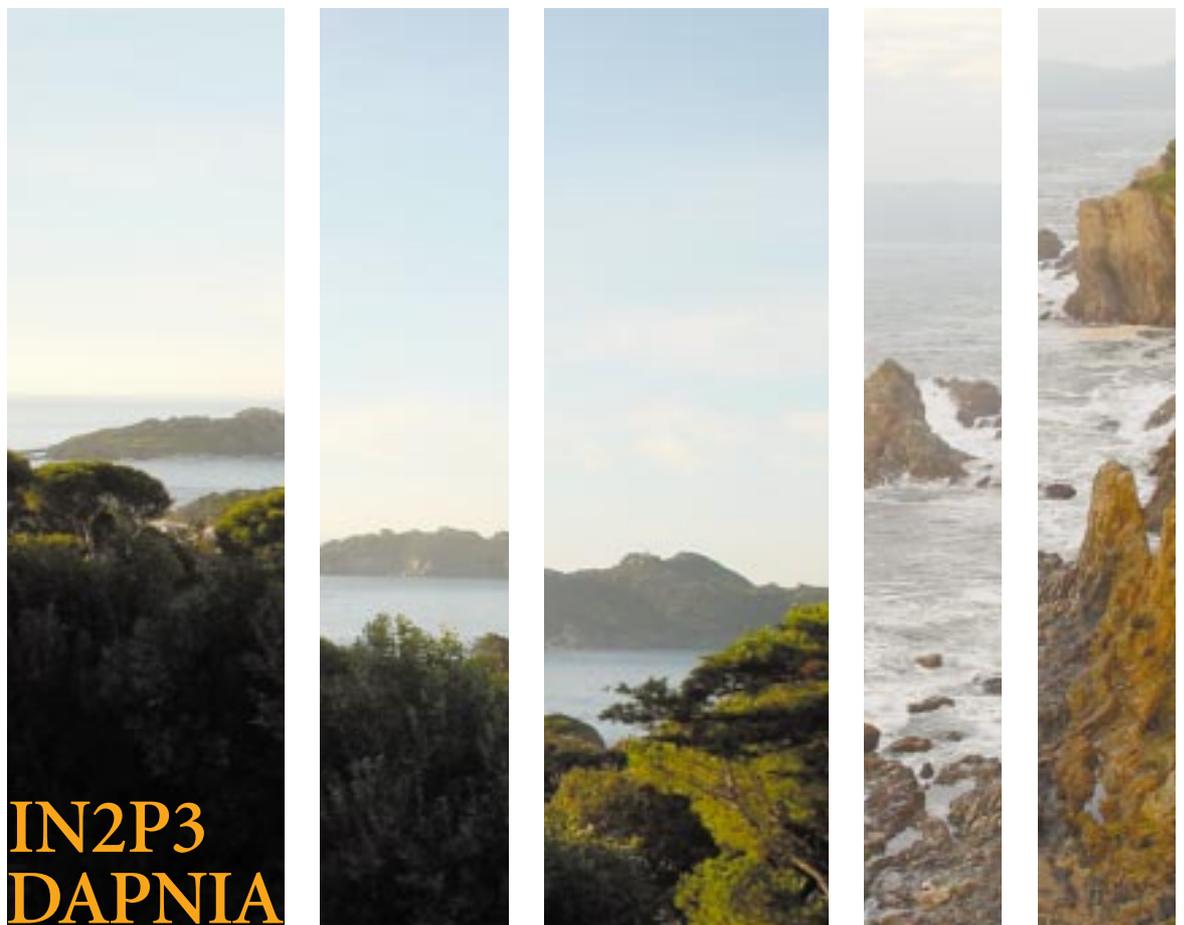


PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET CORPUSCULAIRE IN2P3

LETTRES DES DÉPARTEMENTS SCIENTIFIQUES DU CNRS

*Les Journées
d'instrumentation
et de prospective
Giens 2002*



**IN2P3
DAPNIA**



CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

numéro spécial
juin 2003

Sommaire

	Éditorial de Michel Spiro	3
INSTRUMENTATION	Les détecteurs	5
	Les perspectives du « submicronique profond » à l'IN2P3	6
	Outils et méthodes	7
	R&D accélérateurs	8
PHYSIQUE DES PARTICULES	La violation de CP	10
	Physique au-delà du modèle standard et matière noire	12
	Quête de l'origine de la masse	15
PHYSIQUE DU NUCLÉON ET DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE	La structure du nucléon	18
	Explorer les extrêmes : faisceaux d'ions stables et radioactifs de haute intensité	19
	Les transitions de phase	22
AVAL DU CYCLE	Déchets nucléaires	23
RECHERCHES INTERDISCIPLINAIRES	L'interface physique-biologie	25
ASTROPARTICULES, NEUTRINOS ET COSMOLOGIE	Cosmologie	26
	Le Tour de France des neutrinos	28
	Phénomènes violents de l'Univers	30
PLANNING ET SIGLES	Planning des Journées de Giens et sigles	33

Éditorial



Organisées tous les deux ans conjointement par l'IN2P3 et le Dapnia, les Journées de Giens sont le colloque de prospective national de la physique des particules, de la physique nucléaire, de l'astrophysique nucléaire et des astroparticules, tous domaines illustrés ci-dessous.

Physique des particules

Physique nucléaire

Interactions et particules fondamentales

Astroparticules et cosmologie

Détection de rayonnements et particules, électronique associée et traitement massif des données

Énergie nucléaire et problématiques associées

Interfaces et applications

Accélérateurs

Ce symposium est ouvert aux théoriciens et aux astrophysiciens.

Notre dernier colloque s'est enrichi de « Journées d'instrumentation » portant sur les développements instrumentaux associés à ces disciplines. Ont été particulièrement concernés les domaines des accélérateurs et du cryomagnétisme, ainsi que des réalisations de pointe tant en microélectronique qu'en mécanique et informatique. Cette adjonction des avancées et des défis techniques associés aux grandes questions scientifiques a été vivement appréciée par les participants. Il a été fortement recommandé de maintenir cette formule pour les colloques à venir.

Autre nouveauté, ces Journées ont été précédées d'une phase durant laquelle des groupes de travail ont été mis sur pied pour étudier les différents thèmes devant être abordés. Ces groupes venaient compléter les comités permanents chargés de la prospective à l'IN2P3 et au Dapnia.

Cette démarche a été jugée positive et sera donc amplifiée dès le prochain colloque. Un rapport écrit sera, comme cette année, demandé à chacun de ces groupes avant la tenue du colloque.

Le colloque lui-même s'est déroulé en séances plénières : présentations, tables rondes et séances de discussion se sont ainsi succédé durant cinq jours, deux jours et demi pour la prospective instrumentale et deux jours et demi pour la prospective scientifique. Il a été l'occasion de rencontres entre la communauté et la direction, et entre les sous-communautés. Des invités extérieurs étaient également présents, avec lesquels les échanges ont été particulièrement fructueux, ce dont je me réjouis.

Dernière innovation, enfin, nous avons introduit pour la première fois cette année une phase postcolloque en éditant un certain nombre de rapports de prospective directement liés à des événements de ces Journées. Ceux-ci devraient constituer une aide précieuse pour la définition d'une stratégie nationale et à long terme dans les domaines concernés.

Les priorités de nos champs disciplinaires sont clairement apparues au cours du colloque. Après le succès du LEP et des expériences sur la violation de CP (NA48 et Babar), la communauté des physiciens des particules a pour objectif premier la poursuite de ces recherches avec les expériences au LHC (Atlas, CMS et LHCb). Dans le domaine de la physique nucléaire, l'étude des transitions de phase de la matière nucléaire poursuivie au Ganil, au Cern et à GSI se focalisera sur les recherches auprès du LHC avec le détecteur Alice ; l'étude des noyaux riches ou déficients en neutrons, donc loin de la vallée de stabilité, demeure un axe prioritaire qui se poursuivra au Ganil avec Spiral puis Spiral II ; enfin, le soutien aux recherches sur les déchets nucléaires et l'énergie nucléaire du futur sera poursuivi. Dans le secteur des neutrinos, la détermination des masses et des paramètres de mélange reste un axe primordial avec des prolongements prometteurs. Quant à l'astroparticule, région de rencontre interdisciplinaire de l'IN2P3 avec les autres départements, les axes de recherche prioritaires sont la mesure des paramètres cosmologiques, la recherche de matière noire et l'étude de l'Univers avec des messagers nouveaux (gamma de haute énergie, neutrinos, rayons cosmiques de très haute énergie et ondes gravitationnelles).

Que tous ceux qui ont contribué au succès de ce symposium, en assurant sa logistique et en participant aux groupes de travail et au colloque lui-même, soient remerciés, ainsi que les personnes qui ont permis la réalisation de ce compte rendu.

La vitalité de nos disciplines repose avant tout sur la valeur de leurs acteurs : chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs, qui tous concourent aux avancées scientifiques et techniques qui nous animent.

*Michel Spiro
directeur*

Les détecteurs

Avec la calorimétrie, la trajectographie et la photonique, l'ensemble de la chaîne de détection a été exploré lors de la première Journée de Giens. De la situation actuelle aux besoins pour le futur, de nouvelles orientations s'ébauchent, soutenues par les résultats acquis et une R&D très active.

Transfert de Paris, installation sous les pins, et les Journées d'instrumentation et de prospective commencent avec la session «Détecteurs».

La revue sur la calorimétrie se situait entre l'acquis des expériences LEP et les choix technologiques faits pour le LHC, au moment de l'émergence de gros calorimètres embarqués. Elle a permis de montrer l'état de l'art et d'extrapoler sur les R&D en cours.

Les expériences LEP avaient opté pour quatre solutions distinctes, avec le «même mépris» de la calorimétrie hadronique. Les deux grosses expériences LHC ont également fait des paris différents (priorité à la résolution pour CMS, stabilité un peu lourde pour Atlas) avec, malheureusement, encore beaucoup de matière avant le calorimètre dans les deux cas.

Les solutions embarquées, avec des détecteurs nécessairement plus compacts, tendent à la construction d'objets hybrides : trajectographe calorimétrique comme le calorimètre avec prèshower de Glashow.

Pour la future génération d'accélérateurs, la tendance qui se dessine s'oriente vers une calorimétrie plus universelle, précise, dense, granulaire et hermétique du type W-Si avec des cellules de l'ordre du centimètre carré (Calice) et une détection hadronique qui, pour ne pas négliger les hadrons neutres, pourrait être du même type (éventuellement plus conventionnelle à cause du prix) mais à lecture digitale, le tout contenu dans la bobine. De même pour les spectromètres gamma, la nouvelle génération, représentée ici par Agata, va permettre de gagner deux ou trois ordres de grandeur en efficacité de détection grâce à une géométrie germanium segmentée.

Les excellents résultats obtenus par Edelweiss ont montré toute l'efficacité de la détection par bolomètres massifs à double signature : chaleur et ionisation (Edelweiss, CDMS) ou chaleur-scintillation (Cress, Rosebud). Les efforts portent maintenant sur le passage prometteur à la dizaine de kilogrammes.

La session sur la trajectographie a commencé par une revue des avancées sur les détecteurs à semi-conducteur. Après une description des techniques actuellement utilisées et des impressionnantes surfaces de détection des expériences LHC, les besoins nécessaires aux accélérateurs du futur et l'état des recherches dans ce secteur ont été développés. De nombreuses R&D sont en cours pour améliorer les détecteurs existants (rapidité des CCD¹, granularité et minceur des pixels hybrides) ou en développer de nouveaux (Depfet, Cmos). Les résultats

obtenus jusqu'ici sont très prometteurs, comme en Cmos avec les capteurs Mimosas. La R&D n'est pas moins vigoureuse dans le cadre des micropatterns à gaz. Les tentatives en vue de dépasser les limitations des chambres à fils conventionnelles (MWPC) ont conduit à des semi-impasses (MWGC) ou à des solutions incomplètement abouties (MGWC). Toutefois, depuis quelque temps, de nouveaux types de détecteurs comme les GEM (Cern) et les Micromegas (Dapnia) permettent l'utilisation de détecteurs gazeux dans les conditions les plus extrêmes (Compass utilise des triple-GEM et des Micromegas très en amont dans le spectromètre). L'utilisation de ces détecteurs est également étudiée dans les R&D sur les TPC² installées auprès des futurs accélérateurs (Tesla). Les efforts portent sur le retour des ions, le vieillissement et les champs magnétiques intenses.

La conférence de Beaune avait fait le point sur les détecteurs photoniques en juin. Un résumé des principales tendances a été fait à Giens. Si l'utilisation des HPD³, des APD⁴ devient de plus en plus fréquente, les PMT⁵ ont encore de beaux jours devant eux (multi-anodes utilisées dans AMS et Euso, Flat Panel PMT, nouvelles photocathodes GaAs, InGaAs...) et des nouveautés apparaissent (MCP, Ferenc). De plus en plus de pixellisation et le mode électron unique sont deux points forts des R&D. Après la belle réussite de la construction de Megacam (40 CCD 2K x 4,5K), la tâche de Snap, avec un détecteur trois fois plus gros et une détection dans l'infrarouge, s'annonce encore plus difficile.

Un dernier mot sur les matrices de bolomètres qui vont passer de l'état artisanal (spider web réalisés «à la main») à la fabrication en série (multiplexage, lecture par Squids).

En guise de conclusion : une session «Détecteurs» riche et bien remplie, de gros efforts en perspective pour la discipline, sans oublier une ouverture et de nombreuses applications dans d'autres domaines, tels que la physique des plasmas, la biologie et la médecine.

1 CCD : *Charged Coupled Device*.

2 TPC : *Time Projection Chamber*.

3 HPD : *Hybrid Photo Detector* ou *Hybrid Photo Diode*.

4 APD : *Avalanch Photo Diode*.

5 PMT : *PhotoMultiplier Tube*.

Les perspectives du « submicronique profond » à l'IN2P3

Le seuil du micron étant franchi depuis bien plus d'une décennie, la problématique du submicronique est de fait aujourd'hui celle du « submicronique profond » (DSM). Cette évolution technologique rapide commence à engendrer des difficultés dans les laboratoires qui sont autant de sources d'inquiétude. Après analyse, la situation autorise malgré tout un certain optimisme.

Alors que 87 % des circuits récemment conçus dans les laboratoires de l'IN2P3 mettent en œuvre des technologies à 0,8 μ , l'état de l'art dans l'industrie est de 0,13 μ et le Cern a fait un gros travail sur le 0,25 μ . La situation peut paraître surprenante sinon créer quelque inquiétude. Les exposés de Giens en ont fourni une interprétation et ont dressé un état des questions posées. Il apparaît que les Asic conçus à l'IN2P3 relèvent en majorité du traitement analogique, et de circuits dits « mixtes » associant l'analogique au numérique. Quelques projets relèvent d'une intégration plus forte avec le détecteur. Quant au traitement numérique pur, il est réalisé dans nos laboratoires par des FPGA¹ à haute intégration. L'institut ne conçoit pas de Pentium! Or, l'industrie du circuit intégré est d'abord pilotée par le numérique.

Une compétence incontournable

À l'IN2P3, l'Asic trouve sa justification par le nombre de canaux traités, la spécificité de performances optimisées, un coût et un encombrement réduits et une fiabilité supérieure à celle des technologies traditionnelles. L'Institut a d'ailleurs placé beaucoup de ces circuits sur des expériences majeures et cette compétence - reconnue - est essentielle au devenir de notre instrumentation. En revanche, l'intérêt de la microélectronique pour le durcissement aux radiations est moins connu. Après l'échec de filières dédiées (Dmill²), ces études passeront probablement par la seule maîtrise du DSM standard, d'où le travail du Cern sur le 0,25 μ .

De nouvelles exigences

La conception de circuits complexes et/ou mixtes impose une nouvelle approche méthodologique: nécessité de conception « descendante », de modélisation (analogique) de haut niveau, etc. La part des interconnexions devient prépondérante (traitement complexe des capacités parasites, délais, intégrité du signal) et impose de nouveaux logiciels. Une modélisation plus fine des composants devient également nécessaire. Les informations technologiques sont plus difficiles à obtenir *via* les CMP, les centres multiprojets qui nous sont indispensables à la maîtrise des coûts.

Un domaine en mutation trop rapide

La célèbre « loi de Moore » conduit l'industrie informatique en 2003 à des performances stupéfiantes en termes de fréquence et d'intégration (300 millions de transistors...). Les technologies se bousculent, au prix d'investissements colossaux: 0,25 μ , 0,18 μ , 0,13 μ , etc. Les facteurs d'échelle impliqués, le « *scaling* », sont au bénéfice du numérique, mais ils posent des problèmes majeurs pour l'analogique, certains paramètres étant critiques.

Par ailleurs le couplage est très fort entre l'évolution de la technologie des fondeurs et celle de l'outil logiciel: une nouvelle génération voit le jour pour le DSM. Les coûts des outils dits de « placement-routage » ou de « synthèse physique » pour le numérique sont à présent colossaux. Le problème de l'accès au logiciel est majeur.

Quelles perspectives ?

La part d'inquiétude ressentie à Giens est liée à l'évolution des technologies des logiciels autant qu'à celles des fondeurs. Cependant, des raisons existent qui permettent un relatif optimisme. Il est en effet hautement probable que seront pérennisées des technologies dédiées à l'analogique et au « mixte » car les problèmes des télécommunications (le signal de départ y est analogique) sont proches des nôtres. Les spécialistes parlent avec une certaine confiance de technologie BiCMOS 0,35 μ et de SiGe. Il y a une nécessité évidente de mutation de notre équipement logiciel pour le submicronique profond: une négociation a démarré, pour un usage limité à notre recherche et excluant probablement le numérique pur. Le choix de nos outils a été guidé jusqu'à aujourd'hui par une standardisation de fait dans notre communauté et par l'accès aux CMP; cela doit assurément continuer. Une certaine mutualisation peut aussi s'avérer nécessaire. Enfin, la vitalité des laboratoires de l'IN2P3, prouvée par les nombreux exposés de qualité des Journées VLSI, est assurément le plus fort gage d'optimisme. Les responsables de l'Institut sont conscients de l'enjeu.

- 1 FPGA: *Field Programmable Gate Array*, technologie de circuits numériques programmables à très haute intégration.
- 2 Dmill: technologie de fabrication de circuits durcis aux rayonnements.

Outils et méthodes

Des contraintes du spatial à la méthodologie de positionnement, en passant par les calculs couplés, le management de projet et des calculs sur une cible de spallation, cinq thèmes ont été retenus à Giens. Ils illustrent parfaitement l'investissement, la diversité et le dynamisme des laboratoires de l'IN2P3 et du CEA.

L'exposé sur « L'organisation de projets spatiaux » a montré clairement que l'activité spatiale nécessite sans doute plus qu'ailleurs des méthodes d'organisation très structurées se traduisant par des métiers plus particulièrement orientés sur les aspects « système et qualité ». Quand l'ESA ou la Nasa mettent un lanceur à la disposition de la communauté scientifique, le Cnes et le CEA imposent une méthode de « contrôle projet » dont la structure assure une supervision correcte de l'ensemble des opérations. L'évolution du paysage spatial européen (organigrammes complexes, législation, sous-traitance à tous les niveaux) entre ESA, Cnes, industriels et laboratoires va vers un renforcement important de la contractualisation.

Tout concepteur est confronté aux problèmes des échanges de résultats entre les différents logiciels (mécanique, thermique, magnétisme, hydraulique...). L'exposé « Couplage » a su parfaitement montrer l'intérêt d'un logiciel unique pour les calculs couplés. Avec un large spectre de modèles de comportement et une boîte à outils possédant un langage de programmation efficace, le logiciel Castem est capable d'aborder de nombreuses disciplines pour une communauté d'utilisateurs variés (en local). Sans supprimer la nécessité de spécialistes (et surtout pas en magnétisme), le couplage estompe le cloisonnement entre groupes et renforce la compréhension des autres domaines. Les travaux du STCM¹ (LHC, Atlas, Clas, CMS...) sont précieux pour les physiciens des instituts français pouvant faire appel à son savoir-faire.

Le respect des coûts et délais, la recherche et la maîtrise de la qualité sont des préoccupations constantes au sein des projets. L'exposé sur la « Conduite de projet, qualité et gestion de données techniques » a clairement montré leur importance dans un contexte spécifique (ingénierie distribuée, personnel technique en diminution, âge moyen élevé). Le travail déjà réalisé se traduit par la mise à disposition sur le Web de différents outils tels que référentiel de management, support méthodologique, outils de prévision et *vade-mecum*. L'EDMS est un superbe outil informatique utilisé pour stocker et maîtriser toutes les données techniques d'un projet dans un espace « collaboratif ». Il permettra de mieux communiquer à l'intérieur des laboratoires et des projets et de mettre en commun les savoirs, informations et expériences (bonnes ou mauvaises).

Le projet Megapie a pour objectif la démonstration de la faisabilité technologique du couplage d'un accélérateur (faisceau de protons de 575 MeV, 1,75 mA) à une cible Pb-Bi liquide. Il nécessite des études physico-chimiques (corrosion, matériaux sous irradiation, production d'éléments de spallation...) et une activité « design » très importante. Au cours de l'exposé « Calculs », des exemples de calculs sur la cible de spallation ont été présentés. Il est important de noter l'interaction forte entre le groupe de support scientifique et le groupe conception (calcul nucléaire, thermohydraulique fluide...). On constate une fois encore que seule l'utilisation de codes de calcul permet d'accéder à des valeurs réalistes en température et contrainte, et d'obtenir ainsi l'aval des autorités de sûreté. Les codes utilisés (Ansys-Samcef) ont permis de répondre parfaitement aux besoins du projet.

Connaissez-vous le gon ? La réponse a été donnée par l'exposé sur la « Méthodologie de positionnement appliquée aux détecteurs ». Le souci permanent du contrôle, de l'étalonnage, de la calibration et des suivis périodiques doit s'intégrer dès la conception de la méthode à appliquer à l'objet à mesurer (triangulation spatiale ou photogrammétrie). Très prisée dans les milieux industriels traitant de grands volumes, la photogrammétrie digitale, vraie technique de mesure 3D sans contact, permet de relever les coordonnées d'un grand nombre de points et de déterminer ainsi formes et dimensions avec une remarquable précision (0,1 mm pour 14 m, 0,04 mm pour 5 m) : 8 500 points modéliseront CMS, soit environ 40 000 photos et 1 100 jours de travail. Demandant peu de personnel, certes spécialisé, ce moyen rentable de mesure est parfaitement adaptable à des missions à la demande. Pourquoi ne pas envisager, pour des laboratoires de l'IN2P3, la mise en place (mutualisation) d'un réseau de géomètres proposant un service analogue ? Enfin, le gon est le nom officiel ISO du grade.

¹ Le Service des techniques de cryogénie et de magnétisme du Dapnia.

R&D accélérateurs

Tandis que de très belles expériences « hors faisceau » étaient présentées au cours de ces Journées, il est clairement apparu, au travers de nombreuses interventions, que les accélérateurs de particules constitueront le « cheval de bataille » de l'IN2P3 et du CEA/DSM dans les nouveaux challenges de la physique subatomique et d'autres applications.

Un important programme de R&D est actuellement mené par des équipes de l'IN2P3 et de la DSM/Dapnia visant à une amélioration substantielle des performances des accélérateurs. Un groupe de réflexion¹ CEA-CNRS sur la R&D Accélérateurs a donc été chargé par les directions de la DSM et de l'IN2P3 de faire un état des lieux de la situation, de proposer des axes prioritaires de R&D et des actions à entreprendre, et d'envisager le partage éventuel de ces actions et les modes de collaboration entre l'IN2P3 et le CEA/DSM. Un rapport finalisé fin 2002 contient une proposition cadrée de mise en œuvre et de suivi des actions communes retenues.

Ces travaux peuvent être résumés aujourd'hui par les maîtres mots « forts gradients d'accélération, forts champs magnétiques, fortes intensités et fiabilité ». Lors des Journées de Giens, quelques exemples ont été présentés qui bénéficieront de cette stratégie générique. Le développement de sources d'ions et de canons à électrons performants est un atout pour tout accélérateur. Afin de maîtriser les coûts, l'optimisation du gradient d'accélération est un préalable à tout futur collisionneur linéaire, que ce soit une machine supraconductrice à fort cycle utile (Tesla) ou une machine chaude pulsée (Clic); quant aux usines à faisceaux exotiques, certes de plus petite dimension (Linag, Eurisol), elles ont au fond la même demande. Les machines circulaires (à hadrons), comme le LHC, bénéficient immédiatement de toute augmentation de la rigidité magnétique. L'accélération de faisceaux primaires de très haute puissance (plusieurs MW) est demandée autant par les usines à noyaux exotiques, à neutrinos et à neutrons que par les systèmes hybrides où l'accélérateur est couplé à un réacteur nucléaire sous-critique. Ces ADS (*Accelerator Driven Systems*) qui ont un fort potentiel d'incinération de déchets « nucléaires » à longue durée de vie, demandent que la « fiabilité » du faisceau soit du même ordre que celle d'un réacteur, soit quelques interruptions par an.

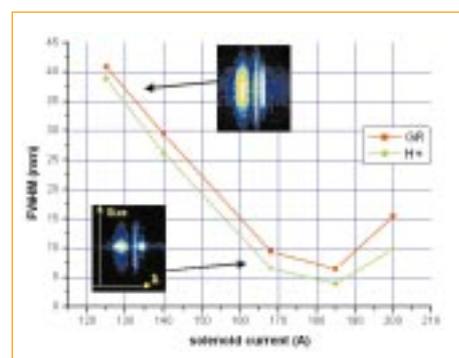
Des exemples de cette R&D ambitieuse mais passionnante ont été présentés.

Machines linéaires

Afin de prouver la faisabilité de Tesla, le projet de collisionneur linéaire électron/positon de 500 GeV (avec ac-

croissement d'énergie à 800 GeV), un programme intense a été lancé au milieu des années quatre-vingt-dix, auquel la DSM et l'IN2P3 participent activement. Ce projet est basé sur l'utilisation de cavités supraconductrices permettant d'obtenir des gradients accélérateurs élevés, avec un rendement de transmission de la puissance RF au faisceau proche de 100 %. La R&D sur ce thème consiste à la fois à pousser les performances de ces structures (aujourd'hui, des gradients de 40 MV/m sont obtenus dans des cavités de type Tesla, contre 5 MV/m au début des années quatre-vingt-dix), à les rendre reproductibles et à développer l'instrumentation associée aux cavités pour leur mise en œuvre: coupleurs de puissance (l'IN2P3 est chargé de la production de trente coupleurs pour le *Tesla Test Facility*), système d'accord à froid, contrôle des variations de fréquence, etc.

Le nombre croissant de projets basés sur des faisceaux de protons motive une R&D forte à tous les niveaux de l'accélérateur. La tête de machine est étudiée à travers le projet Iphi (injecteur de protons haute intensité) construit en collaboration entre la DSM et l'IN2P3, dont l'objectif est de fournir le premier faisceau à 3 MeV et 100 mA en 2005. La source Silhi est déjà opérationnelle (100 mA, 95 keV) et le RFQ (*Radio Frequency Quadrupole*, la section d'accélération chargée de porter l'énergie du faisceau de 95 keV à 3 MeV) en cours de réalisation. La très forte intensité de faisceau nécessitera de nouveaux types de diagnostics faisceau. La figure ci-dessous montre un développement très original de l'IN2P3: le filtrage sur une voie spectrale caractéristique de l'espèce (ici H⁺) en tenant compte de son déplacement Doppler (sélection par la vitesse de la parti-



Taille du faisceau par mesure optique.
© CNRS/IN2P3

Cavité spoke
 $(\beta = 0,35,$
 $f = 350 \text{ MHz}).$
 © CNRS/IN2P3



cule) permet de signer de manière univoque la taille (FWMH) réelle du faisceau de H^+ , alors que le phénomène lumineux global (noté GR sur la figure) issu de l'interaction du faisceau avec le gaz résiduel dans la ligne donne une taille apparente plus grande.

Pour la section d'énergie intermédiaire (10 MeV-100 MeV), l'IN2P3 développe un nouveau type de cavités supraconductrices, les cavités «spoke», qui combinent les avantages de la supraconductivité (performances) avec une conception permettant une large acceptation en énergie et une tenue mécanique renforcée. Le premier prototype est en cours de test (photo).

Pour la section haute énergie, des cavités supraconductrices elliptiques sont étudiées en collaboration entre la DSM et l'IN2P3: un premier prototype a été fabriqué (cavité cinq cellules, $\beta = 0,65$, $f = 704 \text{ MHz}$) et a été testé en décembre 2002. La conception d'un cryomodule complet est en cours et nécessite également le développement de l'instrumentation associée aux cavités (système d'accord à froid, coupleurs de puissance...).

Machines circulaires

L'énergie croissante des machines circulaires construites ou envisagées pour la physique des particules demande des champs magnétiques de plus en plus intenses dans les éléments magnétiques pour réaliser la courbure du faisceau. La technologie actuelle, basée sur des éléments supraconducteurs à fil en niobium/titane, est proche de ses limites avec les dipôles du LHC (8,36 T): le coût limite en effet le diamètre extérieur du bobinage et la tenue mécanique des structures soumises aux fortes contraintes mécaniques engendrées par les hauts champs magnétiques restreint le niveau de champ.

Des études sur de nouveaux types de structure sont en cours: le principe consiste à fractionner la zone des conducteurs afin de limiter les contraintes dans une zone. Par ailleurs, le niobium/étain pourrait être utilisé dans la gamme 10-21 Tesla grâce aux récents progrès (densité de courant = 2000 A/mm² à 4,2 K). Toutefois, la mise en œuvre de cette nouvelle technologie (composé intermétallique fragile, traitements thermiques indis-

pensables) qui nécessite de nombreuses études et développements motive un fort programme de R&D. Un aimant de ce type est en cours de réalisation à la DSM (211 T/m à ~12000 A et 4,2 K). Le bobinage a commencé début 2003 pour permettre des premiers tests à froid début 2005. On notera que ce programme constitue une excellente préparation pour un futur éventuel emploi des supraconducteurs haut Tc (non encore utilisable aujourd'hui sur accélérateur) car il y a des similitudes de mise en œuvre technologique avec le niobium/étain.

Ces exemples sélectionnés montrent la vivacité et le potentiel des programmes qui, par ailleurs, nécessitent souvent une démarche de collaboration européenne (voire mondiale). Leur inscription dans des programmes cadres de l'Union européenne, démarrée depuis le quatrième PCRD pour les faisceaux exotiques et depuis le cinquième PCRD pour l'XADS, doit s'amplifier et se généraliser avec le sixième PCRD en cours d'élaboration. Toutefois, ces perspectives très encourageantes nécessiteront une politique du personnel extrêmement dynamique et volontariste car la pyramide des âges des spécialistes actuels du domaine est très préoccupante.

1 Président: G. Wormser. Membres: T. Garvey, M. Jacquemet, J.-L. Laclare, M. Lieuvain, A. Mosnier, A.-C. Mueller, Y. Terrien.

La violation de CP

Après la découverte de la violation de CP dans les systèmes des kaons neutres et des mésons B, des expériences sont en préparation, notamment auprès du LHC, qui pourraient permettre, à l'horizon 2010, d'ouvrir la voie à une nouvelle physique et ainsi de progresser dans la compréhension de l'asymétrie matière-antimatière de l'Univers actuel.

Le contenu de cette session peut être résumé à l'aide d'un ensemble de questions-réponses.

Que sait-on sur la violation de CP ?

La symétrie CP est le produit de deux symétries discrètes, C (conjugaison de charge) et P (parité). CP est une bonne symétrie pour les interactions forte et électromagnétique, mais elle est légèrement violée lors de certaines désintégrations faibles. Cette faible asymétrie est étudiée en laboratoire depuis sa découverte, dans le système des kaons neutres et depuis peu dans celui des mésons B.

Les trente-cinq ans d'étude des kaons ont montré que cette violation est bien décrite par le modèle standard comme résultant de l'existence d'une phase irréductible dans la matrice complexe décrivant le mélange entre les trois familles de quarks. Deux voies permettent cette légère asymétrie. La première est un mélange non démocratique des deux états propres de CP à l'intérieur de la particule physique K_L qui permet à celle-ci de se désintégrer aussi en $\pi\pi$. La seconde - approximativement mille fois moins probable que la première - a été dernièrement dévoilée de façon définitive comme se produisant lors de la désintégration (expérience NA48 au Cern). Des interférences entre amplitudes de mélange et de désintégration peuvent aussi avoir lieu. On a pu démontrer de façon indépendante la violation de la symétrie T (expérience CPLEAR au Cern), ce qui garantit (à l'intérieur de la précision de la mesure) que la symétrie globale CPT est respectée.

Depuis quelques années, les anneaux électron-positon à Stanford et à KEK, au Japon, ont permis la production en chaîne de mésons B et les hautes statistiques ainsi accumulées ont rendu possible la recherche de la violation de CP dans ce système. Selon le modèle standard, dans certains modes rares de désintégration des B, on doit observer de fortes différences de taux, suivant que B est une particule ou une antiparticule. Les interactions entre quarks sont représentées par un triangle d'unitarité dont les côtés et les angles sont fonction des couplages entre familles. La violation de CP dans les mésons B est maintenant confirmée par les deux expériences Babar et Belle, et la valeur mesurée de $\sin 2\beta$, où β est l'un des angles du triangle d'unitarité, est en parfait accord avec les contraintes déduites de l'ajus-

tement des mesures des côtés du triangle faites en particulier à LEP. Sur la figure ci-contre, le triangle le plus probable est comparé à la mesure directe de $\sin 2\beta$.

Pourquoi s'intéresse-t-on à la violation de CP ?

Cette petite violation de la symétrie CP a été découverte en 1964 grâce à la détection de 0,2 % de désintégrations interdites de K_L en $\pi\pi$. Son intérêt, mis à part sa compréhension qualitative et quantitative, est lié à l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'Univers, les mesures montrant qu'un baryon sur un milliard ($N_{\text{baryons}}/N_{\text{photons}} = 10^{-9}$) a survécu lors de l'annihilation matière-antimatière. En 1967, trois conditions nécessaires à la réalisation d'un tel excès ont été formulées par A. Sacharov, à savoir: la violation du nombre baryonique, la violation de CP et l'Univers en situation hors équilibre thermodynamique.

En ce qui concerne la quantité de violation de CP capable d'engendrer l'asymétrie observée, ni le modèle standard ni ses proches extensions ne sont en position de fournir un mécanisme suffisant. Cela constitue un des problèmes majeurs pour la physique des particules et la cosmologie d'aujourd'hui.

Que veut-on apprendre dans les prochaines années ?

La communauté scientifique française est impliquée pour les années à venir dans des projets qui assureront des réponses à l'horizon 2010 à certaines des questions posées sur la violation de CP. En effet, les mesures au Tevatron à Fermilab fourniront (avant 2005) la fréquence d'oscillation de Bs nécessaire à l'étude de l'unitarité du triangle (expériences D0 et CDF). Les mesures futures auprès des usines à B et au LHC (LHCb, Atlas et CMS) permettront de tester la fermeture du triangle et son unitarité avec une précision de 1 %. Cela donnera des indications sur la présence d'une nouvelle physique. LHC étudiera l'existence et les propriétés de la supersymétrie. Si ce modèle décrit effectivement la nature, de nouvelles phases violant CP sont attendues. Les oscillations de neutrino observées ces dernières années

suggèrent l'existence d'une matrice de couplage leptonique à trois familles et des phases violant CP. L'expérience Nemo montrera si le neutrino est une particule de Majorana. Si c'est le cas, de nouvelles sources de violation de CP sont attendues. L'expérience Cast au Cern améliorera d'un facteur 10 la limite actuelle sur les axions, particules reliées à la violation forte de CP. On espère avoir une meilleure compréhension théorique des contributions hadroniques qui sont la principale source d'incertitude dans les prédictions. Cela peut venir à la fois des calculs QCD sur réseaux et de l'ajustement des paramètres théoriques que permettront certaines mesures de précision.

Tout cela permet d'espérer que la question: «Y a-t-il de nouvelles sources de violation de CP et si oui, lesquelles?», sera élucidée de façon complémentaire par des mesures de précision démontrant l'insuffisance du modèle standard (cas de non-fermeture du triangle d'unitarité) et donc la nécessité de son extension, et par des mesures directes (cas de découverte des nouvelles particules).

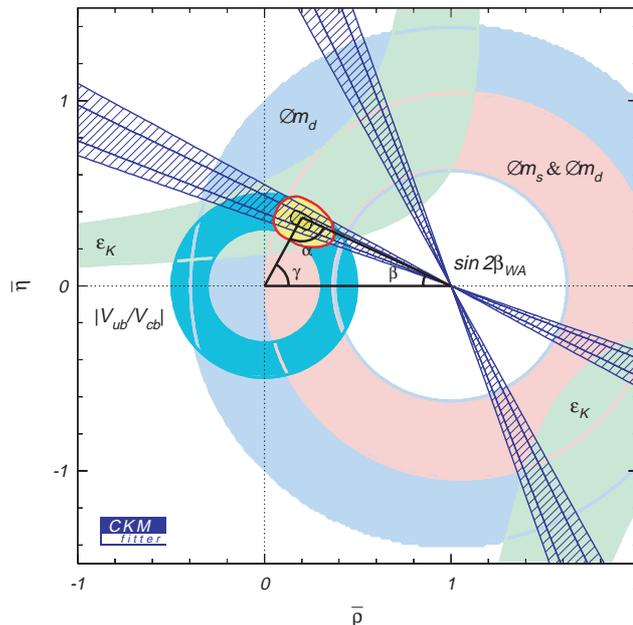
Les physiciens et ingénieurs des deux instituts (IN2P3 et CEA) sont fortement impliqués dans cette classe de recherche et en particulier dans la série des projets cités ci-dessus. La continuité naturelle des sujets laisse à penser qu'une grande partie des chercheurs impliqués actuellement sur le Tevatron et dans Babar viendra renforcer l'effort de ceux qui travaillent déjà sur les expériences futures.

A-t-on manqué un projet important ?

D'autres projets concernant l'étude de la violation de CP, ou en étroite relation avec elle, sont actuellement en préparation sans participation française prévue. Le Comité de la session souligne l'importance des trois projets suivants.

Les programmes d'étude de modes très rares de désintégration de kaons

Deux modes reliés à l'apex et à l'hypoténuse du triangle avec de «petites» incertitudes théoriques de 7 % au maximum permettent d'accéder au triangle d'unitarité: $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ et $K^\pm \rightarrow \pi \nu \nu$ (taux $< 10^{-10}$). L'intérêt de cette mesure concerne la cohérence de la théorie entre les mésons K et les mésons B et vise à avoir deux estimations indépendantes du triangle. Les projets KOP10 et CKM aux États-Unis et un projet similaire à JHF au Japon, auxquels la communauté française ne participe pas malgré une expertise certaine et un intérêt exprimé, sont actuellement en construction.



Contraintes les plus récentes sur le triangle de l'unitarité. Les bandes colorées indiquent les régions permises par différentes mesures. Les deux axes hachurés en bleu désignent les quatre valeurs possibles de l'angle β correspondant à la mesure de $\sin 2\beta$. La tache tricolore sur l'intersection de toutes les bandes indique la valeur la plus probable de l'apex du triangle à trois niveaux de degrés de confiance.

© Collaboration Babar

Le projet d'expérience au PSI visant à l'amélioration de deux ordres de grandeur de la limite sur le moment dipolaire électrique (EDM) du neutron, ce qui permettrait de contraindre certains modèles supersymétriques

Un moment dipolaire électrique non nul pour une particule serait une conséquence directe de la non-conservation de la symétrie T et donc de CP. Les neutrons offrent un système avantageux pour cette étude en raison de leur charge nulle et de la possibilité de former des faisceaux ultra-froids. Le laboratoire ILL de Grenoble a une longue expérience dans ce domaine de physique. Néanmoins, nos deux instituts n'ont jamais fait partie de ce programme.

Le projet Cleo-c à Cornell, un champ d'étude complet sur les mésons charmés

Ce domaine permettrait d'effectuer des mesures précises des termes actuellement mal connus qui interviennent dans les désintégrations des mésons B, les affectant d'incertitudes importantes. De ce point de vue, il constitue un passage obligé pour optimiser la précision maximale sur les mesures de la violation de CP. Par ailleurs, il existe en France des physiciens intéressés par ce type de recherches.

Ces projets ont l'avantage d'être complémentaires des expériences majeures déjà entreprises, peu onéreux et économiques en termes d'investissement en personnes. Ils se dérouleront en partie parallèlement aux projets principaux et fourniront des résultats de première importance à l'horizon 2010. Une discussion les concernant serait souhaitable au sein de la communauté.

Physique au-delà du modèle standard et matière noire

Le modèle standard ne permettant pas de répondre à nombre d'interrogations fondamentales, la quête de nouvelles particules se poursuit aussi bien dans l'Univers qu'au cœur de collisionneurs de très haute énergie. Elle devrait permettre de tester certains des prolongements théoriques au modèle standard proposés à ce jour.

Les résultats récents et spectaculaires des expériences Boomerang, Archeops et MAP ont confirmé l'existence de matière non baryonique (noire) en quantité importante dans l'Univers, sans qu'il soit possible pour l'instant d'en connaître les propriétés fondamentales. Les recherches directes ou indirectes de matière noire ou les recherches de nouvelles particules auprès d'accélérateurs de haute énergie forment un axe de recherche très actif dont l'objectif commun est d'aller au-delà du modèle standard des particules élémentaires pour mieux comprendre les lois fondamentales et les caractéristiques de notre Univers.

Recherches directes et indirectes de matière noire

Les mesures cosmologiques récentes sur le rayonnement fossile, les supernovæ lointaines, les grandes structures de l'Univers et la nucléosynthèse primordiale permettent de prédire de manière cohérente que $\Omega_{\text{matière}}$, la densité de matière de l'Univers rapportée à sa densité critique (densité pour laquelle l'Univers serait plat, ce qui est établi expérimentalement avec une bonne précision), vaut environ 0,27 et que sa composante baryonique vaut 0,04. Le 0,23 manquant serait dû à de la matière noire non baryonique.

Les mesures astrophysiques permettent de contraindre la densité locale de matière noire ρ_{DM} , en particulier les mesures concernant les courbes de rotation des galaxies qui montrent que ces dernières sont entourées d'un halo de matière noire. Localement, on estime ρ_{DM} proche de $0,3 \text{ GeV/cm}^3$.

La recherche par l'expérience Eros d'effets de lentilles gravitationnelles, qui indiqueraient le passage de corps massifs du halo (Macho) devant les étoiles des deux nuages de Magellan, a conduit à des limites sévères sur la densité de ces objets et montré qu'ils ne pouvaient représenter qu'une faible fraction du halo de notre galaxie (< 25 % pour des Machos de masse comprise entre 10^7 et 1 masse solaire), en bon accord qualitatif donc avec les résultats cosmologiques. L'analyse en cours des données obtenues ces dernières années permettra de contraindre davantage la présence de ces objets et la continuation de ce type de recherche se fera à l'aide d'expériences de type Point-Agape qui observeront dans

la direction de la galaxie d'Andromède en essayant de détecter des variations de luminosité par pixel et non pas des étoiles résolues.

La matière noire non baryonique doit donc être cherchée sous d'autres formes, notamment sous la forme d'un nouveau type de particules génériquement appelées Wimps (du fait de leur faible interaction avec la matière) pour lesquelles la particule supersymétrique la plus légère, en général le neutralino, est un candidat privilégié. Les Wimps peuvent être recherchées de manière directe *via* leur diffusion sur les noyaux ou de manière indirecte *via* la détection de leurs produits d'annihilation dans les rayons cosmiques.

L'étude des diffusions élastiques Wimp-noyau, caractérisées par l'énergie de recul du noyau, leur taux (en fonction de la direction du soleil) et la forme du spectre de E_{recul} , permettrait de remonter à la masse des Wimps (M_{W}) et à leur section efficace. Pour $M_{\text{W}} = 100 \text{ GeV}$, on attend un recul de 20 keV et un taux variant entre 1 evt (événement)/tonne/mois et 1 evt/kg/j (avec les sections efficaces attendues pour les particules supersymétriques [Susy]). Deux stratégies expérimentales ont été poursuivies: 1) un détecteur simple, à base de scintillateurs ou de cristaux de germanium, et massif tel Dama (NaI) ou Zeplin (Xe liquide), mais ne fournissant pas une bonne discrimination des reculs nucléaires; 2) un détecteur au germanium cryogénique (tel CDMS en surface ou Edelweiss à Modane) optimisé pour la discrimination, événement par événement, des signaux de recul et de bruit. Cette seconde solution permet de meilleures sensibilités, grâce à la mesure simultanée des signaux de chaleur et de charge et à la possibilité d'étalonnage par rayonnement γ ($^{252}\text{Californium}$). Edelweiss a ainsi pu exclure comme candidats Wimps les signaux modulés en temps de Dama et commencer à tester directement les prédictions supersymétriques. Les gains à venir concernent la statistique (trois détecteurs), le seuil et la résolution pour Edelweiss, tandis que CDMS bénéficiera d'une implantation en site souterrain. Ces gains permettront d'augmenter la sensibilité en section efficace de deux ordres de grandeur environ d'ici à 2006, l'objectif ambitieux pour la fin de la décennie étant, pour les collaborations européennes, de devenir sensibles à des sections efficaces de l'ordre de 10^{-10} pb , ce qui permettrait de couvrir une partie importante des prédictions de la supersymétrie.

Les Wimps sont aussi recherchées de manière indirecte par leurs produits d'annihilation dans les rayons cosmiques : recherche d'excès d'antimatière (expérience AMS), signaux directionnels de ν (Antares) ou γ (AMS, Celeste, Hess) provenant de matière noire accumulée au centre des galaxies, du Soleil ou de la Terre, ou encore recherche d'un halo de photons diffus autour de la galaxie.

Aucun signal n'a pour l'instant été observé, mais dans les années à venir la combinaison des recherches directes et indirectes augmentera fortement les contraintes sur la matière noire et sur le modèle supersymétrique minimal.

Physique au-delà du modèle standard

Bien qu'ayant été capable d'expliquer jusqu'à présent tous les résultats expérimentaux en physique des hautes énergies, le modèle standard doit encore passer l'examen du mécanisme de Higgs (recherches décrites dans un autre exposé). Ici, il s'agit d'examiner comment dépasser le modèle standard, dans la mesure où celui-ci n'est pas capable d'expliquer un nombre important de questions fondamentales. Par exemple, si le boson de Higgs existe et est un champ scalaire fondamental, il faut envisager une extension théorique au modèle standard dont la plus prometteuse est la supersymétrie, ou peut-être l'existence de dimensions supplémentaires. Au-delà de ces questions qui se présentent immédiatement, il faut rappeler aussi que le modèle standard n'offre pas d'explication au sujet de l'existence de trois familles de particules, de la valeur des masses des particules, de la relation entre la gravitation et les autres forces, ou de la quantification de la charge électromagnétique.

L'étude de la violation de la symétrie CP étant traitée par ailleurs, les deux accélérateurs où s'effectuent les recherches actuelles dont il est question ici sont Hera et le Tevatron, auprès desquels les laboratoires de l'IN2P3 et le Dapnia sont engagés dans les expériences H1 et D0. Ces équipes poursuivent les recherches commencées au LEP pour mettre en évidence la supersymétrie, dont la phénoménologie dépend de la nature de la particule Susy la plus légère. Lorsque la brisure de la supersymé-

trie est due à la gravité, cette particule est préférentiellement le neutralino (χ^0), mais d'autres candidats sont possibles, tels le sneutrino ou le gluino. La brisure peut aussi se produire d'autres manières, conduisant à des réactions différentes, mais l'attention est portée ici sur le modèle le plus simple (MSSM).

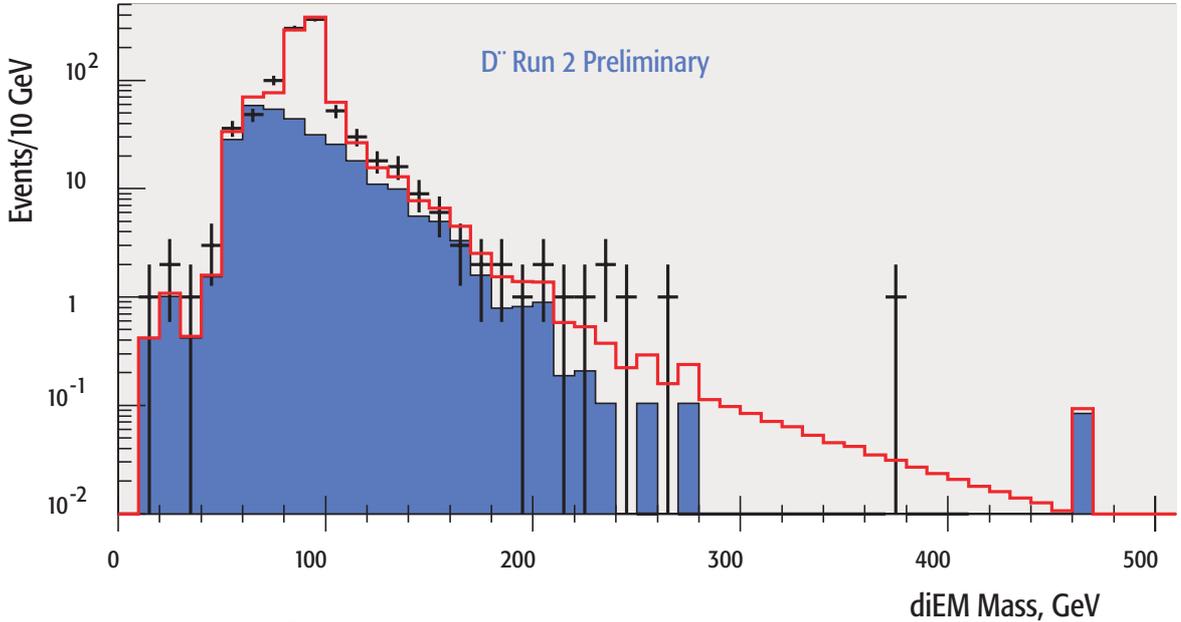
L'augmentation de la luminosité du Tevatron va permettre d'étendre le domaine de sensibilité sur les particules supersymétriques jusqu'à des masses de 400 (450) GeV pour les gluinos (squarks) à l'horizon 2006 dans les canaux « jets + énergie transverse manquante (ETM) » ou « 2 jets + 2 leptons + ETM », soit un gain d'un facteur 2 environ en masse. Sur les charginos et les neutralinos, le canal $pp \rightarrow \chi^+ \chi^0_2$, avec dans l'état final 3 leptons ou 2 leptons de même signe, devrait permettre d'être sensible jusqu'à une masse de χ^+ de 200 GeV. Enfin, concernant le stop ou le sbottom, qui pourraient être les squarks les plus légers, les sensibilités devraient également être de l'ordre de 200 GeV à la fin du Run IIa, après étude des canaux sbottom $\rightarrow b\chi^0$ et stop $\rightarrow b\chi^+$, $bW\chi^0$, $c\chi^0$ ou stop $\rightarrow b$ -lepton-sneutrino si ce dernier est léger. À Hera, le domaine de compétitivité concerne les modèles Susy avec violation de R-parité, avec une sensibilité qui pourrait être étendue à 290 GeV pour les squarks. Quant au LHC, il permettra de rechercher les particules Susy à l'échelle du TeV et au-delà.

La recherche directe de leptoquarks, particules prédites dans diverses extensions du modèle standard et qui relient les secteurs des leptons et des quarks, va se poursuivre à Desy et à Fnal jusqu'à des masses de 400 GeV pour 10 fb^{-1} de luminosité intégrée au Tevatron, à condition que le rapport d'embranchement en lepton chargé - quark soit grand, sinon la sensibilité de Hera sera plus grande.

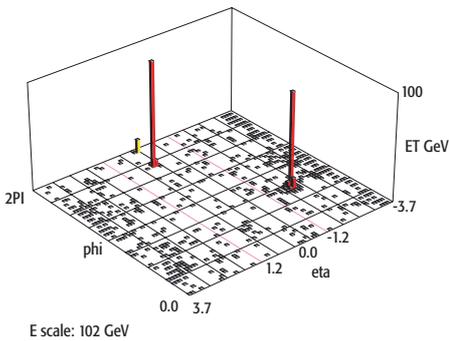
Les recherches d'irrégularités dans les processus à grande énergie transverse (Drell-Yan, dijets, diphotons ou diffusion profondément inélastique) vont elles aussi continuer afin de mettre en évidence de nouveaux phénomènes dont le plus surprenant pourrait être celui dû à l'existence de grandes dimensions supplémentaires. Ces effets ont déjà été exclus jusqu'à des échelles d'énergie de l'ordre de 1 TeV, mais les expériences auprès du Tevatron devraient atteindre une sensibilité de 2 TeV, tandis que le LHC explorera des échelles de l'ordre de 5 à 7 TeV. Les premières données du Run II du Tevatron

a)

diEM Mass Spectrum



b)



Premiers résultats du Run II du Tevatron par l'expérience D0 obtenus à partir des données prises jusqu'à l'été 2002 ($L = 10 \text{ pb}^{-1}$).

a) Le spectre en masse invariante des événements avec une paire e^+e^- ou $\gamma\gamma$ dans l'état final est comparé aux prédictions du modèle standard. Un excès à grande masse pourrait être dû à des dimensions supplémentaires.

b) Visualisation en mode « lego » et en vue de profil de l'événement à plus grande masse (375 GeV). Ces données préliminaires ont déjà permis d'exclure des dimensions supplémentaires à une échelle de masse inférieure à 0,82 TeV.

© Collaboration D0

qui a démarré au printemps 2001 ont permis d'établir une première limite sur l'existence de ces dimensions (figures). Par ailleurs, les interactions de contact seront testées à des échelles correspondant à des distances de quelque 10^{-17} cm.

Enfin, l'augmentation de luminosité attendue à Hera et au Tevatron devrait permettre de clarifier le « petit » excès d'événements multileptons à grande masse invariante observé par H1 mais non confirmé par Zeus.

En conclusion, malgré les remarquables succès du modèle standard des particules et du modèle standard cosmologique qui permettent de rendre compte de l'essentiel des phénomènes observés, il reste de nombreuses énigmes fondamentales dont certaines semblent à la portée de nos instruments dans un futur proche tandis que d'autres paraissent être encore à la limite ou au-delà de notre imagination, gage de la vitalité de nos disciplines.

Quête de l'origine de la masse

Pour les physiciens des particules partis à la quête du (ou des) boson(s) de Higgs, l'accroissement de l'énergie des faisceaux d'accélérateurs est une priorité. Après le LEP puis le Tevatron, les expériences se poursuivront auprès du LHC et à plus long terme probablement auprès d'un collisionneur linéaire d'électrons de très haute énergie.

Depuis plus de deux décennies, les progrès expérimentaux et théoriques en physique des hautes énergies n'ont cessé de confirmer ce que nous appelons le modèle standard de physique des particules. Dans ce modèle, les interactions faibles et électromagnétiques sont unifiées en une seule interaction électrofaible. Les interactions fortes γ ont aussi été intégrées avec, comme groupe de symétrie, le groupe $SU(3)_C \oplus SU(2)_L \oplus U(1)_Y$. Un des premiers grands succès de la théorie a été la découverte, au début des années quatre-vingt au Cern, des bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 , médiateurs de l'interaction faible, avec une masse un peu en dessous de 100 GeV, en accord avec les prédictions.

Depuis, les mesures de précision effectuées au LEP au Cern, aussi bien à LEP100 (production de Z^0) qu'à LEP200 (production de paires W^+W^-), ainsi qu'au SLC à Slac et au Tevatron à Fermilab ont vérifié ces prédictions avec une précision inégalée dans ce domaine d'énergie.

Néanmoins, dans la construction de ce modèle théorique, où, au départ, les particules élémentaires, quarks et leptons, ont une masse nulle, un mécanisme de brisure de symétrie est nécessaire pour leur donner une masse. Le mécanisme le plus couramment admis est l'introduction d'un doublet supplémentaire de champs scalaires se couplant aux particules de la théorie et faisant apparaître une nouvelle particule appelée boson de Higgs. Aucune prédiction sur la valeur de la masse de cette particule n'est cependant faite: d'où la recherche systématique effectuée sur l'ensemble du domaine d'énergie accessible auprès des accélérateurs.

Le Higgs au LEP

Le boson de Higgs n'étant pas présent dans des données déjà existantes, comme cela a été vérifié, il a été recherché à la plus haute énergie accessible au LEP. Les mesures de précision permettent, de façon indirecte, de donner une limite sur la masse grâce aux corrections radiatives faisant intervenir des boucles avec un boson de Higgs virtuel. Les limites sont peu contraignantes car, en général, ces corrections dépendent logarithmiquement de la masse du boson de Higgs: $M_H = 91^{+58}_{-37}$ GeV et $M_H \leq 211$ GeV avec 95 % de degré de confiance. La recherche directe au LEP a été faite *via* la réaction de pro-

duction $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$. Au cours des dernières années de fonctionnement du LEP, afin d'explorer la plus haute masse possible pour le boson de Higgs, l'énergie des faisceaux a été poussée à son extrême limite par l'ajout de cavités RF supraconductrices supplémentaires. Le résultat final est que la masse du Higgs est supérieure à 114,4 GeV avec 95 % de degré de confiance. Pour aller plus haut en masse, il faut se tourner vers des accélérateurs plus énergiques comme le Tevatron à Fermilab (collisions proton-antiproton à $2 \times 0,96$ TeV), le LHC au Cern (collisions proton-proton à 2×7 TeV) dont on espère la mise en route en 2007 et, à plus long terme, le collisionneur linéaire à électrons-positrons d'énergie comprise entre 0,5 et 1 TeV.

Le Dapnia et l'IN2P3 ont participé activement à cette recherche avec les expériences UA1 et UA2 au SppS du Cern pour la découverte des bosons intermédiaires W et Z , puis plus récemment avec les quatre expériences Aleph, Delphi, L3 et Opal au LEP (mesures de précision et recherche directe). Ils continuent à le faire avec l'expérience D0 à Fermilab (run II) et les futures expériences Atlas et CMS au LHC. Enfin, dans un futur plus lointain, ils participeront au collisionneur linéaire à électrons.

Le Higgs au Tevatron

Au Tevatron, le run IIa qui vient de commencer doit permettre d'accumuler une luminosité intégrée vingt fois plus grande (2 fb^{-1}), à une énergie dans le centre de masse un peu plus élevée qu'avant et avec une luminosité instantanée nettement plus élevée ($10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ au lieu de $2 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Cette augmentation de luminosité a obligé les deux expériences CDF (*Collider Detector at Fermilab*) et D0 à modifier leur électronique de lecture et déclenchement car les croisements entre faisceaux étaient plus proches. Des améliorations ont aussi été apportées aux détecteurs avec, par exemple pour D0, l'installation d'un solénoïde supraconducteur pour que le détecteur de traces mesure aussi l'impulsion des particules chargées et l'installation de détecteurs au silicium plus performants pour détecter des vertex secondaires. Le mode le plus prometteur pour détecter le boson de Higgs à Fermilab est la production associée $q\bar{q} \rightarrow W H^0$ ou $q\bar{q} \rightarrow Z H^0$, le boson de Higgs se désinté-

grant en une paire de quarks $b, H^0 b\bar{b}'$. L'étiquetage du quark b par la présence d'un vertex secondaire est donc particulièrement important. La limite sur la masse du boson de Higgs pourra être montée un peu au-dessus de la limite atteinte par LEP II, soit jusqu'à environ 120 GeV à la fin du run IIa. On estime qu'il faut une luminosité intégrée de 10 fb^{-1} pour exclure le boson de Higgs jusqu'à une masse de 140 GeV.

Le Higgs au LHC

Au LHC, le Dapnia et l'IN2P3 participent à la construction des deux expériences généralistes Atlas et CMS. L'énergie des faisceaux de protons, 7 TeV, et la luminosité instantanée $10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ puis $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ donneront accès à une recherche du boson de Higgs jusqu'à une masse de l'ordre du TeV. À basse masse, autour de 120 GeV, le mode le plus prometteur est la production de Higgs par fusion de gluons $gg H^0$ ou par fusion de W ou Z , $qq' \rightarrow WWqq'$ ou $ZZqq' \rightarrow H^0qq'$, suivie par la désintégration du Higgs en 2 photons $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Les calorimètres électromagnétiques de ces deux expériences ont été soigneusement optimisés pour détecter ce mode. Plusieurs groupes français sont engagés dans la construction des calorimètres d'Atlas et de CMS. Ils ont montré à Giens les progrès spectaculaires réalisés ces dernières années avec l'assemblage de la première des deux roues du calorimètre central pour Atlas (photo), et la livraison du premier quart des 80 000 cristaux de tungstate de plomb et la réalisation d'environ un sixième des modules du baril central pour CMS.

Au-dessus d'une masse d'environ 140 GeV, les désintégrations du boson de Higgs en une paire de W ou en une paire de Z , $H \rightarrow W^+ W^-$ ou $H \rightarrow Z^{0(*)} Z^0$, sont plus indiquées pour sa mise en évidence. Cela conduit, en excluant les états purement hadroniques trop difficiles à isoler des interactions hadroniques QCD ordinaires, à rechercher des états finals $2l2\nu$ (2 leptons chargés, 2 neutrinos) ou $lvjj$ (lepton neutrino et 2 jets) pour les paires de W et à rechercher des états finals 4 leptons chargés (électron, muon ou tau) ou 2 leptons chargés 2 neutrinos pour les paires ZZ . Les autres sous-détecteurs d'Atlas et de CMS, tels que le détecteur de traces interne comprenant des détecteurs à pixels de silicium et des détecteurs de silicium, le calorimètre hadronique et le spectromètre à muons, seront sollicités pour mesurer soit l'énergie transverse manquante (présence de neutrinos), soit l'impulsion des électrons et des muons

(lepton chargé). Plusieurs groupes français sont engagés dans la construction de ces sous-détecteurs. Les calendriers montrés à Giens laissent espérer que ces détecteurs seront effectivement prêts à voir les premières collisions proton-proton en 2007. La découverte du boson de Higgs est de première importance, mais l'étude de ses propriétés (valeur de sa masse, valeur de la section efficace de production, rapports d'embranchement...) l'est également pour le caractériser complètement. Un certain nombre de ces mesures seront faites au LHC et le collisionneur linéaire à électrons-positrons ambitionne de les effectuer avec une encore plus grande précision.

Vers un collisionneur linéaire électrons-positrons

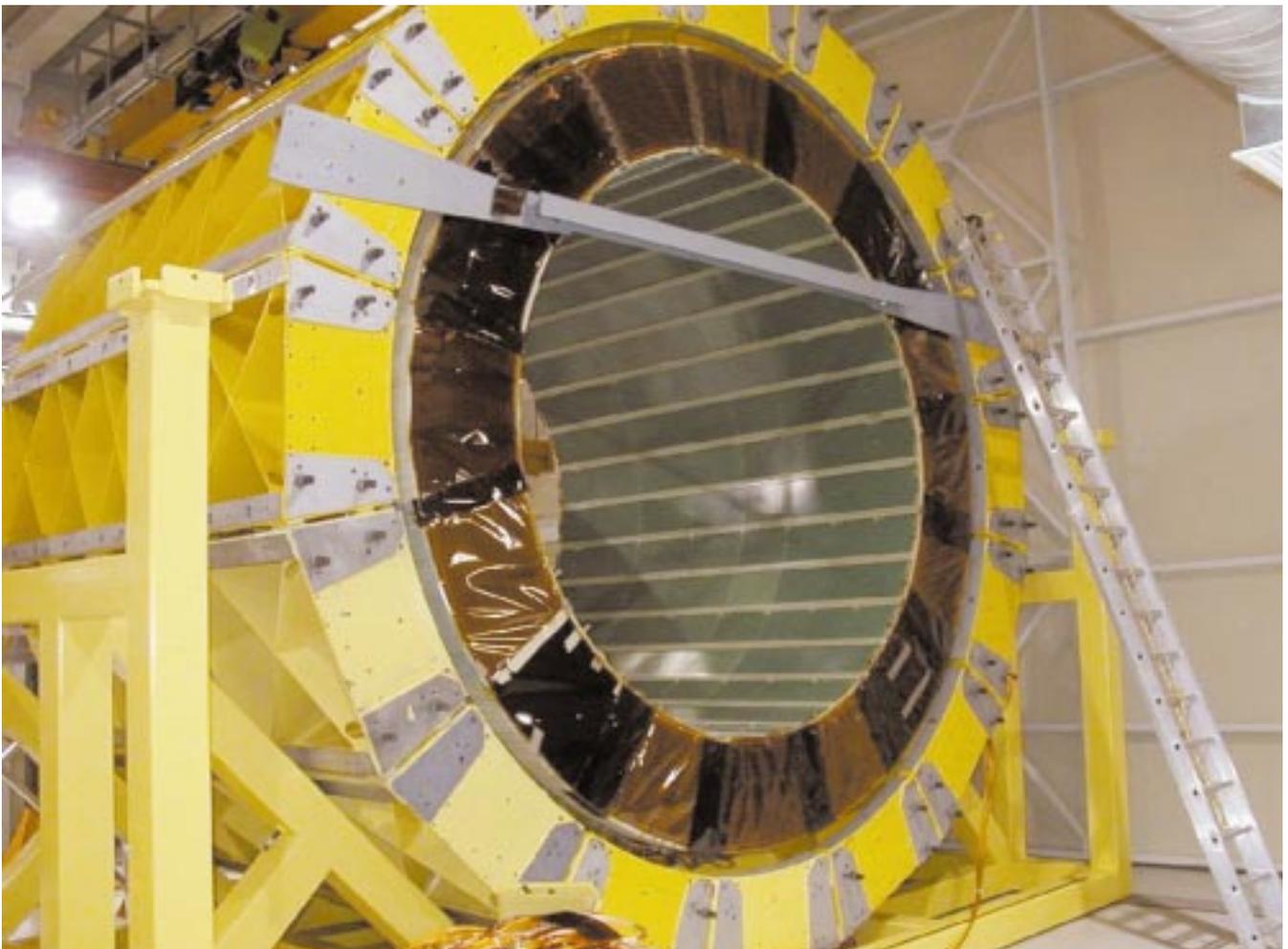
Des physiciens du Dapnia et de l'IN2P3 se sont regroupés dans la collaboration Socle pour étudier la physique auprès d'un tel collisionneur et définir le détecteur à construire. Plusieurs programmes de R&D sont déjà engagés : calorimètre électromagnétique à plaques de tungstène et de détecteurs au silicium, TPC, détecteurs au silicium, capteurs Cmos pour un détecteur à pixels... De plus, ces deux organismes ont participé et participent *via* les projets Tesla et Clic aux R&D accélérateurs nécessaires pour montrer la faisabilité d'un accélérateur linéaire supraconducteur.

Le programme ci-dessus a été décrit dans le cadre du modèle standard strict avec un seul boson de Higgs. Or, on sait qu'en dehors de l'absence de mise en évidence du boson de Higgs le modèle standard présente plusieurs difficultés théoriques graves telles que le problème de l'ajustement très fin des corrections à apporter aux masses, la question de la hiérarchie entre l'échelle de grande unification et l'échelle électrofaible ou le fait que la gravitation n'entre pas facilement dans ce cadre théorique. Une façon élégante de surmonter ces difficultés est de supposer l'existence d'une symétrie supplémentaire, la supersymétrie, dans laquelle à chaque fermion on fait correspondre un partenaire boson supersymétrique, et réciproquement. Dans ce cas, le secteur du Higgs se complique et, au lieu d'introduire un doublet de champs scalaires pour expliquer la masse, il faut en introduire au moins deux ; dans le modèle supersymétrique minimal (nombre minimal de paramètres supplémentaires), il apparaît alors deux bosons de Higgs chargés H^+ et H^- et trois bosons neutres appelés h , H et

A. Bien entendu, cette nouvelle symétrie est brisée dans la mesure où aucune particule supersymétrique n'a été vue à ce jour, cette brisure se situant à l'énergie du TeV. Cela renforce évidemment la nécessité d'effectuer des mesures précises sur le ou les bosons de Higgs trouvés, pour préciser quel scénario de supersymétrie la nature aurait choisi. D'autres modèles ont été proposés pour résoudre les difficultés théoriques indiquées ci-dessus, par exemple des modèles avec des extradimensions ou des modèles de technicouleur. Ces derniers pourront être aussi testés au LHC et au collisionneur linéaire.

La quête de l'origine de la masse, axe majeur de recherche en physique des particules, mobilise, on le voit, beaucoup de physiciens au sein de l'IN2P3 et du Dapnia. Les prochaines années, avec les prises de données au Tevatron de Fermilab et le démarrage du LHC, sont donc attendues de pied ferme.

*Première roue
du calorimètre
d'Atlas
(enveloppée
de plastique
rouge) avant son
introduction
dans le cryostat.
© Cern*



La structure du nucléon

La connaissance des propriétés individuelles des quarks de valence ne suffit pas à expliquer la richesse des processus qu'ils engendrent au sein des protons et des neutrons. Pour comprendre l'origine de leur confinement, l'étude de leur comportement au sein même des hadrons s'avère indispensable.

Les noyaux sont composés de protons et de neutrons, lesquels sont constitués de trois quarks de valence! Ces deux vérités connues depuis bien longtemps illustrent parfaitement la situation paradoxale dans laquelle se trouve l'étude de la structure du nucléon. Les composants élémentaires du nucléon sont connus. Pourtant, la masse au repos des quarks de valence ne représente que 1 % de celle du nucléon. En conséquence, 99 % de la masse de la Terre et de ses occupants est déterminée par les interactions entre ces quarks, et donc par les gluons, et par les fluctuations quark-antiquark de la mer. Dans ces conditions, il va sans dire que seules des méthodes non perturbatives pourront permettre de comprendre, d'un point de vue théorique, la structure du nucléon.

Dans cet esprit, l'étude de la structure du nucléon se rapproche de celle de la structure nucléaire: en effet, il ne suffit pas de dire que le noyau est constitué de protons et de neutrons pour comprendre toute la richesse de la structure nucléaire et, notamment, des phénomènes collectifs dont elle est le siège. Il en va d'ailleurs ainsi de tout système complexe.

Il convient donc d'aller au-delà de la simple connaissance des propriétés individuelles des quarks de valence, comme leur fonction de distribution. Trois approches complémentaires peuvent être suivies, en concordance avec des programmes expérimentaux en cours ou en projet.

La première approche s'intéresse à la composition du nucléon en gluons (à Compass) et en quarks de la mer, notamment en quarks étranges (à JLAB, Mami, MIT). C'est un enjeu important pour comprendre l'origine du spin du nucléon et, ainsi, aller au-delà de notre compression naïve du nucléon en termes de modèle de quarks constituants non relativistes.

La deuxième approche consiste à étudier la réponse dynamique du nucléon à une excitation extérieure. C'est le rôle du programme d'étude des résonances (à Graal par exemple), ou de celui des polarisabilités électriques et magnétiques, que ce soit à $Q^2 = 0$ ou à plus haut transfert (à Mami et JLAB). Ces dernières observables sont essentielles pour comprendre le rôle que doit jouer le pion dans la structure du nucléon.

La troisième approche consiste en la détermination directe des fonctions de corrélation entre quarks. Il s'agit ni plus ni moins ici que d'avoir un accès, même indirect ou partiel, à la fonction d'onde du nucléon

elle-même! C'est le rôle du programme d'étude des facteurs de forme électromagnétiques et faibles du nucléon (à JLAB) ou de celui de la diffusion Compton virtuelle profondément inélastique (à JLAB, Hermes, Compass) avec la détermination des fonctions de distribution généralisées.

D'un point de vue théorique, la situation n'est pas moins paradoxale. Plus aucun théoricien ne met en doute la validité du Lagrangien de QCD - que chaque étudiant en DEA de physique subatomique devrait d'ailleurs pouvoir écrire sur le dos d'une enveloppe! - pour comprendre la structure du nucléon. Néanmoins, nous ne savons pas encore le résoudre. Il a donc fallu dans un premier temps avoir recours à des modèles phénoménologiques. Cependant, les méthodes théoriques visant à résoudre directement le Lagrangien de QCD ont fait d'énormes progrès depuis une dizaine d'années. Les calculs de QCD sur réseau commencent à prédire quelques observables expérimentales, notamment dans le domaine des quarks lourds. Comme toujours, les symétries jouent un rôle moteur dans la compréhension des phénomènes physiques complexes. Il en est ainsi pour la symétrie chirale. Sa brisure spontanée et donc la nécessité d'avoir un boson de Goldstone associé - le pion - sont à l'origine, dans le cadre de la théorie des perturbations chirales, de nombreuses prédictions sur les observables à basse énergie dans le domaine des quarks légers et dans celui de la structure microscopique des noyaux.

Ces développements théoriques, adossés à un programme expérimental cohérent et riche, sont un gage certain de réussite dans les dix années à venir.

Explorer les extrêmes : faisceaux d'ions stables et radioactifs de haute intensité

La réflexion prospective en physique nucléaire a permis de dégager deux axes d'évolution. La recherche de phénomènes extrêmes devra bénéficier pour se développer d'un accélérateur européen dédié de basse énergie et haute intensité. Après Spiral II, la réalisation d'une machine européenne de type Eurisol semble être la conduite à suivre pour l'avenir de la physique des noyaux loin de la stabilité.

Au moment où démarre le premier exposé sur la physique du noyau, on peut s'interroger sur le visage que va présenter cette discipline: fragmentation des objectifs ou, au contraire, cohérence de ses perspectives, liens entre les thématiques et affichage clair de ses priorités?

La physique nucléaire de basse énergie avec faisceaux stables

L'exposé d'introduction du groupe de travail sur la structure nucléaire au moyen de faisceaux stables de basse énergie (autour de la barrière 5-10 MeV/nucléon) plante le décor. Il ne présente pas une «shopping list» diversifiée de projets, mais 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, appariement et noyaux $N = Z$ par réaction de fusion-évaporation.

Cette physique explore des phénomènes qui seront peu ou pas accessibles au moyen des installations actuelles à faisceaux secondaires radioactifs - ces dernières sont certes de plus en plus performantes mais dans un autre secteur, celui de la matière nucléaire très asymétrique.

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

Dans le même temps, les accélérateurs européens de basse énergie arrivent quasiment à bout de souffle. Face aux exigences en intensité à venir, il va falloir gagner entre un et deux ordres de grandeurs (de 1 μA au mieux aujourd'hui à 10-100 μA demain) pour accéder à ces nouveaux phénomènes.

Illustrant cet impératif, l'exposé sur les noyaux superlourds fait un point très complet sur l'état de l'art en la

matière. Il montre comment les recherches actuelles à GSI et Dubna, et plus récemment au Ganil, butent autour de l'élément $Z = 112$, voire 114, avec des sections efficaces de fusion déjà inférieures au picobarn (10^{-36} cm^2) aux intensités inférieures à 1 μA des faisceaux stables actuels. Les prédictions théoriques semblent indiquer que l'îlot de stabilité est centré autour de $Z = 126$, $N = 184$ (figure 1).

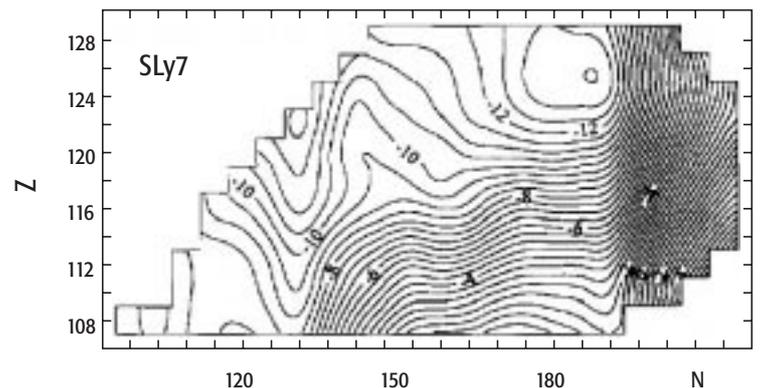


Fig. 1
Calcul théorique des énergies de liaison en fonction de la charge et de la masse dans la région des noyaux superlourds. Un minimum très prononcé est observé pour $Z = 126$ et $N = 184$. (Nuclear Physics A611, 1996, p.211)

Malgré les progrès considérables des spectromètres actuels qui atteignent des taux de rejets de 10^{-14} , il faudrait des faisceaux de 200 μA pour atteindre, en quelques semaines de production, le cœur de l'îlot de stabilité au-delà de $Z = 120$. Autres conséquences importantes, ces superlourds décroissent par émission successive de particules alpha (4 à 6) avant de rejoindre la région de masse où le dernier descendant fissionne. Or, les données spectroscopiques sur ces ultimes descendants sont quasiment inexistantes, d'où l'intérêt soulevé par l'étude de ces noyaux très lourds (transfermiums, Z inférieur à 104).

La conclusion est claire: cette physique des noyaux au-delà du fermium et jusqu'aux superlourds requiert un nouvel accélérateur dédié, de basse énergie et très haute intensité (supérieur de plus de deux ordres de grandeur aux performances actuelles de la ligne basse énergie du Ganil ou du Linac du GSI) en Europe.

La deuxième thématique de basse énergie concerne les noyaux à hauts spins et déformations extrêmes. Les modes recherchés, au moyen de réactions de fusion-évaporation, sont ceux liés aux formes exotiques (hyperdéformation, noyau tétraédrique). Il est envisagé une structure en clusters préexistante pour expliquer la structure de tels états (figure 2). Or, il faut aller chercher ces phénomènes dans des voies de réactions qui ne représentent que quelques 10^{-6} de la section efficace de fusion, d'où l'émergence de boules de germanium pur avec localisation du rayonnement gamma grâce à une large segmentation du détecteur (le projet européen Agata a été discuté dans la session instrumentation).

Enfin, la spectroscopie des noyaux $N = Z$ proches de la drip-line proton jusqu'au noyau de ^{100}Sn est aussi possible par l'intermédiaire de ces mêmes réactions et avec le multidétecteur Agata. La question très actuelle de l'appariement neutron-proton et de sa manifestation dans les noyaux devrait pouvoir être abordée dans l'étude de noyaux $N = Z$. Il est montré de façon très convaincante que les outils nécessaires sont les mêmes que pour la physique des superlourds. La réflexion engagée en France et en Europe sur la définition d'une installation dédiée de faisceaux d'ions lourds stables de très haute intensité combinée à une nouvelle génération de détecteurs gamma avec segmentation et trigger ultra-rapide et de spectromètres de recul à très bon taux de réjection a porté ses premiers fruits.

La discussion qui suit montre que ce programme de physique est particulièrement convaincant. Il est souhaitable maintenant de définir plus précisément l'accélérateur, son coût et les partenaires européens qui veulent s'investir dans ce projet.

La physique des noyaux loin de la stabilité

La deuxième session a pour thème unique les avancées et perspectives en France, en Europe et dans le monde de la physique des noyaux loin de la stabilité.

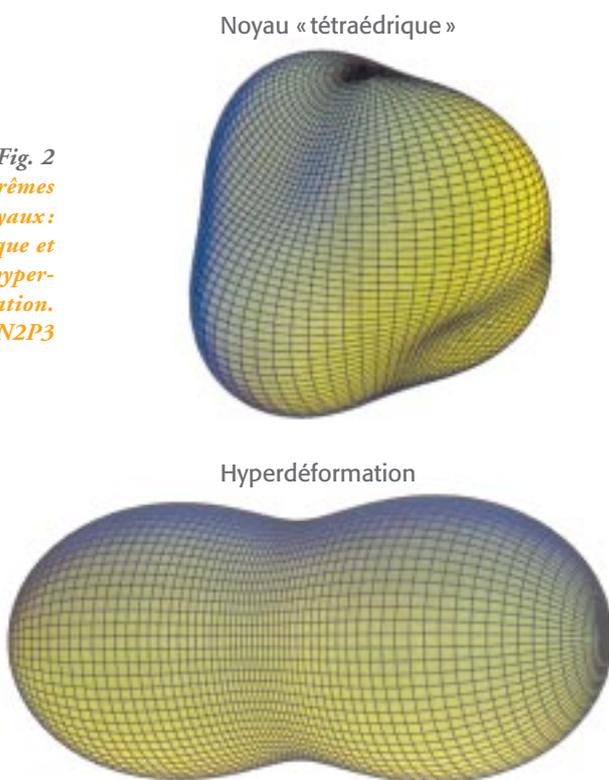
Spiral au Ganil

Pour le Ganil, et ses faisceaux d'ions lourds les plus intenses au monde dans leur domaine d'énergie (20-100 MeV/nucléon), l'événement est la réalisation des premières expériences auprès de la nouvelle installation Spiral, mise en route il y a à peine un an.

Spiral 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 reaccélération par le cyclotron Cime. Les premières espèces exotiques ainsi produites avec des intensités de 10^4 - 10^6 pps (particules par seconde) à des énergies allant de 4 à 20 MeV/nucléon sont: ^6He , ^{18}Ne et ^{72}Kr . La mise en route expérimentale des faisceaux Spiral et de nouveaux instruments (cibles cryogéniques, Exogam...) est un joli succès.

L'avenir à moyen terme du Ganil (2003-2007) se prépare avec le projet Spiral II. L'objectif est d'étendre considérablement la gamme des ions secondaires radioactifs disponibles, en particulier vers les noyaux moyens et lourds, riches en neutrons. La méthode de production choisie est la fission induite par neutrons rapides. Le projet (figure 3) s'inspire de la station prototype Parne 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 C 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, entre les masses 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 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 environ 38 M€ et pourrait être opérationnel en 2008, si un financement est disponible

Fig. 2
Formes extrêmes
de noyaux:
tétraédrique et
hyper-
déformation.
© CNRS/IN2P3



dès 2004. L'avant-projet détaillé et le groupe de projet sont en cours de constitution. En conclusion, il est montré la synergie d'un tel projet avec les études de la machine européenne ultime du domaine: Eurisol. L'exposé suivant porte sur ce qu'est

Eurisol

Eurisol, la situation actuelle et les étapes à venir. Les motivations de la physique «aux limites de la stabilité nucléaire» sont brièvement introduites, tant du point de vue de la structure et des réactions nucléaires que de celui de leur intérêt astrophysique. Les recommandations de NuPECC dans ce domaine pour l'Europe reposent sur le déploiement de deux installations complémentaires, l'une autour du projet de GSI de production par des ions lourds relativistes intenses (1 GeV/nucléon), l'autre par une installation Isol de nouvelle génération.

Dix laboratoires européens ont la charge de définir la machine Isol qui a reçu un support financier européen dans le cadre du cinquième PCRD (2000-2003, 1,2 M€) et qui a pris le nom d'Eurisol. L'organisation en groupes de travail et les responsabilités sont décrites, et l'accent est mis sur l'état quasi final du rapport résumant les caractéristiques de l'installation proposée et les premières estimations du coût d'investissement.

L'accélérateur de production «Driver» est un linéaire supraconducteur de protons d'énergie nominale 1 GeV et d'intensité moyenne 5 mA. Il pourra aussi accélérer des ions légers de $Z/A = 1/2$ (deuteron, alpha, carbone). Des cibles pouvant supporter la dissipation de MW de puissance de faisceau s'inspireront 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 sont celles permettant une excitation sélective des ions radioactifs par laser et le projet Alto proposé par l'IN2P3 comme banc prototype pour mesurer le taux de production, de diffusion et d'ionisation des ions rares dans des ensembles cibles-sources. Un nouveau concept de séparateur de masse est à l'étude, ainsi que la définition du postaccélérateur d'ions «exotiques» qui devra accélérer tous les ions produits jusqu'à la masse 140 à des énergies variables, entre 0 et 100 MeV/nucléon. L'étude technique a abouti à la sélection, à l'encore, d'un linéaire supraconducteur avec des sorties dans le domaine du KeV/nucléon, de 3-15 MeV/nucléon et enfin de 20-100 MeV/nucléon (haute énergie). Le groupe instrumentation a fait un très bon travail de prospective tant du point de vue de la définition des futurs multidétecteurs de particules et gamma combinés que de celui de l'électronique embarquée. Un plan

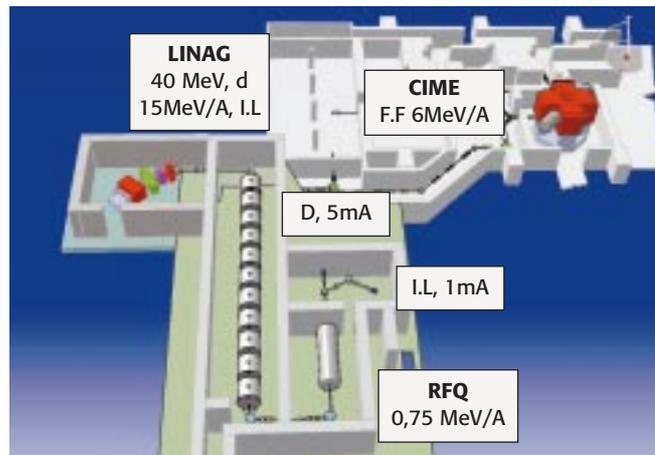


Fig. 3
Projet Spiral II
de production
de noyaux
exotiques riches
en neutrons par
fission induite
par neutrons
rapides sur
une cible
d'uranium.
© Ganil

d'implantation des halls expérimentaux a aussi été étudié. De trois à cinq expériences pourront être alimentées en parallèle.

Le coût de l'ensemble du projet hors salaires est d'environ 400 M€. La comparaison avec les projets d'ampleur équivalente au GSI et à Riken (Japon) pour la fragmentation et avec le projet américain RIA qui a pour ambition de combiner les deux approches montre que les budgets nécessaires sont comparables sinon supérieurs. Enfin, le Ganil pourrait être un excellent site pour accueillir Eurisol: le linéaire de Spiral II et l'ensemble des halls expérimentaux déjà très bien équipés de Ganil sont en effet d'excellents arguments en faveur du site français.

Le rapport final est prévu pour la fin de l'année 2003 et les R&D à recommander dans le cadre du prochain plan européen (sixième PCRD, 2003-2006) couvrent les domaines des cavités supraconductrices pour linéaires de forte puissance et des ensembles cibles-sources correspondants, ainsi que quelques projets d'instrumentation. La construction est envisagée au cours de la période 2006-2012.

Aux termes de ces deux sessions sur la physique du noyau, l'impression qui domine peut se formuler ainsi :

- Les physiciens du domaine ont montré où se trouvent les enjeux scientifiques de la prochaine décennie. Leurs priorités ont été clairement exprimées et l'intégration de celles-ci dans un cadre européen est déjà bien avancée.

- La réalisation de Spiral II suivie à plus long terme d'une extension du type Eurisol apparaît comme la stratégie à suivre pour la physique des noyaux instables.

- Pour la recherche des phénomènes extrêmes, un accélérateur dédié de basse énergie et haute intensité devrait être étudié et mis en service en Europe à la fin de la décennie.

Les transitions de phase

Les études des transitions de phase de la matière nucléaire, à basse comme à haute température, ont apporté des résultats notables ces dernières années grâce aux accélérateurs d'ions lourds. Dans le futur, le LHC devrait permettre l'obtention d'un véritable plasma de quarks et de gluons.

La chromodynamique quantique (QCD) est la théorie fondamentale qui se doit de décrire le diagramme de phases et les équations d'état de la matière hadronique constituée de quarks et de gluons (matière nucléonique, baryonique, gaz de hadrons, plasma de quarks et de gluons, verre de couleur, etc.). Cela semble utopique à basse température car le confinement des quarks dans les quasi-particules incolores que sont les hadrons ne permet pas, *a priori*, d'aborder cette étude à partir de la théorie fondamentale. Cependant, l'analogie entre la force nucléaire (nucléon-nucléon) et la force de Van der Waals permet de prédire l'existence d'une transition de phase liquide-gaz (transition entre nucléons et noyaux) à des températures de 5-10 MeV et/ou à des densités 0,3 à 0,6 fois la densité de la matière nucléaire froide. Au contraire, à haute température, les calculs sur réseaux de QCD peuvent décrire le diagramme de phases de la matière. Une transition de phase vers un plasma de quarks et de gluons a ainsi été prédite à une température de l'ordre de 170 MeV.

Expérimentalement, seules les collisions entre ions lourds permettent d'étudier la matière hadronique en laboratoire. Les chocs frontaux entre ces ions devraient produire les conditions de température et de pression nécessaires aux transitions de phase recherchées. Cependant, l'état du système ion-ion aux premiers instants de la collision est très loin de l'équilibre thermique et chimique. En conséquence, de nouvelles questions doivent être résolues avant de pouvoir atteindre les objectifs initiaux : comment décrire la dynamique de la collision ? Un équilibre thermique ou chimique est-il atteint pendant la collision ? Les conditions de température et de pression sont-elles suffisantes pour que les transitions recherchées aient lieu ? Les réponses à ces questions

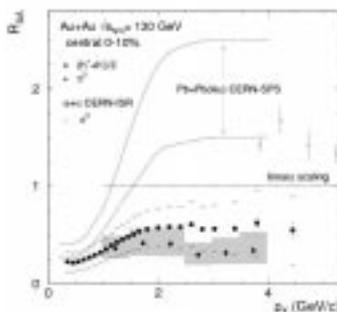
sont recherchées dans les mêmes expériences d'ions lourds, et, *de facto*, des progrès très remarquables ont eu lieu durant la dernière décennie. Mais, pour être quantitatifs, un cadre théo-

rique fiable reliant l'état initial de la collision au début de « l'équilibration » est impératif. Cela n'a pas encore été possible car les effets non perturbatifs dominent la dynamique de la collision dans les domaines d'énergie étudiés jusqu'à présent, depuis les énergies Ganil (énergie centre de masses de quelques dizaines de MeV par nucléon) jusqu'aux énergies SPS (quelques dizaines de GeV par nucléon).

Les collisions entre ions lourds aux énergies LHC (quelques TeV par nucléon) ouvriront de nouvelles perspectives. À ces énergies, la théorie fondamentale doit être en mesure de décrire la dynamique de la collision, car les quarks et les gluons deviennent les degrés de liberté pertinents. *Grosso modo*, les gluons du champ de couleur seront matérialisés lors de l'entrecroisement des quarks de valence et une grande « boule » gluonique sera formée qui évoluera vers un état d'équilibre à des températures très supérieures à la valeur critique de transition. Le cadre théorique doit encore être développé, mais il est déjà possible d'affirmer que la soupe de quarks et de gluons sera au rendez-vous et que l'utilisation du mot « plasma » sera vraiment justifiée. En attendant la construction du collisionneur LHC, les expériences Rhic (quelques centaines de GeV par nucléon) ont déjà montré des résultats très prometteurs : production thermique de particules, présence du flot elliptique décrit par l'hydrodynamique relativiste, suppression des particules de grande impulsion transverse (figure), etc. Tout cela n'est qu'un début. Les prochaines années seront très fructueuses, grâce à l'augmentation de la luminosité du faisceau. L'étude exclusive de la production de jets et celle de la production de quarkonia (charmonium et bottomium) seront, sans nul doute, les vedettes des prochaines prises de données.

A fortiori, les résultats de Rhic encouragent la participation de l'IN2P3 à la construction d'Alice, l'expérience LHC dédiée à l'étude du plasma de quarks et de gluons, mais aussi au volet ions lourds de l'expérience CMS. Les collisions Pb + Pb, à 5,5A TeV, feront augmenter d'un ordre de grandeur l'énergie et le volume du plasma, de façon à davantage le rapprocher des conditions idéales où des prédictions théoriques pourront être testées dans un régime plus fiable. Les expériences devront être prêtes en 2007 pour procéder à la première campagne de prise de données au LHC.

Suppression de la production des hadrons de grande impulsion transverse observée à Rhic par l'expérience Phenix. Les données Rhic sont comparées aux données du Cern-ISR et du Cern-SPS où cette suppression n'a pas été observée.
© Collaboration Phenix, Physical Review Letter 88 (2002) 022301



Déchets nucléaires

La loi du 30 décembre 1991 fait obligation aux organismes de recherche d'étudier les modes de gestion des déchets radioactifs dont la production accompagne la génération d'énergie nucléaire. Le CNRS a structuré son soutien à ces recherches à travers cinq GDR réunis dans le Programme sur l'aval du cycle électronucléaire « Pace » coordonné par l'IN2P3.

Le programme Pace doit se poursuivre jusqu'en 2006, échéance prévue par la loi Bataille. Au sein des cinq GDR de Pace, les recherches sont pluridisciplinaires et réalisées en collaboration avec d'autres organismes comme le CEA, EDF, la Cogema, l'Andra ou Framatome. Le travail présenté concerne les recherches menées à l'IN2P3 et au Dapnia, lesquelles relèvent plus spécifiquement de deux GDR : Gedeon/Gedepeon (Gestion des déchets par des options nouvelles qui inclura, à partir de 2003, les recherches liées à la production d'énergie) et Practis (Physico-chimie des actinides et autres radioéléments en solution et aux interfaces).

Après une dizaine d'années de travail, on assiste à une réflexion qui a élargi le cadre de la recherche, d'une recherche initialement centrée sur les modes de gestion (séparation, stockage ou transmutation) des éléments radioactifs présents dans les combustibles usés du parc actuel à une recherche de scénario pour le futur du nucléaire. En effet, on est confronté au niveau mondial à une demande énergétique qui devrait au minimum doubler d'ici à 2050 (augmentation de la population et du niveau de vie moyen) et à la nécessité de trouver une alternative aux ressources fossiles menacées d'épuisement et responsables des émissions de gaz à effet de serre. L'énergie nucléaire pourrait répondre à ces attentes, mais, pour s'inscrire dans une logique de développement durable, les nouveaux concepts de réacteurs devront améliorer la sécurité, minimiser de façon spectaculaire la production de déchets, économiser les ressources et assurer la non-prolifération des armes nucléaires.

Les exposés ont porté sur les données nucléaires, la chimie des combustibles et des déchets et sur des études de systèmes innovants pour le nucléaire du futur.

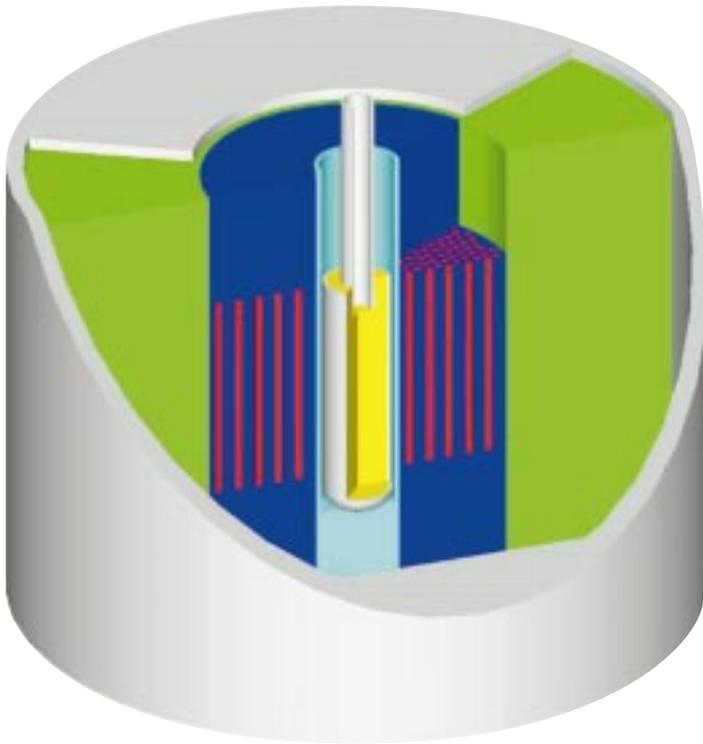
Les données nucléaires

Un vaste programme expérimental se déroule depuis quelques années au sein de diverses collaborations nationales et internationales. Il s'agit, par exemple, pour les systèmes hybrides de mesures de sections efficaces de réactions induites par protons ou neutrons de très haute énergie (> quelques dizaines de MeV) qui permettront de comprendre le comportement des différents matériaux de structure, de la cible de spallation et du com-

bustible. Le programme expérimental effectué sur divers sites (Darmstadt, Jülich, Groningue, Louvain-la-Neuve et Uppsala) est maintenant assez complet pour ce domaine d'énergie et des progrès théoriques spectaculaires ont été récemment enregistrés pour la modélisation de ces réactions. Dans le domaine des basses énergies, allant du régime thermique à quelques MeV, les bases de données utiles aux études de transmutation des déchets et à la définition de nouveaux cycles de combustibles sont encore incomplètes, voire inexistantes. C'est sur cette gamme d'énergie qu'un effort expérimental important commence à être fourni notamment au Cern, auprès de l'installation n-TOF, mais aussi sur d'autres sites comme Bordeaux, Grenoble, Orsay ou Geel.

La chimie des combustibles et des déchets

Les thématiques de recherche couvrent aussi bien les études de séparation-extraction en milieu liquide pour le retraitement du combustible que les études de tenue des matrices de confinement destinées à la transmutation ou au stockage. Dans le domaine de la spéciation en solution, un effort particulier est porté sur la chimie de Tc et de Pa mais aussi de U, Pu, Np, Cm, Am, Eu, etc. Outre les méthodes radiochimiques, diverses techniques de caractérisation sont employées, comme l'Exafs ou l'électrochimie. Dans l'hypothèse d'un changement de filière (passage à un combustible thorium, par exemple), de nouveaux procédés de séparation-extraction doivent être mis au point. Ces méthodes innovantes, comme l'emploi de CO₂ supercritique, de liquides ioniques et surtout de sels fondus, pourraient également se révéler intéressantes pour le cycle actuel. Ces études devraient se développer rapidement, du fait de leur intérêt. Finalement, un effort concerté est mené par la communauté pour mettre au point de nouvelles matrices à usage spécifique (transmutation ou stockage de nouveaux combustibles). Les premières étapes de caractérisation d'un matériau passent, entre autres, par l'étude de sa tenue mécanique aux radiations, à la radiolyse, à la chaleur... En vue de passer à une application industrielle, les études menées actuellement à l'IN2P3, notamment avec des accélérateurs de faisceaux d'ions,



Écorché d'un réacteur hybride à sel fondu montrant la cible de spallation en jaune, la matrice de graphite en bleu, les canaux de sel en rouge et le réflecteur graphite en vert.
© CNRS/IN2P3

seront dans un avenir proche complétées par des études au CEA, en cellules chaudes, afin de tester la résistance des matériaux dans des conditions d'irradiation interne simulant au mieux les conditions réelles d'emploi de ces matrices. Les avancées significatives d'ores et déjà obtenues dans ces différents domaines permettent de considérer l'avenir avec optimisme.

L'étude de systèmes innovants pour le nucléaire du futur

Dans les études sur le retraitement des combustibles usés, la question du futur du nucléaire ne peut être ignorée, en particulier à cause du plutonium qui sera selon les cas soit un déchet, soit un combustible. **Il est possible de produire de l'énergie pendant encore environ deux siècles sans épuiser les ressources en ^{235}U , en utilisant des centrales fonctionnant sur le mode actuel, et les stocks de plutonium peuvent être limités en multirecyclant le Pu dans ces réacteurs standard, moyennant des améliorations du combustible.** Cependant, un tel multirecyclage serait associé à une forte production d'actinides mineurs, notamment Am et Cm. Pour éliminer ces actinides mineurs, il est proposé de placer ces noyaux non fissiles dans des réacteurs à neutrons rapides dédiés à leur incinération et qui ne représenteraient qu'une faible part du parc électronucléaire (< 10 %). Pour des raisons de sûreté, ces réac-

teurs doivent être sous critiques et pilotés par accélérateur. L'IN2P3 et le Dapnia sont engagés dans divers programmes expérimentaux visant à valider le concept de réacteurs hybrides (Muse, Megapie). Il existe également un programme européen du cinquième PCRD visant à définir les premières caractéristiques de ce que pourrait être un démonstrateur de réacteur hybride d'une puissance de plusieurs dizaines de MW thermiques. L'accélérateur envisagé est un accélérateur linéaire de protons de haute intensité et d'énergie voisine du GeV, la cible de spallation serait une cible liquide plomb-bismuth et deux caloporteurs, l'hélium et le plomb, sont à l'étude. Il est d'ores et déjà acquis que ces travaux se poursuivront dans le cadre du sixième PCRD.

Dans le cas d'un nucléaire durable, il faudrait avoir recours à la surgénération afin d'éviter l'épuisement des ressources. Deux cycles de combustibles sont alors possibles, le cycle uranium (^{238}U - ^{239}Pu) et le cycle thorium (^{232}Th - ^{233}U). Si le premier n'est surgénérateur qu'en spectre rapide, le second permet d'atteindre la surgénération également en spectre thermique et ainsi de limiter d'une manière significative les inventaires nécessaires en matières fissiles. Il offre de plus l'avantage de réduire considérablement la production d'actinides radio-toxiques, comme Am et Cm. Il nécessite cependant de retraiter rapidement le combustible, afin d'en extraire les poisons neutroniques qui dégradent les performances de surgénération. Les réacteurs à sel fondu (figure) associés à une unité de retraitement sont pratiquement les seuls à pouvoir remplir cette condition car le combustible liquide (sel fondu), qui sert par ailleurs de caloporteur, peut alors être retraité « en ligne ».

Ces réacteurs constituent néanmoins un défi technologique et une recherche importante est nécessaire pour en valider les concepts. Les avantages qu'ils offrent sur le long terme sont tels qu'il est aujourd'hui souhaitable de s'engager dans des expériences concrètes, qui permettront d'étudier en détail la partie neutronique et surtout les performances de l'unité de retraitement en ligne. Il s'agit d'un sujet très vaste, qui requiert diverses compétences. Au sein du CNRS, une collaboration entre physiciens et chimistes est en train de naître autour de ce thème important pour la production d'énergie des décennies à venir (plate-forme Peren). Cette ligne de recherche est également inscrite dans le programme Euratom du sixième PCRD.

L'interface physique-biologie

Les activités situées à la frontière entre la physique, la biologie et la médecine connaissent un véritable essor. L'année 2002 a été marquée par la volonté de structurer cette frontière à l'IN2P3 et au Dapnia.

Elle a aussi vu l'émergence de nouvelles activités basées sur les outils et méthodes informatiques de la physique subatomique.

L'interface entre la physique corpusculaire et la biologie est en pleine évolution au Dapnia et à l'IN2P3. Si l'intérêt du Dapnia est récent, cette interface a une longue histoire à l'IN2P3. Mentionnée dès le premier rapport d'activité 1972-1982, elle n'occupe que quelques lignes des rapports d'activité jusqu'en 1991. Suite à l'activité pionnière et toujours remarquable des premières équipes à travailler à l'interface physique/biologie, ces dernières années ont vu un foisonnement d'initiatives auxquelles on peut trouver plusieurs origines, notamment les développements instrumentaux pour le LHC et les encouragements multiples aux initiatives pluridisciplinaires et à la valorisation.

L'année 2002 a été marquée par la volonté de structurer l'interface en nommant des chargés de mission au sein des deux organismes : Philippe Lanièce auprès de Daniel Guerreau, directeur adjoint scientifique, pour l'IN2P3, et Patrick Ledu et Philippe Mangeot auprès de Michel Spiro, directeur du Dapnia, pour le CEA. Cette structuration s'est manifestée par l'émergence de pôles de compétences impliquant plusieurs laboratoires sur des thématiques communes.

C'est le cas notamment de l'imagerie médicale et de l'imagerie du petit animal, fers de lance des développements instrumentaux de l'IN2P3 pour l'imagerie nucléaire... Dans ce même contexte, le Dapnia a récemment indiqué sa volonté de faire de l'imagerie PET grand champ l'un de ses développements prioritaires.

C'est aussi le cas, en radiobiologie, des études par microfaisceaux effectuées à l'IN2P3 autour du projet Aifira (Applications interdisciplinaires des faisceaux d'ions en région Aquitaine).

Un autre projet ambitieux et fédérateur est la construction d'un centre de traitement par faisceaux d'ions légers en région Rhône-Alpes. Ce projet dit Etoile rassemble ainsi les énergies de médecins, physiciens médicaux et physiciens du Dapnia et de l'IN2P3 autour de cet objectif commun qui consiste à donner à mille patients par an l'accès à un traitement optimal pour des tumeurs particulièrement difficiles à opérer ou à traiter avec des faisceaux de photons.

Une nouvelle approche est en train d'émerger qui est basée sur l'utilisation des moyens et des méthodes informatiques de la physique corpusculaire pour les sciences du vivant. Des projets récents d'imagerie nucléaire s'appuient en effet sur la simulation du transport des particules dans la matière. La collaboration Gate, plate-forme de simulation PET/Spect basée sur Geant4, s'est ainsi élargie de deux à quatorze laboratoires en 2002, dont deux du CEA, quatre de l'IN2P3 mais aussi cinq spécialisés en imagerie médicale.

Un autre secteur d'activité en pleine croissance concerne la mise en œuvre de la technologie des grilles informatiques pour les applications très gourmandes en calcul des sciences du vivant que sont la génomique et l'imagerie médicale. L'IN2P3 et le Dapnia sont ainsi impliqués dans plusieurs projets nationaux et européens de grilles biomédicales en collaboration avec les départements Stic et SDV du CNRS.

Cosmologie

La cosmologie observationnelle propose un programme expérimental important et prometteur. Les expériences en cours ou en préparation (à moyen et long terme) permettront d'apporter des réponses aux nombreuses interrogations soulevées par les théoriciens et notamment celles concernant l'« énergie noire ».

L'état actuel et les perspectives de la recherche en cosmologie à l'IN2P3 et au Dapnia ont été couverts par deux présentations. La première, « Cosmologie, paradigme actuel et perspectives », traitait du cadre théorique et la seconde, « Cosmologie : expériences », des aspects expérimentaux de cette recherche.

Le cadre théorique

Au cours de son tour d'horizon des enjeux de la cosmologie moderne, l'orateur a rappelé le paradigme actuel dans lequel a évolué la recherche en cosmologie ces dernières années :

- un univers en expansion accélérée, homogène et isotrope à grande échelle, et dont le contenu en énergie et masse est constitué de photons (1 %), de neutrinos (1 à 2 %), de baryons (5 à 6 %), de matière noire (25 %) échappant toujours à la détection et pour le reste, soit environ les deux tiers, d'une non moins mystérieuse « énergie noire » ;
- l'instabilité gravitationnelle comme origine de la formation des grandes structures, notamment les fluctuations quantiques d'un champ scalaire primordial, l'inflaton, spectaculairement révélées dans les infimes (10^{-6}) anisotropies du fond diffus cosmologique.

À l'intérieur de ce cadre que l'on pourrait être tenté de qualifier de « modèle standard cosmologique », un certain nombre de problèmes subsistent :

- où se cachent les baryons ?
- quelle est la nature de la matière noire et quelles sont ses propriétés ?
- quelle est la nature de l'énergie noire ?
- quelles sont les propriétés de l'inflaton ?
- quelles sont les propriétés géométriques globales de l'Univers ?

Parmi ces questions, l'énergie noire apparue ces dernières années est une énigme pour les théoriciens. Est-ce une « vraie » constante cosmologique, le résultat d'une modification des propriétés de l'espace-temps à grande échelle (dimensions supplémentaires, branes...), l'énergie du vide quantique ou un champ scalaire de type inflaton parfois dit de Quintessence ? Mesurer l'équation d'état du vide cosmique permettra de répondre à ces interrogations.

En conclusion, si les valeurs des paramètres cosmologiques globaux de l'Univers commencent à être bien connues, beaucoup de questions restent encore sans réponses et il s'agit là d'enjeux de physique fondamentale au croisement de la physique des hautes énergies et de l'astrophysique.

Les expériences

La cosmologie repose aujourd'hui sur un ensemble d'observations que l'orateur a classé en trois grands sous-ensembles :

- les observations s'attaquant à l'historique de l'Univers, en particulier les mesures des paramètres cosmologiques H_0 et q_0 , respectivement vitesse et accélération de l'expansion de l'Univers, de la constante cosmologique Λ et de l'équation d'état du vide cosmique $p = w\rho$ (où p est la pression, ρ la densité et w leur relation à déterminer) ;
- les mesures directes du contenu de l'Univers, en particulier de Ω_b , Ω_{CDM} et Ω_ν , les densités respectives de baryons, matière noire et neutrinos, notamment *via* les mesures des fractions de gaz dans les amas de galaxies et des pics acoustiques du rayonnement à 3 K (CMB) ;
- les mesures des fluctuations *via* les anisotropies et la polarisation du CMB, l'étude des grandes structures et les effets de lentilles gravitationnelles.

Les résultats récents et les perspectives dans les domaines où une forte communauté de l'IN2P3 et du Dapnia est engagée ont ensuite été passés en revue. Cela concerne les supernovæ, les grandes structures et les amas de galaxies, et le fond cosmologique.

Les supernovæ permettent aujourd'hui de retracer l'histoire récente de l'Univers jusqu'à des décalages spectraux de l'ordre de $z = 1$. Les résultats publiés en 1998-1999 ont permis de découvrir que l'expansion de l'Univers accélérera et de mettre ainsi en évidence une nouvelle forme d'énergie (constante cosmologique ou phénomène dynamique) appelée aujourd'hui « énergie noire ». Des programmes dits de deuxième génération vont entrer en service en 2003 et se proposent de multiplier les statistiques d'un facteur 10 de façon à atteindre le millier d'événements. Ces programmes, qui s'étaleront

jusqu'en 2008-2009, visent aussi à améliorer notre compréhension des explosions de supernovæ et permettront de mesurer directement w avec une précision de l'ordre de 10 %. C'est en allant dans l'espace et en observant plusieurs milliers de supernovæ jusqu'à des décalages spectraux de $z = 1,7$ que des précisions de l'ordre du % sur la mesure des paramètres cosmologiques pourront être atteintes. C'est le but du projet Snap, actuellement en phase de R&D et dont le lancement est prévu à l'horizon 2010.

Pour l'essentiel, les activités autour des amas et grandes structures se poursuivent au Dapnia. Elles permettent d'obtenir des contraintes indépendantes sur les paramètres cosmologiques et visent à étudier la formation des premières structures. Un des outils prometteurs dans ce domaine est l'effet Sunayev Zel'dovich qui permet de détecter des amas à très grand décalage spectral par l'empreinte qu'ils laissent sur le CMB. Les expériences majeures dans ce domaine sont ou seront : XMM (observatoire spatial X), Olimpo (ballon stratosphérique dédié à l'effet SZ et au CMB), Herschel (observatoire spatial IR, lancement prévu en 2007) et Planck (fond cosmologique) qui comporte également une forte participation IN2P3.

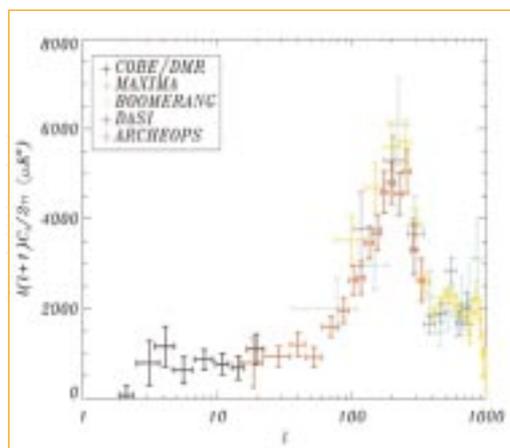
Les équipes de l'IN2P3 et du Dapnia engagées dans les mesures du fond cosmologique ont obtenu un très beau succès en 2002 avec les résultats de la collaboration Archeops. Ainsi ont été rappelés les contributions au projet instrumental des chercheurs français, les conditions du vol du 7-8 février 2002 au voisinage du cercle Arctique et les résultats déjà obtenus sur la mesure de la densité totale ($\Omega = 1,00 \pm 0,03 - 0,02$) et de la densité de baryons ($\Omega_b = 0,022 \pm 0,003 - 0,004$) (valeurs déduites du spectre de puissance des fluctuations du CMB reproduit sur la figure). Ces résultats très encourageants permettent d'envisager avec sérénité l'arrivée prochaine des volumes de données plus importants de la mission spatiale Planck, dont le lancement est prévu en 2007 et à laquelle participent des équipes du Dapnia et de l'IN2P3.

Les succès enregistrés avec les mesures du CMB, ainsi que les récentes avancées dans le domaine des détecteurs permettent d'envisager une nouvelle génération

d'expériences visant à mesurer la polarisation du CMB, laquelle est en effet aujourd'hui une limitation aux mesures cosmologiques. Cela permettrait en particulier de lever certaines dégénérescences et de procéder à la mesure de paramètres aujourd'hui inaccessibles, comme les perturbations de type tenseur prédites par les modèles d'inflation.

Un certain nombre de développements devront être engagés dans nos instituts pour mener à bien ces nouveaux projets. Cela concerne en premier lieu les détecteurs qui devront être améliorés pour détecter des objets toujours plus lointains et moins lumineux (détecteurs bas bruit dans le proche IR, bolomètres, matrices de détecteurs...). Un autre aspect a trait aux simulations numériques nécessaires, en particulier pour le traitement des effets non linéaires dans la formation des grandes structures, et aux méthodes de traitement de données (fusion de données de provenances diverses, observatoires virtuels...).

En conclusion, la cosmologie observationnelle est fortement motivée par la physique fondamentale. Un nombre important d'expériences sont en cours ou en projet à l'IN2P3 et au Dapnia qui engendrent un volume toujours plus important de données à analyser. C'est un domaine en fort développement dans les laboratoires de nos instituts.



*Spectre de puissance des fluctuations du fond diffus de rayonnement cosmologique.
© Archeops*

Le Tour de France des neutrinos

Que cela concerne les neutrinos issus d'accélérateurs ou les neutrinos solaires, ou encore la désintégration double bêta, les idées de projets ne manquent pas pour construire le futur à moyen et long terme de la recherche sur les neutrinos. Mais les moyens seront-ils au rendez-vous en France ?

La physique des neutrinos vue de l'IN2P3 et du Dapnia a été déclinée à Giens selon trois axes : neutrinos d'accélérateurs, neutrinos solaires et désintégrations double bêta. Les physiciens français seraient-ils présents sur tous les fronts du neutrino ? C'est ce que nous avons essayé d'approfondir en écoutant les exposés présentés.

Neutrinos d'accélérateurs : les superfaisceaux

En quelques transparents, nous voici projetés dans l'avenir à long terme du domaine. Les projets en construction font presque partie du passé. Minos en 2005 ? Le CNGS en 2006 avec Icarus et Opera, où quatre équipes IN2P3 sont engagées ? Il n'en est point question : le thème est la prospective.

On suppose connus θ_{23} , Δm_{23} et le changement de saveur de ν_μ en ν_τ , et l'on ne parlera ni de confirmations, ni de meilleure précision sur les paramètres. On admettra aussi connaître θ_{12} et Δm_{12} car les résultats de Kamland vont arriver et devraient confirmer la solution LMA (*Large Mixing Angle*) des neutrinos solaires. Il ne manque donc que l'angle θ_{13} et la phase δ violant CP pour compléter la matrice de mélange MNS.

De nombreux projets se présentent pour mesurer θ_{13} , que nous savons inférieur à 10° grâce à Chooz, où la France joua un grand rôle. Pour accéder à θ_{13} , il faut rechercher l'oscillation des ν_μ en ν_e au maximum de l'oscillation atmosphérique, mais la probabilité restant petite, faisceaux intenses et détecteurs très massifs sont nécessaires. Les expériences « actuelles » (Minos, CNGS) ne disposeront que d'une courte période pour améliorer la contrainte de Chooz sur θ_{13} si des projets dédiés commencent à produire des résultats dès 2008. Quant à la phase δ , son accès, possible seulement dans le cas LMA, est plus difficile et il faudra pour cela passer à des détecteurs énormes de l'ordre du million de tonnes.

Un faisceau de protons très intense peut produire un superfaisceau neutrino. Il est également possible de régler plus efficacement l'énergie des neutrinos en désaxant le détecteur. Au Japon, le JHF pourrait viser Super-Kamiokande après 2007 avec un synchrotron à protons (PS) de 1 MW. Plus tard (aux environs de 2021 !), un PS de 4 MW pourrait pointer vers un détecteur géant de 1 000 kilotonnes, Hyper-Kamiokande. Une proposition des États-Unis est d'utiliser le faisceau

Numi hors axe avec un calorimètre de 20 000 tonnes (en 2008 ?) pour atteindre $2-3^\circ$ sur θ_{13} , comme la phase 1 de JHF. L'étape suivante est encore en discussion.

En Europe, en l'absence de faisceaux très intenses à moyen terme (ou de projets hors axe compétitifs sur le CNGS), l'orateur se fait l'avocat d'un détecteur mégatonne qui utiliserait les 4 MW du SPL prévu au Cern après 2015. Le tunnel du Fréjus est juste à la bonne distance pour θ_{13} . Il ne resterait plus qu'à y creuser une nouvelle cavité de $60 \times 80 \times 250 \text{ m}^3$. Cela peut s'imaginer à l'occasion du perçage de la galerie de sécurité qui va doubler le tunnel routier. Un détecteur mégatonne au Fréjus, sensible à $1,2^\circ$ en θ_{13} et à δ , pourrait revisiter la désintégration du proton et les neutrinos de supernovæ avec une sensibilité inégalée. Et si des « β -beams », faisceaux de ν_e formés avec des noyaux radioactifs, étaient développés au Cern pendant cette période, les performances sur les paramètres d'oscillation pourraient encore s'améliorer. Tout cela à condition de trouver financements et hommes, au sein bien sûr de grandes collaborations.

Neutrinos solaires

Pour les neutrinos solaires, 2002 est une date historique. Il manque toujours la « fumée du canon », comme disent les Anglo-Saxons, après les expériences Chloé et Gallium, et Super-Kamiokande qui a affiné ses données sur les neutrinos du B^8 , lesquelles n'ont fait apparaître aucune distorsion spectrale, ni aucun effet temporel caractéristique d'une oscillation. L'expérience SNO au Canada a donné des résultats en courant chargé sur deutérium qui confirment le déficit du B^8 et qui, combinés aux autres résultats, semblent désigner la solution d'oscillation LMA.

En avril 2002, les résultats de SNO en courant neutre amènent l'élément décisif attendu. Tout est cohérent : un flux total de neutrinos parfaitement compatible avec le modèle standard solaire, un flux réduit de ν_e mesuré de façon consistante en courant chargé et en diffusion élastique sur électron. Le déficit des neutrinos solaires est donc bien dû à un changement de saveur des neutrinos. La solution LMA est clairement favorisée. Il ne reste qu'à la confirmer : différence de masse et angle de mélange solaires seront alors connus. C'est cette réponse que l'expérience Kamland, en mesurant

*Nemo3, installée
au laboratoire
souterrain de Modane,
seule expérience
neutrino à composante
française à prendre
actuellement
des données.
© CNRS/IN2P3*

des neutrinos de réacteurs nucléaires à une distance moyenne de 180 km, aurait pu nous apporter à Giens¹.

Mais Giens était en avance d'une semaine... et nous avons encore pu considérer le problème des neutrinos solaires dans une certaine généralité. Borexino est en phase de préparation finale au Gran Sasso (Italie). En mesurant la diffusion élastique des neutrinos du Be^7 , cette expérience très délicate au niveau du bruit de fond est capable de distinguer les solutions solaires, comme les solutions LOW et VAC qui auraient des effets journalier ou saisonnier. Et si Kamland donne un résultat améliorable avec des réacteurs à une distance plus faible, un projet pourrait être mis sur pied à Heilbronn, en Allemagne.

Si la solution LMA est confirmée, les projets solaires futurs seront perçus différemment. Le projet Lens de mesure des neutrinos solaires pp, dont l'étude de faisabilité devait aboutir en 2003, pourrait voir son apport se limiter à un test des modèles solaires. XMASS, avec 10 tonnes de xénon liquide pour mesurer le flux pp en diffusion ν -e, pourrait se trouver dans un cas analogue, mais avec l'avantage de combiner d'autres recherches : les Wimps de la matière noire et la désintégration double bêta.

Recherche de la désintégration double bêta

La désintégration $\beta\beta$ sans neutrino nous renseigne à la fois sur la nature de Majorana du neutrino et sur son échelle absolue de masse. Nous voyons les avantages et inconvénients des méthodes purement calorimétriques ou comportant un détecteur de traces. Les meilleures limites actuelles sur la masse effective du neutrino $\langle m_\nu \rangle$, entre 0,3 et 1,3 eV, viennent d'expériences utilisant des diodes au germanium enrichi, Heidelberg-Moscou et Igex.

Cependant, Nemo3, dans laquelle la France a une contribution importante, a récemment démarré à Modane (photo) et son faible bruit de fond, dû au détecteur de traces, aux blindages et à l'effort de purification des matériaux, doit lui permettre d'atteindre avec 7 kg de Mo^{100} une limite sur $\langle m_\nu \rangle$ entre 0,2 et 0,7 eV en cinq ans. Une partie minoritaire des secteurs permettra de tester le Se^{82} , prometteur sur le plan du bruit de fond. Cuoricino au Gran Sasso va démarrer en 2003 avec des



modules bolométriques représentant 13 kg de Te^{130} et pourrait rapidement atteindre une limite de 0,2 à 0,3 eV, voire de 0,1 à 0,2 eV. Nemo3 pourra arriver à ces derniers chiffres avec 25 kg de Se^{82} .

Avant d'atteindre une sensibilité de 10 meV, qui exigera 1 tonne d'isotopes $\beta\beta$ et un bruit de fond réduit de deux ordres de grandeur, une étape intermédiaire comportant une source de 100 kg devrait être nécessaire. Enrichir et purifier 100 kg de matériau est déjà long et difficile, la mesure de la pureté étant à la limite des détecteurs. Le choix de l'isotope ultime n'est pas clair. La maîtrise des bruits de fond demandera encore beaucoup d'efforts, et des progrès restent à faire sur l'efficacité et la résolution en énergie avec un détecteur de traces.

On sent qu'il faudra du temps pour arriver à 10 meV, que ce soit avec des bolomètres comme Cuore (250 kg de Te^{130}), des détecteurs Germanium comme Genius (1-10 t de Ge^{76}), des scintillateurs comme XMASS ou bien des détecteurs de traces comme une TPC au xénon. La route s'annonce longue aussi sur la voie double bêta. Finalement, 2021, ce n'est peut-être pas si loin pour voir un synchrotron à protons de 4 MW tirer des salves de neutrinos sur un énorme Hyper-Kamiokande.

1 Les premiers résultats de Kamland (hep-ex/0212021) semblent bien confirmer la solution LMA.

Phénomènes violents de l'Univers

Ces dernières années, la recherche dans le domaine des énergies extrêmes a connu un véritable essor grâce à l'étude des phénomènes violents de l'Univers. De nouvelles fenêtres sur l'Univers ont en effet été ouvertes : rayons gamma, particules chargées et neutrinos de très haute énergie ou ondes gravitationnelles. Certaines expériences ont déjà apporté leur moisson de découvertes ; d'autres sont très prometteuses.

Un grand nombre de phénomènes de haute énergie ont été détectés dans l'Univers. L'inventaire de ces sources extrêmes fait apparaître des objets résultant de l'évolution stellaire (supernovæ, étoiles à neutrons et trous noirs de masse stellaire) et des trous noirs ultramassifs situés au cœur des noyaux actifs de galaxie. Or, ces sites cosmiques ont des conditions physiques extrêmes de champ magnétique, de température, de densité et de gravitation qui offrent une opportunité unique de tester les limites de notre conception actuelle de la matière et des rayonnements, et de découvrir de nouvelles lois physiques non accessibles dans les laboratoires terrestres.

Contrairement à la majorité des astres, qui rayonnent dans une étroite bande spectrale, ces sites produisent un abondant rayonnement non thermique dans un très vaste domaine spectral. Même si les observations dans les seules bandes de photons de haute énergie restent le moyen privilégié - parfois le seul - d'étudier les processus physiques, il convient de les observer sur la plus large gamme spectrale possible (études multilongueurs d'onde). La capacité de ces sites à accélérer des particules ouvre également la possibilité de les étudier par le truchement des particules accélérées et des neutrinos de haute énergie qu'elles produisent tant à la source que lors de leur propagation (études multimessagers). Souvent façonnés par les champs de gravitation les plus intenses, beaucoup de ces sites doivent enfin se manifester comme sources d'ondes gravitationnelles.

Rayonnements gamma de haute énergie

Ces dernières années ont été marquées par une importante série de découvertes. Les résultats sont surtout venus des missions spatiales dans le domaine des rayons X et des rayons gamma d'énergie inférieure à 20 GeV, tandis que s'affirmaient les techniques d'observation au sol des rayons gamma de plus haute énergie par l'identification de sources actives bien au-delà du TeV. Ces observations ont élargi notre connaissance des processus à l'œuvre au voisinage des trous noirs où ils sont souvent associés à des éjections de plasma à des vitesses relativistes. L'astronomie

gamma s'est spectaculairement ouverte au domaine extragalactique avec la découverte de près de soixante noyaux actifs de galaxie de type blazar, certains d'entre eux ayant été détectés à très haute énergie.

La France est déjà fortement impliquée dans l'astronomie gamma de haute énergie avec ses expériences CAT et Celeste sur le site de Thémis (Pyrénées-Orientales). Le projet franco-allemand Hess (en haut ci-contre) améliore encore les techniques d'imagerie des télescopes à effet Cherenkov, et sa localisation en Namibie donne accès au centre galactique et aux amas globulaires, sources potentielles de gamma issus de l'annihilation de neutralinos. La première phase du projet Hess comporte quatre télescopes. La grande surface collectrice (quatre miroirs de 12 m de diamètre), une électronique rapide, la stéréoscopie et la bonne qualité de l'image permettent de baisser le seuil de déclenchement vers 50 GeV et de faire des mesures spectrales de 100 GeV à 50 TeV, avec un gain d'un facteur 10 en sensibilité par rapport aux meilleurs détecteurs antérieurs. Le premier télescope est désormais opérationnel et commence sa prise de données. L'installation de trois autres s'étalera jusqu'en 2004.

L'avenir de la recherche spatiale en astronomie gamma est également riche en perspectives. Le satellite Integral a été lancé en octobre avec pour objectif principal l'exploration approfondie des sites célestes émettant dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV. Le projet de satellite Glast de la Nasa pour l'observation du ciel en gamma de 20 MeV à 300 GeV est en préparation. Le lancement est prévu pour 2006. Ces projets font l'objet d'un engagement fort des équipes françaises.

Rayonnement cosmique d'ultrahaute énergie

En raison des réactions avec le rayonnement fossile à 3 K, on s'attend que le spectre des rayons cosmiques s'arrête aux alentours de 10^{19} eV (coupure GZK suivant Greisen, Zatsepin et Kuzmin). Or, l'observation de quelques événements au-delà de cette énergie, événements « super-GZK », pose un problème majeur de compréhension en ce qui concerne les processus d'accé-



*Le premier
téléscope
de Hess
en Namibie.
© Collaboration
Hess*

lération cosmique et la propagation du rayonnement cosmique dans l'Univers. Les difficultés théoriques pour rendre compte de ces rayons cosmiques d'ultrahaute énergie sont accrues par la très faible statistique disponible, en raison du flux extrêmement faible de ces particules.

L'Observatoire Pierre-Auger (OPA), un projet mondial en construction en Argentine (ci-dessous), va pouvoir surmonter ce handicap grâce à un réseau géant de capteurs au sol (1 600 cuves à effet Cherenkov sur 3 000 km²) combiné à quatre ensembles de télescopes de mesure de la lumière de fluorescence des gerbes produites dans l'atmosphère par des rayons cosmiques. Le déploiement des cuves va se poursuivre jusqu'au début de 2005. Deux des quatre bâtiments abritant les télescopes sont déjà construits et les prototypes validés. L'« *engineering array* » comprenant une trentaine de cuves est en fonctionnement depuis plus d'un an. En plus de quelques événements hybrides (événements détectés à la fois avec le réseau de surface et un télescope de fluorescence), l'OPA a détecté de nombreuses gerbes avec le réseau au sol et ses équipes consacrent maintenant un temps important à l'analyse des données. Parmi les 250 000 gerbes détectées à ce jour, plus de 20 l'ont été conjointement par au moins 8 cuves et correspondent à des énergies supérieures à 10¹⁹ eV. La gerbe la plus vaste a été enregistrée le 23 mai 2002, avec 20 cuves déclenchées et une énergie (estimation préliminaire) au voisinage de la coupure GZK.

Les laboratoires français sont largement impliqués à tous les niveaux de l'OPA, de la réalisation des détecteurs à l'analyse des données, l'interprétation astrophysique et la réflexion théorique sur les sources. Si les évé-

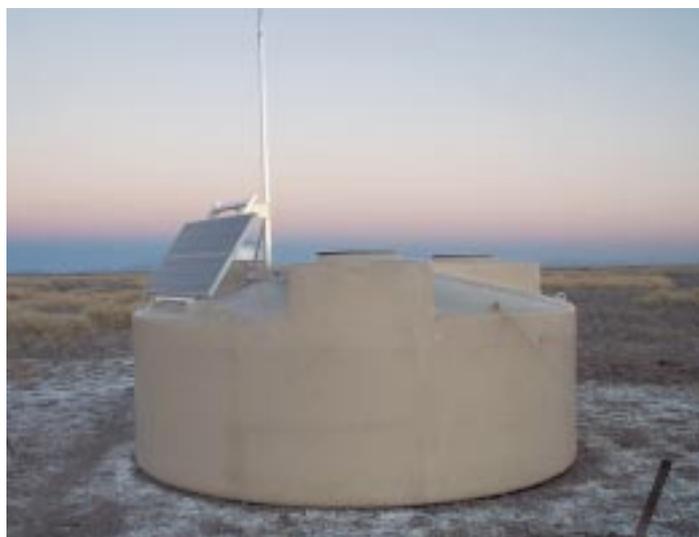
nements super-GZK sont confirmés, il est probable que la résolution de la question des rayons cosmiques d'ultrahaute énergie nécessitera d'accroître considérablement les données dans ce domaine. Dans cette perspective, la France participe activement aux études de faisabilité du projet Euso, qui consistera à observer la fluorescence des gerbes atmosphériques depuis l'espace, avec un champ

de vue équivalent à 150 000 km²! La communauté prépare également l'expérience spatiale AMS qui a pour but de mesurer avec une très bonne précision la composition et le spectre des rayons cosmiques chargés dans le domaine allant du GeV au TeV, une attention particulière étant portée aux antiprotons et antinoyaux.

Neutrinos de haute énergie

La nouvelle astronomie de particules chargées sera complétée par l'astronomie neutrino. Les neutrinos peuvent être détectés grâce à leurs interactions avec la Terre en mesurant les muons

*Une cuve
du réseau
de surface
de l'OPA sur
la pampa
en Argentine.
© Collaboration
Pierre Auger*



ascendants issus de ces réactions. Dans les télescopes à neutrinos, ces muons sont détectés par la lumière Cherenkov qu'ils émettent soit dans l'eau, soit dans la glace. Après une phase de R&D sur la faisabilité d'un télescope sous-marin de neutrinos de haute énergie, les équipes françaises ont initié le projet Antares, un détecteur européen constitué d'un millier de modules optiques répartis sur douze lignes de mouillage. Installé par 2500 m de profondeur au large de l'île de Porquerolles, ce détecteur aura une surface effective de détection de l'ordre de 0,1 km² pour des muons ascendants ayant une énergie supérieure au TeV. L'installation du détecteur a débuté à l'automne 2001 par le déploiement du câble de télécommunication de 40 km de long reliant le détecteur à sa station de contrôle à terre. Elle se poursuit actuellement par le déploiement et la mise en opération d'une ligne prototype. Le détecteur devrait être opérationnel en 2005. Même si le détecteur Amanda, en fonctionnement actuellement sous la calotte glaciaire de l'Antarctique, a une taille similaire, le détecteur Antares sera fortement compétitif grâce à sa résolution angulaire améliorée de près d'un facteur 10. Situés dans des hémisphères différents, ces deux détecteurs auront en outre une couverture du ciel complémentaire.

Les prédictions théoriques actuelles sur les faibles flux de neutrinos cosmiques de haute énergie et leurs fortes incertitudes indiquent néanmoins la nécessité de construire un télescope ayant une surface effective de détection d'au moins 1 km². Cela est l'objectif de la collaboration IceCube qui vise à la construction d'un gros détecteur au pôle Sud avant la fin de la décennie en cours. Au sein de la collaboration Antares, des groupes de travail sont également en train de se mettre en place, en relation avec les autres projets européens Nemo et Nestor, en vue de la conception d'un télescope sous-marin de neutrinos de haute énergie de 1 km² en Méditerranée. L'objectif est de réaliser des travaux de R&D sur quelques points technologiques clés et des simulations afin d'aboutir à un projet de détecteur vers 2005.

Ondes gravitationnelles

La théorie prédit que les sources astrophysiques comme les supernovæ, les coalescences de systèmes binaires et les trous noirs émettent des ondes gravitationnelles. Leur mise en évidence permettrait de tester la théorie de la relativité générale et d'ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation en astrophysique. Or, le passage d'une onde gravitationnelle entraîne une déformation de l'espace-temps visible par une variation apparente des longueurs. Dans l'expérience franco-italienne Virgo, cette variation est mesurée par un interféromètre de Michelson à longue base formé de deux bras de 3 km. Ce détecteur atteint une sensibilité suffisante entre 10 Hz et

10 kHz pour espérer détecter des sources jusqu'à l'amas de la Vierge à 10 Mpc (Mparsec). La construction de Virgo est en cours à Cascina, en Italie. La partie centrale de l'interféromètre a été installée en 1999, puis intensivement testée jusqu'en juillet 2002. Cela a permis de valider la majorité des choix techniques. La construction des deux bras a commencé en 1999. L'année 2003 verra l'installation des miroirs définitifs et du laser final et sera marquée par la mise en route complète de l'interféromètre.

Divers autres détecteurs d'ondes gravitationnelles sont présents sur la scène internationale. L'expérience américaine Ligo, semblable à Virgo, utilise trois interféromètres. Après une mise en route relativement rapide en 2000, elle est parvenue à faire fonctionner un interféromètre dans sa configuration optique complète fin 2001. Quant à l'expérience japonaise Tama, elle est actuellement la seule à avoir atteint sa sensibilité nominale. Le principal facteur limitant des interféromètres actuels est le bruit thermique des fils et des miroirs. Il peut être réduit en améliorant la qualité des matériaux ou en refroidissant les masses-tests. Pour Virgo, l'utilisation de fils de quartz a été largement testée et devrait pouvoir être mise en œuvre lors d'une amélioration partielle du détecteur. Plusieurs projets de R&D sur la cryogénie sont également en cours. Dans un futur plus lointain, le projet spatial Lisa (prévu pour 2011) couvrira une gamme de fréquences différente qui viendra compléter le spectre des ondes gravitationnelles.

Les expériences mentionnées plus haut allient de manière cohérente des objectifs relevant de l'astrophysique, de la cosmologie et de la physique des particules, montrant ainsi qu'un cap important est sur le point d'être franchi dans le domaine des sciences des énergies extrêmes. Le développement rapide de ces activités expérimentales a été accompagné par d'importants efforts sur le plan théorique, tant pour la préparation des projets que pour l'analyse des nouvelles données. Le domaine a pris très vite une extension dépassant les frontières culturelles et administratives des communautés impliquées. C'est pourquoi il est apparu indispensable de mettre sur pied, début 2000, un groupement de recherche sur les phénomènes cosmiques de haute énergie (PCHE) regroupant des physiciens de trois départements du CNRS (IN2P3, Insu, SPM) et de deux services du Dapnia (SAP et SPP) du CEA. Pour peu que les équipes scientifiques impliquées soient de taille et de force à mener à bien les lourdes tâches de dépouillement, de traitement et d'interprétation des données, le retour sur investissement devrait atteindre un niveau extrêmement satisfaisant.

Planning des présentations

Introduction	J.J. Aubert, IN2P3 - M. Spiro, Dapnia	R&D Accélérateurs II R&D Accélérateurs	M. Lieuvin, IN2P3
Détecteurs I Calorimétrie Revue calorimétrie Bolomètres	H. Videau, LLR X.F. Navick, Dapnia	Contraintes théoriques (Susy, dim. suppl., etc.) Recherche de nouvelle physique (LEP, D0, H1) Grid	P. Binétruy, CNRS E. Perez, Dapnia J.J. Blaising, LAPP
Détecteurs II Trajectographie Revue détecteurs semi-conducteurs Micropattern à gaz Vamos émission secondaire Compass	M. Winter, IreS V. Lepeltier, LAL C. Mazur, Dapnia E. Delagnes, Dapnia	Expériences LHC : état d'avancement de la construction Atlas CMS	L. Serin, LAL D. Contardo, IPNL
Détecteurs III Photonique Beaune Matrices bolomètres Megacam Tracking gamma Agata	J.P. Peigneux, LAPP L. Rodriguez, Dapnia X. Charlot, Dapnia G. Duchene, IreS	Préparation de l'analyse LHC Software - LCG	J.F. Laporte, Dapnia
De l'électronique au traitement du signal <i>Front-end</i> analogique : synthèse et perspectives Évolution des technologies numériques Distribution horloge et synchronisation	C. Delataille, LAL J.P. Cachemiche, CPPM Ch. Olivetto, IreS	Cosmologie Théorie Expériences Structure du nucléon	F. Bernardeau, SPHT/CEA J. Delabrouille, PCC M. Garçon, Dapnia
Systèmes d'acquisition de données et informatique Technologie Web appliquée aux bus de terrain Développement logiciels d'acquisition et méthodologie orientée objet Tendances des systèmes temps réel et DAQ Projets embarqués et instrumentation spatiale SNAP Prospective pour informatique	Ch. Walter, Dapnia F. Bugeon, Dapnia P.Y. Duval, CPPM P. Astier, LPNHE D. Linglin, CCIN2P3	Perspective en physique nucléaire de basse énergie avec faisceaux stables Introduction Noyaux superlourds Perspectives	F. Hannachi, CENBG S. Grévy, IPC Caen O. Dorvaux, IreS
Outils et méthodes Submicronique Spatial Couplage Management et gestion des données	J.D. Berst, IreS Ph. Lavocat, Dapnia J.M. Baze, Dapnia M. Lieuvin, IN2P3	6° PCRDT II	P. Petiau, LLR
Mécanique, alignement Calculs Mécanique grands détecteurs	A. Cadiou, Subatech C. Lasseur, CERN	Aval du cycle Évolutions récentes Systèmes innovants pour le futur du nucléaire Données nucléaires Chimie nucléaire	H. Doubre, CSNSM S. David, IPNO F. Gunsing, Dapnia I. Billard, IreS
R&D Accélérateurs I Cavités supra et diagnostic faisceau haute intensité Hauts champs	S. Bousson, IPNO J.M. Rifflet, Dapnia	Transitions de phase Les transitions de phase de la matière nucléaire	Y. Schutz, Subatech
6° PCRDT I	B. Sanghai, Dapnia	Matière noire Matière noire	J. Gascon, IPNL
Introduction Journées Prospective scientifique Interfaces physique, biologie, médecine Conclusion Journées Instrumentation	J.J. Aubert - M. Spiro P. Lanièce, IPNO S. Katsanevas, IN2P3	Neutrinos Solaires Faisceaux et Modane Double bêta	H. De Kerret, PCC J. Bouchez, Dapnia C. Marquet, IreS
Violation de CP Introduction Perspectives	R. Legac, CPPM G. Hamel de Monchenault, Dapnia	De Spiral à Eurisol Spiral II Eurisol	W. Mittig, CEA/GANIL Y. Blumenfeld, IPNO
		Phénomènes cosmiques de haute énergie Phénomènes cosmiques de haute énergie Astronomie gamma de haute énergie Rayons cosmiques de haute énergie Astronomie neutrino Ondes gravitationnelles Perspective et discussion	J. Paul, Dapnia M. Punch, PCC E. Parizot, IPNO V. Bertin, CPPM F. Cavalier, LAL B. Degrange, LLR
		Conclusions	J.J. Aubert - M. Spiro

Sigles

AGATA:	multidécteur européen de rayonnements gamma de nouvelle génération	CLIC	<i>Compact linear collider</i> : projet de collisionneur linéaire e^+e^- multi-TeV au CERN
AIFIRA	Applications interdisciplinaires des faisceaux d'ions en région Aquitaine	CMS	<i>Compact muon solenoid</i> : une des expériences auprès du LHC
ALICE	<i>A large ion collider experiment</i> : expérience sur les ions lourds au LHC	CNGS	<i>CERN neutrinos to Gran Sasso</i> : prochain faisceau de neutrinos du CERN, dirigé vers le site souterrain du Gran Sasso, Italie
ALTO:	projet de banc prototype pour mesurer le taux de production, de diffusion et d'ionisation des ions rares dans des ensembles cibles-sources	D0:	expérience auprès du collisionneur hadronique proton-antiproton à Fermilab (Chicago, États-Unis)
ANTARES	<i>Astronomy with a neutrino telescope and abyss environmental research</i> : programme européen de recherche et développement pour un détecteur sous-marin de neutrinos cosmiques de haute énergie	DAPNIA	Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée: CEA/DSM
AMANDA	<i>Antarctic muon and neutrino detector array</i> : détecteur de neutrinos sous la calotte glaciaire de l'Antarctique	DESY	<i>Deutsches elektron synchrotron</i> : laboratoire allemand de physique des particules installé à Hambourg
AMS	<i>Anti-matter in space</i> : expérience de recherche d'antimatière dans l'espace	EDELWEISS	Expérience pour la détection des WIMPs en site souterrain: recherche de matière noire à l'aide de bolomètres au Laboratoire souterrain de Modane
ApPEC	<i>Astroparticle physics european coordination</i> : coordination européenne pour les astroparticules	EROS	Expérience de recherche d'objets sombres: expérience de recherche de matière noire par effet de lentille gravitationnelle (observatoire de La Silla, Chili)
ARCHEOPS:	ballon stratosphérique dédié à la cartographie du fond de rayonnement cosmologique	ETOILE	Espace de traitement oncologique par ions légers européen: projet d'hadronthérapie par ions carbone
ATLAS	<i>A toroidal LHC apparatus</i> : une des expériences auprès du LHC	EURISOL	<i>European isotope separation on-line</i> : projet de futur accélérateur européen de faisceaux radioactifs
AUGER (Observatoire Pierre) ou OPA:	expérience de détection des rayons cosmiques d'énergie extrême (supérieure à 10^{19} eV), Argentine	EUROBALL:	multidécteur européen de rayonnements gamma pour la physique nucléaire, successeur d'EUROGAM
BABAR:	expérience d'étude des mésons beaux au Stanford linear accelerator (SLAC), États-Unis	EUROGAM:	multidécteur européen de rayonnements gamma pour la physique nucléaire
BELLE:	expérience de mesure de la violation de CP dans le système des mésons B à KEK, Japon	EUSO	<i>Extreme universe space observatory</i> : projet d'observation des grandes gerbes cosmiques dans l'atmosphère depuis la station spatiale internationale
BOREXINO:	expérience sur les neutrinos solaires dans le site souterrain du Gran Sasso, Italie	FERMILAB (FNAL)	<i>Fermi national laboratory</i> : laboratoire américain de physique des particules installé près de Chicago, États-Unis
CALICE	<i>Calorimeter for the linear collider with electrons</i> : projet de calorimètre pour les futurs accélérateurs linéaires à électrons	GALLIUM:	nom générique des expériences utilisant le gallium comme cible dans la détection des neutrinos solaires, comme SAGE au Caucase (Russie) et GALLEX puis GNO au Gran Sasso (Italie)
CAST:	expérience au CERN de recherche des axions	GANIL	Grand accélérateur national d'ions lourds: CEA/IN2P3 à Caen
CAT	<i>Cherenkov array at Thémis</i> : expérience destinée à l'observation des rayons gamma de très haute énergie (de 200 GeV à 20 TeV)	GLAST	<i>Gamma-ray large area space telescope</i> : futur télescope d'observation des sources célestes de rayonnement gamma (de 10 MeV à 100 GeV)
CDF	<i>Collider detector at Fermilab</i> : expérience auprès du collisionneur hadronique proton-antiproton à Fermilab (Chicago, États-Unis)	GRAAL	Grenoble anneau accélérateur laser: projet de construction d'un faisceau de photons polarisés à 100 % à l'énergie maximum (1,5 GeV) par rétrodiffusion Compton de photons laser sur les électrons de 6 GeV de l'anneau de stockage de l'ESRF
CELESTE:	expérience destinée à l'observation des rayons gamma de très haute énergie (de 20 à 300 GeV)	GSI	<i>Gesellschaft für schwerionenen forschung</i> : laboratoire allemand de physique nucléaire, à Darmstadt
CHLORE:	nom générique des expériences utilisant le chlore comme cible dans la détection des neutrinos solaires, et en particulier de l'expérience située dans la mine de Homestake (Dakota du Sud, États-Unis)		
CHOOZ:	commune des Ardennes (France) et expérience ayant observé les antineutrinos du réacteur nucléaire du même nom		
CKM	<i>Charged kaons at the main-injector</i> : future expérience à Fermilab (Chicago, États-Unis) visant à étudier les désintégrations KL		

H1 :	expérience auprès du collisionneur HERA	NEMO	Neutrino-molybdène: expérience européenne de double désintégration bêta au Laboratoire souterrain de Modane
HERA	<i>High energy ring accelerator</i> : collisionneur électron-proton installé à DESY (Hambourg, Allemagne)	NUMI	<i>Neutrinos at the main injector</i> : projet de faisceau neutrino longue distance de FERMILAB dirigé vers la mine de Soudan (Minnesota, États-Unis)
HESS	<i>High energy stereoscopic system</i> : un détecteur de nouvelle génération pour l'astronomie gamma au-delà de 100 GeV, Namibie	NuPECC	<i>Nuclear physics european collaboration committee</i> : comité européen pour la physique nucléaire
ICARUS	<i>Imaging cosmic and rare underground signals</i> : projet d'expérience sur le faisceau CNGS (Gran Sasso, Italie)	OPERA	<i>Oscillation project with emulsion tracking apparatus</i> : expérience d'oscillation de neutrinos
ICECUBE:	projet de construction d'un gros détecteur de neutrinos au pôle Sud	PLANCK:	projet de satellite de l'ESA pour la mesure du rayonnement de fond cosmologique (lancement prévu en 2007)
INTEGRAL:	satellite transportant des expériences d'astrophysique nucléaire et d'exploration approfondie des sites célestes en gamma (de 15 keV à 10 MeV), lancé en octobre 2002	RHIC	<i>Relativistic heavy ion collider</i> : collisionneur d'ions lourds au <i>Brookhaven national laboratory</i> , États-Unis
IPHI	Injecteur de protons de haute intensité	PSI	<i>Paul Scherrer Institut</i> : à Villigen en Allemagne
JHF	<i>Japan hadron facility</i> : à KEK au Japon	SLAC	<i>Stanford linear accelerator center</i> : laboratoire américain de physique des particules installé à l'université de Stanford, États-Unis
JLAB:	voir TJNAF	SNAP	<i>Supernova acceleration probe</i> : projet de télescope spatial grand champ de mesure des paramètres cosmologiques à l'aide de supernovæ de type Ia
KOPIO:	expérience au <i>Brookhaven national laboratory</i> (États-Unis) visant à étudier les désintégrations KL	SNO	<i>Sudbury neutrino observatory</i> : expérience sur les neutrinos solaires utilisant de l'eau lourde (mine de Sudbury, Canada)
KAMLAND	<i>Kamioka liquid scintillator anti-neutrino detector</i> : expérience destinée à l'observation des anti-neutrinos des réacteurs nucléaires japonais (mine de Kamioka, Japon)	SPIRAL	Système de production d'ions radioactifs accélérés en ligne: équipement installé au GANIL, à Caen, de production (collisions d'ions lourds dans une cible de carbone) et d'accélération de noyaux « exotiques »
KAMIOKANDE	<i>Kamioka nucleon decay experiment</i> : expérience sur la désintégration du proton ayant aussi observé les neutrinos atmosphériques (mine de Kamioka, Japon); <i>Super-Kamiokande</i> : expérience du même type mais beaucoup plus grosse (50 000 tonnes), ayant observé les neutrinos atmosphériques et les neutrinos solaires; <i>Hyper-Kamiokande</i> : projet du même type encore plus gros (1 000 000 tonnes)	SPIRAL II:	projet d'extension de la gamme des ions radioactifs produite par SPIRAL, vers les noyaux moyens et lourds, riches en neutrons, produits par fission induite par neutrons rapides
KEK	<i>High energy accelerator research organization</i> : laboratoire à Tsukuba au Japon	SPL	<i>Superconducting proton linac</i> : projet d'accélérateur linéaire de très haute intensité au CERN
LEP	<i>Large electron positron collider</i> : ancien collisionneur électron-positon du CERN	SPS	<i>Super proton synchrotron</i> : accélérateur de protons du CERN, utilisé également en collisionneur proton-proton et en injecteur du LEP
LHC	<i>Large hadron collider</i> : futur collisionneur proton-proton du CERN	TAMA:	expérience de détection directe des ondes gravitationnelles au Japon
LHCb:	détecteur pour l'étude de la violation de CP au LHC	TESLA	<i>Tera electron-volt superconducting linear accelerator</i> : projet allemand de collisionneur linéaire électron-positon de 500 GeV (avec accroissement d'énergie à 800 GeV)
LENS	<i>Low energy neutrino spectroscopy</i> : projet d'expérience sur les neutrinos solaires	TEVATRON:	accélérateur proton-antiproton à Fermilab (Chicago, États-Unis)
LISA:	projet spatial pour les ondes gravitationnelles	TJNAF	<i>Thomas Jefferson national accelerator facility</i> : laboratoire américain de physique hadronique à Newport News, Virginie
LIGO:	expérience de détection directe des ondes gravitationnelles aux États-Unis (trois interféromètres)	VIRGO:	expérience de détection directe des ondes gravitationnelles à Cascina, Italie
MAP (WMAP) - (Wilkinson)	<i>microwave anisotropy probe</i> : expérience visant à cartographier, sur la totalité du ciel, le fond diffus de rayonnement cosmologique	XADS	<i>eXperimental accelerator driven system</i> : programme européen d'étude de la faisabilité d'un réacteur hybride pour la transmutation
MEGAPIE	<i>Megawatt pilot experiment</i> : collaboration visant à concevoir, réaliser et exploiter une cible de spallation en plomb-bismuth liquide pour une puissance de faisceau de protons de 1 MW auprès de l'installation SINQ à PSI	XMASS	<i>Xenon neutrino MASS detector</i> : projet d'expérience sur la désintégration double bêta, sur les neutrinos solaires et sur la matière noire, utilisant du xénon liquide
MINOS	<i>Main injector neutrino oscillation search</i> : projet d'expérience sur le faisceau NUMI		
NA 48:	expérience sur la violation directe de CP auprès du collisionneur SPS au CERN		

IN2P3

INSTITUT NATIONAL DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

INSTITUT NATIONAL
DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE
ET DE PHYSIQUE DES PARTICULES

3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16
Tél. : 01 44 96 40 00
Fax : 01 44 96 53 40

Directeur de la publication
Michel Spiro

Rédaction en chef
Dominique Armand

Maquette
Page B

Impression
Imprimerie de Wissembourg

N° ISSN - 1252 - 2015