

03

INTERACTIONS, PARTICULES, NOYAUX, DU LABORATOIRE AU COSMOS

Président de la section

Philippe QUENTIN

Membres de la section

Éric AUBOURG

Bernard BORDERIE

Jean-Claude BRIENT

Jean-Marie BROM

Hugues DELAGRANGE

Emmanuel GANGLER

Raphaël GRANIER DE CASSAGNAC

Jean-François GRIVAZ

Fazia HANNACHI

Jean-Christophe IANIGRO

Lydia ICONOMIDOU-FAYARD

Élyette JEGHAM

Sylvie LEES-ROSIER

Dominique PALLIN

Konstantin PROTASSOV

Fanny REJMUND

Philippe SCHWEMLING

Mossadek TALBY

Egle TOMASI-GUSTAFSSON

Michel TRIPON

INTRODUCTION

La discipline concernée par la section 03 se structure actuellement en quatre grands courants. Les deux premiers sont traditionnellement associés aux thématiques de la section. Le troisième d'émergence plus récente a dorénavant accédé à une pleine maturité. Le quatrième à la croisée de plusieurs disciplines trouve son naturel épanouissement à l'intérieur, et même au-delà, d'un CNRS trans-disciplinaire par construction.

La physique du noyau et du nucléon correspond aux premiers niveaux de résolution dans notre vision du monde subatomique. L'enjeu de ces recherches est de comprendre la structure et la dynamique de tels objets composites en termes de leurs constituants plus élémentaires et de leurs interactions. Un accent particulier est mis actuellement sur l'étude des noyaux atomiques de plus en plus lourds placés à la limite de l'instabilité (par exemple en isospin : noyaux appelés « exotiques »).

La physique des particules et la description des interactions fondamentales se placent au niveau le plus élémentaire accessible présentement. Les enjeux actuels de ces recherches consistent d'une part en une tentative de mettre en évidence le dernier élément du

modèle standard des interactions élémentaires, à savoir le mécanisme qui confère une masse aux particules, et d'autre part en une exploration de la nouvelle physique au-delà du modèle standard, par exemple la mise en évidence d'une symétrie nouvelle appelée supersymétrie.

La physique de l'univers est abordée au travers de l'étude de nombreux phénomènes liés à la physique nucléaire et à la physique des particules. Ces travaux portent principalement sur les phénomènes particulièrement violents (hautes énergies, hautes densités) dans l'univers. Elles ont pour enjeu de contribuer à construire notre compréhension de l'évolution cosmologique, notamment en adoptant une stratégie d'emploi de messagers multiples.

À tout cela on doit ajouter une forte implication dans diverses approches interdisciplinaires. Les recherches précédemment évoquées qui forment le cœur de nos disciplines ont permis de forger des outils ou des concepts directement utilisables, voire utilisés déjà, en lien avec d'autres disciplines fondamentales ou appliquées. Ceci est le cas dans les domaines de l'énergie, de l'informatique, des sciences des matériaux, de la bio-médecine pour n'en citer que les principaux.

Les recherches qui nous intéressent ici, se caractérisent le plus souvent par une structuration forte entre plusieurs laboratoires. En fait, ces laboratoires peuvent être en très grand nombre appartenant à de nombreux pays. Il s'agit donc, souvent, à proprement parler d'une organisation des recherches à l'échelle mondiale. C'est en particulier, mais pas uniquement, le cas pour les expériences auprès du LHC (CERN).

Une autre caractéristique est la grande échelle de déploiement de chaque projet dans le temps (3 à 15 ans sont des durées courantes). Ceci implique des engagements fermes à moyen ou long terme tant au niveau technique qu'aux niveaux financier et humain. En outre, les équipements techniques (par exemple systèmes d'accélération, de détection et d'acquisition de données) sont conçus, construits et mis en œuvre le plus souvent

au sein même de la communauté scientifique. Ceci justifie une politique pro-active de recrutement, de promotion et de formation de personnels techniques en nombre et de niveau technique adaptés.

Enfin ces recherches, dans chacun des domaines évoqués plus haut, ne peuvent prospérer et porter leurs justes fruits au sein de la communauté nationale que si elles se vivent localement en symbiose avec une activité théorique qui leur est dédiée phénoménologiquement, même si, parfois, ses finalités propres sont beaucoup plus larges.

1 - L'ORGANISATION DE LA MATIÈRE EN INTERACTION FORTE

La physique nucléaire cherche à comprendre l'organisation des constituants élémentaires dans les particules ainsi que des constituants élémentaires et des nucléons dans les noyaux atomiques et la matière dense. Elle est une composante essentielle de l'étude des systèmes complexes quantiques. À ce titre, elle est riche en phénomènes communs à d'autres disciplines : petits systèmes, condensats de Bose superfluides et supraconducteurs, transitions de phases, phénomènes critiques, etc. Cette rencontre se fait souvent au niveau conceptuel requérant **un effort théorique important qui doit être fortement soutenu.**

1.1 DES PARTICULES COMPOSÉES DE QUARKS ET DE GLUONS

La **physique hadronique** a pour but la description de la structure des hadrons en termes de quarks et de gluons, constituants élémentaires sensibles à l'interaction « forte ».

À l'intersection de la physique nucléaire et de la physique des particules, elle étudie principalement le nucléon aux courtes distances, dans la région où la chromodynamique quantique ne peut s'appliquer en tant que théorie perturbative. Des théories effectives basées sur les symétries fondamentales et des modèles phénoménologiques se développent et s'affinent. Il faut aussi signaler **le formalisme des distributions de partons (quarks et gluons) généralisées** qui permet de comprendre le nucléon en tant qu'objet dynamique en trois dimensions. Les calculs de **Chromodynamique quantique sur réseau** semblent prometteurs et des progrès considérables sont attendus dans un futur proche. Nous croyons le nucléon (proton ou neutron) composé essentiellement de trois quarks, mais ceci ne suffit pas à expliquer toutes ses propriétés et de nombreux mystères subsistent. Quelle est sa distribution de charge? Quelle est l'origine du moment magnétique du nucléon, en particulier celui du neutron? Des quarks étranges participent-ils à sa structure? Quel est le rôle des gluons? L'environnement des noyaux induit-il des modifications de ces propriétés? Pourquoi le nucléon présente-t-il moins de modes d'excitation (résonances) que la théorie n'en prédit? Existe-t-il des formes « exotiques » de matière hadronique?

Expérimentalement on utilise des sondes hadroniques et leptoniques (TJNAF aux USA, Mami à Mayence) et les observables de polarisation sont incontournables. Des particules sans structure comme les électrons et les photons sont des sondes privilégiées grâce à la maîtrise des interactions électrofaibles. Quatre thèmes mobilisent depuis quelques années les équipes françaises : mesure du contenu en quark étrange du nucléon, étude des distributions de partons généralisées (GPD) reliées à la problématique du spin du nucléon, problème des résonances manquantes du nucléon et effet du milieu nucléaire sur les propriétés des mésons (masse, durée de vie). Les prises de données sur l'asymétrie due à la violation de la parité en diffusion élastique électron-proton vont se terminer en 2007 **et apporteront des informations définitives sur le contenu en quark étrange du nucléon.** Après avoir

montré qu'une diffusion Compton sur les quarks a bien lieu, l'extraction des GPD est prévue à la suite des expériences en cours. Dans le même esprit il vient d'être montré que le canal du méson \bar{n} est favorable pour accéder aux GPD. Dans l'expérience GRAAL à l'ESRF de Grenoble **de nouvelles résonances nucléoniques ont été mises en évidence.** L'expérience HADES au GSI en Allemagne, relative à l'étude de la modification éventuelle des propriétés des hadrons dans la matière, est dans la phase prise de données et les premières analyses commencent.

À moyen et long terme, la communauté française composée d'une quarantaine de physiciens cherche à se rassembler autour de trois projets : extraction des GPD avec une énergie incidente plus élevée à TJNAF, expérience COMPASS au CERN sur la mesure du spin du nucléon (physiciens du CEA exclusivement) et enfin l'expérience PANDA prévue auprès **du nouvel accélérateur FAIR** qui entrera en fonctionnement à partir de 2012 en Allemagne et fournira un faisceau d'antiprotons de haute énergie ; le groupe français qui s'est engagé dans un investissement technique bien défini (calorimètre magnétique) souhaite avec cette expérience étudier la structure électromagnétique du proton.

1.2 DES NOYAUX COMPOSÉS DE PARTICULES

- La structure nucléaire a pour objectif de comprendre l'organisation des nucléons dans les noyaux. Elle s'oriente vers des configurations nucléaires extrêmes comme bancs d'essais des modèles actuels. De nouveaux champs d'investigation s'ouvrent grâce aux avancées technologiques comme l'avènement des **faisceaux de noyaux radioactifs** et le développement de **systèmes de détection innovants**. La complexité du système nucléaire implique une collaboration étroite entre expérience et théorie. Les prédictions théoriques incitent les efforts expérimentaux toujours

plus aux frontières des noyaux connus, et en retour les nouvelles caractéristiques découvertes permettent de valider l'ensemble de la compréhension du noyau. Les noyaux exotiques, qui n'existent pas à l'état naturel sur Terre, présentent des cohésions, des propriétés et des formes inattendues. D'une façon générale, il apparaît aujourd'hui que **les propriétés des noyaux très exotiques s'écartent très fortement des extrapolations que l'on pouvait faire à partir des noyaux stables.**

Les équipes françaises, composées d'environ soixante-dix physiciens, se sont dotées d'outils très performants combinant faisceaux d'ions radioactifs, spectromètres et ensembles de détection qui leur permettent d'être **au plus haut niveau de la compétition internationale.** Elles exploitent les installations françaises (GANIL, SPIRAL, ALTO), mais aussi internationales telles qu'ISOLDE au CERN, JYFL à Jyväskylä et LNL à Legnaro pour l'Europe ainsi que MSU aux USA et RIKEN au Japon.

L'un des paradigmes de la structure nucléaire est l'organisation en couches des nucléons. Les différentes propriétés de stabilité nucléaire correspondent aux fermetures de ces couches et sont associées à des nombres magiques de nucléons. Pour les noyaux loin de la stabilité, cette organisation semble migrer vers de nouveaux nombres magiques associés à des fermetures de nouvelles couches. On peut citer par exemple la controverse relative aux résultats publiés par des équipes américaines et françaises sur l'existence d'une fermeture de couche à $N = 28$ lorsqu'elle est associée à un fort déséquilibre entre le nombre de protons et de neutrons au sein du noyau, comme dans le ^{42}Si .

Grâce aux faisceaux de SPIRAL1, les états quasi-moléculaires du noyau et les propriétés des noyaux entourés d'un halo de neutrons peuvent être étudiés. Ces travaux ont aussi conduit à discuter l'existence du tétra-neutron, qui aujourd'hui ne semble pas pouvoir exister dans un état lié ; la question de son existence sous forme d'état résonant est toujours posée. Dans le futur, d'autres systèmes multi-neutrons plus lourds seront investigués. D'ores et déjà, la

France s'est investie, en parallèle avec le Japon, dans **l'étude des caractéristiques du noyau ^7H** , isotope le plus lourd d'hydrogène, qui présente le plus fort excès de neutrons, en valeur relative, de tous les noyaux produits en laboratoire.

Une équipe française a été pionnière dans **la découverte d'une nouvelle radioactivité** : l'observation de l'émission de deux protons par l'état fondamental du noyau ^{45}Fe (radioactivité 2 protons). Des études se poursuivent actuellement en France et en Allemagne pour déterminer l'influence de l'attraction de l'appariement dans cette décroissance particulière, par la mesure des corrélations entre les deux protons.

Les états extrêmes en masse et charge des noyaux, les noyaux super-lourds, sont recherchés depuis longtemps dans des réactions de fusion. Le GANIL s'est doté d'un système expérimental de pointe pour leur production. Toutefois, le temps colossal de faisceau nécessaire à ces études ainsi que la très forte demande sur GANIL plaident pour le développement d'une **nouvelle machine de faisceaux stables de haute intensité.** L'étude de l'existence des noyaux super-lourds se fait aujourd'hui par l'intermédiaire de l'étude des mécanismes de réactions et de la structure des trans-fermiums, au GANIL, à Dubna en Russie ou à Jyväskylä en Finlande, afin de déterminer le rôle des états de particules individuelles dans la stabilisation de ces noyaux. La France est impliquée dans une réflexion autour d'un futur projet de construction d'un accélérateur de faisceaux stables de haute intensité qui sera également dédié à d'autres sujets de recherche, comme notamment **l'étude des états hyper-déformés du noyau et autres déformations exotiques.** Les états extrêmes de déformation à haut moment angulaire permettent d'étudier les limites de la cohésion portée par les interactions individuelles vis-à-vis des perturbations collectives.

• L'accélérateur ALTO fournit ses tout premiers faisceaux de noyaux exotiques lourds riches en neutrons. **L'accord donné récemment pour la construction de SPIRAL2** permettra d'élargir, à partir de 2012, le champ

d'investigation actuel en fournissant des faisceaux exotiques de haute intensité et sur une gamme d'énergie qui permettra d'accéder à des réactions secondaires. Un énorme effort de R&D est actuellement fourni par l'ensemble des laboratoires français pour la construction de SPIRAL2. Des progrès spectaculaires sont attendus grâce au développement d'un nouveau détecteur européen de photons, **AGATA**. Ses caractéristiques procurent un pouvoir de résolution qui permettra d'étudier des structures très rares, en particulier pour la caractérisation des noyaux super-lourds et hyper-déformés, ou lors des réactions avec les ions exotiques. La communauté française a pris une part très active dans la R&D d'AGATA, et accueillera le démonstrateur en 2009.

- La physique nucléaire intervient aussi dans des thématiques comme l'astrophysique ou les interactions fondamentales, sujets décrits dans d'autres paragraphes.

- À l'horizon 2011-2012 la communauté des physiciens nucléaires européens disposera de deux accélérateurs SPIRAL2 et FAIR. Ces deux machines sont complémentaires par leurs caractéristiques et leurs productions de faisceaux exotiques. À plus long terme la construction d'un accélérateur européen de seconde génération est envisagée, **EURISOL**, qui comme SPIRAL2 serait une machine à faisceaux exotiques ré-accélérés sur une plus large gamme d'énergie. **La France devrait pouvoir jouer un rôle clef dans cette perspective en s'appuyant sur les acquis de SPIRAL2.**

1.3 UNE MATIÈRE DENSE À HAUTE TEMPÉRATURE

Les propriétés macroscopiques (thermiques, chimiques et mécaniques) de la matière nucléaire dense, comme elle a pu être produite lors du Big-Bang ou comme elle existe aujourd'hui dans les supernovae et les étoiles à neutrons, peuvent être décrites dans le cadre de la thermodynamique. L'équation d'état (tempéra-

ture, énergie, pression, densité, composition chimique, etc.) de **la matière nucléaire devrait présenter deux transitions de phases :**

- à basse température, environ 100 milliards de degrés, la transition entre les noyaux décrits comme des gouttes liquides et un gaz de particules ;

- à haute température (2 000 milliards de degrés) la libération des quarks et la création d'un plasma de quarks et de gluons.

Les collisions d'ions lourds permettent de porter, de façon transitoire, la matière aux hautes densités d'énergie a priori nécessaires pour permettre l'apparition de telles transitions de phase.

La première de ces transitions est étudiée en France auprès du GANIL et auprès d'autres accélérateurs dans le monde (USA, Allemagne, Italie et Chine). Après l'étude de propriétés nouvelles comme l'existence de capacités calorifiques négatives et des indications sur la dynamique de la transition de phase, la communauté française continue de jouer un **rôle leader au plan mondial** avec la mise en évidence du **comportement bimodal d'un paramètre d'ordre dans la transition de phases d'un système fini** et l'observation corrélée des différents signaux de transition mis en évidence. Par delà une métrologie du diagramme de phase de la matière dense ces recherches font évoluer notre compréhension des changements d'état en général. Le futur de ces recherches passe tout d'abord par un progrès expérimental visant à construire des détecteurs à grande couverture angulaire plus performants au niveau des identifications en numéro et masse atomiques ; **la France et l'Italie** font un effort particulièrement important dans ce sens dans le cadre du projet **FAZIA**. Dans le même temps l'avènement de faisceaux de noyaux exotiques suffisamment intenses (**SPIRAL1** puis **SPIRAL2**) à Caen et **FAIR** en Allemagne permet et permettra d'étudier **les propriétés « chimiques » de la matière** c'est-à-dire l'influence d'une variation relative de neutrons et de protons. Cette thématique mobilise une communauté française d'une vingtaine de physiciens.

La seconde transition est étudiée grâce aux collisions noyau-noyau auprès de **collisionneurs de très haute énergie**. Le plasma de quarks et de gluons est un état de la matière où les quarks seraient déconfinés, qui pourrait avoir existé dans l'univers primordial. Les équipes françaises, issues des deux communautés de physique nucléaire et de physique des particules, ont eu un rôle majeur dans l'observation au CERN de premiers indices (parmi ceux-ci la suppression d'un méson par effet d'écrantage) qu'un nouvel état de la matière avait été produit. Cette suppression a été confirmée, à plus haute énergie, au **RHIC** de Brookhaven ; un nouvel éclairage a également été apporté par l'observation originale de l'inhibition des « jets » au sein du milieu formé. L'ensemble des résultats (expériences BRAHMS, STAR et PHENIX) indique **la production d'un état inattendu, un liquide de partons (quarks et gluons) en interaction**, différent du plasma prédit et recherché (gaz parfait de quarks et gluons). Les énergies plus élevées mises en jeu dans les collisions au **LHC** avec l'expérience **ALICE**, qui débutera en 2008, permettront d'étendre le domaine d'étude des propriétés à des densités d'énergie extrêmes avec l'espoir de produire un gaz quasi parfait de quarks et de gluons. L'objectif est aussi de comprendre le confinement des quarks et donc **d'observer la transition de phase plasma de quarks et de gluons – matière hadronique**. L'apparition de la notion de « condensat de verre de couleur » au RHIC indique que ces recherches concernent aussi les distributions initiales de partons, en particulier dans les noyaux. Ces travaux conduisent à relever de nombreux défis, techniques par la complexité des réactions produisant jusqu'à plusieurs milliers de particules dont il faut mesurer les caractéristiques simultanément, et théoriques par la diversité et l'addition des processus mis en jeu parmi lesquels il faut trouver des signatures aussi fiables que possible. Après une participation significative (une quinzaine de physiciens) aux expériences menées à RHIC, **une majeure partie de la communauté française se rassemble maintenant sur ALICE** (une quarantaine de physiciens) avec une bonne visibilité

de par ses contributions importantes aux niveaux détection et traitement des données.

Un aspect important de cette physique est que les transitions de phases sont étudiées dans des collisions, c'est-à-dire dans des phénomènes hors équilibre concernant des petits systèmes. Les concepts permettant de décrire sans ambiguïté les mécanismes font l'objet de développements théoriques actuels transposables dans d'autres domaines de la physique des petits systèmes. Ils donneront aussi accès aux propriétés dynamiques de la matière dense (transport, friction, etc.) qui sont toujours activement recherchées.

1.4 QUELQUES REMARQUES EN CONCLUSION

La **Physique Nucléaire** est le thème majeur pour environ un tiers des 20 laboratoires de l'IN2P3. Ses grands projets mobilisent de nombreuses ressources humaines et financières. C'est aussi un tournant dans les méthodes de travail et la distribution des tâches au sein des laboratoires. De nouveaux besoins en ressources humaines se font sentir afin de pouvoir investir un nombre suffisant de personnel dans le développement tout en poursuivant les recherches actuelles. Après une période d'investissement expérimental les équipes françaises de physique hadronique devraient contribuer rapidement à éclaircir certains secrets du nucléon. Le nouvel accélérateur FAIR en Allemagne et TJNAF avec des énergies plus élevées aux États-Unis sont les deux pôles auprès desquels se regrouperont les activités. L'étude de noyaux de plus en plus exotiques a apporté des résultats surprenants liés à des changements de magie qu'il convient de confirmer. Une nouvelle radioactivité a été découverte. La quête des états extrêmes en masse et charge des noyaux se poursuit. Les études avec les faisceaux radioactifs et de nouveaux multidétecteurs comme AGATA sont la voie d'avenir. Le projet **SPiRAL2** qui démarre au GANIL place la France dans une position

favorable dans la perspective d'EURISOL. Les équipes françaises continuent de jouer un rôle moteur pour les études de transition de phases de la matière nucléaire et la participation aux futures expériences auprès du LHC avec **ALICE** constitue désormais un des axes forts du programme de physique nucléaire.

2 – LE MODÈLE STANDARD ET AU-DELÀ

La physique des particules s'attache à l'étude des interactions entre constituants fondamentaux de la matière, à la compréhension de l'origine de la masse, et enfin aux symétries d'espace et de temps, l'aspect le plus fascinant étant que dans certains cas, ces symétries ne sont pas parfaites. La physique des particules tisse des liens entre l'observation au niveau microscopique et la compréhension des grandes structures de l'Univers, en recherchant des particules susceptibles de constituer la matière noire.

Construit d'un point de vue théorique dans les décennies 1960 et 1970, le Modèle Standard est une théorie quantique des champs, traitant dans un cadre formel unifié trois des quatre interactions fondamentales. Les particules élémentaires composant la matière sont au nombre de vingt-quatre (douze particules et douze antiparticules), regroupées en trois familles.

Depuis sa conception, le Modèle Standard a été testé de manière approfondie, tout particulièrement au cours de la dernière décennie. Celle-ci a vu les expériences menées auprès du LEP (CERN, Genève) en vérifier la cohérence interne et mesurer ses paramètres avec une très grande précision, en tout cas pour ce qui concerne les couplages de la matière aux bosons intermédiaires W et Z . Toutes les confirmations expérimentales du Modèle Standard ne peuvent occulter le fait qu'il possède plusieurs faiblesses esthétiques

et théoriques donnant à penser qu'il ne s'agit que d'une théorie effective, approximation à basse énergie d'une théorie à très haute énergie (de l'ordre de 10^{16} GeV) plus fondamentale. Les théories au-delà du Modèle Standard ne manquent pas. Elles incorporent par exemple l'existence hypothétique de dimensions supplémentaires, ou des mécanismes d'unification de la gravitation avec les autres interactions, ou des symétries nouvelles dans le cas des théories supersymétriques. Ces théories prédisent l'observation d'un bestiaire de particules nouvelles et de déviations subtiles dans les mesures de certaines observables par rapport aux prédictions du Modèle Standard.

Les tests du Modèle Standard se prolongent actuellement par certaines des mesures menées auprès du TeVatron (Fermilab, USA), et de HERA (DESY, Allemagne).

Le dernier ingrédient du Modèle Standard n'ayant à l'heure actuelle pas reçu de confirmation expérimentale est le mécanisme donnant leur masse aux particules élémentaires, par l'intermédiaire d'une brisure spontanée de la symétrie électro-faible. Il devrait se traduire par l'existence d'un ou plusieurs bosons de Higgs, scalaires, dont les signatures expérimentales sont actuellement activement recherchées auprès du TeVatron, et constitueront un thème phare des recherches qui seront menées auprès du LHC à partir de 2008. L'énergie de 14 TeV et la forte luminosité du LHC, jamais atteintes auparavant, devraient apporter sur la question de l'origine de la masse un éclairage crucial et nouveau, et donnent bon espoir d'observer de nouvelles particules et des phénomènes nouveaux, confirmant ainsi le caractère de théorie effective à basse énergie du Modèle Standard.

D'un point de vue expérimental, l'évolution de la physique des particules ces dernières années se caractérise par des dispositifs expérimentaux moins nombreux, mais plus complexes, rassemblant un nombre croissant de physiciens et d'ingénieurs. Avant leur construction, les détecteurs font l'objet de recherches et développements mettant en œuvre des techniques de pointe en électronique, informatique et sur les matériaux utilisés. Entre les premières

idées et la période de prise de données, une période d'une dizaine d'années devient ainsi nécessaire.

2.1 LA PHYSIQUE AU LHC

La mise en service du LHC, couronnant quinze ans de recherche et développement et de production de détecteurs, auxquelles les équipes de l'IN2P3 auront largement participé, devrait indiquer la direction dans laquelle il nous faudra faire évoluer nos théories.

Deux expériences auprès du LHC s'orientent principalement vers la mise en évidence du boson de Higgs et la recherche de nouvelle physique. Près de 200 physiciens et ingénieurs de l'IN2P3 participent depuis 1991 à ces deux expériences, ATLAS et CMS.

Au cours des quatre prochaines années, les activités des physiciens auprès du LHC passeront successivement par différentes phases :

Le début de la mise en service de la machine, avec accélération des faisceaux de protons jusqu'à 7 TeV, est prévu pour le printemps 2008. La première période sera consacrée – au-delà de l'optimisation de l'accélérateur – à la compréhension des détecteurs des expériences. Tenant compte de la complexité des systèmes mis en jeu, ceci représente une tâche gigantesque pour les physiciens et constitue en même temps une étape déterminante pour la qualité des résultats futurs au LHC. En parallèle avec l'alignement et l'étalonnage des appareillages, les caractéristiques des collisions enregistrées pour la première fois au monde à cette énergie seront scrutées afin de parfaire les simulations. À partir d'une luminosité instantanée de $10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, permettant d'accumuler rapidement de l'ordre de 100pb^{-1} , la physique « classique » des bosons W et Z commencera à enrichir le lot d'événements contenant des muons, des électrons et des jets de particules. Les physiciens s'en serviront pour établir les différentes échelles d'énergie (visible et manquante) et pour étudier l'uniformité des réponses des détecteurs.

La luminosité de $10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, qui serait atteinte fin 2008, permettra d'accumuler 10fb^{-1} par année de prise de données, et devrait donner accès aux premières découvertes auprès du LHC : en effet, la statistique disponible élevée des canaux du Modèle Standard permettra d'une part d'atteindre la calibration nominale des détecteurs et d'autre part, contraindra les bruits de fond afin d'optimiser les critères des analyses destinées à l'identification de nouveaux phénomènes. Une année de prise de données à cette luminosité signalera de façon convaincante la présence éventuelle du boson de Higgs tel qu'il est prédit par le Modèle Standard. Avec la même quantité de données, les premières signatures de la Supersymétrie, théorie permettant de combler les imperfections théoriques du Modèle Standard, pourraient aisément être identifiées.

L'amélioration progressive des performances de l'accélérateur en termes de luminosité instantanée (le niveau « nominal » de $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, soit 100fb^{-1} par an, est attendu début 2010) et de stabilité, donnera accès à des études de plus grande précision ainsi qu'à un domaine plus vaste de recherches concernant la nouvelle physique.

Après une période de prise de donnée à haute luminosité, il sera possible d'améliorer la précision des tests du Modèle Standard et d'étendre de 20 % à 30 % le domaine de découverte possible de nouvelles particules, si besoin est, en augmentant encore d'un facteur dix la luminosité du LHC. Le CERN prévoit cette évolution à l'horizon 2012. L'exploitation d'une telle luminosité demandera des améliorations sur les détecteurs, en particulier sur la rapidité de l'électronique de lecture, mais aussi sur la structure même des détecteurs, notamment pour ceux identifiant les traces chargées. Compte tenu de la complexité de la tâche et des délais de construction, une mise en place des détecteurs modifiés vers 2012 demande de commencer dès maintenant un programme de recherche et développement intense, ce qui permettra par ailleurs de ne pas perdre l'acquis technique de ces dernières années. Par ailleurs, toute amélioration des détecteurs sera bien évidemment guidée par les découvertes effec-

tuées dans les premières années de fonctionnement, et il importe de se préparer d'ores et déjà aux diverses options et de se familiariser avec les technologies les plus récentes. La recherche et développement autour des améliorations des détecteurs du LHC est appelée à monter en puissance dans les quatre prochaines années.

2.2 LA PHYSIQUE AU TEVATRON ET À DESY

En parallèle avec la mise en route du LHC, le programme de physique du TeVatron atteindra son apogée. La compétition sera intense entre les deux machines pour les premières observations du boson de Higgs, entre une machine ayant accumulé des données depuis de longues années, mais limitée par sa luminosité et une énergie de 1,96 TeV, et une machine à la luminosité et à l'énergie inégales, mais commençant tout juste à délivrer des données, avec donc une phase d'optimisation pouvant durer un certain temps.

Jusqu'à la mise en service du LHC, le TeVatron sera donc le collisionneur le plus puissant au monde et, à l'horizon 2009, une luminosité intégrée de 4 à 8 fb⁻¹ devrait être accumulée. L'IN2P3 et le CEA-DAPNIA contribuent de manière importante à l'expérience DØ (environ cinquante physiciens actifs), et à un moindre degré à l'expérience CDF. Le champ de recherche au TeVatron comprend la détermination précise de paramètres fondamentaux du Modèle Standard tels que la masse du boson W et celle du quark top ; celles-ci permettront d'affiner les contraintes sur la masse du boson de Higgs du Modèle Standard, ou de vérifier la cohérence de ce modèle une fois cette masse mesurée. Dans le domaine de la matrice de masse des quarks, l'étude du boson B_s, qui n'est actuellement possible qu'auprès du TeVatron, a déjà permis d'en mesurer la fréquence d'oscillation avec son antiparticule ; une meilleure précision fournira des contraintes significatives sur les extensions

envisageables du Modèle Standard. La validité de la chromodynamique quantique sera testée dans un domaine d'énergie encore inexploré, et fournira des informations sur la structure interne du proton qui auront un impact important sur les prédictions pour le LHC. Les mesures de précision prédisent un domaine de masse pour le boson de Higgs du Modèle Standard qui devrait pouvoir être intégralement exploré par le TeVatron, soit en termes d'exclusion, soit par une mise en évidence, selon la luminosité intégrée effectivement accumulée. La récente mise en évidence auprès du TeVatron de la production électrofaible du quark top, laquelle est un bruit de fond irréductible à la mise en évidence du boson de Higgs, est une étape importante de la recherche de cette particule. Enfin, toute manifestation de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard est et sera activement recherchée, comme il est naturel auprès de l'accélérateur fournissant la plus haute énergie disponible à ce jour, qu'il s'agisse par exemple de particules supersymétriques, de nouveaux bosons de jauge, ou de récurrences prévues dans les théories à dimensions supplémentaires.

Le collisionneur HERA de DESY à Hambourg qui mettait en collision des électrons de 27,5 GeV contre des protons de 920 GeV vient tout juste d'être arrêté, depuis fin juin 2007. Les prochaines années seront consacrées à l'analyse des données. Au total, lors de sa deuxième phase de fonctionnement, HERA II, qui a débuté en 2004, ce collisionneur a délivré à ce jour 10 fois plus de luminosité intégrée que celle accumulée pendant la première phase de son fonctionnement. L'état initial particulier – électrons-protons – du collisionneur HERA lui permet des mesures originales et complémentaires des études menées auprès des autres collisionneurs. Parmi les principaux objectifs de physique de HERA II, à laquelle participent, auprès de l'expérience H1, 3 laboratoires de l'IN2P3 et le CEA-DAPNIA, l'utilisation de faisceaux d'électrons et de positrons polarisés améliore la connaissance de la structure du proton, information qui sera indispensable à la compréhension des données des expériences ATLAS et CMS au LHC. HERA est aussi à la recherche d'une nouvelle physique

et teste les théories au-delà du Modèle Standard par l'intermédiaire de la mesure de production d'événements avec lepton isolé et impulsion transverse manquante, la mesure de production d'événements multi-électrons à grande impulsion transverse et la recherche de lepto-quarks et de fermions excités. Enfin, une prise de données avec une énergie du faisceau de protons à basse énergie (460 GeV et 575 GeV) permet de mesurer la composante longitudinale de la fonction de structure du proton et ainsi d'avoir une meilleure connaissance du contenu du proton en gluons.

2.3 LE PROJET INTERNATIONAL DE COLLISIONNEUR LINÉAIRE

Pour le plus long terme, quand le LHC aura produit ses premiers résultats et donné éventuellement des indications sur la physique nouvelle, les physiciens de particules se sont rassemblés autour de la nécessité de construction d'un collisionneur linéaire électron-positron, l'ILC dont l'énergie peut varier du pic du Z (90 GeV) jusqu'au TeV. Un projet actuellement en phase de recherche et développement, le CLIC, pourrait permettre d'étendre le domaine d'énergie de collision au-delà du TeV. Un collisionneur linéaire est constitué de deux accélérateurs d'environ 20 km de long chacun se faisant face. La technologie retenue pour les cavités accélératrices de l'ILC est la technologie supraconductrice dont les progrès ont été très importants récemment. Celle du CLIC est basée sur une nouvelle méthode d'accélération à deux faisceaux dont la faisabilité est en cours d'étude avec la construction d'une station de test, CTF3 dont les résultats sont attendus pour 2010. Une cinquantaine d'ingénieurs de l'IN2P3 et du CEA-DAPNIA se sont impliqués dans les développements nécessaires à l'ILC, en collaboration avec des industriels. L'IN2P3 est également présent dans les études sur les techniques novatrices d'accélération telles que CLIC.

Ces machines pourront pousser les tests du Modèle Standard dans leurs derniers retrans-

chements et étudier en détail la physique nouvelle mise en évidence au LHC, en tirant profit d'un état initial plus simple et de bruits de fond plus faciles à rejeter que dans le cas d'un collisionneur hadronique. Le programme de physique de l'ILC comprend aussi l'étude détaillée de la brisure de la symétrie électrofaible (boson de Higgs) et de la physique du quark top, des mesures de précision sur les bosons W et Z ainsi qu'une ouverture vers l'au-delà du modèle standard.

L'énergie des collisions dans l'ILC étant ajustable, cela donnera une grande flexibilité à son programme de physique, qui pourra se dérouler en partie en parallèle avec celui du LHC. Avec un rapport signal/bruit plus favorable, une énergie dans le centre de masse ajustable et la possibilité de polariser les faisceaux, l'ILC devrait être capable de répondre à bon nombre des questions que les découvertes du LHC vont soulever, allant de la découverte de particules susceptibles de composer la matière noire jusqu'à l'existence de dimensions supplémentaires. La précision des mesures permettra par ailleurs de contraindre fortement les modèles théoriques et devrait ainsi permettre de lever les ambiguïtés possibles.

Pour l'étude de l'ILC en collaboration mondiale, une équipe dite GDE (Global Design Effort) a été mise en place par l'ICFA («International Committee For Future Accelerator»), pour organiser et diriger le travail sur l'accélérateur. Ce travail doit conduire à un document technique détaillé, y compris sur les aspects financier et industriel en 2010 pour une première phase correspondant à des collisions de 500 GeV. Ce document servira de référence pour les discussions entre les éventuels partenaires. Compte tenu de la spécificité de la physique sur cette machine, étude de précision d'événements multi-bosoniques, le cahier des charges des détecteurs est très particulier et nécessite un important programme de R&D. Celui-ci est déjà bien développé, incluant des tests de prototypes en faisceaux. Une vingtaine de physiciens, accompagnés d'une soixantaine d'ingénieurs et techniciens de l'IN2P3 se sont impliqués dans cet axe de recherche.

Plusieurs programmes européens de plusieurs dizaines de millions d'euros, au sein desquels les physiciens de l'IN2P3 sont moteurs ont été approuvés et mis en place. Ces programmes portent sur l'accélérateur (CARE, EUROTEV), ainsi que sur les détecteurs (EUDET).

L'ensemble de ces recherches couvre au moins une décennie et mobilisera une fraction importante de la communauté scientifique de notre discipline. Les données accumulées permettront de nombreux progrès en parallèle avec les objectifs phares mentionnés ci-dessus : compréhension des désintégration des quarks lourds, phénoménologie de l'interaction forte, etc.

2.4 LA BRISURE DE LA SYMÉTRIE CP

La brisure des symétries discrètes par l'interaction faible est un champ de recherches fécond depuis un demi-siècle. Après la mise en évidence de la violation de la parité au milieu des années 1950, il s'est bientôt avéré que la conjugaison de charge était également violée. L'ensemble de notre compréhension de la nature étant basé sur l'existence de lois de conservation, il était naturel de supposer que le produit CP était conservé. En 1964 est intervenue la preuve expérimentale que CP n'était pas conservé. Dans la mesure où CP connecte les particules de matière et d'antimatière, une telle observation est fondamentale pour la compréhension de la prédominance de la matière sur l'antimatière dans l'Univers actuel. La violation de CP dans le cadre du Modèle Standard est prise en compte par l'introduction d'une matrice de mélange reliant les états de saveur aux états de masse.

Actuellement deux expériences, BaBar, à laquelle participe un important groupe français de l'IN2P3 et du CEA-DAPNIA, et Belle, installées sur des anneaux de stockage e^+e^- asymétriques respectivement à SLAC en Californie et à KEK au Japon, étudient la violation de la

symétrie CP dans le système des mésons B. En 2001 ces deux expériences ont mesuré pour la première fois un effet de violation de CP dans les désintégrations du méson B_d . Cette mesure, qui a atteint actuellement une précision de l'ordre de 5 %, a été confirmée dans plusieurs autres canaux de désintégrations. Les différentes mesures réalisées par les expériences BaBar et Belle ont permis de tester et de valider la description du phénomène de violation de CP dans le Modèle Standard avec une bonne précision à travers la mesure des angles et des cotés du triangle dit d'unitarité qui traduit graphiquement l'une des relations d'unitarité de la matrice décrivant les relations entre états propres de masse et états propres d'interaction, appelée matrice CKM. Ces mesures, de plus en plus précises, ont permis d'autre part de tester et de contraindre des modèles prédisant l'existence d'une nouvelle physique par la recherche de signes indirects de la présence de processus au-delà du Modèle Standard. Les expériences BaBar et Belle devront continuer leurs moissons de données pour disposer chacune à l'horizon 2008 d'un échantillon de 1 milliard de paires de mésons B-antiB jamais atteint à ce jour. Cette grande statistique permettra une précision accrue des mesures déjà réalisées et améliorera aussi les contraintes sur les manifestations hypothétiques d'une nouvelle physique.

À partir de 2008 une nouvelle expérience dédiée à l'étude de la violation de CP dans le système des mésons B sera mise en route auprès du LHC. Il s'agit de l'expérience LHCb, à laquelle prennent part plusieurs laboratoires de l'IN2P3. Le programme de physique de cette expérience consiste à poursuivre l'étude de la violation de CP dans les désintégrations des mésons B_d mais aussi de prolonger cette étude dans celles des mésons B_s inaccessibles aux expériences BaBar et Belle. L'objectif étant de mesurer complètement et avec la plus grande précision les paramètres sources de la violation de CP dans la matrice CKM et d'apporter aussi, grâce à des mesures de précision, de nouvelles contraintes sur la présence ou pas d'une nouvelle physique au-delà du Modèle Standard.

2.5 PHYSIQUE DU NEUTRINO

Les oscillations entre différents types de neutrinos ainsi que leur masse non nulle sont maintenant des faits expérimentaux établis au cours des dix dernières années par les expériences sur les neutrinos solaires et les neutrinos atmosphériques. Le panorama des neutrinos est cependant loin d'être complet aujourd'hui et les questions ouvertes qui s'y rapportent sont fondamentales non seulement pour la physique des particules mais aussi pour l'astrophysique et la cosmologie.

Le neutrino est-il sa propre anti-particule ? Cette question ne peut être tranchée que par l'observation expérimentale d'un phénomène de double désintégration bêta sans neutrino. L'expérience NEMO3, à dominante française et installée dans le Laboratoire souterrain de Modane, tente de répondre à cette question. En prise de données depuis un peu plus d'une année, elle atteindra sa sensibilité nominale après encore environ 3 années. Si rien n'est observé il faudra se préparer à un gain d'un ordre de grandeur en sensibilité, à la fois en augmentant considérablement la masse de matériau source et en réduisant drastiquement les bruits de fond. Plusieurs techniques sont en concurrence et les groupes français se sont déjà engagés dans l'exploration des limites de la technique « tracking-calorimètre » avec le projet Super-NEMO. Une alternative à l'aide de bolomètres (MAJORANA) est explorée aux USA.

Y a-t-il violation de la symétrie CP dans le secteur des neutrinos et est-elle responsable de l'asymétrie matière-antimatière dans l'univers ? La connaissance encore trop partielle du panorama des oscillations de neutrinos ne permet pas de répondre à cette question. En particulier la grandeur de l'angle H_{13} non encore mesuré dans les oscillations, conditionne notre capacité à observer expérimentalement une éventuelle violation de CP. Plusieurs expériences sont donc en cours ou en construction pour mesurer cet angle. MINOS (aux USA) et OPERA (en Italie, avec une forte participation française) vont dans un premier temps préciser

sur accélérateur les phénomènes observés avec les neutrinos atmosphériques et améliorer d'un facteur 2-3 la sensibilité sur l'angle Θ_{13} . Mais c'est surtout avec les expériences de la génération suivante, Double-CHOOZ (dans les Ardennes françaises) et T2K (au Japon), que la meilleure sensibilité sera atteinte. Les groupes français sont bien implantés dans les collaborations mondiales qui construisent ces nouveaux détecteurs. Si Θ_{13} n'est pas trop petit, l'accès à la violation de CP se fera avec des accélérateurs d'un type nouveau (béta-beams ou usines à neutrinos) aux développements desquels des R&D sont d'ores et déjà consacrées dans un cadre européen.

En plus d'être un formidable objet d'étude, le neutrino est également un messenger nouveau et précieux pour l'astrophysique. Son rôle est mis en avant dans le chapitre suivant.

2.6 ACTIVITÉS TECHNIQUES ASSOCIÉES

L'activité technique dans nos laboratoires vit au rythme des grands projets de machines et de détecteurs. L'achèvement des constructions liées au LHC va engendrer des renouvellements d'activité importants. Les années à venir devraient donc voir un effort de formation important afin de permettre à nos équipes une participation de premier plan aux R&D des futurs collisionneurs et de l'instrumentation associée.

Il importe donc que chaque laboratoire définisse au plus tôt ses besoins en fonction de sa propre prospective. Il faut aussi réfléchir à l'évolution des carrières de nos agents dans un contexte de travail de plus en plus international et inter-organismes, afin qu'ils ne souffrent pas de positions d'infériorité par rapport aux membres d'autres organismes avec lesquels ils devront travailler. Ce dernier point est particulièrement critique pour maintenir une adéquation entre compétences, niveau d'emploi et responsabilités d'encadrement dans une grande collaboration.

3 – PHYSIQUE DES ASTROPARTICULES ET COSMOLOGIE

3.1 INTRODUCTION

Le domaine à l'interface entre physique des hautes énergies et astrophysique, communément appelé « astroparticules », s'est fortement développé durant les dix dernières années. Le CNRS en a fait une de ses priorités scientifiques : un programme interdisciplinaire a été mis en place et une commission interdisciplinaire dédiée a été créée et renouvelée une fois (son mandat se terminera en 2008).

Les grands domaines couverts par cette spécialité sont :

- l'étude des sources extrêmes dans l'Univers, produisant des particules de très haute énergie ;
- l'étude des interactions fondamentales, grâce aux très hautes énergies et densités qui sont atteintes dans l'Univers ;
- l'étude de l'évolution de l'Univers, depuis la singularité initiale (Big Bang) jusqu'au temps présent.

De nombreux autres thèmes viennent s'associer à ces domaines fondamentaux, par exemple : les tests des lois fondamentales (gravité, physique transplanckienne), l'astrophysique nucléaire, etc. **Rappelons que la détermination des sections efficaces nucléaires est essentielle pour des avancées en astrophysique, astro-particules et cosmologie.**

La physique des astroparticules est donc un espace de rencontres entre de nombreuses disciplines de physique (physique nucléaire, physique de la matière condensée, physique quantique, physique des plasmas, physique de la combustion, etc.), avec également une riche activité théorique.

Ce domaine bénéficie de l'expérience et des compétences techniques des équipes tra-

vaillant sur les grands détecteurs de physique des particules. Les détecteurs de nombreuses expériences sont souvent les mêmes que ceux d'expériences sur accélérateurs (calorimètres, photodétection, détecteurs de traces, identification des particules, etc.) et les outils sont partagés (simulation d'interactions, électronique rapide, méthodes d'analyse et de calculs, etc.).

3.2 LES GRANDES QUESTIONS

Le domaine des astroparticules souhaite répondre à un certain nombre de questions, dont le nombre et la diversité expliquent l'attrait qu'il provoque. On cite ici celles qui concernent plus la section 03 :

- matière noire : quelle est la nature de la matière sombre non-baryonique ? ;
- énergie noire : Faut-il modifier la gravitation ou introduire de l'énergie noire pour expliquer l'accélération de l'Univers ? Quelle est sa nature et son lien avec l'énergie du vide de la théorie quantique des champs ? ;
- asymétrie matière-antimatière : le modèle standard de la physique des particules ne peut l'expliquer. Quelle est son origine ? ;
- nouvelle physique : supersymétrie, gravité quantique, dimensions supplémentaires (quel est le nombre exact de dimensions spatiales de l'Univers ?) ;
- particules à très haute énergie : Quels sont les sites d'accélération galactiques et extragalactiques ainsi que les processus d'accélération et de propagation ? Quelle est la composition de ces rayons cosmiques ? Leur spectre en énergie donne-t-il des indices d'une nouvelle physique ? ;
- astrophysique nucléaire : quels sont les mécanismes à l'œuvre dans la nucléosynthèse stellaire ? Quelles mesures de section efficace sont nécessaires pour la compréhension des processus stellaires ? ;
- supernovae : comment explosent-elles ? On est encore incapable de simuler l'explosion

de certains types de supernovae, pourtant à l'origine des éléments lourds dans l'univers ;

– masse des neutrinos : quel est leur rôle cosmologique ?

Cette liste n'est certainement pas exhaustive.

3.3 DES STRATÉGIES MULTI-MESSAGERS

La compréhension fine des sites astrophysiques extrêmes et de l'Univers primordial passe nécessairement par la mise en œuvre de moyens observationnels inédits en astronomie traditionnelle. Il s'agit ainsi de collecter autant d'information que possible à l'aide de plusieurs messagers :

– les photons, depuis les ondes radios jusqu'aux gammas de haute énergie, qui permettent de remonter aux zones d'accélération de particules, d'annihilation de matière noire non-baryonique, au découplage matière-rayonnement et à l'Univers primordial ;

– les rayons cosmiques (protons et ions), qui nous renseignent sur les phénomènes d'accélération, et sur la propagation intergalactique et galactique ;

– les neutrinos, qui donnent des informations sur les zones profondes d'objets opaques aux photons ;

– les ondes gravitationnelles, produites par les mouvements de la matière (sources astrophysiques et cosmologiques, en particulier les trous noirs et les objets compacts) et par l'Univers primordial.

Soulignons que les neutrinos de haute énergie et les ondes gravitationnelles sont des domaines pionniers.

3.4 PROJETS EN COURS ET FUTURS

Les grandes structures de l'univers

Plusieurs sondes permettent d'explorer la géométrie de l'Univers, et d'accéder à des informations sur sa composition et la nature de l'énergie noire : supernovae utilisées comme chandelles standard, fond diffus cosmologique, relevés à grand champ, cisaillement gravitationnel, oscillations de baryons.

La France a une excellente position dans le domaine des supernovae et du cisaillement gravitationnel (« weak shear ») grâce au programme « Legacy Survey » du CFHT, à Hawaï (CFHTLS, SNLS, SNFactory). Dans le domaine du fond diffus, elle a acquis une expérience certaine grâce à l'expérience ballon Archéops, et joue un rôle important dans la mission spatiale Planck, dont le lancement est prévu en 2008, avec un rôle leader dans l'un des deux instruments (HFI), qui devrait permettre des progrès importants sur l'étude de la polarisation du fond cosmologique. Il est important de bien assurer le retour scientifique de la mission Planck, en particulier au sein de l'IN2P3.

En ce qui concerne l'astronomie à grand champ, la France est absente du projet américain SDSS (Sloan Digital Sky Survey), qui bénéficie en ce moment d'un retour scientifique exceptionnel, en grande partie dû à la combinaison entre photométrie à grand champ et spectroscopie. Mais vue l'importance des sujets de physique concernés par cette technique (cisaillement gravitationnel, supernovae, oscillations de baryons, mesures d'amas de galaxies), la France (et l'Europe) doivent définir une stratégie de participation à de futurs projets d'astronomie grand champ, qui bénéficieraient, à l'instar du SDSS, d'une association avec un survey spectroscopique. En particulier se posent les questions d'une participation au projet LSST et du rôle de l'ESO. L'extension dans le domaine infrarouge de ces surveys (par exemple avec VISTA) permettrait de caractériser des objets plus lointains, ce qui est essentiel pour la recherche de supernovae à $z > 1$.

La raie à 21 cm de l'hydrogène aux redshifts cosmologiques, donne accès en particulier à la physique de la réionisation et aux oscillations de baryons. Une participation à des projets tels que HSHS, LOFAR, et à plus long terme SKA (Square Kilometer Array) est actuellement à l'étude dans l'IN2P3.

Du côté du fond diffus cosmologique (CMB), la prochaine étape est la mesure de sa polarisation, en particulier des modes B. Le projet BRAIN, en Antarctique, et le projet spatial SAMPAN sont dédiés à ce type de mesure. D'autres expériences internationales au Pôle Sud ou dans l'Atacama (Chili) sont en cours de construction. À terme la comparaison entre les possibilités d'une nouvelle expérience au sol et d'un satellite est indispensable.

Un autre aspect important du fond diffus cosmologique, qui pourra être abordé par Planck et les générations futures d'expériences CMB est l'étude des avant-plans, à la fois en tant que « pollution » du signal cosmologique, et en tant qu'objets d'étude en soi (effets SZ, Rees-Sciama, physique de la Galaxie et de la MHD interstellaire). La corrélation avec des surveys optiques tels que ceux mentionnés ci-dessus est alors indispensable afin d'extraire les signaux les plus faibles.

Astronomie gamma

La France a une excellente position dans le développement d'instrumentation dans ce domaine. Elle a un rôle de leader dans le satellite INTEGRAL (PI du spectromètre SPI, fourniture du détecteur principal de l'imageur IBIS) qui mesure les gammas de moyenne énergie entre 20 keV et 10 MeV émis par les objets célestes. Par ailleurs, les laboratoires français assurent une contribution importante au télescope Cherenkov HESS en Namibie, qui a permis d'atteindre une sensibilité d'un facteur 10 fois meilleure que ses prédécesseurs avec une résolution de 5' arc et de découvrir un grand nombre de sources gamma (entre 100 GeV et 100 TeV) dans la partie centrale de notre Galaxie, et même extragalactiques. Le retour scientifique de HESS et le développe-

ment de son extension HESS2 sont une priorité pour l'IN2P3. au-delà, le projet CTA, qui a l'ambition de couvrir jusqu'à 1 km² suivant la même technique, est à l'étude (au travers d'une « design study » du FP7 européen), et réunit tous les acteurs de l'astronomie gamma européenne.

Le lancement du satellite GLAST est prévu pour début 2008 et couvrira les gammas entre 10 MeV et 300 GeV. Malgré le retrait du financement CNES en 2003, l'IN2P3 et le CEA contribuent substantiellement au projet. HESS2 et GLAST, avec un fort recouvrement de leurs sensibilités, explorent tous deux une gamme de fréquences peu observée jusqu'à présent mais cruciale.

Le projet Simbol-X en collaboration avec l'Italie, choisi dans le cadre de l'appel d'offres du CNES de satellites en vol en formation, ouvre la voie d'une nouvelle génération de télescopes spatiaux pour l'astronomie à hautes énergies. Le lancement est prévu pour 2012.

Enfin dans le domaine des sursauts gammas, une étape importante est l'analyse des contreparties optiques qui peuvent servir de sondes cosmologiques. C'est un des enjeux du projet X-Shooter (spectrographe au VLT, prévu pour 2007). Les enjeux concernent à la fois la cosmologie (diagramme de Hubble à plus grand z qu'avec des supernovae) et la physique des hautes énergies. Par ailleurs le satellite SVOM/ECLAIRS, développé dans le cadre de la collaboration avec la Chine et prévu pour un lancement fin 2011, devrait permettre d'assurer la relève du programme SWIFT pour la détection des sursauts gamma.

Rayons cosmiques de hautes énergies

L'excellente présence de la communauté française dans l'expérience Auger, (détection de rayons cosmiques d'ultra haute énergie) en Argentine, doit être soulignée. Les résultats obtenus récemment commencent à mettre en évidence la coupure de spectre attendu à très haute énergie (dite coupure GZK). La construction du deuxième réseau (dans l'hémisphère

Nord) est maintenant très fortement considérée et la place des groupes français est en discussion.

La possibilité de détecter les rayons cosmiques par les ondes radio produites lors du développement de la gerbe est actuellement explorée par le projet CODALEMA. Outre son intérêt pour les rayons cosmiques (coût, et disponibilité jour et nuit du détecteur), les compétences acquises pourraient se révéler utiles dans le domaine de l'astronomie impulsionnelle et dans le cadre d'une future participation à des projets de relevés cosmologiques tels que SKA et LOFAR.

Par ailleurs, une expérience ballon américaine CREAM, avec une participation française en Antarctique pour le vol de fin 2007, a pour but de compléter les mesures de rayons cosmiques des projets au sol et dans l'espace et de tester les modèles d'accélération des rayons cosmiques par les supernovae.

Quant à l'expérience AMS, axée sur la mesure précise des flux de particules et d'antiparticules dans l'espace, son futur est lié à celui de la station spatiale internationale, et donc incertain.

Matière noire non baryonique

L'expérience EDELWEISS de recherche directe de matière noire non baryonique a bénéficié des atouts du Laboratoire Souterrain de Modane et obtenu d'excellents résultats. La phase EDELWEISS II utilise actuellement 10 kg de germanium. Une R&D visant un détecteur d'une tonne est entamée : il convient maintenant de construire un projet européen autour de la technologie la plus adéquate : différents matériaux peuvent être utilisés, et plusieurs méthodes de réjection des particules chargées doivent être appliquées simultanément. Pour maintenir la bonne position internationale des équipes françaises dans ce domaine, un effort important sur les technologies utilisées est indispensable.

Le projet MIMAC est une R&D utilisant des micro-TPC pour mesurer les traces de reculs de noyaux par la lecture d'anodes pixel-

lisées. La direction des traces de recul (inaccessible aux détecteurs bolométriques) de noyaux dans les interactions WIMPs-noyaux serait une signature de l'origine galactique des WIMPs.

La détection indirecte de matière noire offre des perspectives complémentaires, aussi bien par l'intermédiaire de détecteurs gamma et rayons cosmiques comme HESS, GLAST, et AMS qu'avec des télescopes à neutrinos tels qu'ANTARES.

Les recherches de particules nouvelles auprès d'accélérateurs comme le LHC et le possible futur accélérateur linéaire pourraient apporter leur contribution à l'énigme de la matière noire, en créant et observant en laboratoire les particules dont elle est peut-être formée.

Astrophysique nucléaire

Pour expliquer la composition isotopique de certaines météorites l'étude de la production de radio-isotopes par l'irradiation de la nébuleuse proto-solaire nécessite des mesures avec des faisceaux de particules légères.

Quelques sections efficaces de réactions nucléaires des cycles pp, CNO et de la combustion de l'hélium doivent encore être précisées pour accompagner les progrès en observation et en modélisation. Leur étude par mesure directe nécessitera cependant des accélérateurs de faisceaux d'ions stables de faible énergie mais de fortes intensités associés à des systèmes de détection très performants.

La détermination des sections efficaces de capture lente de neutrons (processus s) sur des noyaux instables offre l'accès à des informations clés sur les étoiles de la branche asymptotique des géantes (AGB) : densité de neutrons, température, densité de matière. SPIRAL-II pourrait devenir un site majeur pour ces études, pour lesquelles la production de cibles radioactives et leur irradiation sous un haut flux de neutrons seront indispensables.

Neutrinos

Pour la détection des neutrinos cosmiques de haute énergie, l'expérience ANTARES est en cours de déploiement. La maturation de la technique expérimentale permet d'envisager la construction d'un télescope à neutrinos d'une taille kilométrique (projet KM3), indispensable pour lancer une vraie astronomie neutrino.

Par contre la détection des neutrinos de supernovae (de basse énergie donc) nécessite des détecteurs souterrains de grande taille, de type détecteur Cherenkov Mégatonne. Plusieurs projets à long terme sont à l'étude dans le monde, dont un dans le tunnel du Fréjus: ces projets combinent la détection des neutrinos de supernovae, la mesure de la durée de vie du proton et des mesures fines des paramètres d'oscillations de neutrinos grâce à l'utilisation de nouveaux faisceaux dirigés vers ces détecteurs. L'élaboration d'une stratégie mondiale à long terme est ici indispensable.

Gravitation

En ce qui concerne la recherche d'ondes gravitationnelles, l'interféromètre VIRGO entre dans sa phase d'exploitation, avec une forte participation française. La sensibilité attendue étant limitée, elle sera suivie par les phases VIRGO+ et advanced VIRGO qui vont remplacer certains éléments clés de l'interféromètre, sur lesquels des R&D interdisciplinaires (à l'IN2P3 et dans MPPU) sont en cours. L'étape suivante consistera à explorer une autre gamme de fréquences, permettant d'accéder à d'autres catégories de sources: c'est le projet d'une expérience spatiale, LISA, dans laquelle la France vient d'entrer. Une première étape est le démonstrateur LISA-PathFinder. La détection des ondes gravitationnelles à l'aide d'instruments de type LISA devrait devenir, à long terme, un outil observationnel d'importance.

4 – LES ACTIVITÉS PLURIDISCIPLINAIRES

Les activités pluridisciplinaires à l'IN2P3 peuvent être déclinées en trois thèmes principaux.

Elles s'appuient tout d'abord sur la mise en œuvre de techniques instrumentales de la physique nucléaire et des particules élémentaires (accélérateurs, détecteurs, électronique), avec un recours massif et essentiel à l'informatique, pour aborder des domaines scientifiques variés.

Un second axe d'ouverture tire profit de l'utilisation des techniques et savoir-faire d'autres disciplines pour le développement et la réalisation de nouveaux outils et détecteurs pour la physique subatomique.

Enfin, l'IN2P3 s'est fortement mobilisée pour répondre aux questions liées à l'énergie nucléaire et à l'environnement, qui nécessitent des approches fortement interdisciplinaires.

En outre, les activités pluridisciplinaires constituent par ailleurs un moyen d'intervention et de participation en région, permettant à l'IN2P3 d'avoir, à ce niveau, un impact direct et visible.

4.1 DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES

Accélérateurs

Les accélérateurs sont des outils essentiels du développement scientifique dans les domaines de la physique nucléaire et des hautes énergies. Une forte activité de R&D (pouvant être suivie d'une phase de construction) existe au sein de la DSM et de l'IN2P3. Elle vise à accompagner les besoins exprimés à travers les évolutions de nos champs scientifiques. Cinq laboratoires participent à ces activités.

Les cavités accélératrices supra-conductrices de fort gradient et les coupleurs de puissance (ILC, EURISOL), ainsi que les sources de protons et d'ions lourds intenses (> 1 mA) font l'objet d'une activité de R&D très importante. La création de la plate-forme SUPRATECH, en collaboration avec le CEA/DSM permet de fédérer les acteurs et de les pourvoir des moyens les plus modernes. Les laboratoires impliqués accompagnent les études pour définir les objectifs et résoudre les principales difficultés pour la conception des accélérateurs du futur (ILC, CLIC, etc.).

L'IN2P3 collabore à la construction d'un injecteur de protons pour le CERN de haute intensité (IPHI, 3 MeV, 100 mA, horizon 2007) en vue d'augmenter l'intensité des machines du CERN (projet LINAC4, 160 MeV-10 mA) et de se préparer à des faisceaux intenses de neutrinos ou d'ions radioactifs (projet SPL) au CERN couplés éventuellement à EURISOL (faisceaux bêta horizon 2015-2020).

Ces développements peuvent aussi s'appliquer à la transmutation des déchets radioactifs HAVL avec des réacteurs hybrides (l'aspect « fiabilité » est essentiel dans cette application et sera testé avant l'envoi de l'injecteur IPHI au CERN).

Un programme ambitieux ELI est en cours de montage. Il a pour objet d'étudier l'interaction laser-matière dans le domaine ultra-relativiste et de décliner les applications potentielles, notamment, dans le domaine des accélérateurs. Les potentialités du développement très rapide des lasers à impulsions courtes (attosecondes ou femtosecondes) de très haute intensité ($> 10^{19}$ watts/cm²), tel le projet ELI, présentent pour les activités qui relèvent de l'IN2P3 un intérêt certain.

Elles sont évaluées dans la perspective d'une nouvelle génération d'accélérateurs compacts de grande énergie (au LLR) mais également en vue d'ouvertures possibles pour l'étude des propriétés nucléaires dans des plasmas denses et chauds. Ces études sont également encouragées par l'ouverture à la communauté académique mondiale d'équipements lasers de haute énergie jusque là réservés à la défense : LIL-PETAL, MEGAJOULE.

La constitution du pôle Accélérateurs au sein de l'IN2P3 contribue à rendre ces actions plus cohérentes et efficaces.

Informatique

Le domaine de recherche en Physique subatomique a toujours eu des besoins forts en moyens informatiques, que ce soit en capacité de traitement ou bien de stockage de données. Le stockage et l'accès aux volumes énormes de données produites par les expériences LHC et d'astroparticules ainsi que la puissance de calcul nécessaire pour les traiter sont incompatibles avec les technologies classiques. L'émergence récente d'une nouvelle technologie de calcul distribué, la grille de calcul, permettant de mutualiser l'ensemble des ressources informatiques disponibles sur le réseau, a ouvert des perspectives nouvelles, tant dans le calcul scientifique que dans le monde industriel. Plusieurs laboratoires de l'IN2P3, associés à des équipes du CNRS et de l'INRIA, ont participé activement depuis 2001 à son développement dans le cadre du programme européen DATAGRID. Cet effort se poursuit aujourd'hui avec une forte implication de l'IN2P3 dans le programme EGEE, financé par la commission européenne, et visant à la mise en place d'une infrastructure de grille pluridisciplinaire européenne. La grille de calcul, reliant plusieurs centres et laboratoires dans le monde est déjà en utilisation et son développement futur est une condition nécessaire pour l'exploitation des données du LHC à travers le projet LCG (LHC Computing Grid). Le centre de calcul de Lyon CC-IN2P3 est ainsi devenu un des nœuds importants de cette structure en grille. Plusieurs laboratoires de l'IN2P3 ont également initié et développé avec des supports régionaux des structures de grilles locales, nœuds secondaires de la grille EGEE. À titre d'exemple, AUVERGRID est un centre de ressources de grilles informatiques opérationnel, utilisé par des partenaires publics et privés à l'échelle de la région Auvergne qui le finance très substantiellement.

De très nombreuses retombées dans le monde de la recherche et industriel sont atten-

dues. Grâce à l'expertise acquise et l'infrastructure de grille mise en place dans ses laboratoires, l'IN2P3 participe à plusieurs projets régionaux, nationaux et internationaux, sur des applications industrielles (OPENPLAST) et pluridisciplinaires. Dans ce dernier domaine, outre le projet LCG concernant directement notre discipline, l'IN2P3 a une forte implication dans le domaine du biomédical (EMBRACE, BIOINFOGRID, expérience Wisdom, SHARE, LifeGrid), programmes supportés dans le cadre du 6^e PCRDT.

4.2 AVAL DU CYCLE. ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET ENVIRONNEMENT

Les activités du CNRS autour du cycle électronucléaire sont coordonnées par le programme interdisciplinaire PACEN. Ce programme mis en place en 1997 initialement afin de coordonner jusqu'à fin 2006 les recherches du CNRS concernant la gestion des déchets produits par les centrales nucléaires a élargi son champ d'intérêt aux filières innovantes pour la production d'énergie dans le futur avec un fort soutien européen (5^e et 6^e PCRD).

Dans ce cadre cinq GDR ont été créés, parmi lesquels GEDEPEON (GEstion des DÉchets et Production d'Énergie par Options Nouvelles), NOMADE (NOUveaux MATériaux pour DÉchets) et PRACTIS (Physico-chimie des actinides et autres radioéléments en solutions et aux interfaces) auxquels participent, à divers titres, le CEA, EDF, ANDRA et AREVA NP. Ces GDR regroupent la majeure partie des activités des laboratoires de l'IN2P3.

Les études en cours ont pour but d'une part la réduction de la quantité et de la toxicité des déchets nucléaires à vie longue par transmutation auprès d'ADS et d'autre part, la production d'énergie à l'aide de réacteurs nouveaux produisant moins de déchets et optimisant l'utilisation des ressources en matière fissile, programme engagé au niveau international dans le cadre du forum génération IV. Les équipes de l'IN2P3 explorent plus précisé-

ment la filière Th-U3 dans sa version à sels fondus.

Dans le cadre de GEDEPEON, celles-ci contribuent à plusieurs thèmes de recherche :

- l'acquisition et l'évaluation de données nucléaires de basse énergie ;

- la physique des réacteurs sous critiques : à la suite du programme MUSE qui a permis de mettre au point des méthodes pour mesurer directement la réactivité d'un massif sous-critique ;

- la physique des matériaux pour étudier les problèmes de tenue mécanique des différents éléments en fonction de la fragilisation par le métal liquide et la tenue à l'irradiation. Il faut noter en 2006 l'achèvement et l'installation à PSI de la cible de spallation MEGAPIE dont les retours d'expérience sont très attendus ;

- le développement d'un ensemble source de protons-accelérateur fiable de haute intensité (10 mA), au GeV pour les ADS (dans le cadre du programme européen EUROTRANS) : les choix d'un accélérateur linéaire, d'une source de type IPHI et de cavités supraconductrices pour la partie haute énergie sont maintenant acquis. Les développements sont en cours pour la partie intermédiaire. L'effort principal porte maintenant sur la fiabilisation d'une telle machine pour satisfaire aux exigences du cahier des charges ;

- la mise en place des outils de simulations nécessaires au développement de nouveaux systèmes à la fois régénérateurs et produisant moins de déchets à vie longue.

4.3 INTERFACE AVEC LES SCIENCES DU VIVANT

L'IN2P3, de par son savoir-faire dans le développement d'outils pour les besoins propres en physique nucléaire et physique des particules, a développé un grand nombre de techniques de détection, de modélisation et

d'analyse de données dont certaines ont de manière naturelle des implications dans le domaine de la biologie et de la médecine.

Ces activités en direction des sciences du vivant connaissent un essor depuis quelques années au sein de l'IN2P3. Une cinquantaine de physiciens repartis dans dix laboratoires de cet institut sont impliqués dans ce domaine, essentiellement autour de projets développés dans un contexte local (collaboration avec des centres hospitaliers, des laboratoires de sciences de la vie, des laboratoires privés, ou par l'utilisation d'accélérateurs d'ions locaux) et souvent initiés par des actions universitaires. Un GDR – Instrumentation et modélisation pour l'Imagerie Biomédicale MI2B – s'est mis en place en 2004 pour consolider et structurer les équipes de recherche de l'IN2P3 et du CEA travaillant pour l'imagerie à l'interface entre la physique, la biologie et la médecine. La constitution en 2006 d'une UMR CNRS (IN2P3, VIVANT), Paris VII et Paris XI sur la base des groupes IPB et GMPIB dont l'activité est centrée sur l'imagerie du cerveau – UMR8165, Imagerie et Modélisation en Neurobiologie et Cancérologie IMNC – est un atout supplémentaire pour favoriser la formation dans ce domaine et le développement des liens entre physiciens, biologistes et médecins.

Pour l'ensemble des laboratoires de l'IN2P3, les principaux thèmes de recherches développés concernent :

- la caractérisation de systèmes biologiques et de biomolécules pour le développement de biomatériaux, pour la bactériologie, l'exobiologie, et les sciences de l'environnement, l'étude de l'exposition à divers éléments exogènes dans le milieu vivant ;

- la radiobiologie, et notamment, les effets de divers types de rayonnements (hadrons, ions, agrégats biologiques) sur les systèmes biologiques ;

- le développement de machines et techniques d'irradiation à objectif médical (hadronthérapie, protonthérapie, neutronthérapie, radiothérapie X, e⁻) ;

- l'imagerie en médecine (diagnostic et thérapie) et biologie (imagerie métabolique et morphologique) ;

- l'informatique pour les sciences de la vie (simulation et modélisation pour l'imagerie et la dosimétrie, exploitation des grilles de calcul pour la santé).

Ces programmes profitent pleinement de l'expérience de l'IN2P3 dans le domaine des accélérateurs, dans le champ de l'instrumentation, mais aussi des outils développés par l'institut autour des architectures de grilles de calcul. Ils permettent à l'IN2P3 d'approfondir son savoir faire et de le valoriser en faveur des sciences de la vie tout en contribuant à une meilleure visibilité des laboratoires à l'échelle régionale.

Déjà bien implantées dans des collaborations internationales dans le cadre de projet du 6^e PCRDT, les équipes IN2P3 engagées sur cette thématique en plein développement ont la volonté de se structurer progressivement et plus fortement au niveau national. Des soutiens ciblés et efficaces devraient permettre de fédérer les initiatives et donner une lisibilité dans ce domaine d'activités sur les projets que souhaite soutenir l'IN2P3. L'ampleur de l'implication de l'institut au projet ETOILE doit notamment être clarifiée pour permettre aux équipes de l'IN2P3 collaborant dans ce domaine de se positionner.

Une grande partie des activités relevant de cette thématique sont valorisables. Malgré certains succès, la phase de transfert technologique ou le partenariat avec des industriels et médecins reste difficile à mettre en œuvre de la part des laboratoires.

4.4 VALORISATION

Nous nous bornerons, ici, à traiter un exemple qui illustre bien la démarche allant de la recherche fondamentale vers l'application. Un autre exemple aurait pu être les services de mesures de radioactivité, présents dans

certaines laboratoires et permettant de répondre aux besoins de la société, avec pertinence et compétences. D'autres domaines d'expertise débouchent au stade industriel, comme par exemple les sources d'ions avec la société PAN-TECHNIK.

À titre d'exemple : basses et très basses radioactivités

Un groupe de l'IN2P3 est à l'origine du développement des techniques de spectroscopie gamma ultra bas bruit de fond pour les recherches sur la masse et la nature du neutrino. Grâce à une amélioration constante des sensibilités de mesure, il est maintenant possible de mesurer des taux de radioactivité de l'ordre de 0,1 milliBq/kg soit 5 ordres de grandeur plus faibles que les taux de radioactivité présents dans la nature. Les recherches autour de la détection des très faibles taux de radioactivités sont aujourd'hui développées en collaboration avec le laboratoire souterrain de Modane pour répondre aux exigences des nouveaux projets de physique fondamentale tel SUPER NEMO, recherches qui font aussi l'objet d'un JRA dans le cadre du réseau européen des laboratoires souterrains.

Le savoir faire développé est valorisé par le biais de collaborations avec d'autres laboratoires du CNRS et d'une université française, pour la datation et l'authentification des vins, des sels etc. Un projet pluridisciplinaire de plate-forme de spectrométrie nucléaire bas bruit de fond est en cours d'élaboration entre différentes unités du CNRS en région et le laboratoire de la DGCCRF (Direction Générale de la Consommation, de la Concurrence et de la Répression des Fraudes).

CONCLUSION

L'objet premier des recherches évoquées ci-dessus est de répondre aux nombreuses questions liées à la compréhension de la matière au niveau subatomique (noyaux, nucléons et autres particules élémentaires) et des interactions élémentaires ainsi que de leurs implications cosmologiques. En effet, les physiciens concernés continuent à œuvrer activement, et avec succès, à la compréhension de la physique des noyaux et des nucléons ainsi qu'à l'exploration des conséquences du modèle standard des interactions élémentaires et à la découverte d'une nouvelle physique qui le dépasse. Mais il est maintenant bien établi que cette communauté fournit des contributions directes et centrales aux recherches sur l'évolution cosmologique. Elle s'est en outre, ouverte de plus en plus aux disciplines connexes et contribue à la solution de grands problèmes sociétaux. Elle œuvre avec dynamisme à la mise en route puis à l'exploitation de projets internationaux de très grande envergure, par exemple en physique nucléaire avec SPIRAL II et en physique des particules avec le LHC. Elle a impérativement besoin en son sein, de par son mode de fonctionnement, de compétences techniques de pointe ainsi que d'une communauté dynamique de théoriciens à caractère plutôt phénoménologique. Les chercheurs appartenant à la section 03 du Comité National, et les physiciens d'autre statut qui travaillent dans les laboratoires du CNRS, sont des acteurs forts, pleinement insérés et visibles dans les grands axes de la recherche fondamentale au niveau mondial dans leurs domaines. Ils s'attachent en outre à mettre leur compétence au service de la société, pour contribuer, à leur place, à la solution de grands problèmes tels que la santé publique et ceux que pose la demande énergétique mondiale.

