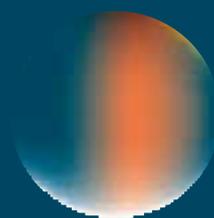


Axes stratégiques





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



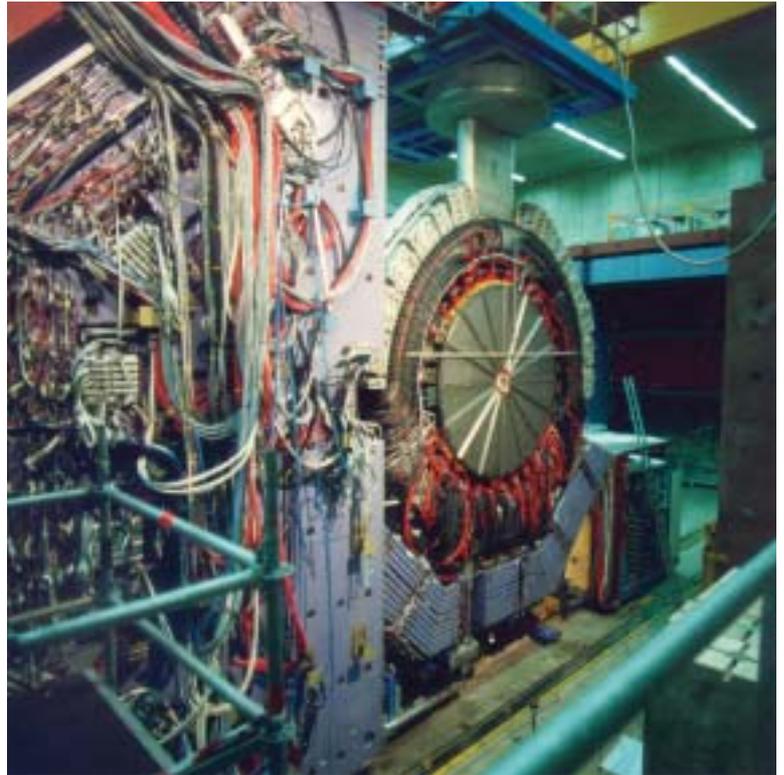
une valeur non nulle, qui échappe au pouvoir prédictif de la théorie. La valeur particulière prise par le champ de Higgs brise la symétrie de jauge; on parle de brisure de la symétrie électrofaible.

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»).

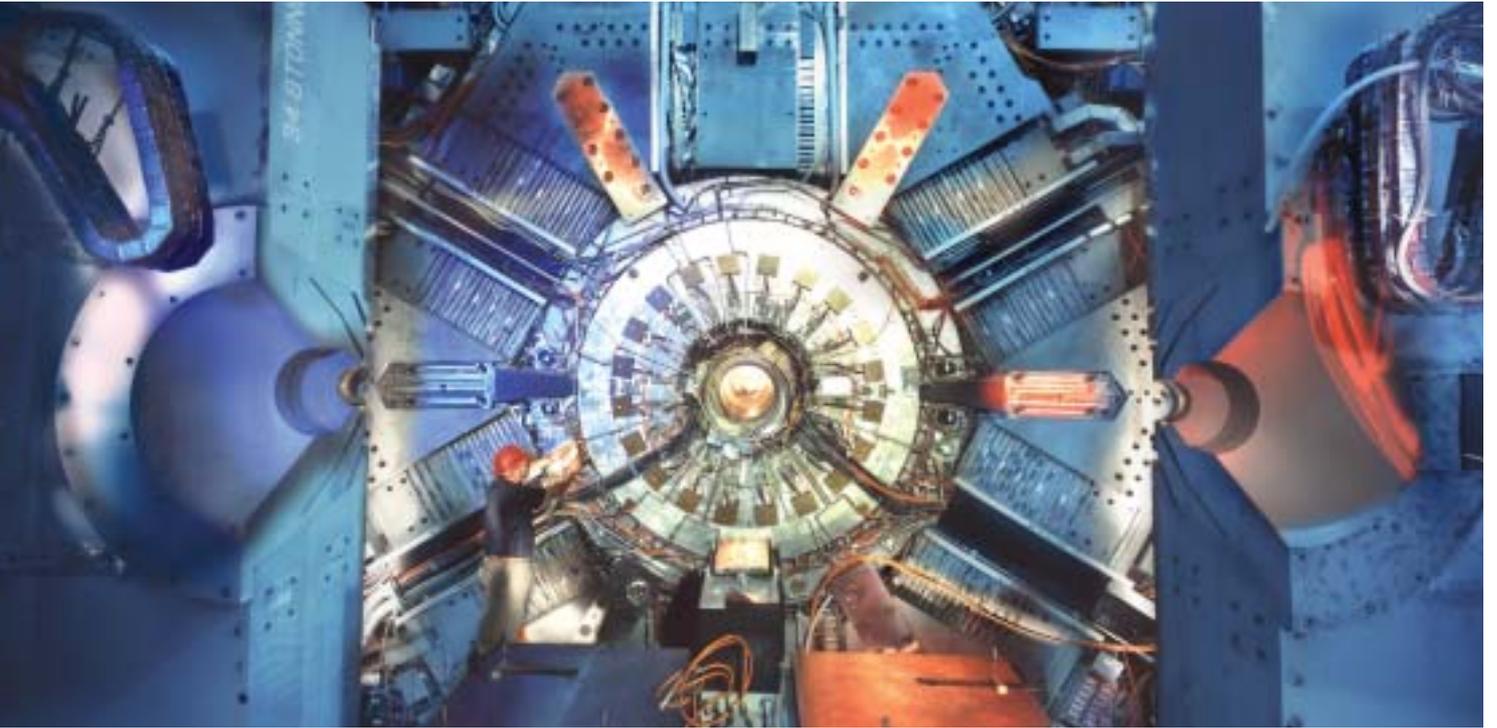
La même année 1973, avant même que la deuxième famille de leptons et de quarks ne soit expérimentalement complétée (il manque encore le quark «charmé»), deux théoriciens japonais, Kobayashi et Maskawa, remarquent que l'existence d'une troisième famille fournirait un mécanisme capable de rendre compte 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

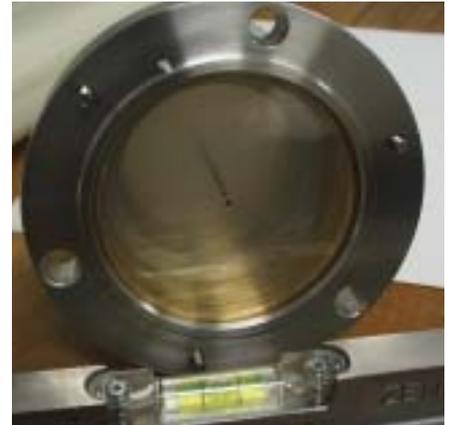
à droite, de haut en bas:

*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.



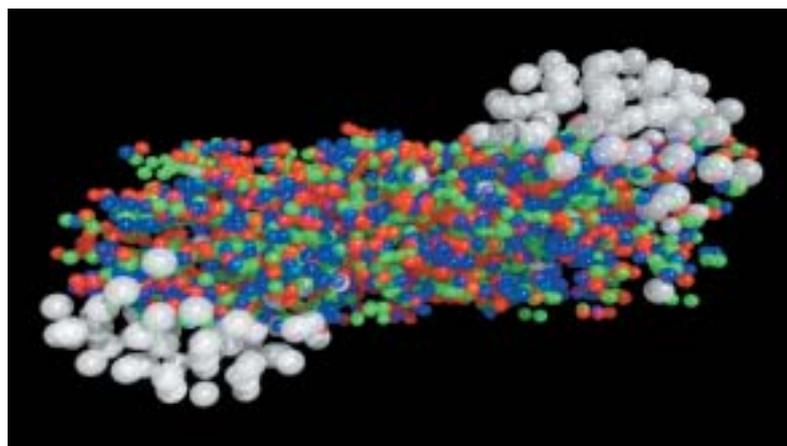
Physique nucléaire et hadronique



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.

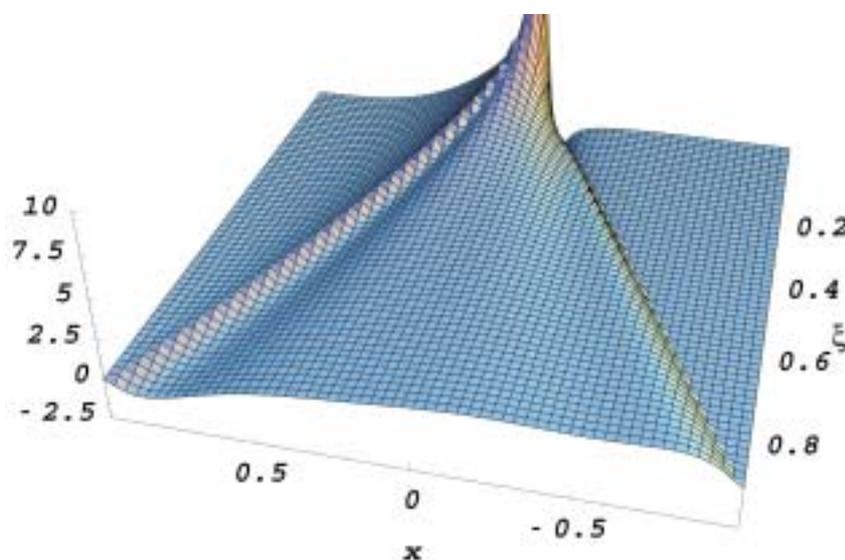
STRUCTURE DU NUCLÉON ET DES HADRONS

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.

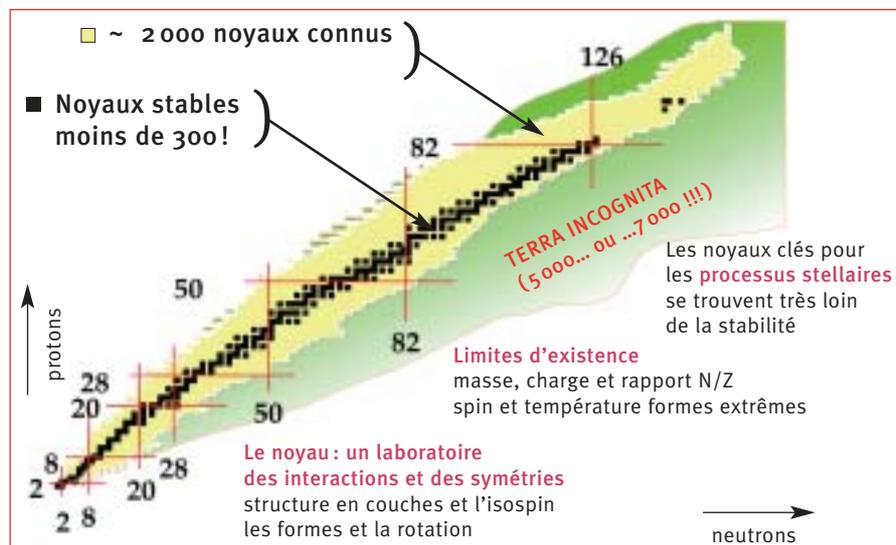
L'étude de la structure nucléaire à basse énergie (autour de la barrière 5^{-10} MeV/nucléon) se concentre sur la « recherche de phénomènes rares à la limite de la cohésion nucléaire » : très hauts spins et formes exotiques, noyaux superlourds, spectroscopie de leurs descendants immédiats (les noyaux 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.

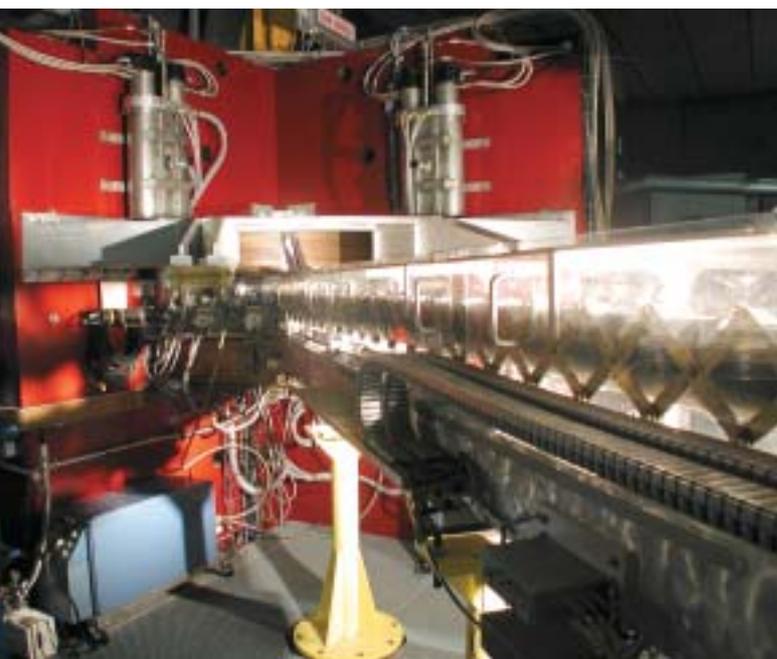
Avec Spiral1, seule une fraction limitée d'espèces rares (principalement des noyaux légers) est accessible à des intensités suffisantes. Il faut donc étendre considérablement la gamme des ions secondaires radioactifs disponibles, en particulier vers les noyaux moyens et lourds, riches en neutrons, tout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

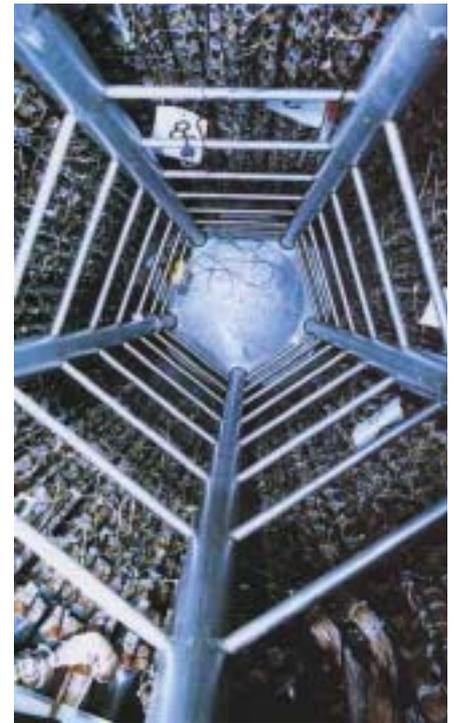
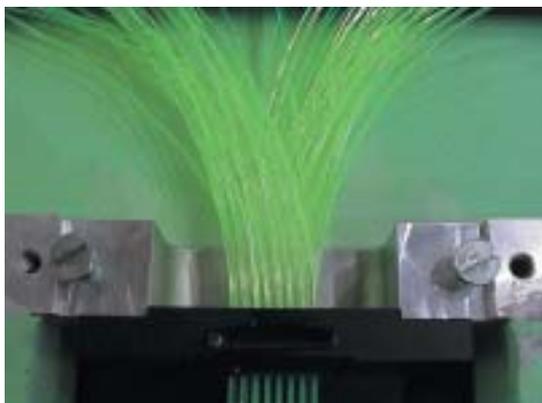
La cosmologie et les phénomènes cosmiques de haute énergie se croisent en plusieurs points le long de leur frontière commune. Ainsi, les supernovæ ont servi de chandelle standard pour mesurer l'accélération de l'Univers et, inversement, la matière noire recherchée en cosmologie pourrait être détectée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

En parallèle, l'IN2P3 prendra une part active, en concertation avec les mêmes départements, au renouvellement/redéfinition et restructuration opérationnelle du programme à partir de 2004.

L'IN2P3, en concertation avec l'Insu et le SPM du CNRS, a aussi contribué à la définition du contour et à la création de la commission interdisciplinaire Astroparticules (CID 47) au sein du Comité national du CNRS. Cette commission a fonctionné de façon exemplaire dans un climat de responsabilité scientifique et sans parti pris partisan vis-à-vis des sections « mères ».

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

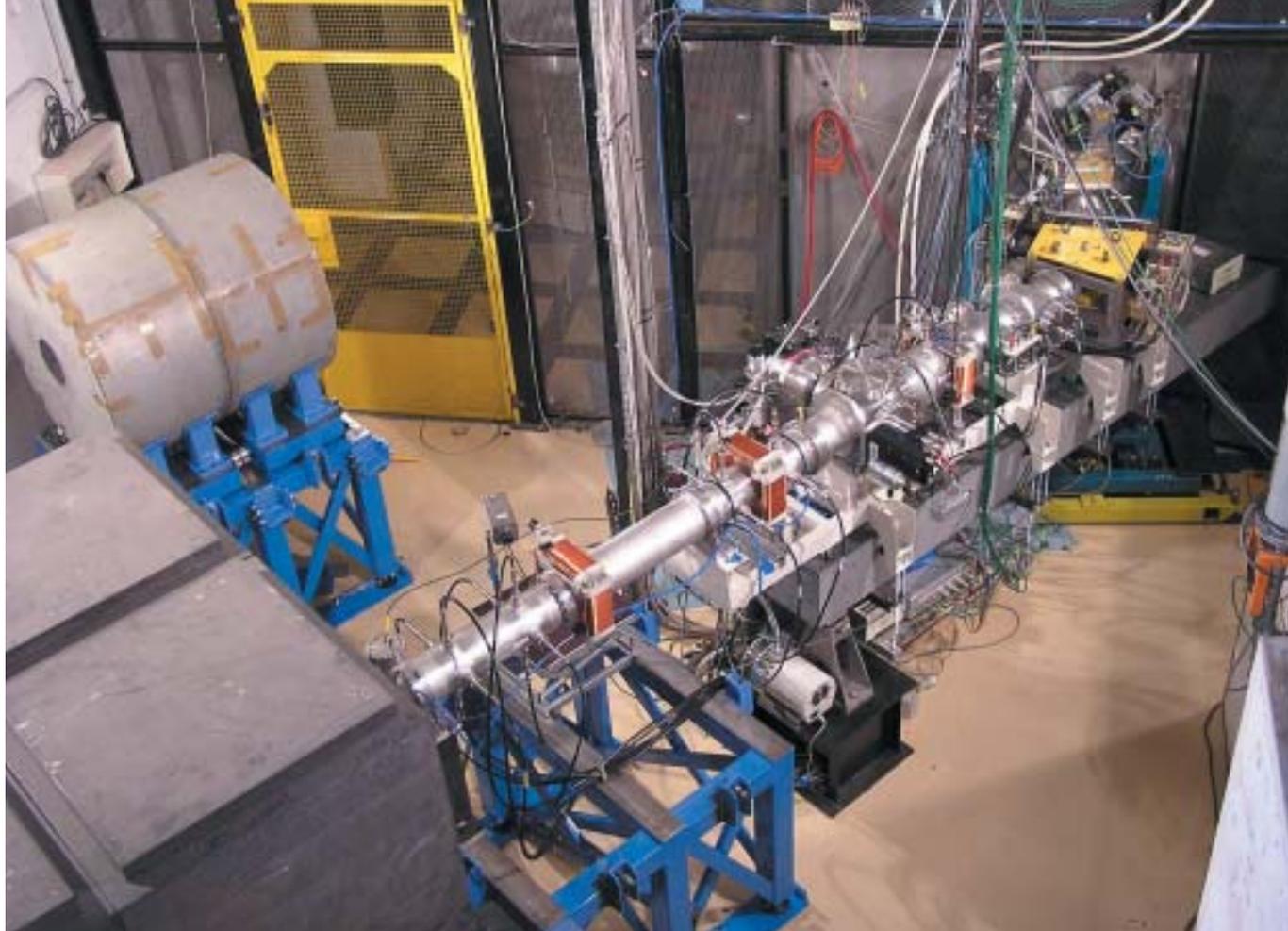


Plate-forme de mesure de sections efficaces pour les systèmes du futur.
© CNRS/IN2P3

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



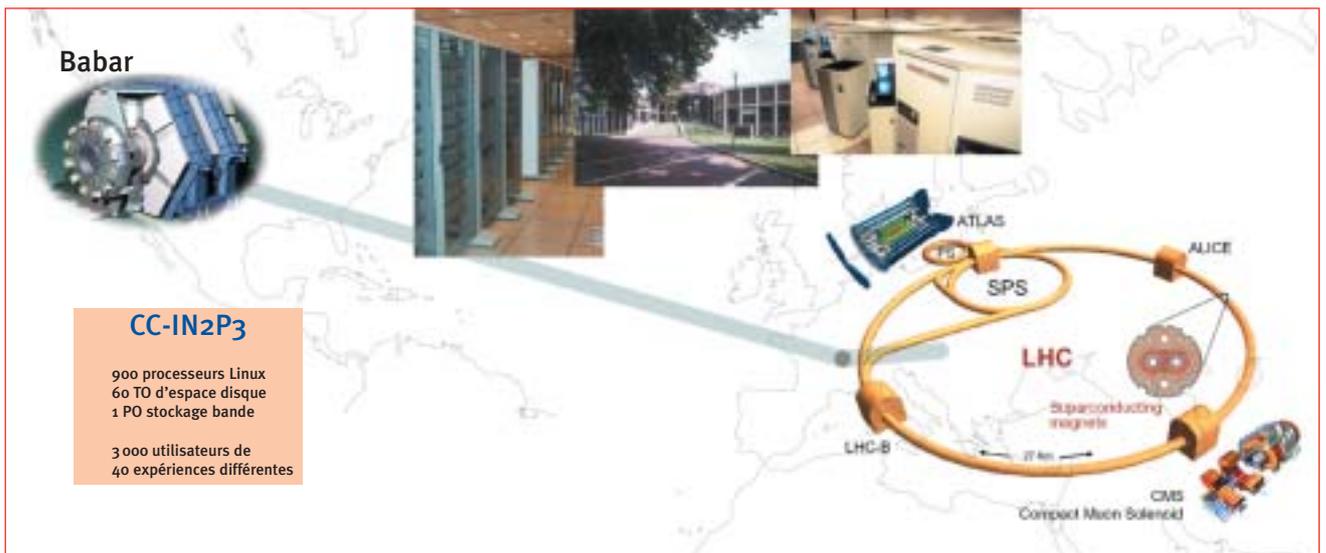
LHC et de produire des données Monte-Carlo permettant d'étudier les performances des détecteurs.

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

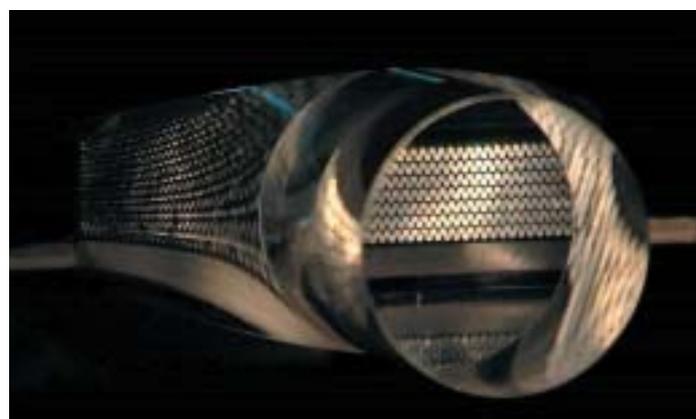
❸ *Euso*
Un observatoire spatial
de rayons cosmiques
d'énergie extrême
page 79

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

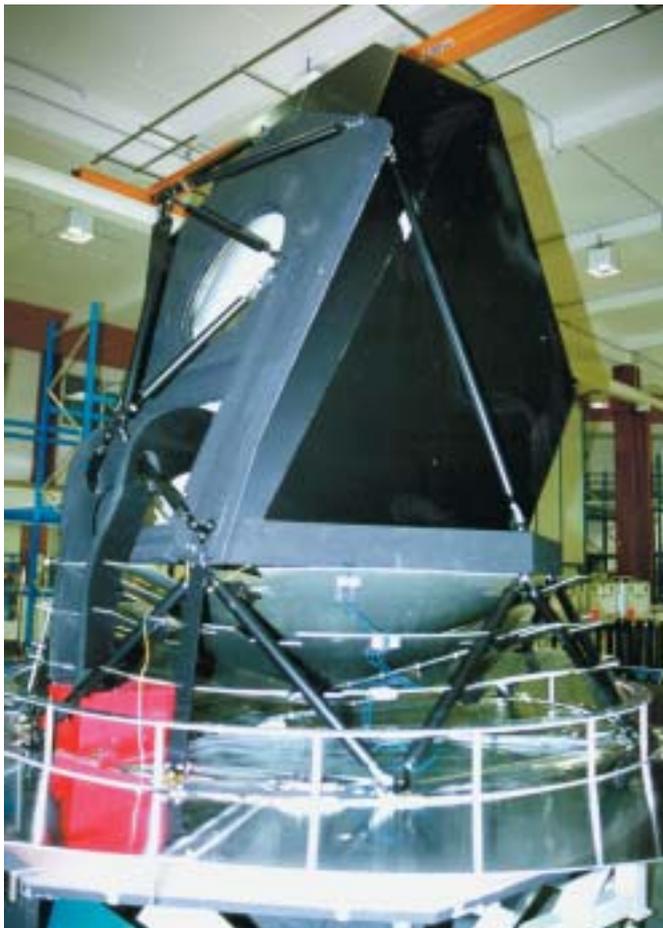
❸ *Snap*
La traque des
supernovæ la à grands
décalages vers le rouge
page 77

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.