56

Récupération d'une ligne de détection du télescope sous-marin Antares à une quarantaine de kilomètres des côtes provençales.
© Antares



Premier télescope
de l'expérience Hess.
© Collaboration Hess

1 Hess
Une pleine sensibilité
depuis décembre 2003
page 57

2 Glast
Le futur de l'astronomie
gamma spatiale
page 78

3 Auger
L'observatoire décrypte
les messages
de l'Univers extrême
page 58

4 Virgo
La recherche d'ondes
gravitationnelles
page 55

5 Edelweiss
À la recherche
de la matière noire
page 54

KM3, associée à l'étude de la morphologie et du spectre de rayons gamma de haute énergie par les télescopes Hess¹ et les expériences sur satellite (Glast², AMS) aboutira à la résolution de l'énigme séculaire de l'origine des rayons cosmiques. Inversement, la recherche sur les astroparticules peut venir irriguer celle sur les particules élémentaires en donnant accès à des énergies qu'on ne peut pas obtenir dans les accélérateurs terrestres. Il suffit de rappeler qu'avant l'avènement des accélérateurs l'antimatière (positons), les pions et les particules de la deuxième « famille » (muons et particules étranges) furent découverts lors d'expériences de rayons cosmiques. L'observatoire de rayons cosmiques de très haute énergie Auger³ en Argentine étudie aujourd'hui les rayons cosmiques à une énergie au centre de masse 30 fois supérieure à celle du LHC.

Les ondes gravitationnelles sont un autre type de messenger céleste. Elles sont émises lors de la fusion de deux trous noirs ou étoiles à neutrons, pendant l'implosion d'une supernova ou de façon périodique par un pulsar. L'antenne interférométrique Virgo⁴ à Pise fait partie d'un réseau mondial d'antennes qui cherchent à détecter pour la première fois les ondes gravitationnelles émanant d'un tel phénomène violent. Les observatoires d'ondes gravitationnelles sont complémentaires des autres observatoires de phénomènes cosmiques de haute énergie et auront une prolongation certaine dans le domaine spatial avec l'expérience Lisa. Dans un futur plus lointain, ils pourraient aussi détecter les ondes gravitationnelles émises par un autre phénomène violent par excellence: le big-bang.



Vue aérienne de l'antenne de détection Virgo.
© EGO – Virgo / CNRS Photothèque



Les théories des champs, cadre de compréhension de la physique des particules, ainsi que plusieurs de leurs extensions (les théories unifiées, les théories des cordes ou les théories à plusieurs dimensions) postulent l'existence de nouvelles particules, les particules supersymétriques. Les particules supersymétriques interagissant faiblement, les Wimps, sont d'excellents candidats pressentis pour constituer la matière noire, qui remplit 25% du contenu de notre Univers et sert de noyau d'accrétion pour les structures cosmiques. L'observatoire de matière noire Edelweiss⁶, situé dans le tunnel de Fréjus, essaie de les détecter de manière directe à travers les quantités infimes d'énergie qu'elles déposent en interagissant avec la matière ordinaire.

Les théories des champs et leurs extensions prédisent également l'existence de champs scalaires, dont le champ de Higgs donnant la masse aux particules élémentaires. Des champs scalaires pourraient aussi être responsables de la phase d'expansion exponentielle (inflation) de notre Univers (l'expérience sur satellite Planck à partir de 2007 testera en profondeur les prédictions du modèle de l'inflation) et de l'accélération de l'expansion de l'Univers à l'époque actuelle. Cette énergie d'accélération, découverte seulement en 1998, appelée énergie sombre et ayant toutes les caractéristiques de la constante cosmologique d'Einstein, occupe 70 % de la densité de masse et énergie de notre Univers.

Trouver la relation entre les champs scalaires de la physique des particules et ceux de la cosmologie ou remplacer ces liens avec une autre théorie englobant de façon cohérente les deux grands piliers de notre connaissance (la théorie quantique des champs et celle de la relativité générale) est la tâche majeure des recherches du XXI^e siècle. Les efforts de la cosmologie et du domaine des astroparticules et neutrinos se trouvent au cœur du débat.

LES ASTROPARTICULES AU CNRS

Les projets d'astroparticules à l'IN2P3 concernent 200 chercheurs et enseignants-chercheurs, soit un total de 360 ETP (équivalent temps plein), ingénieurs et techniciens compris. Cependant, il faut noter que l'imbrication étroite des problématiques des astroparticules (physique des particules, physique nucléaire, astrophysique, cosmologie, théorie) mobilise plusieurs départements et instituts du CNRS (SDU/Insu, SPM et IN2P3) et en constitue un de ses cinq axes interdisciplinaires prioritaires.

La thématique est suivie par le programme interdisciplinaire Astroparticules du CNRS, qui a commencé ses actions en 2000 et dont le directeur scientifique et le directeur de programme sont respectivement le directeur scientifique et le directeur adjoint scientifique pour les astroparticules de l'IN2P3. Le programme a été structuré autour de deux axes :

- participation au financement de grands équipements: tout d'abord l'expérience Auger, mais aussi les expériences Hess, Antares, Edelweiss et la R&D de Virgo;
- financement du GDR « Phénomènes cosmiques de haute énergie » (PCHE) pour assurer l'animation scientifique autour des thèmes cités plus haut et le rapprochement des communautés des astrophysiciens et des physiciens des particules par des actions incitatives interdisciplinaires.



Installation d'une cuve Cherenkov sur le site de l'expérience Auger.
© Auger



Détecteur de l'expérience Chooz en cours d'installation dans une galerie souterraine située à 1 km de la centrale nucléaire de Chooz dans les Ardennes.
© CNRS/IN2P3

ÉTAT D'AVANCEMENT ET RÉSULTATS DES PROJETS D'ASTROPARTICULES

Avant d'énumérer les progrès spécifiques aux différentes expériences, il est important de noter qu'en 1998 deux observations expérimentales ont révolutionné le domaine, conditionnant en grande partie le programme du siècle à venir. La première est l'observation de l'accélération de l'Univers déjà citée. La seconde est l'observation, par l'expérience SuperKamiokande au Japon, d'une anomalie dans le comptage des neutrinos atmosphériques. Son interprétation en termes d'oscillation et de manifestation de la masse du neutrino a été fondée sur les résultats négatifs obtenus avec l'expérience de l'IN2P3 auprès du réacteur Chooz. Il n'est donc pas surprenant que les publications de l'expérience Chooz aient rejoint celles de l'expérience SuperKamiokande et celles du *Supernova Cosmology Project* au palmarès des dix publications les plus citées ces dernières années dans le domaine de la physique des particules, de l'astrophysique et de la cosmologie.

Dans le domaine des infrastructures, l'IN2P3 partage avec le CEA la tutelle du Laboratoire souterrain de Modane (LSM), site des observatoires de matière noire (Edelweiss) et des propriétés du neutrino (Nemo3).

La collaboration Edelweiss, expérience bolométrique de détection directe de matière noire non baryonique, a publié en 2002 des résultats d'une très grande sensibilité. Ces résultats infirment plusieurs interprétations d'un signal, non encore confirmé, observé par l'expérience Dama au tunnel du Gran Sasso, et atteignent pour la première fois la région des prédictions du modèle supersymétrique. Fin 2003, elle est l'expérience la plus sensible de recherche de matière noire au niveau mondial. Une version de la même expérience, plus sensible de 2 ordres de grandeur (Edelweiss II), sera opérationnelle fin 2005.

La construction de Nemo3, expérience de recherche de la désintégration double bêta, également située au LSM, a été achevée en 2003. Les résultats de Nemo3 ont déjà commencé à être présentés lors de plusieurs conférences internationales et à avoir un impact important.

Les années 2001-2003 ont vu la confirmation de l'hypothèse d'oscillation des neutrinos atmosphériques et solaires, citée en exergue, par des expériences ter-

1 Archeops
Un progrès dans la compréhension de la naissance de l'Univers
page 52

2 Supernovæ la
Un accès à l'histoire récente de l'expansion de l'Univers
page 53

3 Snap
La traque des supernovæ la à grands décalages vers le rouge
page 77



Lancement du ballon
Archeops à Kiruna
le 7 février 2002.
© Archeops

restres (accélérateurs et réacteurs). L'expérience Chooz, qui a terminé la prise de données avant 2001, a publié ses résultats finals en 2002. La construction de l'expérience Opera a commencé en 2002. Située au tunnel du Gran Sasso, Opera cherche à mettre en évidence l'apparition d'événements dus à des neutrinos tau dans une cible illuminée par un faisceau constitué presque exclusivement de neutrinos muon, en provenance du Cern à Genève. Cette observation serait un signe irréfutable de l'oscillation du neutrino mu en neutrino tau. L'IN2P3 participe aussi au conseil d'EGO, structure CNRS/INFN mise en place pour assurer le fonctionnement de Virgo et préparer une politique commune sur la détection des ondes gravitationnelles en Europe. La construction de l'antenne gravitationnelle Virgo a été achevée en 2003 et inaugurée en présence des ministres de la Recherche italien et français en juillet 2003.

Un autre fait scientifique majeur de l'année 2003 a été la

publication des résultats de l'expérience WMAP de la Nasa, expérience d'observation du fond diffus cosmologique confirmant le modèle cosmologique dit de concordance selon lequel nous vivons dans un Univers euclidien (plat) constitué de 70 % d'énergie sombre et 30 % de matière dont la majorité est noire. Les résultats de WMAP ont été précédés de quelques mois par la publication de l'expérience Archeops¹ embarquée sous ballon, expérience de faible coût qui, même si elle n'a observé qu'une partie du ciel (1/7), a pu mesurer les paramètres du modèle de concordance avec une grande précision. Les mesures de WMAP ont confirmé les mesures d'Archeops tout en les surpassant en précision. Par ailleurs, Archeops a validé la technologie qui sera déployée dans Planck (2007).

Les équipes de l'IN2P3 participant au *Supernova Cosmology Project*² ont publié des résultats importants confirmant l'accélération de l'Univers. En collaboration avec des équipes de l'Insu/CNRS et du CEA, elles ont développé une série d'instruments qui vont permettre l'approfondissement des premières mesures (*Supernova Factory* - SNIFS et *Supernova Legacy Survey* - SNLS, au CFHT). Ces équipes espèrent poursuivre l'étude de l'énergie sombre avec des télescopes embarqués sur satellite (Mission énergie noire - Snap³).

La construction des quatre télescopes de Hess en Namibie a été achevée en décembre 2003. Une série de résultats obtenus avant la fin de cette construction a été acceptée pour publication dans les revues *Astronomy et Astrophysics* et *Nature*. Elle concerne l'activité de photons de haute énergie émanant du centre de notre galaxie ainsi que l'émission de photons énergétiques par l'enveloppe de matière et la radiation de vestiges d'anciennes supernovæ. Avant même sa pleine mise en opération, Hess est ainsi devenu, par la qualité de ses résultats, le leader mondial dans le domaine des photons de haute énergie.

Les années 2001-2003 ont vu par ailleurs la mise en opération de plusieurs cuves d'Auger («*engineering array*») qui ont permis la validation finale de la technologie. Le déploiement final commencera en 2004.

Quant au télescope neutrino Antares, deux de ses lignes de test ont été déployées en mars 2003 sur le site final au large de Toulon. Ces deux lignes ont permis la prise de données environnementales et pluridisciplinaires (biologie) en continu ainsi que le test de la technologie avant le déploiement des douze lignes finales qui commencera en 2005.

Aval du cycle électronucléaire



Hubert Doubre

Dans le programme Pace, les équipes de l'IN2P3 sont impliquées en physique nucléaire (GDR Gedepeon) et en radiochimie (GDR Paris).

Les actions menées par Gedepeon sont partagées entre l'étude et la réalisation de composants d'ADS incinérateurs, et l'évaluation de systèmes innovants, économes de ressources naturelles et ayant des capacités de transmutation. Les résultats sont présentés ci-dessous.

DONNÉES NUCLÉAIRES

Les mesures de production de neutrons de spallation (à Saturne) et celles des résidus de spallation (à GSI) ont permis d'enrichir de nouveaux codes, décrivant mieux la cascade nucléaire ou l'évaporation; les prédictions de ces codes sont très satisfaisantes. Des données ont été obtenues sur la production de particules composites (tritium, hélium), donc de gaz dans les matériaux. Cette production affecte la tenue de ceux-ci, qu'elle rend fragiles et dont elle limite la durée de vie.

Le programme de mesures engagé à Geel, Bordeaux, Orsay et au Cern fournira les sections efficaces indispensables au calcul des taux de transmutation des actinides mineurs. Les difficultés rencontrées au Cern pour utiliser des cibles radioactives ont considérablement réduit ce programme. L'évaluation de l'ensemble de ces données tarde; une fois ce stade franchi, ce programme pourra être considéré comme un succès.

PHYSIQUE DES MILIEUX SOUS-CRITIQUES

Le programme Muse¹ a étudié la neutronique de configurations sous-critiques (- 300, - 3000 et - 5000 pcm), réalisées dans le réacteur Masurca au CEA/Cadarache, avec un caloporteur sodium. Le générateur de deutons Génépi, construit à l'IN2P3, accélère des deutons à une énergie comprise entre 140 et 240 keV; la durée des impulsions est de 700 ns, à fréquence variable (10-5000 Hz). Suivant la cible utilisée (D ou T), deux énergies de neutrons (2.8 et 14 MeV) sont réalisées. D'excellents résultats ont été obtenus sur la cinétique des réacteurs sous-critiques; la réactivité est mesurée avec précision par diverses méthodes, dont celle de la source pulsée, sans retourner à une configuration critique; le contrôle de la puissance du réacteur par l'intensité de la source donne accès à une mesure directe des neutrons retardés.



de haut en bas:

Vue de dessus du réacteur expérimental Masurca, situé à Cadarache.
© CEA

Accélérateur Génépi couplé au réacteur expérimental Masurca, situé à Cadarache.
© CEA

MATÉRIAUX

Plusieurs études de fragilisation des aciers par les métaux liquides et de thermodynamique des systèmes intermétalliques ont éclairé les conditions de cette fragilisation. Une sonde-pompe à base de zircone yttrée fournit une mesure absolue de la très faible concentration de l'oxygène dans le métal liquide (entre 10^{-2} appm à 200 °C et ≈ 300 appm à 550 °C), qui a une grande influence sur la corrosion des aciers.

Après de nombreuses études sur la tenue mécanique des éléments (fragilisation par le métal liquide, tenue à l'irradiation), la construction de la cible Megapie¹ est maintenant presque terminée.

ACCÉLÉRATEUR

Les travaux réalisés ont débouché sur le choix de l'accélérateur linéaire, la réalisation de sa source et de cavités supraconductrices pour la partie haute énergie. Les cavités «spoke»² à basse énergie sont en cours de qualification. L'effort porte sur les tests de fiabilité (pas plus de 5 arrêts/an d'une durée supérieure à la seconde).

Les études sur un réacteur sous-critique sont maintenant passées au plan européen dans le cadre des programmes PDS-XADS³ (5^e PCRD) et Eurotrans (6^e PCRD). La participation des équipes de Gedepeon porte sur les données nucléaires, l'accélérateur, la cible de spallation, la tenue des matériaux et la physique des réacteurs.



de gauche à droite:

Composant d'un accélérateur moderne: une cavité supraconductrice elliptique en niobium. L'importance de la propreté de surface explique le travail en salle blanche.
© CNRS/IN2P3

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

SYSTÈMES INNOVANTS

Ces études ont porté sur la filière thermique Th-U3, utilisant des sels fondus comme caloporteur et combustible, et sur les matériaux à haute température ainsi que sur quelques études de physique.

Le fonctionnement du réacteur à sels fondus (MSR) repose sur un fort couplage entre la neutronique et les performances de l'unité de retraitement. Le point de départ de l'étude a été le projet MSBR (1970, Oak Ridge). Ce concept est particulièrement intéressant, car son inventaire fissile est bien plus faible que celui des réacteurs rapides, de même que sa production d'actinides mineurs. Le réacteur a été recalculé, sous les contraintes d'un retraitement simplifié et de coefficients de température globalement négatifs. Cela se paie par une dégradation des perfor-

1 Muse
Le premier réacteur sous-critique piloté par accélérateur
page 59

2 Cavités «spoke»
Des cavités accélératrices supraconductrices
page 61

3 PDS-XADS
Le projet européen d'incinération des déchets nucléaires
page 81



*Plate-forme de mesure
de sections efficaces pour
les systèmes du futur.*
© CNRS/IN2P3

mances de surgénération. Les études de scénarios montrent que démarrer une telle filière avec du plutonium est moins avantageux qu'avec de l'uranium-233 produit dans les REP (réacteurs à eau pressurisée) ou les réacteurs rapides de génération IV. Des recherches sur le retraitement, applicables aussi bien au combustible du MSR qu'à celui du GFR, sont en cours avec les équipes du GDR Paris, tandis qu'un atelier commun avec le GDR Nomade a porté sur la tenue des matériaux à haute température pour l'ensemble des systèmes du futur. Un atelier sur la production d'hydrogène à partir de réacteurs nucléaires s'est tenu en septembre 2003.

L'objectif majeur des travaux sur les systèmes est la démonstration de faisabilité scientifique des réacteurs à sels fondus, qui demande de développer simultanément des calculs de neutronique couplée à la thermohydraulique et à la thermochimie, des études de pyrochimie, de matériaux de structure et de sûreté des réacteurs. Des scénarios de déploiement des filières de réacteurs évaluent leurs performances et les options possibles.

En chimie, les recherches approfondissent la connaissance des aspects structuraux, cinétiques et thermodynamiques, notamment des paramètres physicochimiques des ions actinides, lanthanides et autres radionucléides à vie longue en solution dans l'eau, les solvants organiques et les sels fondus. Dans ce dernier cas, des études électrochimiques sont entreprises en collaboration avec le CEA. Les propriétés des sels liquides à température ambiante (RTIL) et des milieux supercritiques sont également explorées: comportements électrochimiques nouveaux, chimie de coordination originale... En chimie théorique, des travaux importants ont porté sur la simulation numérique de la séparation (hydrométallurgie).

Développements technologiques

Les accélérateurs



Marcel Lieuvin

Durant la période 2001-2003, l'évolution amorcée les années précédentes vers une concentration des moyens de recherche autour de quelques grandes installations au niveau international s'est poursuivie. En France, après l'arrêt de Saturne, de Sara, du Vivitron¹ et du Lure (rayonnement synchrotron), seuls le Ganil et le tandem d'Orsay restent en activité pour la physique nucléaire. La physique des particules se concentre au Cern pour l'Europe.

Une vigoureuse politique de R&D pour les accélérateurs a été mise en place avec la prise de conscience que l'avenir de la recherche pour la physique nécessite un renouveau important de ces techniques. Cette politique s'est concrétisée par une augmentation sensible des budgets IN2P3 consacrés à la R&D accélérateurs, par une politique d'emploi, en particulier d'ingénieurs, pour pallier le départ annoncé de nombre de spécialistes et par un rapprochement avec le Dapnia dont les besoins et les ressources sont complémentaires. Ce rapprochement a donné naissance en 2003 à une structure commune de réflexion et de proposition: le Cadi (Coordination des activités accélérateurs de la DSM et de l'IN2P3).

Composant d'un accélérateur moderne : une cavité supraconductrice elliptique en niobium. L'importance de la propreté de surface explique le travail en salle blanche.
© CNRS/IN2P3



LES ACCÉLÉRATEURS POUR LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET POUR L'INCINÉRATION DES DÉCHETS

2001 a été l'année du démarrage de Spiral qui utilise les faisceaux fragmentés, ionisés, triés et accélérés du Ganil. Depuis 2001, Spiral produit régulièrement des faisceaux radioactifs tels que ^6He , ^{24}Ne , ^{45}Ar ...

En 2003, le projet Spiral2² a vu le jour. Il permettra la production de faisceaux radioactifs résultant de la fission de l'uranium. Un groupe de projet a été mis en place fin 2003 pour réaliser l'avant-projet détaillé à remettre fin 2004.

Dans le même temps, l'Institut a entrepris, avec le soutien de la région Île-de-France, la réalisation d'Alto³, qui utilise des cavités accélératrices de l'injecteur du LEP pour réaliser la photofission de l'uranium.

Les futurs projets d'« usines » à ions radioactifs, les incinérateurs de déchets nucléaires et les « usines » à neutrinos ont un point commun: ils font appel à un accélérateur primaire de protons de quelques dizaines de mA d'intensité à 1 GeV d'énergie, ce qui donne des puissances faisceau de plusieurs MW. De telles machines posent des problèmes nouveaux en matière de sources d'ions, de cavités accélératrices et surtout de fiabilité. La R&D à l'IN2P3 s'est essentiellement focalisée sur ces trois points.

Dans le domaine des sources d'ions, de constants progrès ont été réalisés. Ils concernent les sources ECR (*electron cyclotron resonance*), en particulier la source Phoenix 28 GHz. Un développement également important, pour les ions radioactifs, est celui des sources « booster » qui permettent de convertir un faisceau monochargé en un faisceau multichargé avec un excellent rendement.

1 Vivitron
La structure nucléaire aux limites
page 49

2 Spiral2
La production et l'accélération de produits de fission
page 70

3 Alto
Un accélérateur d'électrons pour des faisceaux radioactifs riches en neutrons
page 74



Cavité spoke.
© CNRS/IN2P3



Les faisceaux de forte intensité demandent des cavités accélératrices ayant de larges ouvertures, pour limiter les pertes associées à un fort gradient accélérateur, et un excellent rendement électrique. Les cavités «spoke»¹ développées à l'IN2P3 répondent à ces exigences et sont de bons candidats pour la réalisation du premier étage d'un futur accélérateur de protons de grande puissance.

Le projet Iphi a été conçu pour démontrer la faisabilité d'une machine de forte intensité et de très grande fiabilité. En 1997, l'objectif était un faisceau de 100 mA de protons à 10 MeV. Le projet comprenait: la source, un RFQ jusqu'à 5 MeV, des cavités elliptiques pour atteindre 10 MeV et tous les diagnostics nécessaires. La défaillance en 2002 de la société SICN, en charge de la réalisation du RFQ, a entraîné un retard et une baisse de l'énergie à 3 MeV. Iphi devrait aboutir en 2006 et être transféré au Cern en 2007.

LES ACCÉLÉRATEURS POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES

L'effort principal pendant la période 2001-2003 a été la contribution à la réalisation du grand collisionneur de hadrons (LHC) au Cern. L'IN2P3 s'est ainsi chargé de l'étalonnage des thermomètres froids de la machine ainsi que de la conception des cryostats des quadrupôles.

Dans le même temps, les recherches pour un collisionneur d'électrons se sont poursuivies par une R&D sur les coupleurs de puissance² RF en collaboration avec Desy dans le cadre des projets Tesla, puis X-FEL.

L'IN2P3 participe également à la R&D du projet Clic du Cern à travers les dispositifs démonstrateurs de test CTF2 et CTF3. Il réalise par ailleurs les éléments de focalisation des faisceaux de muons (les « cornes ») destinés à envoyer des flux intenses de neutrinos vers les détecteurs du Gran Sasso.

LES ACCÉLÉRATEURS POUR L'ASPECT INTERDISCIPLINAIRE

Avec le Dapnia, l'IN2P3 s'est intéressé à l'hadronthérapie; il en a résulté l'avant-projet de la machine Etoile, en collaboration avec l'université Claude-Bernard de Lyon, suivi par Asclepios à Caen. Ces projets seront soumis pour décision aux autorités de santé.

Aifira, accélérateur électrostatique de 3 MeV installé à Bordeaux, délivrera dès 2005 des faisceaux de taille nanométrique permettant, par exemple, l'étude de l'effet de faibles doses sur le comportement des cellules vivantes.

Jannus est un projet de plate-forme de recherche technologique régionale sur les sites de Saclay et d'Orsay produisant des faisceaux simultanés d'ions et permettant l'étude du comportement des matériaux soumis à irradiation.

Signalons également le projet d'un cyclotron polyvalent à Nantes.

Pour l'Europe, l'IN2P3 est présent dans les collaborations européennes du 6^e PCRD traitant ou utilisant des accélérateurs de particules: Care, Eurotrans, Eurotev et Eurisol³.



de haut en bas:

Source Phoenix « booster » développée dans le cadre des études menées sur Spiral.
© CNRS/IN2P3

Canon 5 CTF2: premier brasage en préparation de l'étude Clic.
© Cern

1 Cavités «spoke»
Des cavités accélératrices supraconductrices
page 61

2 Coupleurs de puissance pour cavités supraconductrices
page 60

3 Eurisol
Une nouvelle génération de faisceaux radioactifs
page 72

Développements technologiques

Le calcul



François Étienne

De la gestion des données générées par les détecteurs les plus complexes à leur analyse sur le poste de travail, l'outil informatique en physique n'a cessé d'évoluer. Le modèle de calcul de l'IN2P3, fondé sur une hiérarchie distribuée des ressources matérielles et humaines, est en train de se généraliser à travers le concept de Grid à l'ensemble de la discipline et, au-delà, à d'autres domaines scientifiques.

En octobre 2000, le succès de l'«usine à B» à Slac (luminosité en pic de $6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ atteinte à la fin 2003) a conduit la collaboration Babar à organiser l'analyse d'un volume de données sans précédent selon un nouveau modèle de calcul distribué, basé sur l'intégration des centres de calcul engagés dans la collaboration aux États-Unis et en Europe. La production actuelle au CC-IN2P3, qui représente 20 à 30 % de sa capacité totale (équivalente à la puissance de calcul proposée à Slac pour l'analyse des données), a nécessité la mise en œuvre des moyens suivants:

- une quinzaine de serveurs Sun quadriprocesseurs pour le service des bases de données avec 30 TO de disques dédiés;
- l'accès au système hiérarchique de données (HPSS) avec 170 TO sur bandes;
- une liaison à 622 Mbits/s vers Slac *via* Renater;
- la maintenance de la base de données simulées et réelles (170 TO) en miroir complet de la base de données de l'expérience, avec la mise en place d'outils spécifiques pour assurer le transfert automatique dans un délai de 24 à 48 heures;
- la mise en place d'une structure de coordination pour les échanges de données et les mises à jour des logiciels, ainsi que pour la mise en œuvre de tests et la validation des nouveaux outils: «*staging*» dynamique, compression de données...;
- enfin, la mise en place d'une structure d'aide aux utilisateurs, en particulier pour ceux hors IN2P3.

Parallèlement, en novembre 2000, dans le cadre du 5^e PCRD, le projet DataGrid a été financé par la Commission européenne avec pour objectif le développement de systèmes de calcul et de stockage distribués sur des réseaux à hauts débits (Renater & Geant à 2,5 Gbps).

Collaborant avec d'autres départements du CNRS (STIC, SDU, SDV) et avec le CEA, l'IN2P3, en charge de l'intégration et du banc de test du projet, a organisé et validé un système de production Grid d'environ 500 utilisateurs, fondé sur une vingtaine de sites appartenant à huit pays différents. 40 GO de code produits par près de 200 développeurs ont été intégrés. En outre, la mise en place d'une infrastructure de sécurité fondée sur plus de 20 autorités de certification en Europe, en Amérique du Nord et en Asie permet à tout utilisateur d'utiliser de façon transparente l'ensemble des ressources.

Clos avec succès en février 2004, ce projet va servir de socle non seulement au déploiement d'un nouveau projet européen dans le cadre du 6^e PCRD (Egee), mais aussi à la validation d'un nouveau système d'analyse (LCG) des très grands volumes de données ($\sim 5 \times 10^{15}$ octets) générés par le LHC à l'horizon 2007.

C'est dans ce contexte que les expériences auprès du LHC ont réalisé plusieurs Data Challenge depuis la fin 2001. Le but de ces Data Challenge est de valider et de tester le modèle de calcul Grid au



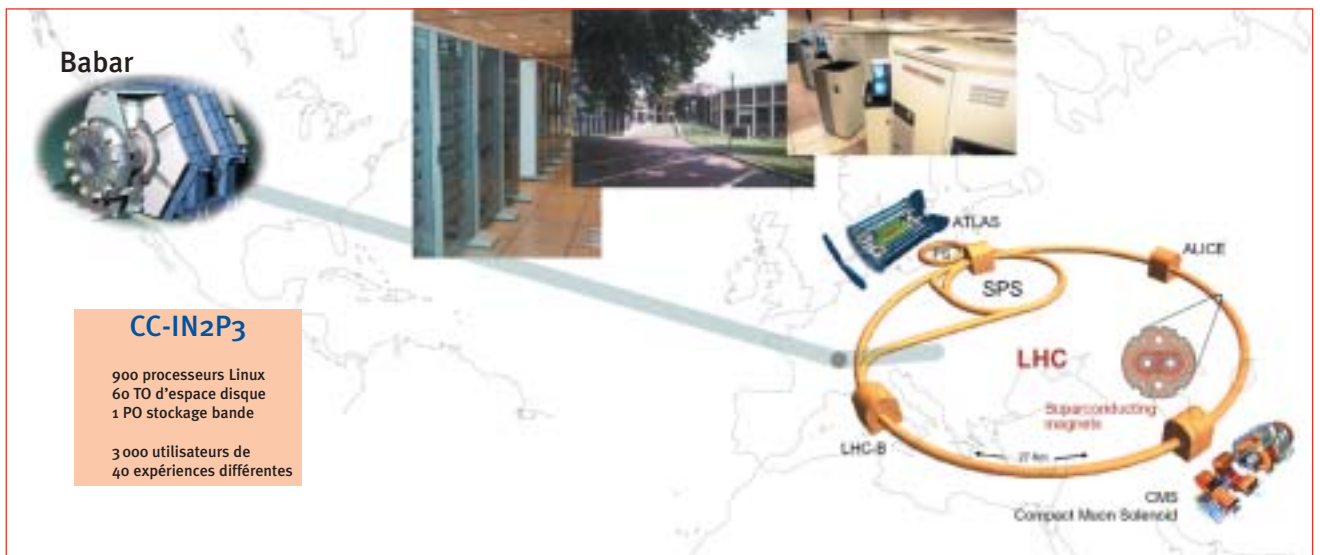
LHC et de produire des données Monte-Carlo permettant d'étudier les performances des détecteurs.

Pour Alice, les premiers Data Challenge ont permis de valider le «middleware Grid» AliEn qui sera à la base de l'intergiciel d'analyse au LCG. Lors du premier semestre 2003, le système AliEn a été déployé dans 32 sites répartis dans le monde entier. Près de 23 000 tâches ont ainsi été exécutées avec un taux d'échec inférieur à 10 %.

LHCb a déployé son propre système Grid de production de données Monte-Carlo: Dirac. En mars-avril 2003, un Data Challenge regroupant 18 sites en Europe a produit 20 TO de données. Celles-ci étaient réparties sur plus de 250 000 fichiers et ont nécessité 36 600 tâches d'exécution.

Les groupes français de l'IN2P3 ont aussi participé aux Data Challenge d'Atlas en 2002-2003, avec une production de 10 % de la puissance totale de la collaboration. Un très grand volume de données, près de 10 TO, a été produit et stocké sur le système hiérarchique HPSS du CC-IN2P3 qui héberge en plus 15 TO produits dans les autres centres d'Atlas.

L'expérience CMS a pour sa part entrepris dès 2001 un programme d'évaluation du «middleware» délivré par le projet européen DataGrid et d'adaptation de sa chaîne de production d'événements Monte-Carlo. Ce test, qui a nécessité environ 10 000 tâches d'exécution, a largement reposé sur le banc test dont l'IN2P3 avait la charge, incluant ainsi le CC-IN2P3 parmi les 5 grands sites de calcul en Europe.



L'évolution en Grid de l'outil informatique, en physique des particules à l'IN2P3 mais aussi dans d'autres domaines scientifiques, est imposée par les volumes sans précédent de données à gérer, mais aussi par la nécessaire optimisation des infrastructures de recherche en Europe et aux États-Unis.

Les développements dans ce domaine au cours des trois dernières années ont non seulement abouti à la validation d'un nouveau concept de calcul, avec déjà des retombées dans l'industrie informatique, mais aussi et surtout à l'éclosion d'une nouvelle culture de relations internationales entre les divers acteurs impliqués dans le développement, le déploiement et la mise en œuvre de ces technologies.

Programmes pluridisciplinaires

Les interfaces avec les sciences de la vie



Philippe Lanièce

LES DONNÉES

L'IN2P3, de par son savoir-faire dans la conception d'outils pour les besoins de la physique subatomique, a développé de nombreuses techniques de détection et d'analyse de données dont certaines ont de manière naturelle des implications dans le domaine biomédical. Débutées vers les années quatre-vingt, les recherches impulsées au sein de ses laboratoires à l'interface avec les sciences de la vie ont récemment connu une très forte croissance formalisée par la contribution de 10 de ses laboratoires et d'une cinquantaine de ses chercheurs. Cinq grands thèmes sont aujourd'hui identifiés :

- la caractérisation physique et chimique pour le vivant;
- la radiobiologie (de l'analyse à l'échelle cellulaire et subcellulaire d'échantillons biologiques par microfaisceau d'ions à l'étude de l'effet des faibles doses radioactives);
- la thérapie par rayonnement ionisant (du développement de dosimètres nécessaires à la métrologie des faisceaux au traitement de tumeurs par faisceau de particules chargées);
- l'imagerie médicale et biologique (de la conception de caméras pour l'assistance chirurgicale en bloc au développement de tomographes dédiés au petit animal);
- la bio-informatique (de la simulation en imagerie médicale à l'exploitation des capacités de calcul et de stockage de données pour la santé).

LES ATOUTS

Encore méconnu il y a peu au sein même du CNRS, l'essor récent du domaine biomédical à l'IN2P3 ne tient en rien au fruit du hasard. En effet, l'Institut possède de très sérieux atouts pour développer une interface de qualité avec la biologie et la médecine.

Ses atouts relèvent de ses compétences en instrumentation, en simulation et en électronique et de la force de ses services techniques qui sont autant d'éléments favorables au développement d'outils originaux pour les sciences de la vie. C'est notamment le cas pour la caractérisation physique et chimique du vivant, la radiobiologie et la radiothérapie qui exploitent souvent l'expérience acquise par les chercheurs et ingénieurs auprès des accélérateurs d'ions légers, ainsi que leur connaissance précise des faisceaux et des systèmes de détection associés. Ainsi, la connaissance de la conduite de projets à grande échelle fondée sur la mise en place d'accélérateurs d'ions légers est déterminante et un garant de la réussite des programmes interdisciplinaires sous-jacents. C'est aussi le cas pour l'imagerie dont la dynamique relève en partie des progrès instrumentaux en physique subatomique et des nouveaux composants développés dans le cadre de ses grands projets. C'est enfin le cas pour la bio-informatique qui profite des outils développés pour la coordination de grands projets, mais aussi des codes de calcul pour profiler la ges-



tion médicale, les caméras ou encore la radiothérapie personnalisée de demain. Par-delà ces aspects purement techniques, l'IN2P3 détient 2 atouts supplémentaires: une méthodologie issue de la physique des hautes énergies qui permet de renseigner des questions de biologie originales soulevées par les progrès récents des sciences de la vie et une autonomie technique de ses laboratoires qui leur permet d'être réactifs face aux demandes spécifiques rencontrées dans les développements à usage biologique ou médical.

LA COORDINATION

Autre atout essentiel de la discipline: la localisation de ses laboratoires à proximité des grands pôles de biologie et de médecine français. Cela a permis au domaine de se développer sur la base de collaborations locales avec des CHU ou des centres anticancéreux, avec des laboratoires de sciences de la vie Inserm, CNRS ou CEA, ou bien encore avec des laboratoires privés. Pour chaque thème décrit, des collaborations européennes ont été initiées qui font l'objet aujourd'hui de programmes inscrits dans le 6^e PCRD.

DES MOYENS CONCERTÉS

Les années 2001-2003 ont été marquées par une étape importante pour le domaine biomédical: la nomination d'un directeur adjoint et d'un chargé de mission au sein de l'IN2P3. Ces nominations ont montré la volonté de structurer la discipline afin de lui offrir une politique en adéquation avec les moyens humains et financiers nécessaires à son épanouissement. Cela est crucial pour que les équipes puissent conserver leur rôle leader en Europe et amplifier leur rayonnement international. Trois types d'initiatives sont en cours d'analyse:

- la première concerne la nécessité de multiplier les sites ou les infrastructures au sein desquels se retrouvent un savoir-faire et un équipement structurant. Aifira pour les microfaisceaux, Etoile ou Asclepios pour la radiothérapie et Egee grille européenne pour la bio-informatique sont autant de lieux ou de projets identifiés, pour lesquels la coordination interdisciplinaire est nécessairement prioritaire, la lisibilité thématique évidente et la mobilisation des ressources plus simple à orchestrer;
- la deuxième propose de décliner des accords formalisés entre les laboratoires de l'IN2P3 et les différents établissements de recherche en lien avec le domaine biomédical. Cela conduit nécessairement à lier le laboratoire à une structure d'évaluation «sciences de la vie» et facilite, par exemple, la création de postes thématiques interdisciplinaires;
- la troisième est la constitution de structures d'interaction, où les spécialistes de chaque discipline se retrouvent à intervalles réguliers et développent des activités de recherche concertées. Ce type de structure (GDR) permet de donner une totale lisibilité à l'activité, d'amener l'implication des différents départements et de lui donner ainsi une meilleure reconnaissance, formalisée par des moyens humains et financiers.

Partie accélératrice de l'accélérateur Aifira.
© CNRS/IN2P3



Programmes pluridisciplinaires

Le spatial



Stavros Katsanevas

Sur la période 2001-2003, les activités du spatial ont pris une importance grandissante au sein de l'IN2P3 : 69 chercheurs et 60 ingénieurs, à temps plein, sont impliqués dans les cinq expériences spatiales de l'IN2P3. Le spatial est un lieu nécessaire pour le développement des recherches de l'Institut. Deux thématiques sont concernées.

❶ *Glast*
Le futur de l'astronomie
gamma spatiale
page 78

❷ *Auger*
L'observatoire décrypte
les messages
de l'Univers extrême
page 58

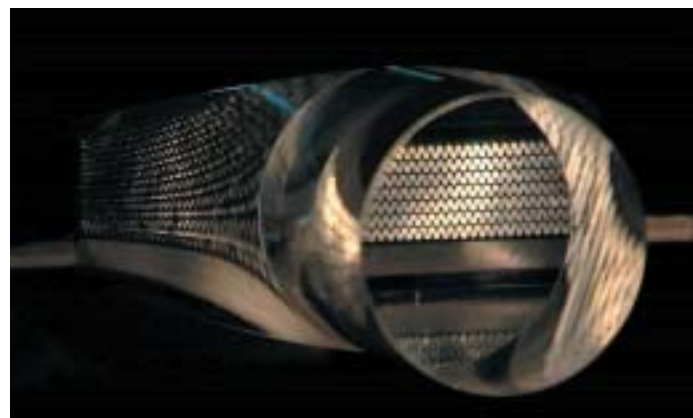
❸ *Euso*
Un observatoire spatial
de rayons cosmiques
d'énergie extrême
page 79

Vue de l'insertion des cristaux d'iodure de césium dans l'une des structures d'un des 16 calorimètres de Glast.
© Collaboration Glast

LES RAYONS COSMIQUES ET LES PHÉNOMÈNES COSMIQUES DE HAUTE ÉNERGIE

La décennie passée a vu l'accumulation de découvertes importantes dans le domaine de l'astronomie gamma de haute énergie. En 2007, l'expérience sur satellite Glast❶ (DOE/Nasa) continuera le recensement des sources gamma jusqu'à une énergie de 300 GeV, avec une excellente résolution angulaire et spectrale. Son potentiel de découverte et celui des télescopes au sol sont complémentaires. L'IN2P3 fournit la partie mécanique du calorimètre et a une responsabilité importante dans la caractérisation du calorimètre sous faisceau d'ions lourds. L'expérience AMS (2008, Nasa) sur la station spatiale internationale (ISS) a montré qu'elle serait également sensible aux gamma de haute énergie; mais AMS étudiera surtout avec une grande précision la présence d'antimatière et de matière noire dans le rayonnement cosmique. L'IN2P3 est impliqué dans la construction et l'intégration d'AMS (calorimètre, Rich, GPS).

Une autre question fondamentale est l'énigme des rayons cosmiques de très haute énergie étudiés au sol par Auger❷. La proposition d'expérience Euso❸ pourrait permettre, dans le futur, de continuer ces recherches depuis l'espace.



Calorimètre électromagnétique plomb-fibres scintillantes avec un guide de lumière pour l'expérience AMS.
© CNRS/IN2P3



LA COSMOLOGIE

❶ *Archeops*
Un progrès dans
la compréhension
de la naissance
de l'Univers
page 52

❷ *Planck*
Un satellite pour l'étude
du rayonnement
de fond cosmologique
page 76

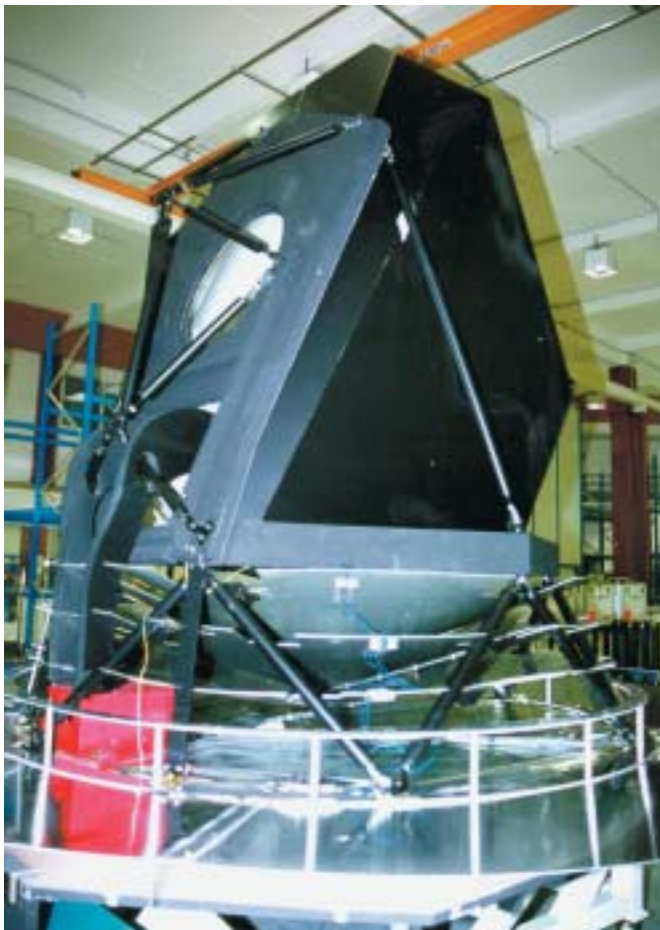
❸ *Snap*
La traque des
supernovæ la à grands
décalages vers le rouge
page 77

❹ *Virgo*
La recherche d'ondes
gravitationnelles
page 55

Les expériences étudiant le rayonnement fossile comme le ballon Archeops❶ et le satellite Planck❷ (ESA) permettent de mesurer les paramètres cosmologiques fondamentaux, de sonder les différents modèles d'inflation, etc. Planck sera lancé en 2007 pour plusieurs années de prises de données du fond diffus micro-onde. Les physiciens de l'IN2P3 ont participé aux analyses d'Archeops. Concernant Planck, l'IN2P3 a un rôle visible dans le traitement et l'analyse des données de HFI (*high frequency instrument*), instrument pointu du point en cryogénie, bolométrie et optique froide, et a des contributions importantes dans l'électronique et le soft embarqués, l'intégration, la calibration au sol et le calculateur de bord.

Les observations de supernovæ lointaines suggèrent que l'expansion de l'Univers serait dans une phase d'accélération. Le télescope sur satellite JDEM (projet Snap❸) de la Nasa/DOE, ou une mission de l'ESA ou du Cnes (Dune) à définir, a pour but d'approfondir l'étude de l'énergie noire.

La détection des ondes gravitationnelles depuis l'espace est l'objet de la mission Lisa (2012-2013, Nasa/ESA). Des équipes de l'IN2P3 pensent y prolonger les études commencées avec les antennes terrestres (Virgo❹).



Structure externe du
satellite Planck.
© ESA

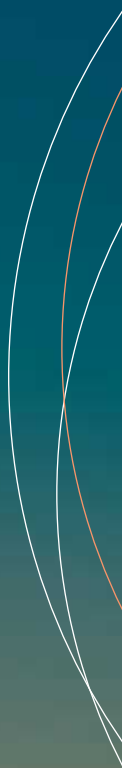
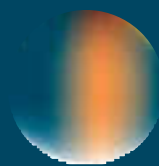


Depuis sa création en 1971, l'IN2P3 associe, par sa nature même, recherches fondamentales et appliquées en physique subatomique et formation. La mission de formation recouvre un spectre large, du monde académique au grand public, dans un pays où les choix politiques ont donné une place particulière à la filière nucléaire. Cette préoccupation forte au niveau de l'enseignement s'est concrétisée par la mise en place, fin 1999, d'un groupe de travail, le Greps (Groupe de réflexion sur l'enseignement de la physique subatomique), conjoint entre l'IN2P3 et le CEA. Ce groupe avait pour mission principale de proposer des actions, pour tenter de « réagir » à la désaffection des jeunes pour les disciplines scientifiques et tout particulièrement la physique. Cela impliquait d'abord une analyse de la situation et une réflexion sur nos propres pratiques. La création de cette structure représentait également une volonté marquée de l'Institut d'élargir sa mission de formation et d'information du public, et notamment des jeunes, au niveau des thématiques sociétales sensibles que sont le nucléaire et ses applications.

Le Greps a donc mis en place plusieurs actions en direction des jeunes et des enseignants. Depuis 2001 est organisée une école d'été appelée E2PHY (École d'été de physique) traitant, au travers de l'implication de la physique, de problèmes sociétaux majeurs comme l'énergie, la santé ou le climat. Cette école offre aux enseignants du secondaire, mais aussi du supérieur, une formation à la fois « culturelle » et « pratique ». L'aspect « culturel » a une vocation claire d'ouverture de la physique, et du physicien, à des champs disciplinaires dans lesquels la physique joue *de facto* un rôle important, en particulier « en amont ». L'aspect « pratique » vise à relier, dans la mesure du possible, les thématiques sociétales abordées aux contraintes des programmes d'enseignement, toujours dans une optique d'ouverture des élèves et des étudiants à la physique. Cette école, soutenue depuis sa création par le CEA et l'IN2P3, attire chaque année plusieurs centaines de participants de toute la France et de certains pays francophones. Les sessions E2PHY offrent manifestement un lieu original d'échanges et de formation; leur pérennisation semble donc en très bonne voie.

Le Greps a également apporté une contribution importante au mouvement initié par les conférences Nepal (Noyaux et particules au lycée) à l'occasion du centenaire de la radioactivité. Le groupe Nepal avait préparé et diffusé, à l'intention des lycéens, quatre conférences types sur des thèmes de recherche propres à l'IN2P3. Le Greps a étendu les thématiques abordées par ces conférences, désormais au nombre de douze, aux implications sociétales de la physique subatomique, comme les applications de la radioactivité et les problèmes de déchets nucléaires ou de production d'énergie.

Faits marquants spectaculaires

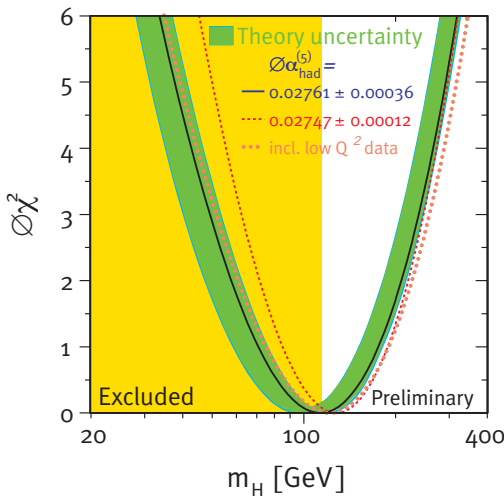


38	Legs LEP
39	Babar
40	D0
41	Atlas, CMS et LHCb
45	Nemo3, CNGS et Opera
46	Rhic
47	Alice
48	Structure du nucléon
49	Structure nucléaire aux limites
50	Radioactivité deux protons et tétra neutron
51	Structures nucléaires exotiques
52	Archeops
53	Supernovæ Ia
54	Edelweiss
55	Virgo
56	Antares
57	Hess
58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

LEP Le legs du collisionneur électron-positon

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

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




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

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

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

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

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

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

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



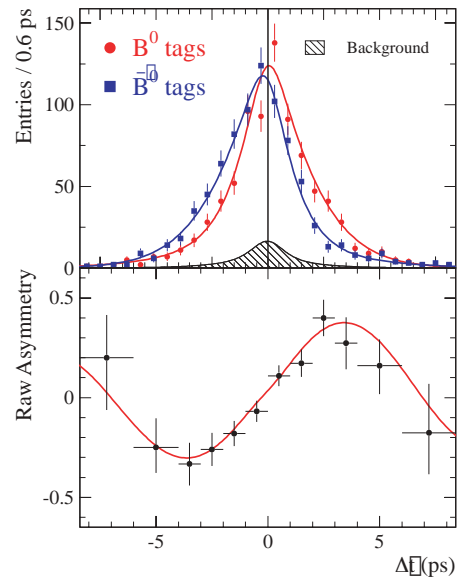
Denis Bernard,
Jean-Pierre Lees

BABAR La violation de CP dans tous ses états

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

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

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



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

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

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

éléments de cette matrice peuvent être représentées graphiquement par un triangle directement connecté à des grandeurs mesurables dans les désintégrations des mésons B. Ainsi les mesures de violation de CP permettent-elles d'accéder, selon les modes de désintégration étudiés, à chacun des trois angles α, β et γ de ce triangle. Les désintégrations et le mélange B⁰ → B⁰ sont connectés quant à eux aux cotés du triangle: la redondance des mesures permet de tester la cohérence du modèle.

Pour les modes B⁰ → ψ K⁰, l'asymétrie varie de façon sinusoidale en fonction du temps de désintégration et son amplitude est mesurée par sin(2β). Babar a mesuré sin(2β) = 0,741 ± 0,067(stat) ± 0,034(syst), en très bon accord avec le MS. Avec la mesure de sin(2β) dans les transitions telles que B⁰ → D^(*)D^(*), φ K⁰, η' K⁰, ψπ⁰, K⁰_Sπ⁰, une campagne de tests systématiques a désormais commencé. Elle vise à comprendre le rôle des différents sous-processus et des différentes transitions entre quarks, ainsi qu'à rechercher des manifestations d'une nouvelle physique. La violation de CP dans les transitions b → u permet d'accéder à l'angle α, une fois les incertitudes théoriques maîtrisées. Les années écoulées ont vu les premières mesures d'asymétrie dans le canal B⁰ → π⁺π⁻. En 2003, la désintégration

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

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



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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

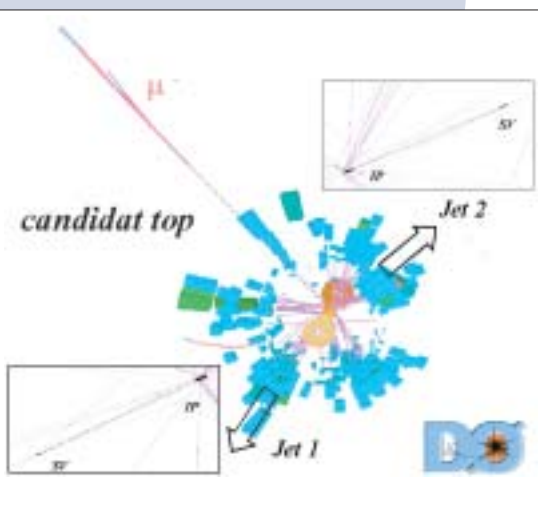


D0 Les premiers résultats du Run II

Éric Kajfasz

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

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



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

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

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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



ATLAS, CMS ET LHCb Trois expériences auprès du futur LHC

Helenka Przywiecniak,
Morgan Lethuillier
et Frédéric Machefert

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

ATLAS

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

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



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

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

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

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

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

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

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

CMS

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

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

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

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

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



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

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

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

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

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



<http://cmsinfo.cern.ch>

ECAL Design Report: Cern/LHCC 97-33.

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

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

LHCb

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

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

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





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

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

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

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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

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



NEMO3, CNGS ET OPERA À la recherche de la masse du neutrino

Imad Laktineh

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

NEMO3

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

CNGS

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

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

OPERA

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

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



LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

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

CNGS CNRS/IN2P3: LAL.

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

RHIC Le déconfinement des quarks et des gluons

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

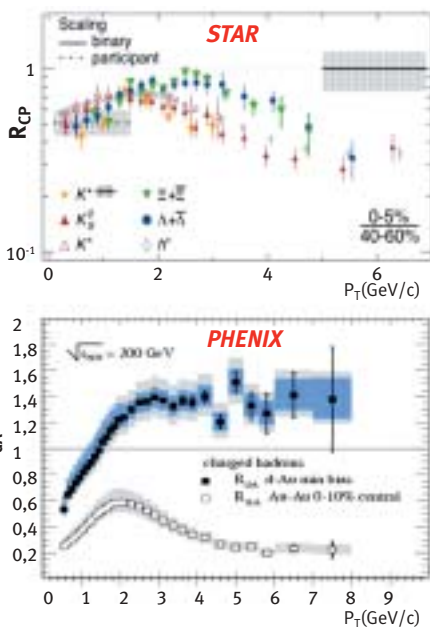
Deux anneaux indépendants supraconducteurs offrent la possibilité au Rhic de produire des collisions très diverses (proton-proton, deuton-or, silicium-silicium, or-or...) pour un large domaine en énergie dans le centre de masse (de ~ 30 à 200 GeV). La communauté française à Brookhaven s'élève à une quarantaine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

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

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

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

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



LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



ALICE

La construction de l'expérience



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

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

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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

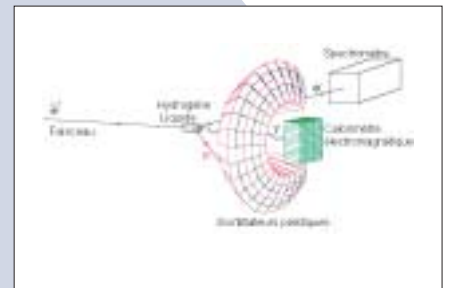


GPD Structure du nucléon

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

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

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



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

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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



Dominique Curien

VIVITRON La structure nucléaire aux limites

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

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

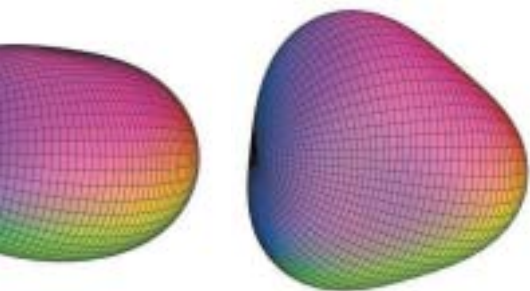
Pour répondre aux contraintes de rotation, le noyau peut changer de « forme ». La prédiction de formes très allongées, comme l'hyperdéformation (HD, noyau de symétrie axiale de rapport d'axe d'environ 3/1), ou encore l'apparition de nouveaux degrés de liberté, comme la symétrie tétraédrique, sont particulièrement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

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


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

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

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



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

 G. de Angelis, A. Bracco et D. Curien, The Euroball gamma ray detector array, *EuroPhysics News*, September/October 2003, p. 181.
J. Dudek *et al.*, We're all made of pyramids, *NewScientists*, 8 juin 2002, p. 7.
D.R. Jensen *et al.*, Evidence for Second-Phonon Nuclear Wobbling, *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 142503.
M.G. Porquet *et al.*, Evolution of the $\pi g9/2^* \nu h11/2$ configuration in the neutron-rich $^{110,112}\text{Rh}$ and $^{114,116}\text{Ag}$ isotopes, *Eur. Phys. J. A* 18 (2003) 25.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

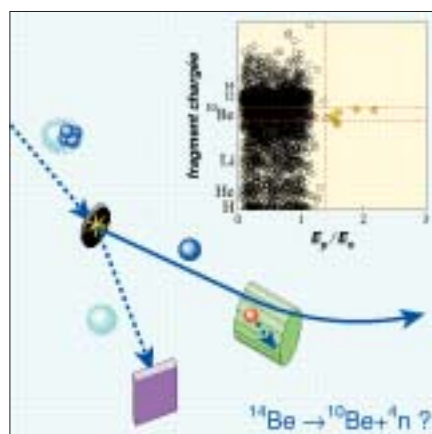


DEUX DÉCOUVERTES

La radioactivité deux protons et le tétraneutron

Bertram Blank

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



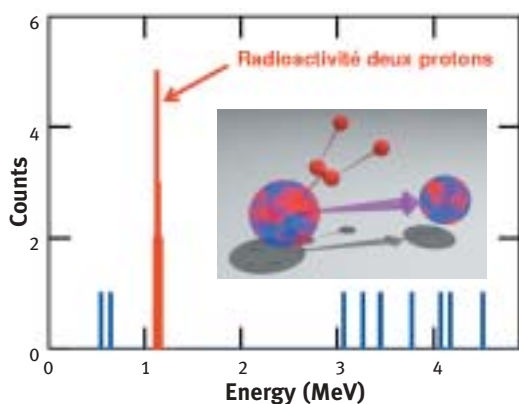
Dans deux expériences indépendantes au Ganil et au GSI, une nouvelle radioactivité deux protons a été découverte récemment. Les résultats des expériences au Ganil qui cherchent le tétraneutron sont également décrits.

LA RADIOACTIVITÉ DEUX PROTONS

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

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

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



LE TÉTRANEUTRON

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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

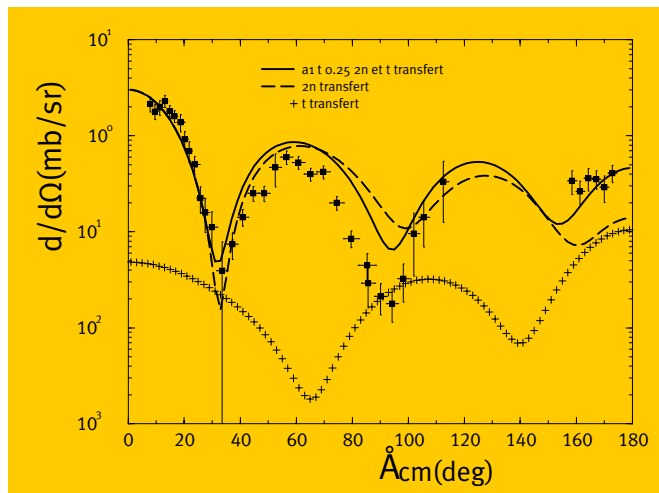


NOYAUX À HALO BORROMÉENS et autres structures exotiques

Patricia Roussel-Chomaz

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

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



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

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

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

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

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

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



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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



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

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

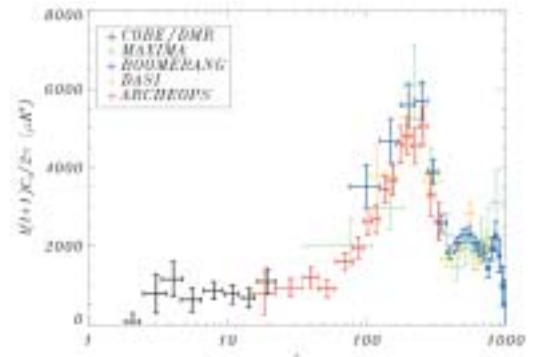
Les anisotropies du fond diffus cosmologique contiennent une mine d'informations permettant de contraindre le modèle cosmologique du big-bang décrivant l'Univers dans lequel nous vivons: de la genèse des fluctuations primordiales aux structures (galaxies, amas de galaxies...) que nous observons aujourd'hui.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

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

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

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

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



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

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



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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS

DE LA COLLABORATION

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

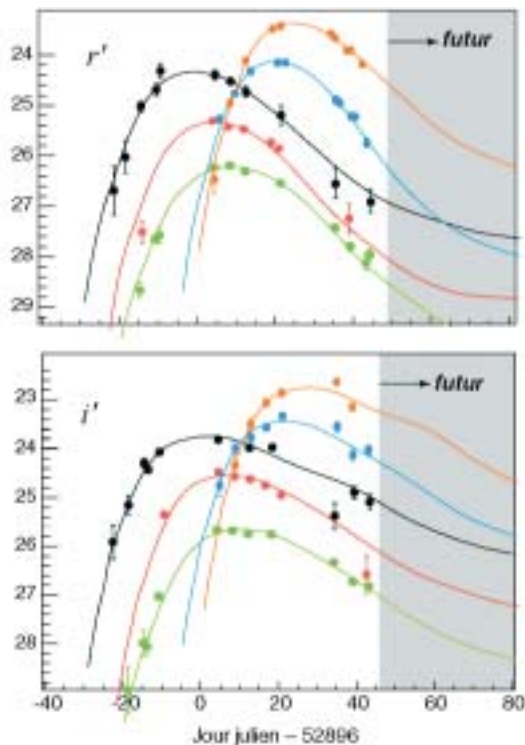


Pierre Astier

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

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

© Collaboration SNLS



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

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

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

Fin 2002, le CFHT met en service Megacam, un nouvel imageur de 1 degré carré construit au CEA. Avec cet instrument, il est désormais possible de découvrir et de mesurer les supernovæ. C'est l'objet du programme SNLS, qui utilise un volume important de temps d'observation au CFHT mais aussi sur les télescopes de 8 m nécessaires à l'identification des candidats. Ce programme se donne pour but premier de caractériser l'énergie sombre, à l'aide de plusieurs centaines de supernovæ Ia mesurées en cinq ans.

L'IN2P3 est aussi engagé dans le programme *SuperNova Factory*, qui ambitionne des mesures spectrophotométriques de SN Ia proches, à l'aide d'un instrument dédié construit dans cet objectif sous maîtrise d'œuvre du CRAL à Lyon. Cet instrument doit commencer les observations scientifiques à l'été 2004. Il fournira les données précieuses nécessaires à l'amélioration des mesures de distance à l'aide des SN Ia, indispensable pour tirer parti de la grande statistique escomptée du SNLS.

Finalement, la caractérisation fine de l'énergie sombre à l'aide des SN Ia nécessite d'observer depuis l'espace. Trois équipes de l'IN2P3 se sont engagées dans les développements scientifiques et instrumentaux d'un projet qui pourrait voir le jour dans les prochaines années (voir Snap/JDEM).

 <http://supernova.in2p3.fr>

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**

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



Jules Gascon

EDELWEISS À la recherche de la matière noire

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

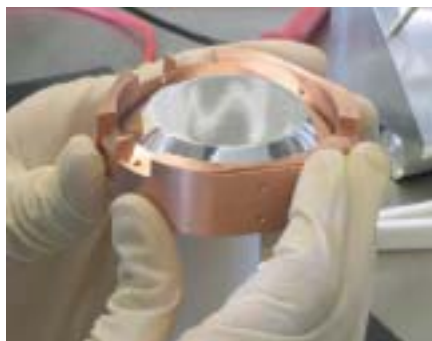
La matière noire, qui serait répartie en un gigantesque halo autour de notre galaxie, est activement recherchée sous la forme de particules massives interagissant faiblement avec la matière (Wimp, selon l'acronyme anglais) et prédites par les théories de supersymétrie, avec des masses de l'ordre de celles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

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

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

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

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



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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, CSNSM. |

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

CEA/DSM: Dapnia, Drecam.



Benoît Mours

VIRGO La recherche d'ondes gravitationnelles

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

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

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

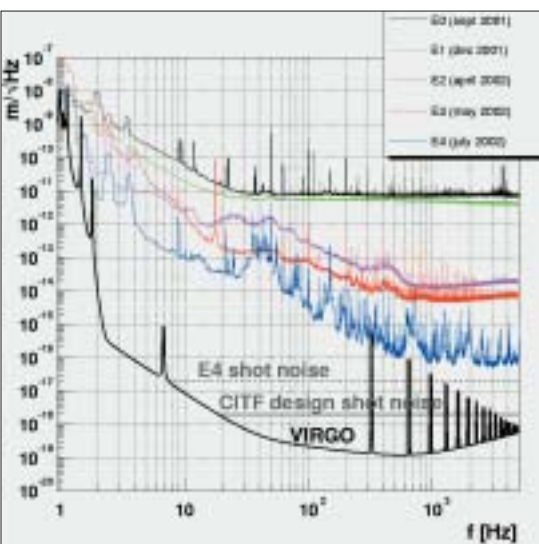
Les laboratoires de l'IN2P3 ont fortement contribué à la construction de Virgo en réalisant l'ensemble de l'enceinte à vide de l'interféromètre, les traitements de surface des miroirs, le système de détection, une grande partie des systèmes de contrôles (électronique et logiciels), l'acquisition des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

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

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

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

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



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

 www.virgo.infn.it

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNL, LAL, LAPP. |

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

CNRS/SPM: Spectroscopie en lumière polarisée.



John Carr

ANTARES Un télescope sous-marin à neutrinos



Déploiement d'une ligne du détecteur Antares.
© CNRS

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

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

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

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

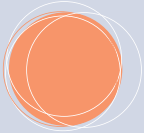
Le programme d'Antares prévoit la réalisation d'un détecteur de douze lignes comprenant environ mille modules

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



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

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



Michael Punch

HESS Une pleine sensibilité depuis décembre 2003

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



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

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

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

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

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

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

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



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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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

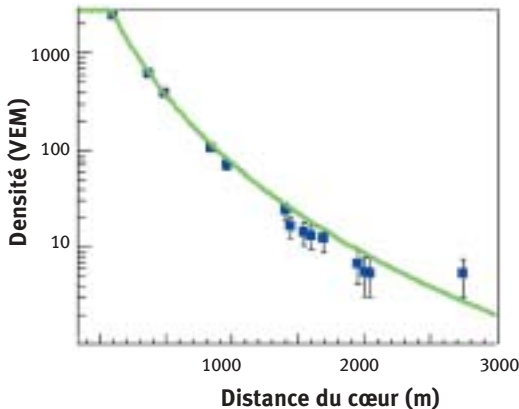


Tiina Suomijärvi

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

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

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



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

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

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

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

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

 <http://www.auger.org>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



MUSE Le premier réacteur sous-critique piloté par accélérateur

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

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

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

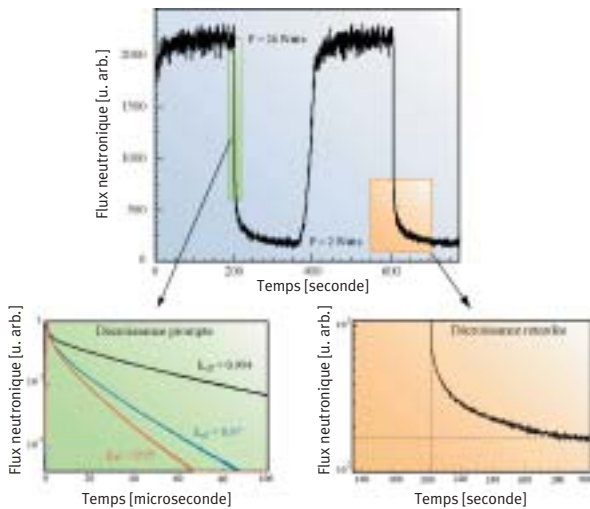
La mesure de k_p consiste alors à comparer la dérivée du taux de comptage de chambres à fission à la dérivée calculée pour différentes valeurs de k_p . Celle s'ajus-

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

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

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

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



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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION

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



Terence Garvey

COUPLEURS DE PUISSANCE pour cavités supraconductrices

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



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

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

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

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

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



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

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



Tomas Junquera

CAVITÉS «SPOKE» Des cavités accélératrices supraconductrices

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

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

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

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

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



 <http://ipnweb.in2p3.fr>

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS

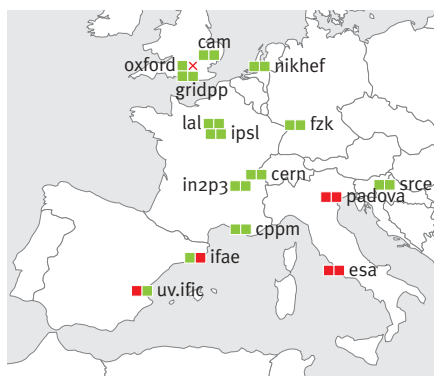
DE LA COLLABORATION

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



Guy Wormser

DATAGRID Un projet de grille de calcul



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

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

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

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

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

déploiement du banc test et des applications biomédicales.

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

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



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

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

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



Philippe Lanièce

PHYSIQUE-BIOLOGIE-MÉDECINE

Une interface en plein essor

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

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



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

un contrôle encore plus précis de la dose distribuée.

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

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

Au sein même de l'Institut, l'interface entre la physique subatomique et les sciences du vivant a connu une croissance particulièrement marquée et remarquable, matérialisée par l'implication de dix laboratoires sur dix-huit, alors qu'on ne répertoriait pas plus de trois laboratoires ayant une affinité avec ce thème lors du passage à l'an 2000. Ces activités se sont naturellement structurées et ont conduit à l'émergence de cinq pôles de recherche impliquant chacun plusieurs laboratoires : l'étude de biomatériaux, la radiobiologie, la radiothérapie, l'imagerie biomédicale et la bio-informatique.

Au sein des grands programmes biomédicaux et en particulier de celui dédié au cancer, à l'heure où la lutte contre le cancer est devenue un grand engagement

-  AIFIRA
[http:// www.cenbg.in2p3.fr/extra/aifira.html](http://www.cenbg.in2p3.fr/extra/aifira.html)
- OPENGATE:
<http://www.lphe.epfl.ch/~PET/research/gate/>
- POCI ET TOHR
http://ipnweb.in2p3.fr/recherche/frame_recherche.html
- IMHOTEP
<http://lyoinfo.in2p3.fr/imagemed/ETOILE>
- <http://etoile.univ-lyon1.fr/>
- IMAGERIE DU PETIT ANIMAL
<http://www.cnrs.fr/SDV/Actions/pi/ipa/ipa.html>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



ÉLECTRONIQUE De nombreuses réalisations

Christophe de La Taille

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



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

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

MICROÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE ET MIXTE

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

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

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

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

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

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

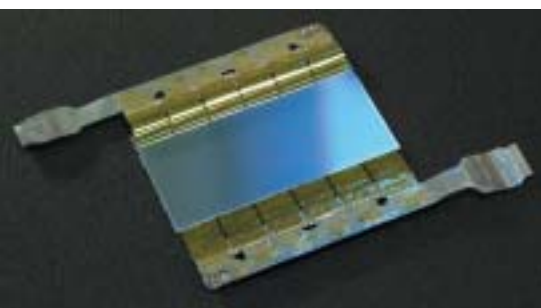
Beaucoup d'autres expériences ont également bénéficié de développements d'Asics (Antares, Hess, Opera, FLC...) produits à plusieurs milliers d'exemplaires par la trentaine de microélectroniciens de l'IN2P3 qui réalisent plus d'une vingtaine de prototypes par an dans diverses technologies analogiques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

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

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



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



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

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

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

ÉLECTRONIQUE NUMÉRIQUE D'ACQUISITION ET DÉCLENCHEMENT

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

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

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

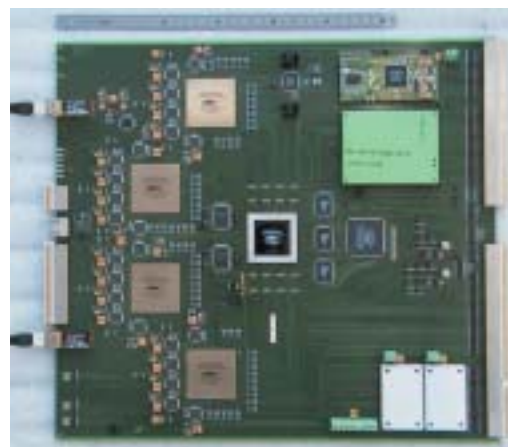
De nombreuses cartes ont ainsi été développées pour diverses expériences (Atlas, CMS, D0, LHCb, Opera...): des téraoctets de données y sont rassemblés par des liens série Gb/s et traités en temps réel à 40 MHz pour ne garder qu'un millionième des données intéressantes pour l'analyse de physique.

ÉLECTRONIQUE SPATIALE

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

CAPTEURS CMOS MONOLITHIQUES

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



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

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

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

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



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

LABORATOIRES FRANÇAIS AYANT PARTICIPÉ À CES RÉALISATIONS

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



Projets



68 Linear collider

70 Spiral 2

72 Eurisol

74 Alto

75 Agata

76 Planck

77 Snap

78 Glast

79 Euso

80 Megapie

81 PDS-XADS



LC Instrumentation pour le collisionneur linéaire électron-positon

Après l'achèvement du LHC (Large Hadron Collider), le collisionneur proton-proton du Cern à Genève, la prochaine machine frontière en physique des particules doit être un collisionneur linéaire électron-positon (LC). Une série de R&D en instrumentation a été mise en œuvre pour élaborer un détecteur adapté au programme de physique attendu et aux spécificités d'une telle machine.

Les interactions e^+e^- ont la particularité d'être d'une grande simplicité d'interprétation. Ce point est illustré par la figure, qui montre la simulation Geant4 d'une interaction e^+e^- à 350 GeV, produisant deux bosons: un Z qui se désintègre en une paire de muons (les deux traces quasi droites dans le calorimètre) et un boson de Higgs dont la désintégration, ici en deux jets, constitue le reste de l'événement. On voit que l'étude des caractéristiques de ce boson de Higgs est aisée sur une telle machine. De plus, il faut noter que la contribution des processus physiques parasites, tels que les interactions photon-photon, est faible et permet de travailler sans sélection électronique rapide (*trigger*). Cela signifie que tout processus physique, même inattendu ou de signature difficile, est observable ici.

Sur cette machine, les productions de paires de bosons W, Z et H sont des processus importants qui peuvent être étudiés au mieux. Pour cela, les désintégrations des bosons en jets de hadrons doivent être utilisables, comme cela a été le cas à LEP2. Il faut donc pouvoir apparier les jets deux à deux en «boson», ce qui est faisable uniquement si la direction et l'énergie des jets sont précisément mesurées dans l'ensemble trajectographe-calorimètre. En outre, l'identification de la saveur des jets sera essentielle pour bon nombre de mesures physiques, en particulier pour l'étude des désintégrations du boson de Higgs, ce qui contraint les performances du détecteur de vertex.

Pour ce qui est des jets, il est clair qu'une reconstruction complète de l'événement, c'est-à-dire la reconstruction du 4-vecteur de chaque particule de l'état final, sera la meilleure. De plus, les faibles

contraintes sur le détecteur de ce type de machine permettent d'en concevoir un qui optimisera cette reconstruction complète sans abandonner la compacité et l'herméticité indispensables. Cette dernière propriété joue un rôle primordial pour la recherche de particules nouvelles caractérisées par de l'énergie manquante.

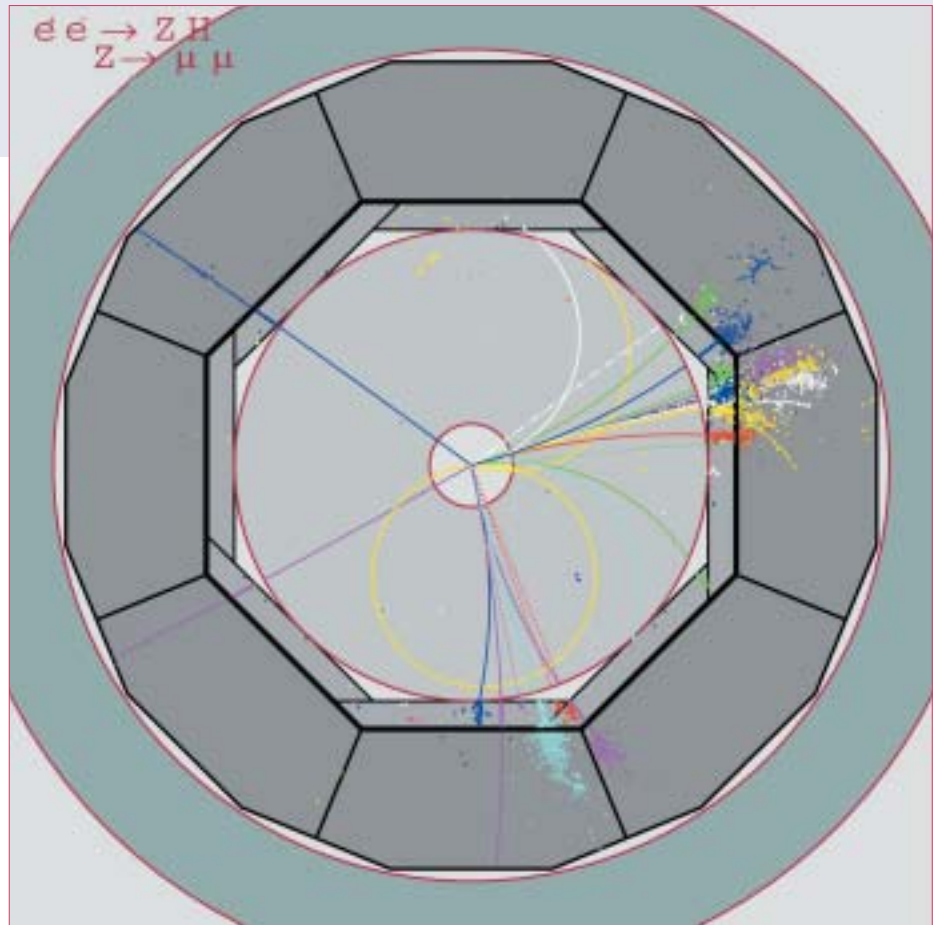
Pour des raisons historiques, datant de l'expérience Aleph, cette reconstruction complète a été appelée «*energy flow*». Dans cette technique, les traces chargées sont reconstruites dans le trajectographe, les photons dans le calorimètre électromagnétique (ECAL) et les hadrons neutres dans le calorimètre électromagnétique ou hadronique (HCAL). Pour éviter le double comptage de l'énergie, il est essentiel de séparer correctement dans le calorimètre les contributions provenant des particules neutres de celles provenant des débris des interactions de traces chargées. La faisabilité et la réalisation technique d'un tel détecteur font l'objet du programme de R&D.

Pour le détecteur de vertex, des capteurs de nouvelle génération en technologie CMOS, susceptibles d'offrir les performances ambitionnées, sont développés. Il s'agit d'aboutir à un capteur très granulaire à lecture rapide, de faible dissipation thermique et sensiblement plus résistant aux rayonnements intenses que les CCD. Il devra aussi offrir une quantité de matière à traverser très réduite, pour minimiser les effets (pertes en résolution, particules secondaires) provenant de l'interaction des particules avec la matière du détecteur. Les performances d'un tel capteur seront l'élément clé de la séparation de saveur b/c dans les jets, si importante pour l'étude du boson de Higgs.

Pour le trajectographe, deux approches sont possibles, l'une s'appuyant sur un grand nombre de points de précision moyenne, c'est la chambre à projection temporelle (TPC), l'autre reposant sur un nombre de points restreints mais très précis. Dans ces deux options, on trouve des groupes de l'IN2P3: d'une part, au sein

Afin d'éviter le problème de perte d'énergie due au rayonnement synchrotron dans les accélérateurs circulaires, une machine linéaire e^+e^- dans la gamme d'énergies allant de 90 GeV à 1 TeV a été proposée. Grâce à une telle machine, des mesures de grandes précisions seront réalisées. De plus, les mesures indirectes devraient apporter des contraintes différentes de celles obtenues de manière directe au LHC. Les prises de données LC concomitantes de celles du LHC, conduisant à un échange d'informations LHC-LC, seront d'un apport inestimable pour la compréhension de la physique des particules au-delà du Modèle standard.

Vue XY d'une annihilation e^+e^- en ZH à 350 GeV d'énergie au centre de masse. Le boson Z se désintègre en $\mu^+\mu^-$ (traces droites dans le calorimètre), le reste provient de la désintégration du boson de Higgs.
© CNRS/IN2P3




d'une R&D commune avec le Dapnia, sur l'utilisation de Micromégas comme système d'amplification des électrons produits par le passage de particules chargées dans le gaz de la TPC et qui dérivent le long de l'axe de la chambre jusqu'au plan de lecture; d'autre part, dans le cadre de la collaboration internationale Silc, sur un trajectographe à éléments en silicium de grandes longueurs pouvant remplacer ou compléter une TPC. Cette R&D s'inscrit dans la poursuite des avancées relatives à cette technologie menées à bien pour le développement des trajectographes à silicium pour le LHC et l'astroparticule spatiale.

Enfin, pour ce qui est de la calorimétrie, trois laboratoires de l'IN2P3 et un de SPM participent à la collaboration internationale Calice. Cette collaboration se propose d'effectuer l'ensemble des R&D conduisant à la définition d'un calorimètre qui optimise les performances de l'*energy flow*. Comparant la réponse du calorimètre à une photographie, on peut

aisément se convaincre que le nombre de pixels de la «photo» déterminera la qualité de la séparation des différentes contributions. Cela a conduit à une proposition de calorimètre ultrasegmenté, avec des tailles de pixels de l'ordre du cm^2 , conduisant à un détecteur de quelques dizaines de millions de pixels. Un prototype de ECAL est en cours de construction et sera testé prochainement en faisceau.

La participation des laboratoires de l'IN2P3 dans ces collaborations est importante, avec des contributions allant des études de mécanique à l'électronique de lecture. Il faut de plus citer Mokka, la simulation du détecteur développée par l'Institut dans le cadre de Geant4, qui est maintenant l'outil officiel de simulation de la communauté FLC, ou encore une simulation rapide, SGV, également développée par l'Institut.

À la suite de l'ensemble de ces R&D, une proposition réaliste de détecteur pourra être formulée.

-  Collaboration Silc: <http://scipp.ucsc.edu/SILC/> et site du LPNHE <http://lpnhe-lc.in2p3.fr>
- Collaboration Calice: <http://polywww.in2p3.fr/flc/calice.html>
- Simulation Mokka: <http://polywww.in2p3.fr/geant4/tesla/www/mokka/mokka.html>
- A TPC for a future linear collider, Note DESY LC-DET-2002-18.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IReS, LAL, LPNHE, LPC Clermont, LLR. | CNRS/SPM: PICM. | CEA/DSM: Dapnia. | Université Louis-Pasteur: LEPSI.



Antonio Villari

SPIRAL2 La production et l'accélération de produits de fission

La physique des ions exotiques connaît depuis quelques années un développement très important de par le monde. L'installation Spiral, au Ganil à Caen, qui a démarré en septembre 2001, vise l'étude de noyaux exotiques ayant des masses inférieures à $A = 80$. Le nouveau projet Spiral2 élargit cette région jusqu'aux masses $A = 160$ en utilisant de nouvelles technologies.

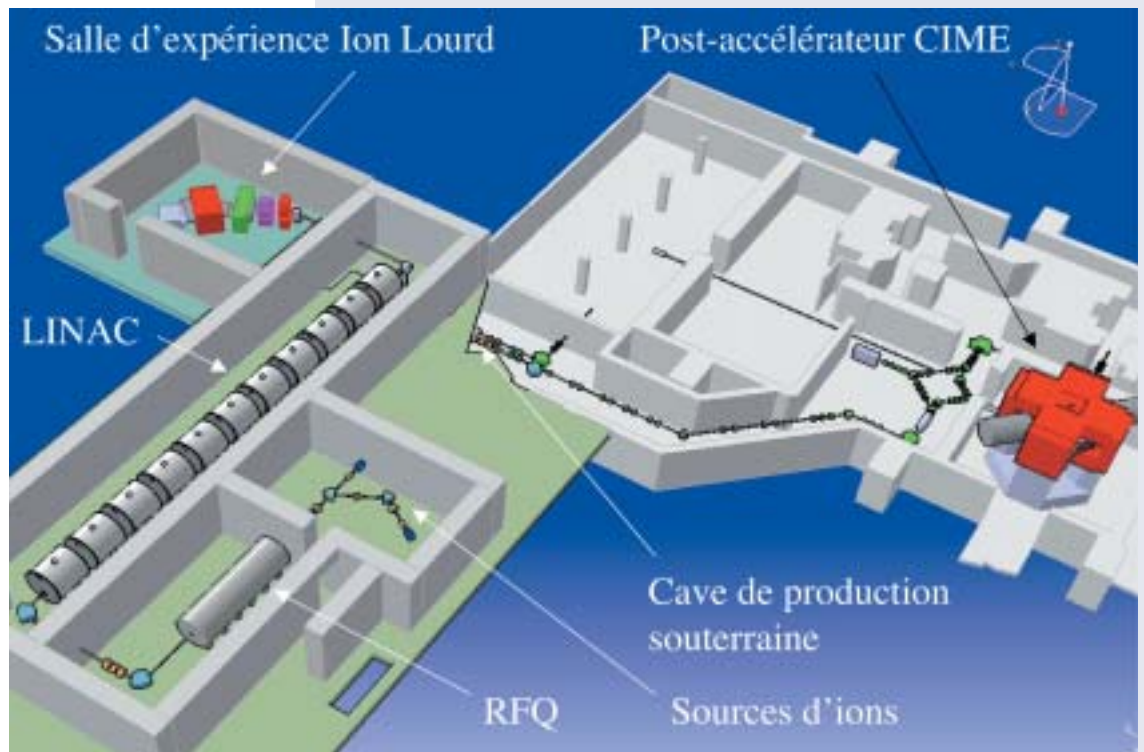
L'interaction des neutrons et des protons produit une incroyable variété de noyaux: tous les éléments qui constituent notre Univers, du plus léger, l'hydrogène, au plus lourd des éléments naturels, l'uranium. Notre connaissance du monde subatomique a d'abord été fondée sur l'étude des noyaux présents sur Terre, qui ont été forgés par les étoiles, il y a plusieurs milliards d'années. Les noyaux stables sont en équilibre: leur cohésion est telle qu'aucune

transmutation radioactive n'est possible. Pour une masse donnée, la proportion des neutrons et des protons correspond aux structures les plus liées par l'action conjuguée des différentes interactions: l'attraction forte, le couplage d'appariement, le spin orbite et la répulsion coulombienne. La nature, dans les processus de nucléosynthèse, et l'homme, avec les accélérateurs de particules, savent produire des noyaux hors de cet équilibre. C'est le domaine des noyaux exotiques, des noyaux instables qui n'existent pas à l'état naturel sur Terre.

Selon les estimations actuelles, de 5 000 à 7 000 noyaux liés devraient pouvoir exister, mais seulement 2 000 d'entre eux ont été observés à ce jour. De plus, hormis pour les quelque 250 espèces stables, très peu d'informations ont pu être obtenues sur ces noyaux instables. Par exemple, le premier état excité de seulement 540 espèces nucléaires a pu être observé.

Pour sonder un noyau et caractériser ses propriétés, il faut lui faire subir diverses réactions nucléaires. Dans le cas des

Vue artistique
du projet Spiral2.
© CNRS/IN2P3-CEA



noyaux stables, il suffit d'en constituer une cible et de la bombarder de particules appropriées. Instables et rares, les noyaux exotiques ne peuvent être rassemblés en cible; en étudier les réactions semble donc impossible. La révolution est venue de la possibilité de constituer des faisceaux de noyaux exotiques. Au lieu d'envoyer la sonde sur le noyau à sonder, il suffit d'envoyer le noyau exotique sur la sonde. Les faisceaux de noyaux exotiques ouvrent ainsi un vaste champ d'étude.

Les réactions nucléaires sont les outils qui permettent de produire les noyaux exotiques en laboratoire. Plusieurs mécanismes sont utilisés. Avec les faisceaux d'ions lourds du Ganil, des réactions de fragmentation se produisent lorsque le faisceau primaire, à une énergie supérieure à quelques dizaines de MeV/nucléon (ce qui correspond à des vitesses de l'ordre de 30 à 50 % de la vitesse de la lumière), heurte une cible. Dans ces réactions, le projectile et la cible perdent une partie de leurs nucléons, produisant ainsi toutes sortes de noyaux plus légers, dont certains peuvent être très exotiques. Dans Spiral, la méthode de production utilisée est appelée Isol (*Isotopic Separation On-Line*). Elle consiste à arrêter les noyaux exotiques produits lors de la collision avec une cible épaisse pour ensuite les accélérer à l'énergie souhaitée avec le cyclotron Cime, soit entre 1,7 et 25 MeV/nucléon pour Spiral.

À l'heure actuelle, les études expérimentales sont encore souvent limitées aux noyaux exotiques les plus légers, car seuls ces faisceaux sont disponibles avec des intensités suffisantes. Il faudrait donc, d'une part, élargir la gamme des noyaux qui pourront être étudiés pour mieux contraindre les modèles, et, d'autre part, augmenter les intensités disponibles pour pouvoir effectuer des expériences plus sélectives et détaillées et ainsi approfondir notre compréhension du noyau. Le projet Spiral2 répond à ces deux souhaits en proposant l'utilisation

de la fission induite par des neutrons rapides dans une cible de carbure d'uranium comme moyen de production de noyaux exotiques. La fission sera induite par les neutrons produits par un faisceau de deutons de forte intensité (5 mA) sur un convertisseur de carbone. Les fragments de fission de l'uranium, extraits par la méthode Isol, permettront d'explorer une région de noyaux riches en neutrons et de masse comprise entre 80 et 160, encore très peu connue. Des noyaux riches en protons pourront aussi être produits par des réactions de fusion-évaporation sur des cibles plus légères, avec des ions lourds fournis par le même accélérateur primaire ($E = 14$ MeV/nucléon), ouvrant des possibilités d'étude de noyaux à courte durée de vie *via* la méthode en-vol. En particulier, cet accélérateur de très haute intensité pourra être utilisé pour les études de synthèse de noyaux superlourds, c'est-à-dire pour la synthèse d'éléments plus lourds que l'uranium. La production, avec des intensités jamais atteintes, de noyaux légers radioactifs pas très éloignés de la ligne de stabilité ouvrira également la possibilité de rechercher des configurations exotiques telles que $^{6,8}\text{n}$.

Un des points les plus forts du projet Spiral2 sera l'étude du processus-r, liée à la nucléosynthèse des noyaux dans l'Univers. Le chemin de la nucléosynthèse passe par une région de la charte des nucléides exotiques, riches en neutrons. Ces noyaux, de courte durée de vie, seront très abondamment produits par Spiral2, permettant l'étude de leurs caractéristiques fondamentales, comme leur durée de vie, leur énergie de liaison ou leur décroissance radioactive, et, grâce au cyclotron Cime, la mesure de sections efficaces pour des réactions d'intérêt astrophysique. Un autre point d'importance sera la synthèse d'isotopes inconnus de noyaux très lourds, ayant un nombre atomique supérieur à 102. La synthèse de ces noyaux est fondamentale afin de valider l'identification de nouveaux éléments superlourds en reconnaissant leurs chemins de décroissance.

Pour l'augmentation des intensités et la variété des faisceaux au Ganil, Spiral2 est une première étape qui s'inscrit dans la continuité des développements actuels. Dans le contexte international, Spiral2 est le premier accélérateur de haute puissance supraconducteur au monde (200 kW de puissance accélérée) et, concernant les intensités des noyaux exotiques produits, le plus intense dans la région de masses proposée. Par ailleurs, il fournira une source de neutrons puissante, la plus intense dans son domaine d'énergie, qui permettra des applications diverses, en particulier des études de matériaux pour le réacteur de fusion contrôlée Iter.

Sous la tutelle de l'IN2P3(CNRS) et de la DSM(CEA) et comptant sur un fort soutien de la région Basse-Normandie, l'APD Spiral2, auquel LNL-INFN (Italie) et PNPI-Gatchina (Russie) collaborent déjà, a démarré en novembre 2003 pour une durée de deux ans. Le premier faisceau radioactif de Spiral2 est prévu pour la fin 2008.



<http://www.ganil.fr/research/development/spiral2/index.html>

Images de la physique 2004, CNRS, à paraître.

I. Tanihata, Special issue on research opportunities with accelerated beams of radioactive ions, *Nucl. Phys. A693* (2001) n°s 1, 2.

P. Chomaz, Faut-il réinventer la physique nucléaire ?, *La Recherche* 335, octobre 2000.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: IPNO, LPC Caen, LPSC, IReS, CENBG. | CEA/DAM: DPTA. | CEA/DSM: Dapnia.



EURISOL Une nouvelle génération de faisceaux radioactifs

Les physiciens nucléaires européens proposent l'étude et la construction d'une installation de faisceaux radioactifs de type Isol de nouvelle génération: Eurisol. Cette installation fournira des faisceaux radioactifs d'intensités jusqu'à trois ordres de grandeur supérieures aux machines actuelles et renforcera le rôle de leader de l'Europe en physique nucléaire au cours de la décennie 2010-2020.

La nature est composée d'environ trois cents noyaux stables. Ces derniers ont été largement étudiés et la modélisation détaillée de leur structure est un des grands succès de la physique du XX^e siècle. Cependant, les modèles nucléaires prévoient l'existence de plus de six mille combinaisons instables de neutrons et de protons: les noyaux radioactifs. Ces édifices, dont le rapport nombre de protons/nombre de neutrons peut s'éloigner beaucoup de celui des noyaux stables, existent pendant de courts instants lors d'événements stellaires explosifs. Ils passionnent depuis longtemps les physiciens nucléaires par leurs propriétés exotiques et, au cours des deux dernières décennies, l'avènement de faisceaux constitués de ces noyaux radioactifs a permis des avancées spectaculaires dans leur compréhension. Il y a deux méthodes pour produire des faisceaux radioactifs: la fragmentation

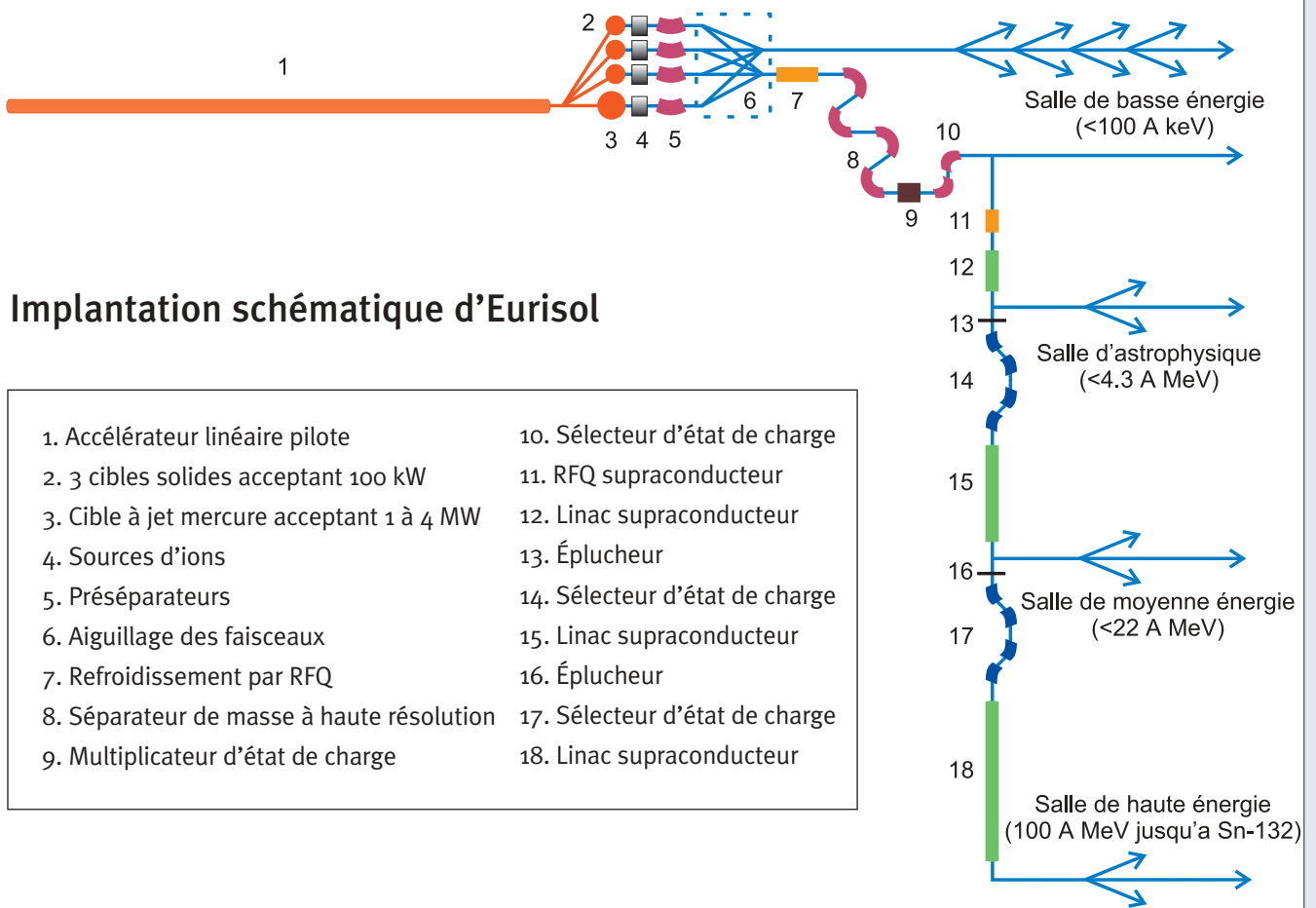
du projectile et Isol. La première fournit une grande variété de faisceaux de haute énergie mais avec des qualités de résolution modestes, alors que la seconde offre des faisceaux de qualités comparables aux faisceaux stables mais généralement limités en types d'ions et en énergie. Les limitations des installations actuelles freinent les avancées scientifiques, ce qui a amené la communauté des physiciens nucléaires, représentée par l'organisation européenne NuPECC, à proposer, au niveau européen, deux installations complémentaires de nouvelle génération, l'une de type fragmentation qui résulterait d'une transformation de l'actuel GSI-Darmstadt et l'autre de type Isol appelée Eurisol. Cette dernière permettra, d'une part, d'aborder de nouvelles frontières scientifiques telles que la compréhension de la structure de la matière nucléaire aux confins de la stabilité, la production de noyaux hyperdésformés ou superlourds ou encore les processus de nucléosynthèse explosive, et, d'autre part, de réaliser des tests de haute précision du Modèle standard. De plus, Eurisol sera la source d'une vaste panoplie de radio-isotopes à usage médical.

Une étude de faisabilité de l'installation Eurisol indépendante du site a été réalisée dans le cadre d'un contrat du 5^e PCRD. Ce travail a été mené par onze laboratoires émanant de huit pays européens et coordonnés par le laboratoire Ganil. La figure illustre une vue schématique du projet Eurisol. L'installation peut être décomposée en quatre parties principales: un accélérateur pilote qui délivre le faisceau primaire, un ensemble cible-source où sont produits les ions radioactifs, un postaccélérateur dans

lequel ces derniers sont portés à leur énergie finale et un ensemble d'aires expérimentales.

L'option de base pour l'accélérateur pilote est un accélérateur linéaire à protons à faisceau continu d'énergie 1 GeV et de puissance 5 MW. La possibilité de l'étendre à l'accélération de deutons et d'ions lourds pourrait augmenter l'intensité de certains faisceaux de noyaux radioactifs. La cible principale, qui permettra d'accepter la totalité de la puissance de l'accélérateur pilote, sera composée d'un convertisseur à jet de mercure produisant des neutrons qui induiront la fission de l'uranium ou du thorium entourant le convertisseur. Un autre type de cible permettra d'accepter directement plusieurs centaines de KW de protons incidents pour la production de noyaux légers et de noyaux déficients en neutrons. Le post-accélérateur de type linéaire supraconducteur permettra l'accélération simultanée de plusieurs états de charge et aura une transmission proche de 50 %. Quatre halls expérimentaux sont prévus pour exploiter pleinement la gamme en énergie continue délivrée, qui ira de 100 keV/nucléon (ions proches de l'arrêt) à 100 MeV/nucléon. Cette énergie maximale élevée permettra la fragmentation secondaire des faisceaux radioactifs, afin de s'approcher au plus près des confins de la liaison nucléaire.

Des intensités inégalées de faisceaux radioactifs accélérés seront produites, par exemple 5.10^{13} ⁶He par seconde ou encore 9.10^{11} ¹³²Sn. Pour les noyaux riches en neutrons, les intensités délivrées seront supérieures sur une large gamme de masses à celles prévues pour les futures installations de fragmentation comme GSI, par exemple pour les noyaux de ⁷⁴⁻⁹⁸Kr. Le coût total de l'installation Eurisol, si elle était construite sur un site vierge, a été estimé à 600 M€. La possibilité d'utiliser les faisceaux remarquablement intenses de ⁶He et ¹⁸Ne d'Eurisol comme base pour la production de faisceaux de neutrinos purs en saveur (faisceau bêta) est aussi envisagée. Le projet pourrait



Vue schématique
du concept Eurisol, tirée
de l'ouvrage The
Eurisol Report réalisé
sous le contrat européen
HPRI-CT-1999-50001.

ainsi servir une autre communauté scientifique importante.

Plusieurs sujets nécessaires de R&D ont été identifiés. Ils concernent en particulier les cavités accélératrices supraconductrices, la cible à jet de mercure, les cibles solides et la radioprotection associée, ainsi que les sources d'ions multi-chargés. De nombreuses synergies ont été identifiées avec la R&D concernant les usines à neutrinos, les réacteurs hybrides (*Accelerator Driven System* - ADS) et les sources de neutrons de spallation.

Une feuille de route allant jusqu'à la construction d'Eurisol a été établie au niveau européen. Elle comporte trois jalons essentiels :

- l'exploitation scientifique vigoureuse et l'amélioration continue des installations Isol actuelles: Spiral, REX-Isolde...;

- la construction de trois installations nouvelles de génération dite «intermédiaire», Spiral 2 (France), Maff (Allemagne) et Spes (Italie) qui mettront chacune en exploitation des technologies nouvelles applicables au concept Eurisol;

- une étude de faisabilité technique détaillée (*Design Study*) accompagnée de la construction de prototypes d'éléments spécifiques novateurs de l'ensemble Eurisol, dont le financement a été récemment demandé à la Communauté européenne.

La réalisation de cet ambitieux programme, que soutient pleinement l'IN2P3 et

auquel participent avec enthousiasme ses laboratoires, permettra à l'Europe de renforcer son rôle de leader en physique nucléaire au cours de la prochaine décennie et au-delà.

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

LABORATOIRES FRANÇAIS DES COLLABORATIONS

RTD EURISOL:

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

DESIGN STUDY EURISOL:

CNRS/IN2P3: Ganil, IPNO, LPC Caen,
CENBG. |
CEA/DSM: Dapnia.



Fadi Ibrahim

ALTO Un accélérateur d'électrons pour des faisceaux radioactifs riches en neutrons

Le projet Alto (Accélérateur linéaire auprès du Tandem d'Orsay) consiste en l'installation d'un accélérateur d'électrons (10-50 MeV, 10 μ A) dans les aires expérimentales du Tandem de l'IPN d'Orsay. Cette installation, qui sera opérationnelle dès 2005, s'intègre parfaitement au Tandem, ce qui ouvre de larges perspectives pour les études de structure nucléaire, pour des programmes pluridisciplinaires (chimie, biologie, physique atomique et de la matière condensée), ainsi que pour des activités de recherche et de développement sur les accélérateurs.

L'étude des noyaux loin de la stabilité, constitutive de l'histoire de la physique nucléaire dès son origine, connaît un essor considérable. Parmi les nucléides les plus éphémères, ceux situés aux frontières de notre connaissance sont qualifiés d'«exotiques». Étudier ces noyaux, c'est se donner la chance d'accéder à des informations nouvelles sur la structure nucléaire et ainsi de mesurer la validité de notre conception de la matière nucléaire lorsque celle-ci est poussée dans des états «extrêmes».

La production de noyaux exotiques s'est avérée un défi permanent dans la poursuite de leur étude et les difficultés rencontrées ont laissé une grande part des noyaux riches en neutrons dans l'inconnu. Afin d'accéder à ces vastes réserves de découvertes intactes, il est nécessaire de produire ces noyaux en quantité et sous la forme de faisceaux accélérés. Les problèmes que soulève la mise en œuvre de tels faisceaux suscitent à l'heure actuelle un énorme effort de réflexion et de mise au point technique.

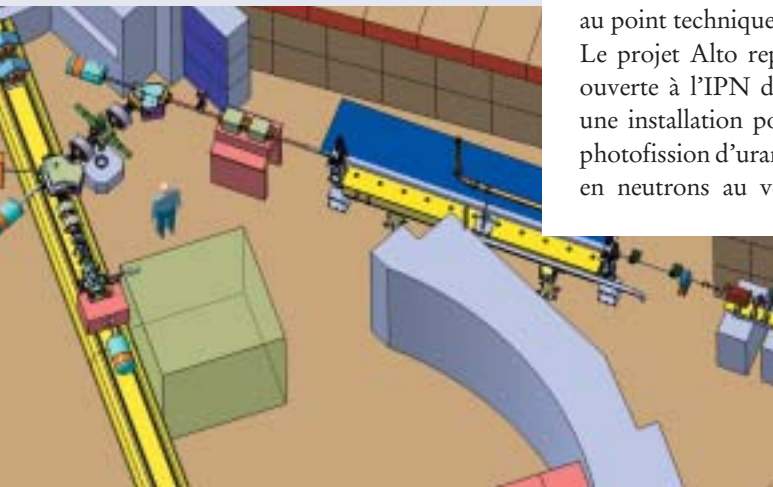
Le projet Alto repose sur l'opportunité ouverte à l'IPN d'Orsay de développer une installation pour la production, par photofission d'uranium, d'isotopes riches en neutrons au voisinage des nombres

magiques $N = 50$ et 82 . Il profite de la possibilité de compléter les installations du Tandem et du dispositif Parnne par un accélérateur d'électrons de 50 MeV d'énergie et de 10 μ A de courant moyen. L'intensité (nombre de fissions par seconde) est du même ordre de grandeur que sur les autres machines existantes: Isolde, Osiris, HRIBF. La combinaison d'une production par pure fission à basse énergie, sans contaminations par des isobares déficitaires en neutrons, et la possibilité d'utiliser des sources d'ions chimiquement sélectives assurent à Alto une niche importante pour la production de faisceaux uniques en pureté d'une trentaine de «nouveaux» isotopes très riches en neutrons.

Les axes majeurs de la physique étudiés auprès d'Alto sont l'étude de la magieité des noyaux riches en neutrons, l'étude du processus r en astrophysique nucléaire, la mesure de propriétés fondamentales de noyaux très exotiques telles que la forme ou la masse.

Alto a pour vocation d'être un banc d'essai pour les futures installations de faisceaux exotiques Spiral2 et Eurisol. En effet, l'un des points les plus sensibles de ces deux projets concerne l'optimisation des ensembles cibles-sources dont dépend directement la production des noyaux exotiques. Les travaux menés sur ce sujet auprès d'Alto permettront de produire les faisceaux Spiral2 dans des conditions optimales.

Par ailleurs, Alto vient conforter la politique d'ouverture pluridisciplinaire du Tandem d'Orsay, que ce soit en termes d'applications à la chimie, à la biologie et à la physique atomique et de la matière condensée, ou en termes d'applications industrielles, telle la validation de composants pour le spatial.



Alto en situation.
© CNRS/IN2P3



F. Ibrahim, *Physics of Atomic Nuclei* 66 (2003) 1399.
S. Essabaa, *Nucl. Instr. Meth. B204* (2003) 780.

**LABORATOIRES FRANÇAIS
DE LA COLLABORATION**

CNRS/IN2P3: IPNO, LAL.



AGATA

Un spectromètre de nouvelle génération

Gilbert Duchêne



Agata est un spectromètre gamma révolutionnaire fondé sur la reconstruction du parcours des photons dans le germanium. Le projet, qui regroupe dix nations et quarante laboratoires, est en phase de R&D jusqu'à la fin 2007. Six laboratoires français y sont fortement impliqués dans la plupart des domaines de développement.

Vue d'un cristal coaxial biseauté de section hexagonale, de 9 cm de long et 8 cm de diamètre, segmenté en 36 (6 secteurs et 6 tranches). Dans sa configuration 180 détecteurs, Agata comporte environ 7000 segments. © University zu Köln, Allemagne

Agata (*Advanced Gamma Tracking Array*) est un spectromètre gamma (γ) 4π révolutionnaire car fondé pour la première fois sur la reconstruction du parcours du rayon γ dans les détecteurs germanium (Ge). Uniquement constitué de Ge, contrairement aux appareillages actuels (Euroball en Europe et Gammasphère aux États-Unis), il permettra une augmentation de la sensibilité de détection de deux à trois ordres de grandeur. De toutes nouvelles perspectives seront ainsi ouvertes pour l'étude des états extrêmes de la matière nucléaire comme: 1° les déformations extrêmes et symétries du noyau; 2° la structure des noyaux très exotiques à la limite de la cohésion; et 3° la structure des noyaux superlourds.

Un rayonnement γ diffuse plusieurs fois dans le détecteur avant absorption totale dans le cristal de Ge: une détermination précise des points d'interaction, alliée aux lois de diffusion rayonnement-matière, permettra de reconstituer sa trajectoire. Pour cela, les cristaux de Ge sont subdivisés électriquement en petits volumes de détection élémentaires (~ 10 cm³) appelés «segments». La précision sur la position du point d'interaction, de l'ordre du centimètre, est encore améliorée (quelques millimètres) par l'étude de la forme des signaux électriques issus des segments, analyse ren-

due possible par la «digitalisation» et le traitement en ligne des impulsions. À partir des coordonnées des points d'interaction ainsi déterminées et des énergies déposées, des logiciels dits de «tracking» reconstituent le parcours des photons. La complexité de l'ensemble de ces calculs, effectués avant stockage des données, requiert une très importante puissance de calcul en ligne.

Agata suppose qu'un effort important de R&D soit réalisé tant en technologie Ge qu'en électronique numérique et en logiciels d'analyse de formes d'impulsion et de tracking. Ce travail est réalisé au sein d'une large collaboration européenne regroupant dix pays (Allemagne, Bulgarie, Danemark, Finlande, France, Italie, Pologne, Roumanie, Suède et Royaume-Uni) et quarante laboratoires dont six français. Ces derniers sont impliqués dans de nombreux domaines, et tout spécialement dans le développement des préamplificateurs des segments, de calculs de simulation Geant, de l'électronique frontale, de cartes et de logiciels d'analyse de formes d'impulsion, de l'analyse des données et, vraisemblablement, du «slow control» du «hardware» d'Agata. Diverses configurations du spectromètre, fondées sur des cristaux Ge coaxiaux ou planaires, ont été explorées. La géométrie finale comportera plus d'une centaine de comp-

teurs du type de celui présenté dans la figure.

La phase de R&D s'étendra jusqu'à la fin 2007, date à laquelle un démonstrateur correspondant à ~ 10 % d'Agata sera testé en conditions expérimentales afin de valider les choix technologiques réalisés. Tout au long de la construction de l'appareillage complet qui devrait débuter dès 2008, des sous-ensembles du spectromètre seront exploités.

Diverses applications des techniques développées pour Agata sont envisagées, notamment la réalisation de caméras γ constituées de cristaux semi-conducteurs multisectionnés pour l'imagerie médicale.



<http://www-w2k.gsi.de/agata/>
J. Gerl et W. Korten (eds.), *Agata, Technical proposal for an Advanced Gamma Tracking Array for the European gamma spectroscopy community*, GSI Darmstadt, 2001.
I. Piqueras Pacheco et al., *Nucl. Instr. Meth. A* 516 (2004) 122 et références internes.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



François Couchot

PLANCK Un satellite pour l'étude du rayonnement de fond cosmologique

Planck est un satellite européen de troisième génération destiné principalement à l'étude du rayonnement de fond cosmologique. Ses mesures permettront de contraindre les modèles cosmologiques au pour-cent. Elles testeront, entre autres, notre représentation des phénomènes en jeu dans l'Univers primordial à des énergies de l'ordre de 10^{16} GeV.

Planck est un projet phare de la cosmologie. Ses cartes du ciel complet auront un retentissement important sur notre connaissance de la physique de l'Univers primordial et sur la détermination des paramètres cosmologiques (entre autres, les propriétés de l'énergie sombre), mais aussi sur la physique concernant les neutrinos, l'évolution des grandes structures, le milieu intergalactique, les amas, le milieu interstellaire et le champ magnétique dans notre galaxie, et les petits objets du système solaire. Planck apportera un gain d'un ordre de grandeur en sensibilité sur son prédécesseur WMAP, pour des pixels dix fois plus petits en surface. La large gamme spectrale couverte, de 30 à 1 000 GHz dans neuf bandes distinctes, lui permettra de maîtriser les diverses contaminations, y compris pour la mesure de la polarisation.

La France contribue pour 40 % à la construction de l'instrument HFI (*High Frequency Instrument*) de Planck, estimée à 140 M€. Le projet est dirigé par l'Insu qui coordonne la réalisation de l'instrument et le traitement des données. L'IN2P3 représente environ la moitié des forces françaises de HFI. Ses équipes sont bien insérées dans cette collaboration avec l'Insu, le SPM/CNRS, le CEA et le Cnes, laquelle se tisse depuis maintenant sept ans à travers Archeops et Planck.

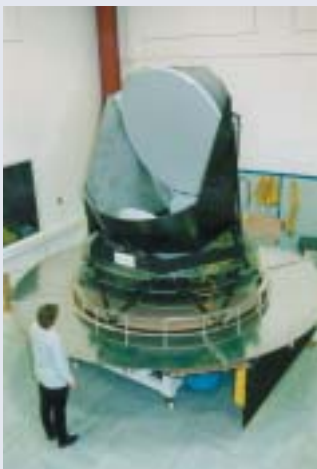
Les responsabilités majeures de l'IN2P3 dans la construction de HFI concernent l'électronique et l'informatique embarquée (processeur de contrôle de l'instrument, compression des données, processeur de contrôle de la machine 20 K, pilotage de la machine 0,1 K), ainsi que

l'étalonnage au sol (étude et réalisation de dispositifs optiques, participation à l'automatisation du cryostat, pilotage et simulation de l'ensemble). Les prototypes ont été réalisés et ont subi les tests d'environnement spatial. Les premières livraisons et les premières phases de l'étalonnage auront lieu en 2004.

Par ailleurs, l'Institut est également responsable du traitement des données de niveau 1 et très impliqué dans la préparation du traitement des données de niveau 2 qui aboutira aux cartes corrigées des effets instrumentaux. Jusqu'ici, les développements ont surtout concerné le cadre de développement logiciel et son architecture générale. Dans les prochaines années, le savoir-faire acquis dans l'analyse d'Archeops sera appliqué à HFI.

Les équivalents temps plein des ITA au développement de HFI avant le lancement sont estimés à 124. Les budgets associés, fournis par le Cnes (et l'ESA en ce qui concerne la majeure partie des composants électroniques de vol), sont d'environ 6,2 M€.

Maquette du satellite Planck chez Alcatel.
© ESA



- <http://www.planck.fr/>
- <http://www.rssd.esa.int/?project=PLANCK>

J. M. Lamarre *et al.*, The Planck high frequency instrument, a third generation CMB experiment, and a full sky submillimeter survey, *New Astronomy Reviews*, Vol. 47, Issue 11-12 (2003) 1017-1024.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: APC-PCC, LAL, LPSC. |

CNRS/SPM: CRTBT. |

CNRS/Insu: CESR, IAP, IAS, LAOG, LERMA. |

CEA/DSM: Dapnia (SAP et SPP).



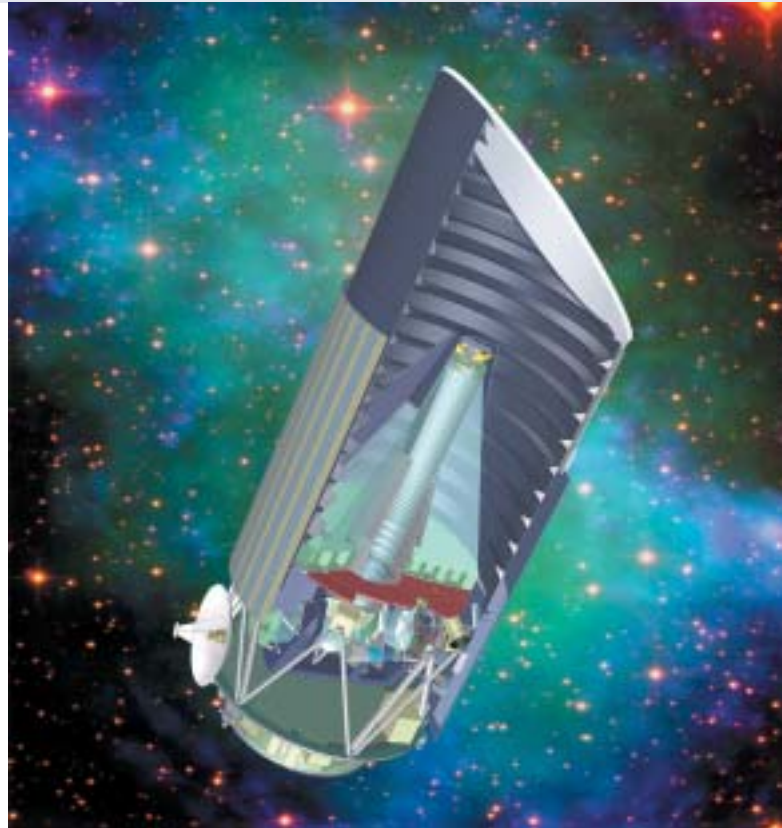
SNAP

La traque des supernovæ Ia à grands décalages vers le rouge

Reynald Pain

Le projet Snap vise la constitution d'un échantillon comprenant plusieurs milliers de supernovæ de type Ia à grands décalages vers le rouge. Cette expérience présente la particularité d'être directement sensible au terme d'énergie sombre et de pouvoir en déterminer la nature. Ses mesures auront un impact majeur sur la compréhension de la physique des hautes énergies et sur la connaissance de l'Univers primordial.

*Vue d'artiste du projet de satellite Snap
© Snap consortium*



La mesure du diagramme de Hubble des supernovæ Ia (SN Ia) permet aujourd'hui d'accéder à l'histoire de l'expansion de l'Univers jusqu'à des décalages vers le rouge de l'ordre de 1, en utilisant la reproductibilité empiriquement constatée de ces objets. Cette approche de la cosmologie observationnelle a permis la mise en évidence d'une «énergie sombre», constituant aujourd'hui de l'ordre des trois quarts de l'énergie de l'Univers et responsable d'une accélération de son expansion. Depuis ces premières indications, la mesure de la courbure par les anisotropies du fond diffus cosmologique et les estimations du contenu de matière utilisant les amas de galaxies ou les effets de lentilles faibles sont venues confirmer ce résultat inattendu.

Les expériences en cours (2003-2009), SNLS et SNF, visent à construire un diagramme de Hubble d'un millier de SN Ia jusqu'à des décalages spectraux de

l'ordre de 1. Les équipes IN2P3 sont très largement impliquées dans ces projets dans lesquels la France occupe une position importante. Ces expériences permettront d'obtenir des précisions de l'ordre de 10 % sur la mesure du paramètre de l'équation d'état de l'énergie sombre.

Le projet Snap ambitionne, quant à lui, de mesurer les SN Ia jusqu'à des décalages spectraux voisins de $z = 2$. Pour atteindre ces décalages vers le rouge avec une qualité d'observation suffisante et pour limiter les effets systématiques, il est indispensable d'observer depuis l'espace. Des mesures très précises seront effectuées jusqu'à $z = 1,7$, qui permettront de déceler une éventuelle dépendance temporelle de l'équation d'état. Le projet Snap est conduit par des équipes américaines, principalement au Lawrence Berkeley National Laboratory, en collaboration avec des équipes de la Nasa.

Le projet est dans une phase préparatoire. Les équipes IN2P3 travaillent à mettre en place une participation française IN2P3, Insu et CEA, en partenariat avec le Cnes. Elles développent actuellement une activité R&D sur l'électronique de lecture

(spécialisation d'une chaîne électronique de lecture de CCD et de détecteurs pixel IR) et l'étude d'un spectrographe en collaboration avec des équipes Insu.

L'année 2003 a vu l'étude de l'énergie noire accéder au statut de projet prioritaire de la Nasa, à la suite d'un accord DOE-Nasa pour soutenir une mission spatiale «énergie sombre» conjointe, *Joint Dark Energy Mission (JDEM)*, ouverte à compétition. Le consortium Snap entre donc maintenant dans une nouvelle phase dite de «définition conceptuelle» qui s'achèvera dans deux ans à l'issue desquels un des projets en lice pour JDEM sera sélectionné par la Nasa. La mise sur orbite pourrait avoir lieu en 2014.



- <http://snls.in2p3.fr>
- <http://snfactory.in2p3.fr>
- <http://snap.in2p3.fr>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

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



GLAST

Le futur de l'astronomie gamma spatiale

Gilles Bogaert

Glast commencera en 2007 l'exploration du ciel gamma de haute énergie, c'est-à-dire du ciel vu au travers de ce rayonnement extrême, beaucoup plus énergétique que le rayonnement visible. Il essayera de dévoiler l'origine des rayons cosmiques, et les mécanismes et sites qui les produisent. Il pourra sonder la structure et l'évolution de l'Univers, voire débusquer des phénomènes encore insoupçonnés.

Glast, pour *Gamma-ray Large Area Space Telescope*, est une mission spatiale internationale et multiagences qui sera lancée par la Nasa en 2007, et à laquelle le CEA et l'IN2P3 participent du côté français. Elle est destinée à étudier le cosmos dans la gamme d'énergies 20 keV-300 GeV. Plusieurs missions exploratoires ont amené le lancement d'Egret en 1991, qui a permis la première cartographie du ciel entre 30 MeV et 10 GeV. Egret a montré une diversité inattendue du ciel gamma, avec environ trois cents sources découvertes, dont des pulsars, des trous noirs super-massifs à grands décalages vers le rouge... mais aussi un grand nombre de sources qui, encore aujourd'hui, restent non identifiées.

Les objectifs de Glast sont :

- la carte détaillée du cosmos à haute énergie, entre 20 MeV et 300 GeV;
 - l'alerte rapide lors de phénomènes transitoires, $E > 20$ keV tels les sursauts gamma et les éruptions de noyaux actifs de galaxies;
 - l'étude poussée de certains objets d'intérêt majeur après un an de cartographie.
- Grâce à des performances exception-

nelles, le télescope de Glast permettra de découvrir des milliers de sources galactiques et extragalactiques, émettant dans la gamme 20 MeV-300 GeV, jusqu'à des distances $z > 5$. La gamme d'énergies au-delà de 30 GeV sera explorée pour la première fois, avec une résolution en énergie de l'ordre de 10 %. Les sources déjà vues par Egret seront localisées pour la première fois avec une précision meilleure que la minute d'arc. Enfin, le télescope offrira un recouvrement avec les télescopes Cherenkov au sol (Hess) permettant des études simultanées sur six décades en énergie et leur « intercalibration ».

Glast est conçu pour permettre des avancées spectaculaires dans l'étude des mécanismes d'accélération des particules dans les noyaux actifs de galaxies, pulsars, restes de supernovæ, dans la résolution du ciel gamma (sources non identifiées et émission interstellaire), dans l'étude des sursauts gamma et phénomènes transitoires, et aussi dans la recherche de la matière noire non baryonique et autres manifestations d'une physique nouvelle.

Le télescope de Glast est un instrument sophistiqué qui requiert un grand savoir-faire scientifique et technique. L'IN2P3 s'est impliqué dans la construction, la « calibration » au sol et la simulation du calorimètre, mais aussi dans la préparation des outils scientifiques indispensables à l'exploitation optimale des informations venant de ce ciel riche et nouveau, différent du ciel paisible habituel, celui des astres et phénomènes très énergétiques.

Glast, vue d'artiste.
© A. Simonnet, NASA
E/PO - Sonoma State
University



- <http://polywww.in2p3.fr/glast/>
- <http://www.cenbg.in2p3.fr/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: LLR, CENBG, GAM. |
CEA/DSM: Dapnia.



Dy-Holm Koang

EUSO

Un observatoire spatial de rayons cosmiques d'énergie extrême

Euso est une mission pionnière pour l'étude depuis l'espace des rayons cosmiques d'énergie extrême, observables lors de leur interaction avec l'atmosphère terrestre. Un télescope conçu et réalisé par une collaboration de plusieurs pays d'Europe, du Japon et des États-Unis sera installé sur la Station spatiale internationale à la fin de cette décennie.

Un des défis majeurs à relever pour la physique des astroparticules est d'élucider l'observation d'un petit échantillon de rayons cosmiques d'énergie proche de 10^{20} eV, soit plus d'un million de fois supérieure à celle que pourront produire les plus grands accélérateurs de particules en construction. L'énergie élevée de ces rayonnements soulève des questions scientifiques fondamentales sur leur origine et leur propagation.

Leur existence pourrait impliquer des mécanismes d'accélération très efficaces, encore incompris, de la part des sources astrophysiques les plus actives ou des désintégrations de particules extrêmement massives, reliques des premiers instants de l'Univers. À ces énergies, le fond de photons cosmologiques de 3 K devrait représenter un véritable obstacle pour la propagation de la plupart des

particules connues. Leur présence au-delà des distances limites attendues, à confirmer prochainement par Auger, pourrait être l'indication d'une défaillance des lois connues de la physique ou d'un rôle singulier joué par les neutrinos.

Ces rayons cosmiques constituent une chance unique d'accéder à une telle échelle d'énergies et aux indices d'une éventuelle nouvelle physique.

Euso, acronyme du nom anglais de l'Observatoire spatial de l'Univers extrême, utilise un système d'imagerie fondé sur un couple de lentilles de Fresnel de 5 m² de surface et doté de 200 000 pixels, chargé de mesurer la lumière UV (fluorescence et Cherenkov) émise lors du passage d'un rayon cosmique dans l'atmosphère terrestre. Les signaux sont détectés et traités par des

photodétecteurs multianodes assortis de circuits intégrés spécifiques de technologie submicronique.

Le télescope d'Euso, placé à 430 km du sol et pointant au nadir, observera avec un angle de vue de 60° une surface au sol de 190 000 km², soit une masse sensible de 2 000 milliards de tonnes. Euso pourra collecter annuellement, à 10^{20} eV, cinq à dix fois plus d'événements que les expériences planifiées au sol, soit, au bout de trois ans, des milliers d'événements d'énergie au-dessus de 5.10^{19} eV. Il permettra: 1° une détermination précise du spectre global des rayons cosmiques à ces énergies; 2° la distribution de leur direction d'arrivée; 3° l'identification et le dénombrement des sources compactes si elles existent; 4° la mesure de leurs spectres individuels. Les données d'Euso pourraient servir à sonder les champs magnétiques intergalactiques et la distribution de la matière noire, et également fournir une cartographie systématique des phénomènes atmosphériques lumineux dans l'UV.

Faisant suite à Auger, Euso pourra entreprendre l'étude de la composante extrême du rayonnement cosmique et accéder ainsi aux processus les plus énergétiques de notre Univers.

Pour le futur et en comptant sur des améliorations dans l'optique et la photodétection déjà à l'étude dans la collaboration, un gain statistique d'un autre ordre de grandeur pourrait être obtenu avec un ensemble de deux ou trois télescopes de nouvelle génération mis en orbite à une altitude de 800 km. La voie potentiellement très prometteuse de l'astronomie neutrino pourrait alors être explorée.



Le télescope spatial d'Euso dédié à la détection des rayons cosmiques d'énergie extrême scrutant l'atmosphère terrestre à partir de la Station spatiale internationale.
© CNRS/IN2P3



- <http://lpsc.in2p3.fr/EUSO/euso0.html>
- <http://www.euso-mission.org/>

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: APC-PCC, LAPP, LPSC. | CNRS/SPM: LPTHE. | CNRS/Insu: IAP, OdP.



MEGAPIE

Une cible de spallation pour les systèmes hybrides

Thomas Kirchner

La cible de spallation Megapie, d'une puissance de 1 MW, sera la première démonstration expérimentale d'une cible liquide pour la réalisation d'une source de neutrons intense. Elle validera la faisabilité du couplage d'un accélérateur avec une cible de spallation liquide, afin de contribuer au développement du concept des systèmes hybrides pour la transmutation des déchets nucléaires.



Vue 3D d'une coupe verticale de la cible Megapie.
© CNRS/IN2P3

Megapie (*Megawatt Pilot Target Experiment*) a pour objectif de démontrer la faisabilité d'une cible de spallation liquide en Pb-Bi. Une telle cible est aujourd'hui la référence des projets de systèmes hybrides. La collaboration internationale (CEA, CNRS, FZK, Enea, SCK-CEN, PSI, Jaeri, Kaeri et DOE) a pour objectif de concevoir, de construire et de faire fonctionner la cible sous un faisceau de protons de l'ordre de 1 MW (≈ 575 MeV et 1,7 mA). Comme matériau de spallation, l'eutectique de Pb-Bi sera utilisé pour son rendement de spallation et pour sa température de fusion relativement basse (~ 125 °C).

La cible Megapie sera montée dans l'installation existante Sinq au PSI en Suisse et doit, par conséquent, respecter de fortes contraintes géométriques (diamètre de 20 cm à 40 cm sur 4 m de hauteur). L'ensemble des composants de Megapie - cible, pompe, échangeur, instrumentation et confinement - doit intégrer ce volume.

La figure illustre une coupe de la cible Megapie. Celle-ci comporte trois zones: la zone de production de neutrons, la zone de transport de chaleur et la zone d'évacuation de chaleur. Le faisceau de protons, arrivant par le bas, traverse d'abord une double enceinte de confinement en AlMg3 refroidie par de l'eau lourde. Il traverse ensuite la fenêtre de la cible en acier T91 (acier martensitique de 1,5 mm d'épaisseur) pour interagir avec le plomb-bismuth liquide. La réaction de spallation donne lieu à un flux intense de neutrons, mais aussi à la dissipation de l'énergie du faisceau (700 kW) dans le plomb-bismuth. À l'aide d'une pompe électromagnétique, le métal liquide remonte alors par la zone centrale de la cible pour traverser ensuite

l'échangeur de chaleur. Le plomb-bismuth ainsi refroidi redescend par la zone périphérique externe de la cible. Pour assurer un meilleur refroidissement de la fenêtre en T91 (endroit critique de la cible), une deuxième pompe électromagnétique reprend une partie du métal liquide à la sortie de l'échangeur pour le diriger directement à travers la fenêtre via un tube «by-pass».

La conception, sous la responsabilité de l'IN2P3, et la réalisation de la cible sont soutenues par des activités de R&D dans les domaines d'étude suivants: matériaux, physico-chimie de l'alliage liquide, thermo-hydraulique, comportements des matériaux sous irradiation... Trois projets européens du 5^e PCRD, Tecla, Spire et Megapie-Test, apportent également leur soutien au projet Megapie.

La conception de la cible a été terminée en 2003. Le projet est actuellement dans sa phase de réalisation. Après un appel d'offres international, l'industriel Atea du groupe Reel a été choisi pour la construction de la cible. Cette construction sera suivie d'une phase de tests hors faisceau en 2005, l'irradiation étant prévue pour 2006. Après l'irradiation et un temps de refroidissement, la cible sera démantelée et analysée en cellule chaude. Le retour d'expérience du projet Megapie est très attendu par la communauté internationale. Le projet Megapie est en effet une des étapes clés de la feuille de route européenne concernant le développement des systèmes hybrides destinés à l'incinération des déchets nucléaires.



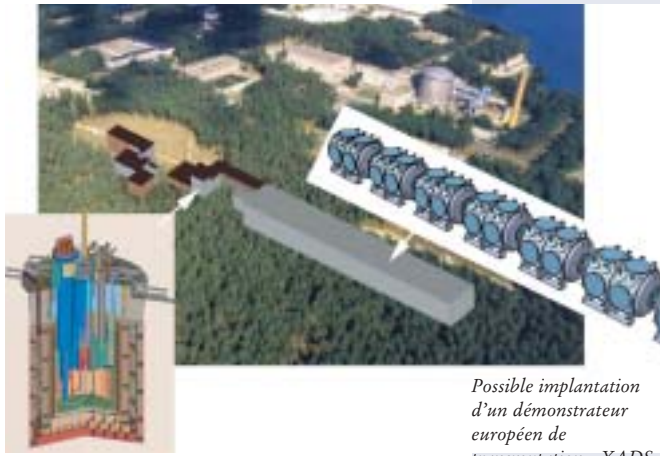
G.S. Bauer, M. Salvatores et G. Heusener, Megapie, a 1 MW pilot experiment for a liquid metal spallation target, *JNM* 296 (2001) 17-33.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION

CNRS/IN2P3: Subatech, LPC Caen. |
CNRS/SC: CECM, LMPGM. |
CEA/DEN: Saclay, Cadarache.



PDS-XADS Le projet européen d'incinération des déchets nucléaires



Possible implantation d'un démonstrateur européen de transmutation « XADS » à Mol (Belgique). © SCK-CEN Mol

Les déchets nucléaires de haute radiotoxicité et de longue durée de vie peuvent être transmutés, dans des flux de neutrons rapides, en produits de fission de courte durée. De nombreux travaux montrent qu'un système sous-critique avec une source externe de neutrons, piloté par accélérateur, est particulièrement attractif, flexible et sûr. L'IN2P3 participe au design d'un démonstrateur «XADS» dont il anime la partie accélérateur.

En application de la loi Bataille sur la gestion des déchets nucléaires, le CNRS a mis sur pied un programme interdisciplinaire de recherche sur l'aval du cycle électronucléaire (Pace). Dans le cadre de l'axe 1 de cette loi qui concerne les procédés de transmutation, il a participé au groupe de travail européen TWG dont la feuille de route préconisait la réalisation d'un réacteur piloté par accélérateur pour incinérer les déchets de très grande et très longue radiotoxicité. En avril 2001, le TWG concluait ses travaux¹ en souhaitant l'élaboration d'un avant-projet détaillé dans le cadre d'une grande collaboration européenne: le programme triannuel PDS-XADS² (*Preliminary Design Study for an Experimental Accelerator Driven System*), subventionné pour moitié (6 M€) par Euratom au 5^e PCRD, a démarré fin 2001. Mené par vingt-cinq partenaires (organismes de recherche, universités et

industriels) de onze pays européens³ et coordonné par Framatome ANP, ce projet est organisé en cinq lots de travaux dont le lot accélérateur est sous la responsabilité du CNRS. Le réseau Adopt (*Advanced Options for Partitioning and Transmutation*) coordonne les travaux du programme Séparation-Transmutation d'Euratom. En octobre 2003, l'atelier international d'Adopt a dressé le bilan d'activités du 5^e PCRD. Pour l'XADS, plusieurs résultats importants ont été présentés: la garantie par l'accélérateur linéaire supraconducteur d'une source fiable de protons de haute intensité pour toutes les configurations envisagées, le progrès des études de différents types de cibles de spallation et des boucles de refroidissement associées, la prise en compte des résultats remarquables de l'expérience Muse pour la mesure de la (sous-)criticité, le concept de sûreté de l'installation, l'identification

de futurs besoins en R&D... On soulignera la proposition du laboratoire belge SCK-CEN d'accueillir sur son site de Mol la version du XADS européen à puissance réduite (projet Myrrha, voir figure). Bénéficiant du travail réalisé sur PDS-XADS, les partenaires européens s'engagent pour le 6^e PCRD dans le design général d'un démonstrateur expérimental. Cette tâche du nouveau projet Eurotrans se situe dans la perspective d'une construction à partir du PCRD suivant. La R&D nécessaire sera le sujet majeur d'Eurotrans. Concrétisant l'engagement fort du CNRS en matière de recherche sur l'énergie, l'IN2P3 jouera un rôle important au sein d'Eurotrans dont il animera deux axes: un ambitieux programme de R&D pour qualifier les prototypes de sections accélératrices en termes de fiabilité et le design de la cible de spallation. En parallèle, le CNRS mène en étroite collaboration avec le CEA un important programme de R&D accélérateur: la construction d'Iphi pour la partie basse énergie et d'une plate-forme cryogénique pour le développement de la section supraconductrice haute énergie.

- 1 - Carlo Rubbia *et al.*, *A European Roadmap for Developing Accelerator Driven Systems (ADS) for Nuclear Waste Incineration*, published by ENEA, Rome 2001, ISBN 88-8286-008-6.
- 2 - Contrat n° FIKW-CT-2001-00179, «PDS-XADS» de la Commission européenne.
- 3 - Allemagne, Belgique, Espagne, France, Grande-Bretagne, Italie, Pays-Bas, Pologne, Portugal, Suède, Suisse.



<http://www.sckcen/sckcen.eu/activities/conf/conferences/20031006/cd/index.html>
Proc. Int. Workshop on P&T and ADS Development, 6-8 October 2003, SCK-CEN Mol.

LABORATOIRES FRANÇAIS DE LA COLLABORATION
CNRS/IN2P3: IPNO, LPSC, Subatech. | CEA/DEN et CEA/DSM. | Framatome ANP. |

Relations externes





84	Valorisation
88	Partenariats
88	Les régions
89	Les universités
90	L'Europe
92	L'action internationale
93	Communication et information scientifique et technique



POUR L'OBJET DE SA RECHERCHE FONDAMENTALE EN PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET EN RAISON DU CARACTÈRE TRÈS SPÉCIFIQUE DE SON BESOIN, L'IN2P3 A DÉVELOPPÉ ET ACQUIS UNE SÉRIE DE COMPÉTENCES POINTUES DANS LES DOMAINES LIÉS À L'INSTRUMENTATION. Ces compétences et savoir-faire font très naturellement l'objet de contrats de transfert de technologie et de prestations de services avec le monde économique. Dans ce domaine, il ne s'agit pas de concurrencer les industries présentes, mais, au contraire, de les enrichir des technologies et savoir-faire développés par la recherche afin d'améliorer leur compétitivité dans un contexte toujours plus concurrentiel.

ORGANISATION DE LA VALORISATION

Pour être efficace, la valorisation de la recherche doit être structurée et organisée; elle doit utiliser des méthodes modernes du «marketing» opérationnel.

Afin de s'inscrire dans cette logique, l'IN2P3 a mis en place un projet global de valorisation. Dans chaque laboratoire, un chargé de valorisation a été nommé. Animé et piloté sur le plan national par la direction de l'Institut, ce réseau a pour mission, avec l'aide ponctuelle des partenaires habituels et d'écoles de management reconnues, de rechercher, d'identifier et de sélectionner les projets potentiels, d'analyser les projets retenus, de rechercher ensuite un industriel potentiel, puis de négocier et de gérer les contrats. Un plan pluriannuel a été développé pour assurer la formation de ce réseau; de nombreux outils d'aide et de marketing sont à sa disposition.

Les chargés de valorisation travaillent étroitement avec les délégations régionales du CNRS pour tous les aspects relatifs aux contrats de licence et à la création d'entreprises. Cette politique porte ses fruits: de nombreux dossiers de valorisation ont été ouverts et les revenus issus de celle-ci ont très significativement augmenté pendant cette période.

GRANDES COMPÉTENCES

Les compétences de l'IN2P3 ont fait l'objet d'un travail de recensement au cours des trois années passées. Elles apparaissent dans *Le Répertoire des compétences du CNRS* à l'adresse: <http://hydre.auteuil.cnrs-dir.fr/dae/competences/>.

Quatre domaines spécifiques émergent plus particulièrement.

Technologie des accélérateurs

Les compétences de l'IN2P3 dans ce domaine sont très anciennes. Ses points forts sont les cavités accélératrices supraconductrices, les coupleurs de puissance pour les cavités, les sources d'ions multichargés et les canons à électrons de grande brillance. La participation active de l'Institut à la réalisation de plusieurs éléments du futur LHC et au projet Iter pour les faisceaux de neutrons intenses, ainsi que la compétitivité internationale reconnue du Ganil (projet Spiral 2) en sont les meilleures illustrations.

SuperNanogan, la plus grande source d'ions à haut état de charge ECR (résonance électronique cyclotronique). © Pantechnik



Dans le domaine de l'hadronthérapie, une convention est en cours avec le centre de protonthérapie d'Orsay pour la réalisation et l'implantation d'un bras isocentrique; deux projets sont également menés avec l'université Claude-Bernard Lyon 1 et le conseil régional de Basse-Normandie pour des centres de traitement par hadronthérapie.

Le partenariat avec la société Pantechnik, filiale d'Eurisys Mesures, s'est poursuivi dans le secteur des sources d'ions. Par ailleurs, de nombreuses prestations dans les domaines de l'implantation et de l'irradiation ionique ont été réalisées pour de grandes entreprises publiques et privées des secteurs optique et spatial.

Électronique

Le savoir-faire de l'IN2P3 dans le domaine des cartes d'acquisition de données et de la conception de circuits intégrés analogiques-numériques est reconnu. Le dépôt d'un brevet dans le secteur de l'échantillonnage haute fréquence par une équipe du LAL a rapidement été suivi par un contrat de développement d'un Asic pour un industriel français du secteur des oscilloscopes. Plusieurs contrats dans ce domaine sont attendus dans les prochains mois.

Le bras actif de la valorisation de l'Institut dans cette matière depuis 1992 est le C4I (Centre de compétences en conception de circuits intégrés), qui a pour vocation de diffuser dans le tissu industriel les savoir-faire des laboratoires et de favoriser l'utilisation de la microélectronique dans les PME-PMI. Plusieurs conceptions de circuits dans les domaines de l'automobile et de l'instrumentation ont été mises en œuvre.

Ces fortes compétences favorisent les développements pour des applications dans la dosimétrie et de l'imagerie médicale. Des brevets ont été déposés dans les secteurs suivants: dispositifs de mesure active du radon par capteur Cmos, procédés de séparation scintillation/Cherenkov pour la dosimétrie de rayonnements ionisants par fibres optiques scintillantes, tomographie haute résolution, dosimétrie temps réel radio transparent pour les procédures radiologiques interventionnelles, sondes de reconnaissance de ganglions sentinelles marqués et cartographie 3D de dose d'irradiation. Certains d'entre eux ont déjà fait l'objet de contrats de licence, plusieurs autres devraient être prochainement signés.

Mesure des rayonnements ionisants de faible activité

Les laboratoires de l'IN2P3 disposent d'équipements et de compétences pointues dans ce domaine, et apportent une qualité de service appréciée par la recherche et le secteur économique.

La majorité des laboratoires de l'Institut fait l'objet d'une qualification technique reconnue par l'Opri (Office pour la protection contre les rayonnements ionisants), par l'intermédiaire d'une comparaison nationale annuelle organisée sous l'égide de cet office et de l'OMS, avec la coordination technique de l'IN2P3. Certains d'entre eux ont même obtenu une accréditation Cofrac.

Un travail de mise en réseau de ces compétences a été conduit, afin de favoriser une qualité de service à l'échelon national. Une étude de marché menée par un cabinet spécialisé a mis en évidence des secteurs de besoin cibles. Par une action des équipes et des chargés de valorisation des laboratoires, elle doit permettre une augmentation sensible du nombre de prestations réalisées.

Grilles de calcul

Plusieurs laboratoires, ainsi que le Centre de calcul de l'IN2P3 participent très activement aux travaux de déploiement de la future grille de calcul LHC *Computing Grid* qui doit permettre le traitement de l'énorme masse de données issues des expériences du futur LHC du Cern. Ce centre d'excellence est reconnu



internationalement pour son expertise opérationnelle et son ouverture pluridisciplinaire dans le domaine des grilles de calcul (biologie et observation de la Terre, pour l'instant). Plusieurs projets de déploiement de grilles thématiques sont actuellement menés avec des partenaires industriels dans les secteurs de la bio-informatique et de la plasturgie. Un fort partenariat avec IBM a été instauré. Le Centre de calcul assure, par ailleurs, de nombreuses prestations dans les domaines de la vidéoconférence, de l'accueil de serveurs Web, du stockage de données et du calcul à la demande.

QUELQUES PARTENARIATS

Les développements réalisés pour la recherche peuvent conduire à des opérations de transfert de technologie et favoriser la création d'entreprise.

Agilium

Un logiciel appelé Cristal a été développé conjointement par le LAPP d'Annecy, l'université de Bristol et le Cern pour assurer le suivi de production d'un calorimètre destiné au futur LHC. Un contrat de licence a été signé avec une start-up du secteur des logiciels EAI (*Enterprise Application Integration*): Agilium. Cette entreprise, créée à cet effet, a été la lauréate Anvar de la création d'entreprise technologique et de nombreux autres prix en 2003. Le fort développement de son activité est porteur d'espoir.

Eldim

Il s'agit d'une collaboration impliquant trois partenaires: le Centre de lutte contre le cancer de Caen (Centre François-Baclesse), la société Eldim basée à Caen et le LPC de Caen. Cette collaboration a permis le dépôt de deux brevets:

- le premier concerne un nouveau dosimètre équivalent tissu capable de mesurer les doses délivrées au patient au pour-cent; le lancement commercial de l'appareil est en cours;
- le second concerne un capteur capable de caractériser en quelques minutes un faisceau de radiothérapie (cartographie de la dose délivrée); un prototype a permis de valider le concept de l'imageur; le lancement commercial est en cours pour un marché estimé à plus de cent millions d'euros.

LE PRIX DE LA VALORISATION

Afin de reconnaître la qualité des travaux entrepris, l'IN2P3 décerne chaque année trois prix de la valorisation dans les domaines suivants:

- transfert de technologie/dépôt de brevet;
- prestation de service;
- création d'entreprise.

Les critères de sélection retenus pour ces prix sont l'originalité technique, l'aspect novateur, l'intérêt pour la société civile et le chiffre d'affaires obtenu ou potentiel.

Les travaux menés par J.-M. Fontbonne du LPC de Caen et son souci constant de valoriser ses connaissances de recherche dans le domaine appliqué avec la société Eldim lui ont valu de recevoir le prix de la valorisation 2002 de l'IN2P3 pour le transfert de technologie.

Partenariats les régions



Éric Suraud

LA CRÉATION DE L'IN2P3 EN 1971 A PERMIS DE REGROUPER, DANS UN INSTITUT UNIQUE, LES FORCES EN PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET DES PARTICULES, AU NIVEAU DU CNRS ET DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR.

L'existence d'une telle structure nationale est essentielle dans le cadre de ce champ disciplinaire particulier où les programmes expérimentaux impliquent un nombre important de laboratoires répartis sur toute la planète. L'échelon national de structuration représenté par l'IN2P3 permet à la France de participer à ces collaborations de manière concertée, et donc particulièrement efficace et reconnue. Le potentiel scientifique de l'IN2P3 est regroupé dans un nombre limité de laboratoires de grande taille, répartis sur tout le territoire. Ces derniers, liés par de nombreuses collaborations aux niveaux national et international, sont également en étroite relation avec les tissus scientifiques locaux. L'immense majorité des laboratoires de l'IN2P3 sont en effet des UMR et entretiennent donc des relations privilégiées avec leurs universités partenaires. Cette implantation se manifeste également par une participation importante à des initiatives scientifiques purement locales, en relation avec les régions et, de manière plus générale, avec les collectivités locales.

L'intervention de l'IN2P3 dans les régions se décline à plusieurs niveaux. Ses laboratoires sont ainsi impliqués dans de nombreux projets, comme des accélérateurs à vocation médicale, dans plusieurs régions de France. On mentionnera, en particulier, la participation de l'Institut aux grands projets français d'hadronthérapie, portés par la communauté médicale et fortement soutenus par les régions. D'autres programmes importants sont également en cours de gestation ou de réalisation, en particulier au niveau des applications des méthodes nucléaires à divers problèmes d'importance sociétale, notamment dans le domaine biomédical. Ces projets impliquent, bien sûr, des collaborations fructueuses entre les laboratoires de l'Institut et des laboratoires de différents champs disciplinaires, et ce sur une base locale. Par ailleurs, les chercheurs de l'IN2P3 sont très impliqués dans les problèmes liés à la diffusion de la culture scientifique. L'IN2P3 a en effet mis en place dans ses laboratoires un réseau de correspondants qui travaillent sur ces questions en direction des jeunes, notamment des lycéens. Cette dynamique, pilotée au niveau national, ne prend cependant tout son sens qu'au niveau local où des équipes de chercheurs et d'enseignants issus de différents horizons travaillent ensemble pour mettre en place des actions spécifiques. L'IN2P3 allie donc à sa forte composante nationale une composante locale très dynamique en relation étroite avec des partenaires scientifiques d'origines variées.

Partenariats

Les universités



Éric Suraud

L'IN2P3 ENTRETIENT TOUT NATURELLEMENT DES LIENS TRÈS FORTS AVEC LES UNIVERSITÉS ET L'ENSEIGNEMENT.

Le décret de création de l'Institut, en 1971, consolidait en effet, au sein de l'IN2P3, l'ensemble des moyens du CNRS et de l'enseignement supérieur, pour les champs disciplinaires concernés par l'Institut. Ces liens historiques se sont vus encore renforcés par la création des

UMR à partir de 1995. Aujourd'hui, tous les laboratoires de l'IN2P3, à l'exception de quelques unités à vocation très spécifique, bénéficient ainsi du statut d'UMR. Leur fonctionnement résulte donc de procédures élaborées par le CNRS, le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et les universités et grandes écoles. Dans les universités et écoles où sont implantées des unités de l'IN2P3, ce dernier est donc largement présent au niveau de tous les cycles de formation universitaire, au travers naturellement de ses enseignants-chercheurs, mais également de ses chercheurs et personnels techniques dont certains assurent des activités de formation. Les relations entre les universités et l'IN2P3 ne se réduisent cependant pas, loin s'en faut, aux seules interventions individuelles des chercheurs de l'Institut dans les cursus universitaires. Ces dernières années, l'IN2P3 est également intervenu, en étroite relation avec les universités, au niveau d'opérations de recherche à caractère régional et, d'un point de vue national, à celui du contenu des programmes d'enseignement universitaire.

Le partenariat entre l'IN2P3 et les universités se concrétise en effet par de nombreuses actions menées en commun au niveau de la recherche. Ainsi, plusieurs opérations de construction d'accélérateurs permettant, entre autres, des applications non nucléaires ont été conduites ces dernières années. Elles associent l'IN2P3 et certaines universités de province ou de la région parisienne, et s'inscrivent même le plus souvent dans une dynamique plus large de partenariat avec les régions et, plus généralement, avec les collectivités locales.

Enfin, l'IN2P3 a participé activement au travail de réflexion mené par le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et la Société française de physique sur les contours des programmes de physique dans le cadre de la réforme LMD. Un groupe de travail a ainsi proposé un programme de l'« honnête physicien », qui permettrait de donner à tous les étudiants de niveau L3 une base commune de savoir. D'un point de vue opérationnel, la physique subatomique n'est représentée que dans un nombre limité d'universités en France, comme c'est d'ailleurs le cas pour d'autres disciplines. Pour pallier ce problème, l'IN2P3 travaille donc à organiser des échanges interuniversitaires, avec le soutien de ce ministère. L'idée consiste à échanger des enseignements entre deux universités « voisines », ce qui permettrait de couvrir, dans chaque structure, un champ disciplinaire plus riche.



LES ACTIONS STRUCTURANTES DE L'INSTITUT AVEC SES PARTENAIRES EUROPÉENS SE SONT FORTEMENT DÉVELOPPÉES DURANT LA PÉRIODE 2001-2003. LA PHYSIQUE DES PARTICULES EST SURTOUT STRUCTURÉE AUTOUR DU CERN, TANDIS QUE, POUR LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET LES ASTROPARTICULES, LES ACTIONS DE COOPÉRATION SONT RÉPARTIES SELON TROIS AXES PRINCIPAUX :

- faire aboutir les programmes engagés dans le 5^e PCRD et préparer le 6^e PCRD;
- établir des accords bilatéraux entre laboratoires ou organisations de recherche européens en vue de la construction ou de la mise en œuvre de nouveaux instruments;
- développer la coordination au sein de Nupecc (Nuclear Physics European Collaboration Committee) et d'Appec (Astroparticle Physics European Coordination).

5^E ET 6^E PCRD

La physique nucléaire, l'énergie et l'aval du cycle électronucléaire

Le réseau Euridice a rassemblé des groupes de théoriciens autour de la physique des hadrons et de leurs constituants.

Précurseur des futurs instruments I3 (*Integrated Infrastructures Initiatives*) du 6^e PCRD, le réseau Finuphy (*Frontiers in Nuclear Physics*), financé dans le cadre du 5^e PCRD, a regroupé une douzaine de laboratoires et a permis le financement :

- de l'accueil d'équipes européennes au sein du réseau d'installations européennes comprenant le Ganil et le Vivitron pour la France;
 - de plusieurs RTD (*Research & Technical Development*), parmi lesquels la *Conceptual Design Study of Eurisol* et plusieurs autres liés à la recherche sur les sources d'ions et sur la production, la séparation et le stockage des faisceaux d'ions radioactifs;
 - d'un réseau en physique hadronique sur la conception de multidétecteurs d'électrons et de photons.
- L'ensemble de la physique nucléaire européenne a obtenu un soutien financier de 23 M€, dans le cadre du 5^e PCRD, dont environ 15 % ont été affectés à l'IN2P3.

La préparation du 6^e PCRD a abouti à la proposition de :

- deux I3, l'une en structure et dynamique nucléaire (Eurions), dont le coordonnateur scientifique est un physicien de l'IN2P3, et l'autre en physique hadronique (HP);
 - une étude détaillée (*Design Study*) du projet Eurisol avec une forte participation des équipes de l'IN2P3.
- Dans le cadre du traité Euratom et du 5^e PCRD, les radiochimistes et physiciens de l'IN2P3 ont contribué au réseau Adopt (matériaux pour combustibles, cible de production Megapie, réacteurs innovants, neutronique avec l'expérience Muse, les données nucléaires avec le programme N-TOF et Hindas).

Enfin, il faut noter la contribution majeure des équipes « R&D accélérateurs » au projet phare du programme fission d'Euratom, appelé X-ADS, projet de transmutation des déchets utilisant le couplage d'un accélérateur de forte puissance à un réacteur en régime sous-critique. Pour la préparation au 6^e PCRD, l'ensemble de ces thématiques a été regroupé autour du programme cadre Eurotrans.

Les astroparticules

L'IN2P3 a joué un rôle important dans le démarrage du projet I3 Ilias (*Integrated Large Infrastructures for Astroparticle Science*). Ilias a regroupé plusieurs réseaux dans le domaine des astroparticules (laboratoires souterrains, matière noire, masse du neutrino, antennes gravitationnelles et théorie), trois projets de RTD (techniques de basse radioactivité, désintégration double bêta pour son-

der la masse du neutrino, techniques avancées de détection des ondes gravitationnelles) et un réseau de coordination des laboratoires souterrains. Par ailleurs, l'IN2P3 et Appec (voir ci-dessous) ont soutenu le *Design Study* KM3net (un télescope neutrino de surface effective de 1 km²) avec une forte participation française (équipes Antares).

ACCORDS DE COLLABORATION EN VUE DE LA CONSTRUCTION OU DE LA MISE EN ŒUVRE DE NOUVEAUX INSTRUMENTS AUPRÈS DES INSTALLATIONS EUROPÉENNES

La physique nucléaire

Les années 2001-2003 ont vu la pleine exploitation du détecteur européen Euroball II, avec des campagnes de mesures auprès du Vivitron (Strasbourg) et de Legnaro (Padoue, Italie). Le démarrage de Spiral1 au Ganil en 2001 a permis de réaliser et de financer, dans le cadre de collaborations européennes, les deux nouveaux équipements expérimentaux de cette installation, le spectromètre à grand angle solide Vamos (France, Allemagne, Royaume-Uni) et le spectromètre de photons à haute résolution Exogam (France, Royaume-Uni, Finlande, Italie, Suède, Hongrie).

En 2002, une collaboration européenne importante regroupant dix pays (dont la France) et plus d'une centaine de physiciens s'est formée autour de la conception et de la réalisation, après Exogam et Euroball, d'un multidétecteur de photons à haute résolution de troisième génération. Ce projet a pris le nom d'Agata.

Des accords bilatéraux de collaboration et d'échanges de chercheurs ont été signés entre le Ganil et le GSI (Allemagne) et entre l'IN2P3 et l'INFN pour la production d'une cible à spins gelés (Hydile).

Les astroparticules

En 2001, la société civile franco-italienne EGO a été créée pour gérer le site et le fonctionnement de l'antenne Virgo qui constitue l'un des TGE (très grands équipements) du CNRS. Le LEA (Laboratoire européen associé) franco-allemand fondé en 2001 autour de l'expérience Hess a permis l'échange de plusieurs chercheurs et de post-docs.

PARTICIPATION ACTIVE AUX TRAVAUX DES COMITÉS EUROPÉENS DE COORDINATION

Associé à l'ESF, Nupecc est un comité qui constitue le conseil scientifique de la discipline sur le plan européen. Quinze pays et vingt-deux institutions y sont représentés, dont l'IN2P3/CNRS.

Les faits marquants de cette période sont la publication de trois rapports: 1) *Impact, Applications and Interdisciplinary Aspects of Nuclear Science in Europe*, 2) *Interdisciplinary Use of Nuclear Physics Large Scale Facilities* et 3) *Perspectives for Nuclear Physics Research in Europe for the Next Decade and Beyond*. Ce dernier est le plan à long terme de la discipline pour la prochaine décennie où les priorités de l'IN2P3 sont fortement représentées.

Par ailleurs, l'IN2P3 a joué un grand rôle dans la formation en 2001 du comité Appec, qui réunit les principales agences européennes gérant des programmes d'astroparticules et dont le but est la coordination au niveau de l'Europe. Aidé par son conseil scientifique, ce comité a émis plusieurs recommandations qui ont permis de mieux structurer l'espace européen des astroparticules. Il a été le noyau de formation des propositions réussies d'Ilias et de KM3net à l'Union européenne. Ce comité souhaite établir une feuille de route européenne.

Partenariats

L'action internationale



Éliane Perret

DE 2001 À 2003, L'IN2P3 A CONSOLIDÉ LES MOYENS MIS EN PLACE POUR SOUTENIR LES COOPÉRATIONS MULTILATÉRALES ET OUVERT SES PROGRAMMES SCIENTIFIQUES À UNE PLUS LARGE COMMUNAUTÉ INTERNATIONALE.

Une autre quinzaine de programmes internationaux de coopération scientifique ont été soutenus durant cette période, portant à soixante-quinze le nombre d'actions initiées depuis la création de ce type de coopération plébiscité pour sa souplesse et la richesse des échanges qui en résultent.

Les pays candidats à l'Union européenne ont bénéficié très largement des programmes ouverts, facilitant leur participation aux projets d'initiative d'infrastructure intégrée ou de réseaux proposés au titre du 6^e programme cadre, mais aussi aux groupements de recherche européens que l'IN2P3 soutient dans les domaines des ions lourds aux énergies ultrarelativistes, de la structure nucléaire, des détecteurs du collisionneur linéaire ou des neutrinos.

La signature, en décembre 2003, de la convention de création d'un groupement de recherche international rassemblant des laboratoires marocains, français et suédois autour d'Atlas, expériencephare du LHC, a formalisé une collaboration de très haut niveau dans le domaine des composants ultimes de la matière, des lois qui la régissent et de la structure spatio-temporelle de l'Univers. Ce type de collaboration permet de dépasser les disparités entre pays, de favoriser leur développement scientifique, technique et économique, et, à travers le mélange des cultures, de faire avancer la science et de rapprocher les hommes.

Des conventions financières passées par l'IN2P3 avec d'autres pays ont également permis d'apporter un soutien spécifique à la construction d'appareillage, telle la convention avec les Universités de Berne et de Neuchâtel (Suisse) qui permet à l'IReS d'accueillir des chercheurs russes pour contribuer à l'assemblage des éléments du trajectographe d'Opéra.

L'action internationale de l'IN2P3 s'étend également en Asie, plus particulièrement au Viêt Nam, où une contribution au laboratoire d'études des rayons cosmiques de Hanoi permet aux chercheurs vietnamiens de participer efficacement aux travaux de la collaboration Auger sur les rayons cosmiques aux énergies extrêmes.

LA DIMENSION INTERNATIONALE DE L'IN2P3 EN 2003

- 68 chercheurs étrangers (post-docs ou confirmés) : 380 mois d'accueil = 802 500 €
- 9 conventions bilatérales d'échanges, 16 pics, 2 actions spécifiques, 1 jumelage, 2 LEA, 3 GDRE/GDRI : 300 dossiers = 165 mois = 565 000 €
- Ressources propres contrats communautaires : 675 000 €

La Cellule de logistique internationale poursuit son action pour résoudre au mieux les questions liées au transport des marchandises entre les laboratoires et les sites d'expérimentation, et utilise des procédures douanières simplifiées qui réduisent significativement le coût des opérations.

Les formulaires à disposition sur le site <http://logistique.in2p3.fr> facilitent le dialogue avec les utilisateurs et permettent d'assurer dans les meilleures conditions tout échange de matériel entre un laboratoire et son partenaire étranger, tout transport national, intra- ou extracommunautaire, tout affrètement particulier ou toute opération d'import-export.

TRANSPORTS 2003

840 opérations pour des marchandises d'une valeur de 20 M€

Communication et information scientifique et technique



Dominique Armand,
Nathalie Huchette
et Dominique Jarroux-Déclais

LA COMMUNICATION DE L'INSTITUT: MISSIONS ET RÉALISATIONS

Le bureau de la communication a deux missions essentielles et étroitement liées, qui doivent être conduites en synergie:

- une mission de communication qui consiste à favoriser la circulation des informations au sein de l'Institut afin de renforcer la cohésion interne et à promouvoir les orientations stratégiques, les disciplines et travaux de recherche de l'Institut;
- une mission d'information scientifique et technique qui consiste à effectuer une veille scientifique sur les travaux et résultats des laboratoires, et à leur apporter le savoir-faire des communicants dans le domaine de la vulgarisation scientifique.

Le bureau a ainsi mené à bien un grand nombre d'actions, dont quelques-unes parmi les plus marquantes sont décrites ci-après.

Les publications

Premier département du CNRS à le faire, l'Institut publie depuis février 2001 une lettre électronique mensuelle, *Info express*, en direction de tout le personnel. Cette lettre est alimentée par des informations en provenance de la direction et des laboratoires de l'Institut et relaye nombre d'informations en provenance du CNRS et de l'externe. Elle favorise réellement le regroupement et la circulation rapide d'informations de tous ordres, dont beaucoup ne souffrent pas d'attendre la sortie d'une lettre trimestrielle, et permet en outre de susciter la contribution des agents à divers événements. Le nombre de ses abonnés ne cesse de croître.

La traditionnelle *Lettre des départements scientifiques du CNRS* est dédiée depuis lors à des articles de fond et diffusée plus largement. Sa publication dépend de l'actualité, ce qui permet de mieux répondre aux besoins de l'Institut. Ont ainsi été publiés: en 2002, le plan d'action 2002-2005 de l'Institut et, en 2003, un compte rendu des Journées d'instrumentation et prospective de l'IN2P3 et du Dapnia de 2002.

Une plaquette institutionnelle constituée de 14 feuillets libres insérés dans une pochette et s'adressant essentiellement aux étudiants, à la communauté scientifique et aux industriels a été éditée en 2001 en versions française et anglaise.

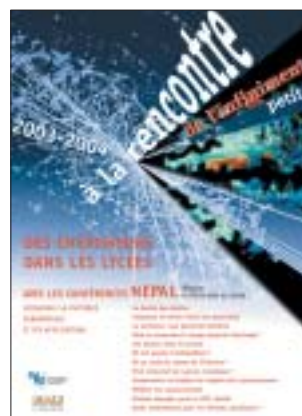
La communication en direction des journalistes

Le bureau de la communication travaille en lien étroit avec le bureau de presse du CNRS, et parfois d'autres organismes, à la réalisation de communiqués et dossiers de presse portant sur des résultats scientifiques très marquants et à l'organisation de voyages de presse. Il s'attache aussi à tisser des liens privilégiés avec les journalistes scientifiques, en étant à leur écoute, en leur fournissant des dossiers de fond et/ou en les mettant en contact avec les bons interlocuteurs. Il participe également aux publications du CNRS destinées aux médias (CNRS-Info puis CNRS-Thema) en proposant des articles.

La communication en direction des jeunes et du public

L'Institut contribue d'une manière informelle et en dehors du cadre des programmes scolaires à l'éducation scientifique des jeunes, en proposant aux lycées des conférences gratuites, les conférences Nepal, données par des scientifiques de l'Institut. L'objectif est d'ouvrir les jeunes au monde de la recherche. De 2001 à 2003, six nouvelles conférences ont été organisées, à la réalisation desquelles le bureau a pris part en apportant conseils pédagogiques et avis sur le contenu et la présentation des transparents, et soutien logistique.

Un réseau d'experts accessible sur le web et une foire aux questions ont été créés en 2001 par le bureau pour répondre aux questions des étudiants dans le cadre de leur Tipe dont les thèmes pour 2001-2002 étaient très proches des thématiques de l'IN2P3. Depuis, ce réseau répond aux questions de tous les publics.



Affiche
de promotion
des conférences
Nepal, année
2003-2004.

En 2003, le nouveau concept de grille de calcul a été présenté à la Cité des sciences et de l'industrie dans le cadre de la fête de l'Internet. Le bureau a également apporté son concours à l'élaboration d'une plaquette grand public sur l'expérience Alice et des plaquettes sur l'énergie et le cancer éditées par le CNRS.

La communication internationale

En 2002, le bureau a mis en place les premiers outils de communication d'ApPEC, la coordination européenne pour les astroparticules (logo, charte graphique et plaquette de présentation). Enfin, la responsable du bureau est membre d'Interaction, un nouveau groupe de communication qui rassemble les responsables de communication des instituts et grands laboratoires mondiaux de physique des hautes énergies, et dont l'objectif est de faire émerger une communication globale dans ce domaine.

LA COMMUNICATION DES LABORATOIRES

L'Institut possède un réseau de correspondants communication chargés des relations avec le bureau de la communication et de la réalisation d'actions locales. Nombre d'entre eux s'investissent beaucoup dans la fête de la Science, développant des trésors d'imagination pour attirer toujours plus de public (conférences attractives, petites expériences à faire soi-même, expositions). Certains ont aussi en charge l'organisation de congrès, conférences, journées de prospective ou inaugurations.

Comme initiative singulière, on peut citer:

- le site Internet intitulé « Monsieur tout-le-monde rencontre la radioactivité », conçu en 2001 par Christian de la Vaissière (LPNHE) qui ne cesse depuis de l'enrichir de nouvelles rubriques. Ce site, qui expose les diverses applications de la radioactivité et des réactions nucléaires, peut intéresser les internautes les moins avertis comme les plus éclairés;
- l'exposition « La radioactivité, une facette de la nature » organisée en 2003 en Basse-Normandie, à l'initiative du Ganil et de la SFP et avec la participation active du LPC Caen, autour de laquelle de nombreuses manifestations ont été préparées (bar des sciences, conférences, accueil de classes...).

L'Institut dispose également de correspondants Nepal chargés de promouvoir ces conférences au niveau régional et de mobiliser des conférenciers. Des conférences grand public sont parfois organisées par les laboratoires: elles ont en général un franc succès.



Journée « Portes ouvertes » le 19 octobre 2003 au CNEBG (plus de 700 visiteurs). © CNRS/IN2P3



Journées « Portes ouvertes » en 2002 au LAPP. © CNRS/IN2P3

LE MUSÉE ET LES ARCHIVES DE L'INSTITUT DU RADIUM, CURIE ET JOLIOT-CURIE

Les activités du musée Curie au cours des années 2001, 2002 et 2003 se sont développées autour de ses missions: conservation, gestion et valorisation des collections, information, documentation et mise à disposition des ressources historiques, conseil et orientation des consultants et des publics professionnels, et, enfin, accueil des visiteurs du musée.

Ces années ont été marquées par la réorganisation du service des archives permettant la création d'un centre de ressources historiques qui regroupe les archives Curie et Joliot-Curie et celles de la Fondation Curie-Laboratoire Pasteur, dont le fonds Claudius-Regaud. Le musée Curie se positionne ainsi comme lieu de référence en France pour toute personne s'intéressant à l'histoire de la radioactivité et du nucléaire, d'une part, et de la cancérologie, d'autre part, l'Institut Curie ayant été le berceau de ces deux grands champs scientifiques.

Le personnel, les collections et les ressources historiques ont largement contribué à la réalisation de supports audiovisuels ou multimédias et de manifestations culturelles, propres ou en collaboration. Le musée Curie a notamment participé en 2003 à la commémoration du centenaire du prix Nobel de physique de Pierre et Marie Curie.

LA BASE DOCUMENTAIRE DE PUBLICATIONS

Le réseau des documentalistes a pour mission de mener une politique documentaire commune, fondée sur la mutualisation des outils, tout en préservant l'autonomie des bibliothèques. Deux objectifs ont conduit ses actions, qui tiennent compte de l'importance croissante des accès aux ressources électroniques pour les chercheurs:

- inscrire la base des publications dans le processus «Open Access» (archives ouvertes: dépôt et consultations libres et gratuits de documents) et assurer ainsi une visibilité plus importante de la production scientifique de l'IN2P3. Un travail en collaboration avec le Centre pour la communication scientifique directe (CCSD) permettra la mise en place en 2004 de démocrite@HAL, une nouvelle base des publications qui fera partie de HAL (Hyper article en ligne), la base multidisciplinaire internationale du CNRS, avec une interconnection vers ArXiv, base d'archives ouvertes de référence dans les thématiques de l'IN2P3. Le processus est déjà en cours, les thèses étant transférées en texte intégral sur la base TEL (Thèse en ligne). La production scientifique de l'IN2P3 est transférée sur PubliCnrs et les données bibliographiques le sont sur la base internationale Inis (base de données de l'Agence internationale de l'énergie atomique) par l'intermédiaire du CEA;
- proposer une nouvelle organisation des fonctions. Il est prévu de compléter l'activité du réseau par la création en 2004 d'une cellule de documentation électronique.

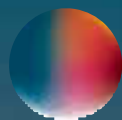
En parallèle, plusieurs membres de Démocrite participent aux réseaux CNRS multidisciplinaires, concernant notamment les relations entre le CNRS et les universités pour l'accès aux périodiques électroniques.



- Site Nepal : <http://www.in2p3.fr/page/communication/grandpublic/nepal/nepalf.htm>
- Site Experts : <http://www.in2p3.fr/page/communication/grandpublic/comgpublicf.htm>
- Site Radioactivité : <http://www.laradioactivite.com/>
- Site ArXiv : <http://fr.arxiv.org/>

Programmes et structures

96	Les programmes
101	Les chiffres
102	La direction
103	Les laboratoires



Les programmes



PHYSIQUE DES PARTICULES

Programmes	Détecteurs	Accélérateurs ou sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations françaises ¹
Tests du Modèle standard ; au-delà du Modèle standard				
La physique des collisions électron-positon	DELPHI	LEP	CPPM, IPNL, IReS, LAL, LPSC, PCC, LPNHE	CEA/Dapnia
	ALEPH			
	L3			
	FLC	non déterminé	IReS, LLR, LAL, LPC - Clermont, LPNHE	CEA/Dapnia
La physique des collisions proton-proton	ATLAS	LHC	CPPM, LAL, LPSC, LAPP, LPC - Clermont, LPNHE	CEA/Dapnia
	CMS			
La physique des collisions électron-proton	H1	HERA	CPPM, LAL, LLR	CEA/Dapnia
La physique des collisions proton-antiproton	D0	Tevatron	CPPM, IPNL, IReS, LAL, LPNHE, LPSC, LPC - Clermont	CEA/Dapnia

Violations de symétrie

Violation de CP dans le système des mésons B	BABAR	SLAC	LAL, LAPP, LPNHE, LLR	CEA/Dapnia
Violation directe de CP dans le système des mésons K	NA48	SPS	LAL	CEA/Dapnia
Violation de CP dans le système des mésons B	LHCb	LHC	CPPM, LAL, LPC - Clermont, LPNHE, LAPP	

¹ La plupart de ces expériences se déroulent dans le cadre de très grandes collaborations internationales.

Il n'est pas possible, dans ce cadre, de citer toutes les institutions étrangères impliquées.



PHYSIQUE HADRONIQUE ET NUCLÉAIRE

Programmes

Détecteurs

Accélérateurs

Laboratoires IN2P3

Collaborations

La structure des hadrons

Facteurs de forme faibles du nucléon	PVA4	MAMI B	IPNO	Université de Mayence
Facteurs de forme faibles du nucléon et violation de parité	G0	TJNAF	LPSC, IPNO	États-Unis
Diffusion Compton virtuelle	DVCS		LPC - Clermont, LPSC, IPNO	CEA/Dapnia
Structure du proton	H1	HERA	(voir Physique des particules)	

Les hadrons dans le milieu nucléaire

	HADES	GSI	IPNO	Allemagne, Espagne, Italie, Chypre, Pologne, République tchèque, Russie, Slovaquie
--	-------	-----	------	--

Les mécanismes de production et d'interaction des hadrons

Photoproduction de mésons	GRAAL	ESRF	IPNO, LPSC	Italie, Russie
---------------------------	-------	------	------------	----------------

Structure nucléaire

Interactions neutron-proton dans le noyau superfluidité effets collectifs	EUROBALL	VIVITRON	IReS, CSNSM, IPNO, LPSC	Europe
	DIAMANT			
	SAPHIR			
	BBS	AGOR	IPNO	Hollande

Noyaux exotiques

Degré de liberté d'isospin du champ moyen Matière nucléaire et noyaux loin de la stabilité Nucléosynthèse stellaire	LISE	GANIL/SPIRAL	CENBG, CSNSM GANIL, IPNL, IPNO IReS, LPC - Caen	Europe
	SPEG			
	DEMON			
	MUST			
	EXOGAM			
	VAMOS			
	MISTRAL	ISOLDE	CSNSM IPNO	Cern Cern
	COMPLIS			
		ALTO	IPNO	

Collisions nucléaires

Physique à la barrière de Coulomb	ICARE CHARISSA	VIVITRON GANIL	IReS, LPSC, LPC - Caen, LPC - Clermont, Subatech	
Thermodynamique de la matière nucléaire, fragmentation	INDRA FOPI	GANIL GSI	IPNO, LPC - Caen LPC - Clermont	

Ions lourds relativistes

Recherche du plasma quark-gluon	ALICE	LHC	IPNL, IPNO, IReS, LPC - Clermont, Subatech	Cern
	NA60	SPS	LPC - Clermont, IPNL	Cern
	STAR	RHIC	Subatech, IReS, LLR, IPNO, LPC - Clermont	
	PHENIX			



NEUTRINOS ET ASTROPARTICULES

Programmes	Détecteurs	Sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations
Neutrino				
La double désintégration bêta	NEMO	LSM	CENBG, IReS, LAL, LPC - Caen	CFR (CNRS/Insu)
Les oscillations de neutrinos	OPERA	CERN-GRAN SASSO	IPNL, IReS, LAL, LAPP	

Rayons cosmiques

Recherches de gamma	CAT - CELESTE	Thémis ¹	CENBG, LPNHE, PCC, GAM, LLR	CEA/Dapnia; CESR (CNRS/Insu); GPF - Perpignan, République tchèque
	HESS	Namibie	GAM, LLR, LPNHE, PCC	Europe
	GLAST	Espace	CENBG, GAM, LLR	CEA; Collaboration internationale
Antimatière	AMS	ISS	LAPP, LPSC, GAM	Observatoire de Grenoble Collaboration internationale
Cosmiques de très haute énergie	Observatoire Auger	Argentine, États-Unis	IPNO, LAL, LPNHE, PCC	Observatoire de Besançon, ENS Télécom Collaboration internationale
	EUSO	ISS	LAPP, LPSC, PCC	Collaboration internationale
Neutrinos	ANTARES	Toulon	CPPM, IReS	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
Anisotropies du rayonnement à 3K	PLANCK	Point de Lagrange L2	LPSC, LAL, PCC	IAP, IAS (CNRS/Insu); CRTBT (CNRS/SPM); CEA/Dapnia; Collaboration internationale
Recherche de supernovæ de type Ia	SUPERNOVÆ	Espace	CPPM, IPNL, LPNHE	LAM (CNRS/Insu); Collaboration internationale
	SNAP/JDEM	Espace	LPNHE, IPNL, CPPM	LAM (CNRS/Insu)

Ondes gravitationnelles

	VIRGO	Cascina (Italie)	IPNL, LAL, LAPP	Italie
--	-------	------------------	-----------------	--------

Astrophysique nucléaire et neutrinos solaires

Micrométéorites		Orsay (PAPAP) Bordeaux (Van de Graaf)	CSNSM, IPNO	
-----------------	--	---	-------------	--

¹ Site aménagé avec le soutien de EDF et de la région Languedoc-Roussillon.



RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES

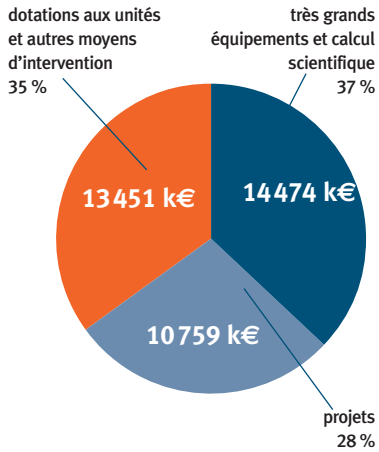
Programmes	Détecteurs	Accélérateurs ou sites	Laboratoires IN2P3	Collaborations
Aval du cycle électronucléaire				
Recherche sur l'aval du cycle électronucléaire	MUSE Données nucléaires dont N-TOF	CADARACHE GSI CERN, KVI, LLN	CENBG, CSNSM, IPNL, IPNO IPNO, IReS, CENBG LPC - Caen, Subatech	GDR Gedéon CEA/Dapnia
Migration des déchets nucléaires dans les matériaux liquides et solides	MEGAPIE	PSI	Subatech, IReS, LPC - Caen, CSNSM IPNO, IReS, Subatech	GDR Practis CNRS (IN2P3 + SC) CEA, ANDRA, EDF
Interaction faisceaux-matière				
Agrégats métalliques et gazeux		TANDEM... Microsonde JANNUS	IPNO, IPNL, CENBG, CSNSM	CNRS/SPM - SPI CEA/DEN
Caractérisation des matériaux et implantation ionique Interactions ions lourds-plasma		GANIL/CIRIL... GSI		
Interface avec la biologie et la médecine				
Imagerie médicale Détecteurs pour l'imagerie médicale	TOHR, POCl		IPNO CPPM, IPNO, IReS, LPC - Caen, LPSC	
Séquençage de l'ADN Irradiation de la cellule		Microsonde nucléaire AIFIRA	IPNO CENBG	CNRS
Grid pour la biologie		GATE	LPC - Clermont, IPNL, IReS, LPSC	CEA, Inserm; Europe, États-Unis, Canada, Corée
Spectrométrie de masse par accélération				
		Tandétron	CSNSM	Europe

Les chiffres

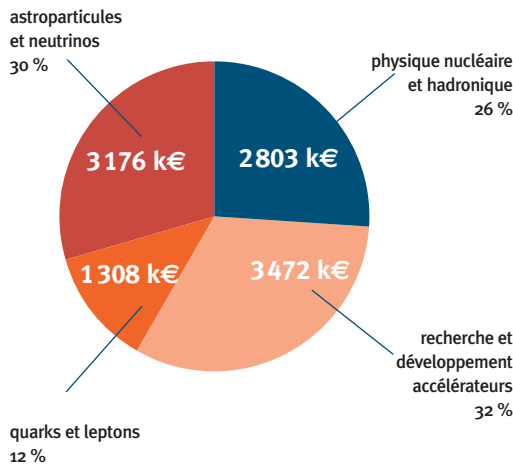


LE BUDGET 2005

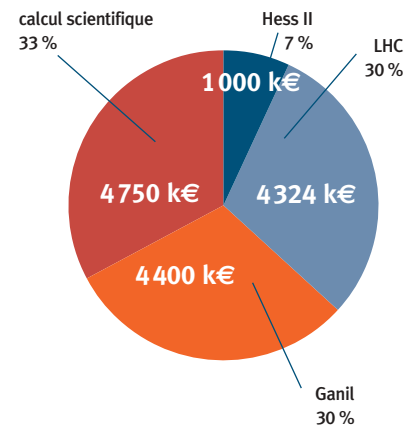
Autorisations d'engagement



Projets

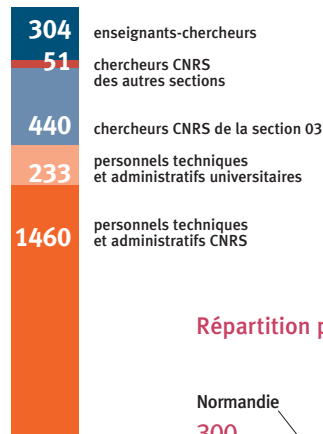


Très grands équipements et calcul scientifique

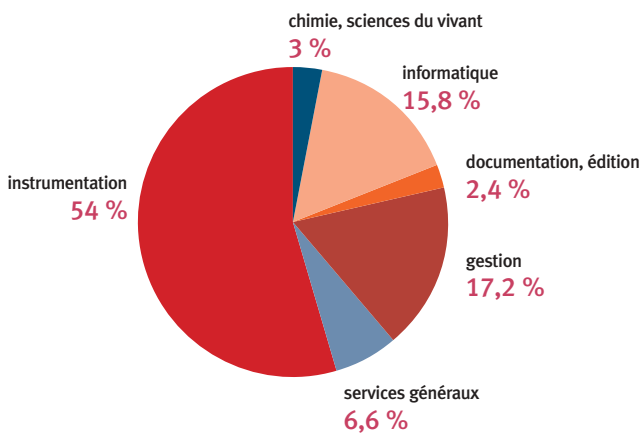


LES PERSONNELS EN 2005

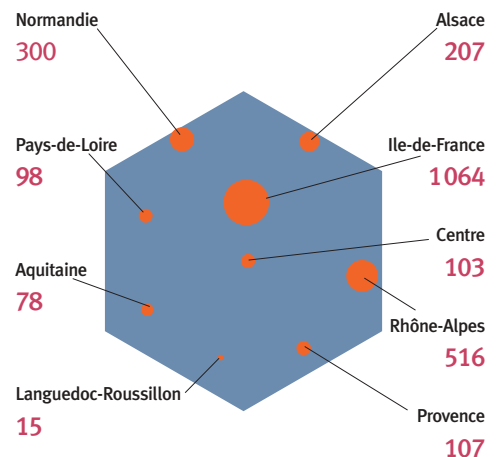
Effectifs totaux des personnels permanents des laboratoires de l'IN2P3 : 2 488



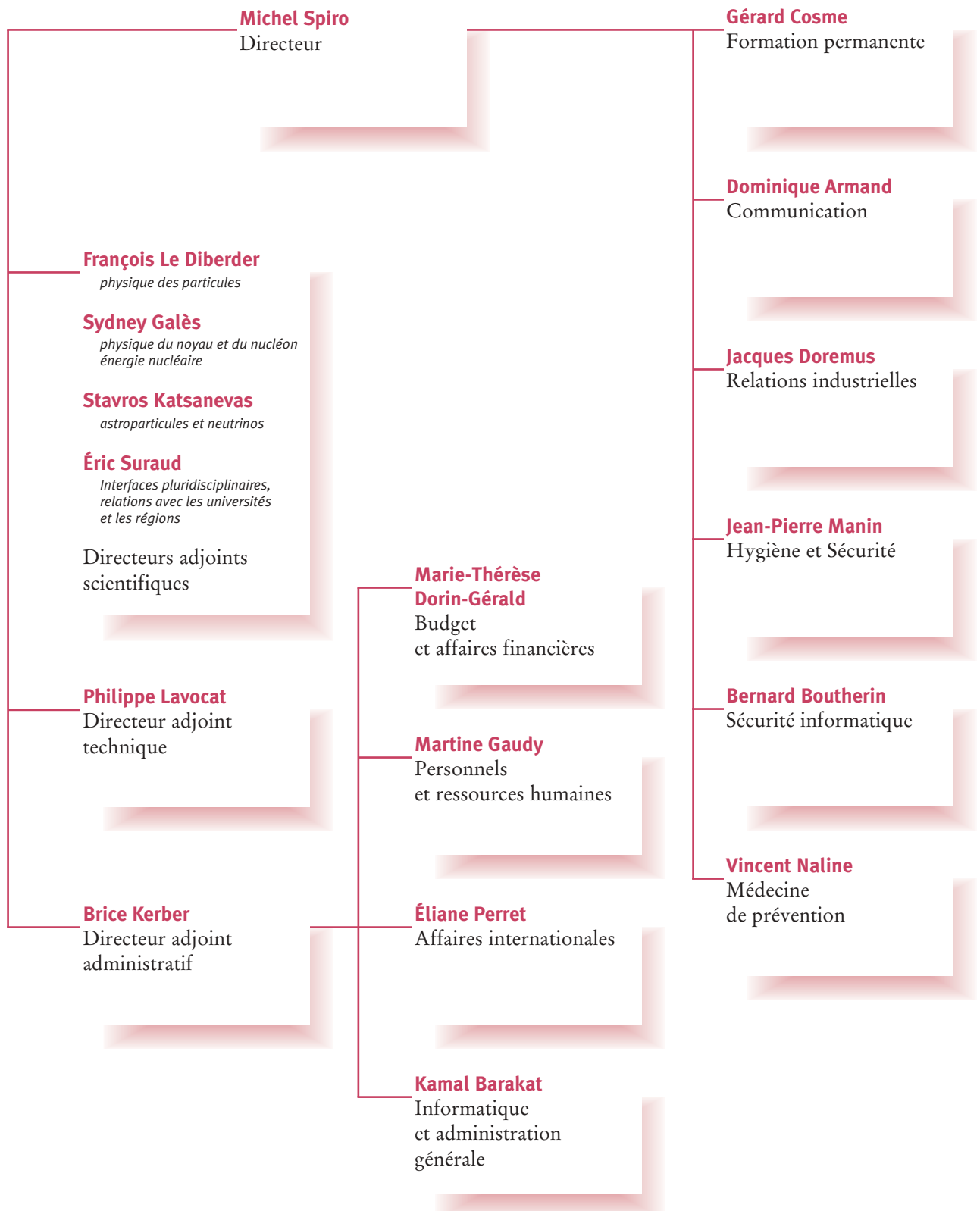
Répartition des personnels ITA, TPN, et CDD dans les laboratoires de l'IN2P3 par branches d'activité professionnelle (effectif de 1460 personnes)



Répartition par régions (effectif de 2488 personnes)



La direction de l'IN2P3



Les laboratoires de l'IN2P3

FR 2562 Astroparticule et cosmologie (APC)

Université Paris-VII, Collège de France
11, place Marcellin-Berthelot
75231 Paris Cedex 05
Tél.: 01 44 27 14 39 - Fax: 01 43 54 69 89

Directeur: **Pierre Binetruy**

EFFECTIFS 2 ITA CNRS

THÈMES DE RECHERCHE Cosmologie observationnelle: étude du rayonnement cosmologique primordial avec le ballon Archeops et le satellite Planck, et étude des supernovae de type Ia. Étude des phénomènes cosmiques à haute énergie: rayonnement cosmique (Observatoire Auger, expérience Euso), astronomie neutrino (Antares) et astronomie gamma au sol et dans l'espace (Integral, Cat, Celeste et Hess). Neutrinos: Borexino, R&D Lens, Double Chooz. Théorie: cosmologie, supercordes, astrophysique à haute énergie, ondes gravitationnelles.

USR 6402 Centre de calcul de l'institut national de physique nucléaire et de physique des particules - CCIN2P3

Campus de la Doua,
27-29, bd. Niels-Bohr
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél.: 04 78 93 08 80 - Fax: 04 72 69 41 70

Directeur: **Denis Linglin**

EFFECTIFS 1 chercheur CNRS, 31 ITA CNRS, 21 ITA non CNRS

THÈMES DE RECHERCHE Le CC fournit d'abord des services de calcul (fermes de processeurs), de stockage de masse (disques et cartouches) et de réseau aux communautés IN2P3 et Dapnia, ainsi qu'à des équipes de biologie. Le CC fournit également de multiples autres services informatiques: bases de données, gestion de documentation technique, hébergement de sites et de services web, publications scientifiques et plusieurs outils collaboratifs, dont un service de visioconférence. Tous ces services sont assurés autant que possible en continu. Le CC par ailleurs entreprend et teste des développements logiciels pour accompagner son évolution, beaucoup d'entre eux sont liés aux technologies de grille.

UMR 5797 Centre d'études nucléaires de Bordeaux Gradignan - CENBG

Université Bordeaux-I,
Le Haut-Vigneau
33175 Gradignan
Tél.: 05 57 12 08 04 - Fax: 05 57 12 08 01

Directeur: **Bernard Haas**

EFFECTIFS 19 chercheurs CNRS, 17 enseignants-chercheurs, 27 ITA CNRS, 12 ITA non CNRS, 13 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Étude théorique de la structure des noyaux et des hadrons. Noyaux « exotiques » (loin de la vallée de stabilité) et radioactivités rares. Physique du neutrino et double désintégration bêta. Astronomie gamma de haute énergie. Transmutation de déchets nucléaires et étude de systèmes innovants de production d'énergie. Interface physique-biologie et environnement. Physique corpusculaire auprès des lasers de puissance.

UMR 6550 Centre de physique des particules de Marseille - CPPM

Faculté des Sciences de Luminy
Case 902 - 163 av. de Luminy
13288 Marseille Cedex 9
Tél.: 04 91 82 72 00 - Fax: 04 91 82 60 58

Directeur: **Roy Aleksan**

EFFECTIFS 26 chercheurs CNRS, 9 enseignants-chercheurs, 63 ITA CNRS, 1 ITA non CNRS, 11 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Physique au LEP: expérience Aleph (Cern). Physique auprès du collisionneur électron-proton Hera: expérience H1 (Desy). Physique auprès du collisionneur Tevatron: expérience D0 (Fermilab). Préparation de la physique auprès du LHC (Cern): expériences Atlas et LHCb. Détection de neutrinos cosmiques de haute énergie: expérience Antares.

UMR 8609 Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse - CSNSM

Université Paris-XI,
Bât. 104-108
91405 Orsay Cedex
Tél.: 01 69 15 52 13 - Fax: 01 69 15 50 08

Directeur: **Hubert Flocard**

EFFECTIFS 27 chercheurs CNRS, 3 enseignants-chercheurs, 40 ITA CNRS, 10 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Structure nucléaire. Développement de détecteurs gamma de haute résolution. Réactions nucléaires d'intérêt astrophysique et nucléosynthèse. Mesure, évaluation et étude théorique des masses des noyaux atomiques. Séparation d'isotopes. Fission induite par les ions lourds. Préparation par implantation de matériaux nouveaux. Nanomagnétisme et nano-optique. Identification et dosage d'éléments radioactifs dans l'environnement. Datation. Applications géologiques et climatiques. Analyse de micrométéorites recueillies en Antarctique. Recherche de méthodes de confinement des déchets radioactifs. Supraconducteurs à haute température. Bolomètres cryogéniques. Croissance sous irradiation.

UMR 5139 Groupe d'astroparticules de Montpellier - GAM

Université Montpellier-II
Case 85 - Place Eugène-Bataillon
34095 Montpellier Cedex 05
Tél.: 04 67 14 93 05 - Fax: 04 67 14 41 90

Directeur: **Alain Falvard**

EFFECTIFS 5 chercheurs CNRS, 1 chercheur non CNRS, 2 enseignants-chercheurs, 6 ITA CNRS, 4 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE Astronomie gamma: recherche indirecte de la matière noire, sources galactiques de photons de très hautes énergies, sursauts gamma. Expériences AMS, Celeste, Glast, Hess.

UMR 6415 Grand accélérateur national d'ions lourds - GIE GANIL (CNRS/CEA)

Boulevard Henri Becquerel
BP 55027
14076 Caen Cedex 5
Tél.: 02 31 45 46 47
Fax: 02 31 45 45 86

Directeur:
Dominique Goutte

EFFECTIFS 12 chercheurs CNRS, 9 chercheurs non CNRS, 1 enseignant-chercheur, 119 ITA CNRS, 88 ITA non CNRS, 3 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE Laboratoire d'accueil de la communauté nationale et internationale des physiciens utilisant des faisceaux d'ions lourds. Production des faisceaux et mise à disposition des physiciens. Soutien technique des expériences et hébergement des utilisateurs. Thèmes de physique: physique nucléaire des ions lourds, production et étude de la structure des noyaux loin de la stabilité, production et étude des noyaux chauds, dynamique des collisions nucléaires.

UMR 5822 Institut de physique nucléaire de Lyon - IPNL

Université Lyon I - Bât Paul-Dirac - 4 rue Enrico-Fermi
69622 Villeurbanne CEDEX
Tél.: 04 72 44 84 57
Fax: 04 72 44 80 04

Directeur: **Bernard Ille**

EFFECTIFS 32 chercheurs CNRS, 41 enseignants-chercheurs, 60 ITA CNRS, 13 ITA non CNRS, 22 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Physique au LEP: L3 et Delphi (Cern), au Tevatron: D0 (Fermilab) et CMS au LHC (Cern). Plasma de quarks et de gluons: NA50, NA60, Alice et CMS-ions (Cern). Matière nucléaire chaude: Indra. Noyaux superdéformés: Euroball et noyaux exotiques en isospin: Exogam. Recherche de matière noire non baryonique: Edelweiss. R & D de composants optiques à faible perte et miroirs de Virgo. Physique du neutrino: Opera. Programme Supernovæ de mesure des paramètres cosmologiques: Snifs, projet Snap. Physique théorique. Interaction d'ions et d'agrégats énergétiques avec la matière. Aval du cycle électronucléaire: migration de radioéléments et confinement des déchets nucléaires. Effets biologiques des rayonnements ionisants à l'échelle moléculaire. Hadronthérapie, imagerie médicale.

UMR 8608 Institut de physique nucléaire d'Orsay - IPNO

Université Paris-XI
91406 Orsay Cedex
Tél.: 01 69 15 51 57
Fax: 01 69 15 64 70

Directeur:
Guillemaud - Mueller

EFFECTIFS 70 chercheurs CNRS, 33 enseignants-chercheurs, 237 ITA CNRS, 12 ITA non CNRS, 24 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE Structure et dynamique nucléaire loin de la stabilité, thermodynamique des systèmes finis et multifragmentation, plasma quark-gluon: NA50, Alice au LHC (Cern), physique hadronique: expériences Hades (GSI), G0 et Deep-Rho (TJNAF, E.-U.), Graal (ESRF), astroparticules, observatoire Auger. Radiochimie et aval du cycle électronucléaire: N-TOF (Cern), Interaction ion-agrégats avec surface et solides. Interface physique-biologie-médecine. Physique théorique.

UMR 7500 Institut de recherches subatomiques - IReS

Université Strasbourg-I
23, rue de Loess
BP 28
67037 Strasbourg Cedex 2
Tél.: 03 88 10 66 56
Fax: 03 88 10 62 92

Directeur: **Daniel Huss**

EFFECTIFS 41 chercheurs CNRS, 28 enseignants-chercheurs, 130 ITA CNRS, 4 ITA non CNRS, 20 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE Physique du noyau avec l'accélérateur Vivitron: structure de la matière dans des états extrêmes de spin et de déformation, Euroball. Mécanismes de réaction et de fission. Interactions ions lourds-matière. Noyaux exotiques et faisceaux radioactifs: Isolde (Ganil). Physique nucléaire théorique. Chimie nucléaire: aval du cycle. Radioprotection et mesures environnementales: Ramses. Physique des collisions électron-positon au LEP: Delphi (Cern). Participation à Star au RHIC (BNL). Physique des collisions proton-proton et ions lourds au LHC: CMS et Alice (Cern). Développement des capteurs CMOS et applications au projet de collisionneur Tesla. Physique du neutrino: Nemo, Opera et Antares. Applications biomédicales, imagerie du petit animal.

UMR 8607 Laboratoire de l'accélérateur linéaire - LAL

Université Paris XI
Bât. 200,
BP 34
91898 Orsay CEDEX
Tél.: 01 64 46 83 00
Fax: 01 69 07 94 04

Directeur:
Bernard d'Almagne

EFFECTIFS 54 chercheurs CNRS, 11 enseignants-chercheurs, 211 ITA CNRS, 1 ITA non CNRS, 12 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Tests de précision du Modèle standard et recherche de nouvelles particules: préparation de l'expérience Atlas (Cern), expérience D0 (Fermilab). Structure du proton: H1 (Desy). Préparation de l'expérimentation auprès d'un futur collisionneur linéaire (FLC). Violation de la symétrie CP: BaBar (Slac), LHCb (Cern). Physique du neutrino par recherche de désintégration double bêta (Nemo). Étude des oscillations du neutrino mu (Opera). Étude du rayonnement cosmique aux énergies extrêmes: Observatoire Auger. Recherche de matière noire: Eros. Détection d'ondes gravitationnelles: Virgo. Étude du rayonnement à 3 K: Planck. Physique et technique des accélérateurs à électrons: projets Clic (Cern) et Tesla (Desy), Elyse (Université d'Orsay).

UMR 5814 Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules - LAPP

BP 110,
chemin de Bellevue
74941 Annecy-le-Vieux
CEDEX
Tél.: 04 50 09 16 00
Fax: 04 50 27 94 95

Directeur: **Jacques Colas**

EFFECTIFS 38 chercheurs CNRS, 8 enseignants-chercheurs, 74 ITA CNRS, 15 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Expériences auprès du LEP: L3, Aleph (Cern). Expériences Atlas et CMS auprès du LHC (Cern). Violation de symétrie: BaBar (Slac), LHCb au LHC (Cern). Projet Virgo de détection d'ondes gravitationnelles. Recherche d'antimatière dans l'Univers: AMS. Physique du neutrino: Opera. Etude des rayons cosmiques de très haute énergie: expérience EUSO.

UMR 7638 Laboratoire Leprince-Ringuet - LLR

École polytechnique
Plateau de Palaiseau –
Route de Saclay
91128 Palaiseau Cedex
Tél.: 01 69 33 41 36
Fax: 01 69 33 30 02

Directeur: **Henri Videau**

EFFECTIFS 38 chercheurs CNRS, 42 ITA CNRS, 11 ITA non CNRS, 9 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Physique des collisions électron-positon: expérience Aleph, LEP (Cern). Structure interne du nucléon: H1 auprès de Hera (Desy). Etude de la violation de CP: expérience BaBar (Slac). Collisions de protons de très haute énergie: CMS auprès du LHC (Cern). Plasma de quarks et de gluons dans des collisions d'ions lourds: NA 50 au SPS (Cern) et Phenix au Rhic (BNL). R&D pour le détecteur d'un collisionneur linéaire à électrons: FLC. Astronomie gamma: Celeste (Thémis), Hess (Namibie), projet Glast sur satellite.

UMR 6534 Laboratoire de physique corpusculaire de Caen - LPC Caen

ENSI Caen
6 bd du Maréchal-Juin
14050 Caen Cedex
Tél.: 02 31 45 25 00
Fax: 02 31 45 25 49

Directeur:
Jean-François Lecomte

EFFECTIFS 12 chercheurs CNRS, 18 enseignants-chercheurs, 22 ITA CNRS, 9 ITA non CNRS, 16 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Étude de la matière nucléaire chaude et comprimée: multifragmentation et flot nucléaire (Indra, Démon). Production et caractérisation de noyaux exotiques. Réactions induites par faisceaux exotiques. Physique du neutrino par recherche de désintégration double bêta. Étude des corrélations b-n dans la désintégration b. Mesures de données nucléaires (Gedéon). Interface physique-biologie-médecine.

UMR 6533 Laboratoire de physique corpusculaire - LPC Clermont

Université Clermont-II
24 avenue des Landais
63177 Aubière Cedex
Tél.: 04 73 40 72 72
Fax: 04 73 26 45 98

Directeur: **Alain Baldit**

EFFECTIFS 16 chercheurs CNRS, 35 enseignants-chercheurs, 39 ITA CNRS, 5 ITA non CNRS, 25 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Quarks et leptons: expérience ALEPH au LEP, projets ATLAS et LHCb au LHC (Cern), projet FLC/Tesla. Matière nucléaire: collisions d'ions lourds: NA50-NA60 au SPS, expérience Phénix à BNL, projet ALICE au LHC (Cern), expérience FOPI (GSI); physique hadronique: expériences à jLAB (E.-U.) et Mayence. Physique théorique. Physique appliquée: datation et mesure de faibles radioactivités, effets biologiques des neutrons, physique nucléaire appliquée aux biomatériaux, plate-forme de calculs pour les sciences du vivant, techniques de détection en imagerie médicale, étude d'émission induite par laser de courants forts par des photocathodes au silicium.

UMR 7585 Laboratoire de physique nucléaire et de hautes énergies - LPNHE - P6/7

Université Paris VI-VII
4, place Jussieu
75252 Paris Cedex 05
Tél.: 01 44 27 63 13
Fax: 01 44 27 46 38

Directeur:
Jean-Eudes Augustin

EFFECTIFS 28 chercheurs CNRS, 1 chercheur non CNRS, 24 enseignants-chercheurs, 46 ITA CNRS, 1 ITA non CNRS, 28 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Physique des collisions électron-positon: Delphi au LEP(Cern), futur collisionneur linéaire. Collisions proton-proton et antiproton: Expérience Atlas au LHC (Cern) et Expérience D0 (Fermilab). Violation de symétrie CP: BaBar (Slac). Étude des faisceaux de neutrinos: Harp (Cern). Photons de hautes énergies dans l'Univers: CAT et Hess. Programme Supernovæ de mesure des paramètres cosmologiques: SCP, Snif, SNLS, Snap. Étude des rayons cosmiques aux énergies extrêmes: Observatoire Auger. Théorie: QCD, approches phénoménologiques.

UMR 5821 Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie - LPSC

Université Grenoble-I
53, av. des Martyrs
38026 Grenoble Cedex
Tél.: 04 76 28 40 02
Fax: 04 76 28 40 04

Directeur: **Johann Collot**

EFFECTIFS 37 chercheurs CNRS, 1 chercheur non CNRS, 18 enseignants-chercheurs, 92 ITA CNRS, 7 ITA non CNRS, 17 doctorants

THÈMES DE RECHERCHE Participation aux expériences Atlas au LHC (Cern); D0 (Fermilab). Mesure du moment magnétique du neutrino: Munu au Bugey. Recherche d'antimatière dans l'Univers: AMS. Participation à l'expérience Archeops et au projet Planck. Etude des rayons cosmiques de ultra haute énergie: expérience EUSO. Physique hadronique (TJNAF, E.-U.), Graal (ESRF). Réacteurs critiques à sels fondus - Réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateur et transmutation des déchets nucléaires. Structure nucléaire. Physique théorique. Physique des accélérateurs. Sources d'ions. Tomographie PET.

UMR 6417 Laboratoire souterrain de Modane - LSM

2, rue Polset
73500 Modane
Tél.: 04 79 05 22 57
Fax: 04 79 05 24 74

Directeur: **Gilles Gerbier**

EFFECTIFS 1 chercheur non CNRS, 3 ITA CNRS, 1 ITA non CNRS

THÈMES DE RECHERCHE Site à l'abri du rayonnement cosmique et en environnement de très faible radioactivité, aménagé et maintenu pour recevoir des expériences recherchant des signaux faibles: désintégration double bêta, matière noire, mesures de faibles radioactivités pour l'environnement. Développement du savoir-faire sur les mesures faibles radioactivités et blindages contre gamma et neutrons.

UMR 7553 Physique corpusculaire et cosmologie - PCC

Collège de France
11, place Marcelin-Berthelot
75231 Paris Cedex 05
Tél.: 01 44 27 14 39
Fax: 01 43 54 69 89

Directeur: **Daniel Vignaud**

EFFECTIFS 18 chercheurs CNRS, 3 chercheurs non CNRS, 6 enseignants-chercheurs, 40 ITA CNRS, 6 ITA non CNRS, 14 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Cosmologie observationnelle: matière noire baryonique, expérience Agape. Étude du rayonnement cosmologique primordial avec le ballon Archeops et le satellite Planck. Rayonnement cosmique de très haute énergie: Observatoire Auger, expérience EUSO. Astronomie gamma au sol: CAT, Celeste, HESS. Neutrinos: Borexino, R&D LENS, Double Chooz.

UMS 6457 Laboratoire de physique subatomique et des technologies associées - Subatech

École des Mines
4, rue Alfred-Kastler
La Chantrerie, BP 20722
44307 Nantes Cedex 03
Tél.: 02 51 85 81 00
Fax: 02 51 85 84 88

Directeur: **Jacques Martino**

EFFECTIFS 11 chercheurs CNRS, 1 chercheur non CNRS, 27 enseignants-chercheurs, 41 ITA CNRS, 14 ITA non CNRS, 24 doctorants et post-docs

THÈMES DE RECHERCHE Recherche du plasma de quarks et de gluons dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes: expériences Alice au LHC (Cern), Phenix et Star au Rhic (BNL). Modélisation des interactions fondamentales aux énergies ultrarelativistes: étude du plasma quark-gluon; théorie et modélisation de réactions aux énergies ultrarelativistes; modélisation des phénomènes de transport dans la matière nucléaire. Radiodétection de gerbes cosmiques de très hautes énergies (Nançay). Aval du cycle électronucléaire (GDR Gédéon): données nucléaires proton + noyau; étude de la cible de spallation pour réacteur hybride: Lisor, Megapie (PSI, Suisse). Radiochimie: étude et modélisation des barrières de confinement pour le stockage des déchets nucléaires; chimie des émetteurs alpha (stockage des déchets et applications médicales); mesure de radioactivité dans l'environnement (Smart): métrologie et service. Développement de concepts nouveaux de détecteurs à gaz (Micromégas).

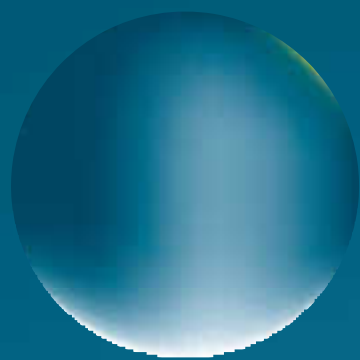
UMS 6425 Musée Curie et archives de l'Institut du Radium

Institut Curie
11 rue Pierre et Marie Curie
75248 Paris Cedex 05
Tél./Fax: 01 42 34 67 49

Directeur: ...

EFFECTIFS 1 ITA CNRS, 4 ITA non CNRS

THÈMES DE RECHERCHE Conservation, restauration et valorisation des collections historiques. Accueil du public au musée. Recherches historiques et muséologiques.



Sigles et acronymes

AGATA - Advance gamma-ray tracking array: projet international de développement d'un spectromètre gamma

AIFIRA - Applications interdisciplinaires de faisceaux d'ions en région Aquitaine: plate-forme de faisceaux d'ions à vocation interdisciplinaire

ALEPH - Apparatus for LEP physics: une des quatre expériences auprès du LEP

ALICE - A large ion collider experiment: expérience dédiée à l'exploration des propriétés du plasma de quarks et de gluons au LHC

ALTO - Accélérateur linéaire auprès du Tandem d'Orsay: projet d'installation d'un accélérateur d'électrons (10^{-50} MeV, 10 μ A) auprès du Tandem d'Orsay

AMS - Anti-matter in space: expérience de recherche d'antimatière dans l'espace

ANTARES - Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research: expérience dédiée à la détection et à l'étude des neutrinos cosmiques de haute énergie à l'aide d'un télescope sous-marin

ApPEC - Astroparticle physics european coordination: coordination européenne dans le domaine des astroparticules

ARCHEOPS - Ballon stratosphérique dédié à la cartographie du fond de rayonnement cosmologique

ASCLEPIOS - Aire européenne de soins du cancer par les protons et les ions: projet d'hadronthérapie à Caen

ATLAS - A toroidal LHC apparatus: expérience dédiée principalement à la recherche de nouvelles physiques au LHC

AUGER (Observatoire Pierre) - Expérience de détection des rayons cosmiques d'énergie extrême (supérieure à 10^{19} eV), Argentine

BABAR - Expérience d'étude des mésons beaux au Stanford linear accelerator (SLAC), États-Unis

BNL - Brookhaven national laboratory: laboratoire américain de Brookhaven, États-Unis

CADI - Coordination des activités accélérateurs de la DSM/CEA et de l'IN2P3/CNRS

CALICE - Calorimeter for the linear collider with electrons: R&D pour le développement de calorimètres électromagnétique et hadronique pour l'ILC

CARE - Coordinated accelerator research in Europe: projet de plate-forme technologique européenne dans le domaine de la recherche sur les accélérateurs

CCSD - Centre pour la communication scientifique directe, unité IN2P3/SPM

CEA - Commissariat à l'énergie atomique

CERN - Organisation européenne pour la recherche nucléaire: laboratoire européen de physique des particules à Genève

CFHT - Télescope Canada-France-Hawaii

CHOOZ - Expérience ayant observé les antineutrinos du réacteur nucléaire de Chooz (commune des Ardennes)

CLIC - Compact e^+e^- linear collider: projet de collisionneur linéaire à électrons multi-TeV au Cern

CMOS - R&D pour le développement d'un détecteur de vertex pour l'ILC

CMS - Compact muon solenoid: expérience dédiée principalement à la recherche de nouvelles physiques au LHC

CNES - Centre national d'études spatiales

CNGS - Cern neutrinos to Gran Sasso: projet de faisceau de neutrinos allant du Cern au laboratoire du Gran Sasso en Italie pour l'étude des oscillations des neutrinos

DO - Expérience auprès du collisionneur proton-antiproton à Fermilab, États-Unis

DAPNIA - Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée: CEA/DSM

DATAGRID - Projet européen de démonstration de la faisabilité d'une grille de calcul distribuée à l'échelon international

DELPHI - Detector for electron, lepton, photon, hadron identification: une des quatre expériences auprès du LEP

DESY - Deutsches elektron synchrotron: laboratoire allemand de physique des particules installé à Hambourg

DOE - Department of energy: le département de l'énergie américain

DSM - Direction des sciences de la matière: CEA

DVCS - Deep virtual compton scattering: diffusion Compton profondément virtuelle, expérience d'étude de la structure interne du proton

EDELWEISS - Expérience pour la détection des WIMPs en site souterrain: expérience de recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au Laboratoire souterrain de Modane

EGEE - Enabling grids for e-science in Europe: projet européen de création d'une infrastructure de grille disponible 24 heures sur 24 partout en Europe

EGO - European gravitational observatory: société de droit civil qui gère le site de Virgo

ESA - European space agency: Agence spatiale européenne

ESF - European science foundation: Fondation européenne de la science

ETOILE - Espace de traitement oncologique par ions légers européen: projet d'hadronthérapie par ions carbone à Lyon

EURISOL - European isotope separation on-line: projet de futur accélérateur européen de faisceaux radioactifs

EUROBALL - Multidécteur européen de rayonnements gamma pour la physique nucléaire, successeur d'Eurogam

EUROTEV - Projet d'étude européen en vue d'un collisionneur linéaire e⁺e⁻ dans la gamme d'énergie du TeV

EUROTRANS - Projet européen de conception et d'étude de faisabilité d'un prototype d'ADS

EUSO - Extreme universe space observatory: projet d'observation des grandes gerbes cosmiques dans l'atmosphère depuis la station spatiale internationale

EXOGAM - Spectromètre gamma de grande efficacité dédié à la spectroscopie nucléaire des noyaux exotiques (Ganil)

FAIR - Facility for antiproton and ion research: projet d'infrastructure qui fournira des faisceaux d'antiprotons (de 0,1 à 15 GeV) et d'ions lourds relativistes (de 1,5 à 30 GeV/nucléon) auprès du GSI (Darmstadt)

FERMILAB - Fermi national laboratory: laboratoire américain de physique des particules installé près de Chicago

FLC - Voir ILC

G0 - expérience de mesure du contenu en quark étrange du nucléon au TJNAF

GANIL - Grand accélérateur national d'ions lourds: CEA/IN2P3 à Caen

GDR - Groupement de recherche

GEDEPEON - Gestion des déchets et production d'énergie par des options nouvelles: groupement de recherche CNRS/CEA/EDF/Framatome

GENEPI - Générateur de neutrons pulsés de forte intensité

GLAST - Gamma-ray large area space telescope: futur télescope d'observation des sources célestes de rayonnement gamma (de 10 MeV à 100 GeV)

GSI - Gesellschaft für schwerionenen forschung: laboratoire allemand de physique nucléaire, à Darmstadt

H1 - Expérience auprès du collisionneur HERA dédiée à l'étude de la structure interne du proton et à la recherche de particules et d'interactions non encore observées

HADES - High acceptance dielectrons spectrometer: spectromètre diélectrons de grande acceptance pour la physique hadronique

HERA - High energy ring accelerator: collisionneur électron-proton installé à Desy - Hambourg

HESS - High energy stereoscopic system: détecteur de nouvelle génération pour l'astronomie gamma au-delà de 100 GeV

HINDAS - High and intermediate energy nuclear data for accelerator driven systems: programme européen d'étude de certaines réactions nucléaires

HYDILE - Cible hydrogène/deutérium pour l'étude de certaines propriétés des nucléons

IFREMER - Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

ILC - International linear collider: collisionneur linéaire électron-positon, d'énergie située entre 90 GeV et 1 TeV dans le centre de masse

INFN - Instituto nazionale di fisica nucleare: institut italien de physique nucléaire et de physique des particules

INSERM - Institut national de la santé et de la recherche médicale

INSU - Institut national des sciences de l'Univers: CNRS

IPHI - Injecteur de protons de haute intensité

ISOL - Isotopic separation on-line: méthode de séparation d'ions exotiques

ISOLDE - Projet d'installation de production d'ions radioactifs par séparation isotopique en ligne au Cern

JDEM - Joint dark energy mission: projet de mission spatiale «énergie sombre» conjointe DOE/Nasa

L3 - Une des quatre expériences du LEP

LC - Voir ILC

LCG - LHC computing grid: infrastructure s'appuyant sur la technologie des grilles de calcul pour stocker et analyser les données produites par les expériences au LHC

LEP - Large electron-positon collider: ancien collisionneur électron-positon du Cern

LHC - Large hadron collider: futur collisionneur proton-proton du Cern

LHCb - Expérience dédiée à l'étude de la violation de CP dans le système des mésons beaux au LHC

MAMI - Mainz mikrotron: accélérateur d'électrons à l'Institut de physique nucléaire, Université de Mayence, Allemagne

MASURCA - Réacteur expérimental sous-critique de faible puissance installé à Cadarache (CEA)

MEGAPIE - Megawatt pilot experiment: expérience visant à concevoir et exploiter une cible de spallation en PbBi liquide auprès de l'installation SINQ à PSI

MUSE - Multiplication d'une source externe auprès du réacteur Masurca (CEA, Cadarache): expérience de caractérisation des propriétés neutroniques d'un réacteur sous-critique

MUST - Ensemble de détection de particules chargées légères au Ganil

MYRRHA - Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications: projet européen d'implantation d'un démonstrateur de transmutation «XADS» à Mol en Belgique

NASA - National aeronautics and space administration: administration gouvernementale responsable du programme spatial aux États-Unis

NEMO - Neutrino-molybdène: expérience de double désintégration bêta au Laboratoire souterrain de Modane

NOMADE - Nouveaux matériaux pour les déchets: groupement de recherche CNRS/CEA/EDF/Andra

N-TOF - Neutron time of flight: installation servant à la mesure de données nucléaires pour l'aval du cycle électronucléaire

NuPECC - Nuclear physics european collaboration committee: comité européen pour la physique nucléaire

OPAL - Une des quatre expériences auprès du LEP

OPENGATE - Projet de développement d'instrumentation dédiée à l'optimisation des caméras médicales exploitées en particulier en oncologie pour le diagnostic

OPERA - Oscillation project with emulsion tracking apparatus: expérience d'oscillation de neutrinos

PACE - Programme pour l'aval du cycle électronucléaire: programme interdisciplinaire du CNRS

PARIS - Physicochimie des actinides et des radioéléments aux interfaces et en solution: groupement de recherche CNRS/CEA/EDF/Andra

PARRNe - Production d'atomes radioactifs riches en neutrons: station prototype pour la production d'atomes radioactifs riches en neutrons auprès du Tandem d'Orsay

PHENIX - Expérience d'étude du plasma quark-gluon au Brookhaven national laboratory, États-Unis

PLANCK - Projet de satellite de l'ESA pour la mesure du rayonnement de fond cosmologique

POCI - Peroperative compact imager: projet de développement de systèmes miniaturisés pour le guidage du geste du chirurgien en bloc opératoire lors de l'exérèse de tissus cancéreux

PSI - Paul Scherrer Institut, Villigen

RHIC - Relativistic heavy ion collider: collisionneur d'ions lourds au Brookhaven national laboratory, États-Unis

SCP - Supernovæ cosmology project: expérience de détection des supernovæ lointaines

SILC - R&D pour le développement d'un trajectographe pour l'ILC

SLAC - Stanford linear accelerator center: laboratoire américain de physique des particules installé à l'université de Stanford, États-Unis

SNAP - Supernova acceleration probe: projet de télescope spatial grand champ de mesure des paramètres cosmologiques à l'aide de supernovæ la lointaines

SNF - Supernova factory: expérience de mesures spectrophotométriques de supernovæ la proches

SNLS - Supernova legacy survey: programme de recherche et de mesure de supernovæ la dans le but de caractériser l'énergie noire

SPIRAL - Système de production d'ions accélérés en ligne (GANIL, Caen)

SPIRAL2 - Projet d'élargissement de SPIRAL à des ions plus lourds et à de plus fortes intensités

SPM - Département des sciences physiques et mathématiques: CNRS

SPS - Super proton synchrotron: un composant du complexe accélérateur du LHC

STAR - Solenoidal tracker at RHIC: expérience d'étude du plasma quark-gluon au Brookhaven national laboratory

SUPERKAMIOKANDE - Expériences japonaises de désintégration du proton, et d'étude des neutrinos solaires et atmosphériques à Kamiokande

TANDEM - Accélérateur Van de Graaf électrostatique d'ions situé à Orsay

TESLA - Tera electron-volt superconducting linear accelerator: projet allemand de collisionneur linéaire électron-positon

TEVATRON - accélérateur proton-antiproton à Fermilab (Chicago)

TJNAF - Thomas Jefferson national accelerator facility: laboratoire américain de physique hadronique à Newport News, Virginie

VAMOS - Variable mode spectrometer: spectromètre de grande acceptance (Ganil)

VIRGO - Expérience de détection directe des ondes gravitationnelles à Cascina, Italie

VIVITRON - Accélérateur électrostatique à Strasbourg

WIMP - Weakly interactive massive particle: particules massives, interagissant très faiblement avec notre monde, qui pourraient constituer la matière cachée de l'Univers

WMAP - Wilkinson microwave anisotropy probe: satellite américain d'observation du fond diffus cosmologique, prédécesseur de Planck

XADS - eXperimental accelerator driven system: programme européen d'étude de la faisabilité d'un réacteur hybride pour la transmutation

X-FEL - Projet international de laser à électrons libres fonctionnant dans la gamme des rayons X

Table des matières

SOMMAIRE GÉNÉRAL	P. 2
AVANT-PROPOS	P. 4
AXES STRATÉGIQUES	P. 6
Physique des particules	P. 8
Physique nucléaire et hadronique	P. 14
Astroparticules et neutrinos	P. 19
Aval du cycle électronucléaire	P. 24
Développements technologiques	P. 27
Les accélérateurs	P. 27
Le calcul	P. 29
Programmes pluridisciplinaires	P. 31
Les interfaces avec les sciences de la vie	P. 31
Le spatial	P. 33
Enseignement	P. 35
FAITS MARQUANTS	P. 36
LEP, le legs du collisionneur électron-positon	P. 38
Babar, la violation de CP dans tous ses états	P. 39
D0, les premiers résultats du Run II	P. 40
Atlas, CMS et LHCb, trois expériences auprès du futur LHC	P. 41
Nemo3, CNGS et Opera, à la recherche de la masse du neutrino	P. 45
Rhic, le déconfinement des quarks et des gluons	P. 46
Alice, la construction de l'expérience	P. 47
GPD et structure du nucléon	P. 48
Vivitron, la structure nucléaire aux limites	P. 49
Deux découvertes, la radioactivité deux protons et le tétraneutron	P. 50
Noyaux à halo Borroméens et autres structures exotiques	P. 51
Archeops, un progrès dans la compréhension de la naissance de l'Univers	P. 52
Supernovæ Ia, un accès à l'histoire récente de l'expansion de l'Univers	P. 53
Edelweiss, à la recherche de la matière noire	P. 54
Virgo, la recherche d'ondes gravitationnelles	P. 55
Antares, un télescope sous-marin à neutrinos	P. 56
Hess, une pleine sensibilité depuis décembre 2003	P. 57
Auger, l'observatoire décrypte les messages de l'Univers extrême	P. 58
Muse, ou le premier réacteur sous-critique piloté par accélérateur	P. 59
Coupleurs de puissance pour cavités supraconductrices	P. 60
Cavités « spoke », des cavités accélératrices supraconductrices	P. 61
Datagrid, un projet de grille de calcul	P. 62
Physique-biologie-médecine, une interface en plein essor	P. 63
Électronique, de nombreuses réalisations	P. 64

PROJETS	P. 66
LC, instrumentation pour le collisionneur linéaire électron-positon	P. 68
Spiral2, la production et l'accélération de produits de fission	P. 70
Eurisol, une nouvelle génération de faisceaux radioactifs	P. 72
Alto, un accélérateur d'électrons pour des faisceaux radioactifs riches en neutrons ..	P. 74
Agata, un spectromètre de nouvelle génération	P. 75
Planck, un satellite pour l'étude du rayonnement de fond cosmologique	P. 76
Snap, la traque des supernovæ Ia à grands décalages vers le rouge	P. 77
Glast, le futur de l'astronomie gamma spatiale	P. 78
Euso, un observatoire spatial de rayons cosmiques d'énergie extrême	P. 79
Megapie, une cible de spallation pour les systèmes hybrides	P. 80
PDS-XADS, le projet européen d'incinération des déchets nucléaires	P. 81
RELATIONS EXTERNES	P. 82
Valorisation	P. 84
Partenariats	P. 88
Les régions	P. 88
Les universités	P. 89
L'Europe	P. 90
L'action internationale	P. 92
Communication et information scientifique et technique	P. 93
PROGRAMMES ET STRUCTURES	P. 96
SIGLES ET ACRONYMES	P. 107

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION
Michel Spiro

COORDINATION ÉDITORIALE
Dominique Armand

CONCEPTION ET RÉALISATION
Page B

IMPRESSION
Aubin Imprimeur
décembre 2005

