

# INTERACTIONS, PARTICULES, NOYAUX, DU LABORATOIRE AU COSMOS

## *Président*

Konstantin Protassov

## *Membres de la section*

Patrick Aurenche

Christophe Beigbeder Beau

Vincent Breton

Marie-Claude Cousinou

Jean-Marie de Conto

Emmanuel Gamelin

Jérôme Giovinazzo

Raphaël Granier de Cassagnac

Jean-Yves Grossiord

Francesca Gulminelli

Sonja Kabana

Santiago Pita

Éric Plagnol

Thierry Pradier

Melissa Ridel

Marc Rousseau

Marie-Hélène Schune

Michel Tripon

Marc Winter

Fabian Zomer

Les objectifs de la physique subatomique sont de trouver les briques les plus élémentaires de la Nature, d'étudier leurs propriétés et de comprendre la façon avec laquelle elles forment la matière et font évoluer l'Univers. La recherche des constituants élémentaires et l'étude de leurs propriétés et de leurs origines correspondent aux champs d'investigation des physiques des particules et des astroparticules. La structuration de la matière à l'échelle microscopique fait partie des interrogations de la physique nucléaire et de la physique hadronique et, à l'échelle de l'Univers, de celles de l'astrophysique nucléaire et de la cosmologie.

En outre, la physique subatomique a toujours eu un très fort impact sur la société : elle a conduit à la découverte d'un nouveau type d'énergie, l'énergie nucléaire, et des recherches ont été entreprises sur les conditions sécurisées dans lesquelles cette énergie peut être contrôlée et utilisée. Elle continue à apporter des réponses aux problèmes sociétaux dans un spectre très large allant de la physique médicale jusqu'aux développements indirects comme le World Wide Web qui fut inventé au Cern pour la communauté internationale des physiciens des particules, et qui a complètement bouleversé la société moderne.

## 1 - L'ORGANISATION DE LA MATIÈRE EN INTERACTION FORTE

La physique nucléaire cherche à comprendre l'organisation des nucléons dans les noyaux atomiques, ainsi que des quarks et des gluons dans les nucléons. 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.

### 1.1 DES NOYAUX ET DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE COMPOSÉS DE PARTICULES

Le noyau atomique est un système quantique régi par les interactions forte, faible et électromagnétique, à l'origine d'une grande variété de phénomènes complexes. Le but de la physique nucléaire est d'aboutir à une compréhension globale et cohérente de ces différents phénomènes, des propriétés collectives aux excitations, des systèmes nucléaires à très petit nombre de corps à la matière étendue, en passant par la compréhension et le contrôle des réactions nucléaires. Cet objectif n'est pas seulement nécessaire à la compréhension du comportement de la matière hadronique qui nous entoure, mais il a aussi des implications essentielles sur nombre

d'applications technologiques d'intérêt sociétal, de la production d'énergie au retraitement des déchets, de l'imagerie à l'hadron-thérapie.

Les physiciens français se sont dotés d'outils très performants pour cette exploration, combinant faisceaux d'ions stables et radioactifs, spectromètres et ensembles de détection qui leur permettent d'être au plus haut niveau de la compétition internationale. Ils exploitent les installations françaises (Ganil, Spiral, Alto), mais aussi internationales telles qu'Isolde au Cern, JYFL à Jyväskylä, FLNR à Dubna, LNL à Legnaro, GSI à Darmstadt ainsi que MSU aux USA et RIKEN à Osaka.

Actuellement, l'une des questions de base dans ce domaine concerne les limites d'existence du noyau atomique, c'est-à-dire l'identification des isotopes les plus asymétriques en proportion relative de protons et de neutrons (drip lines), et l'étude de leur structure. Des variations brusques d'énergie de liaison se retrouvent dans la structure en couches, en correspondance de nombres de nucléons spécifiques : les nombres magiques. Récemment, une variation des nombres magiques en s'éloignant de la vallée de stabilité a été mise en évidence. Des physiciens français ont par exemple montré que le caractère magique du nombre de neutrons  $N=20$  disparaît dans le noyau très riche en neutron  $^{32}\text{Mg}$ . Ces découvertes remettent en question l'un des paradigmes les plus solides de la structure nucléaire, à savoir l'universalité des nombres magiques.

La compréhension microscopique de ces nouveaux phénomènes nécessite une exploration complète de la table des isotopes, des hydrogènes aux noyaux super-lourds.

Le domaine des noyaux légers constitue un champ d'étude d'élection afin de connecter les degrés de liberté sub-nucléoniques avec la structure des noyaux complexes, connexion qui commence à pouvoir être quantitative avec les théories modernes ab initio. Du point de vue expérimental, la disponibilité d'accélérateurs d'ions radioactifs de première génération a permis l'étude des propriétés des noyaux légers très faiblement liés ou non-liés à proximité des drip lines ( $^7\text{H}$ ,  $^9\text{He}$ ,  $^{11}\text{Li}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ,  $^{12}\text{O}$ ) à l'aide de réactions directes en cinématique inverse. Les équipes françaises sont pionnières dans ce domaine.

L'extension de l'exploration des drip lines vers des noyaux plus lourds n'est pas seulement un enjeu expérimental, mais demande aussi de considérables progrès théoriques. En effet, la compréhension des états peu liés requiert une

modélisation correcte du continuum, ce qui implique une description cohérente des états de diffusion, des résonances et des états liés dans un même formalisme en termes de système quantique ouvert. Les physiciens français contribuent de façon importante à l'avancée de ce programme.

Si la drip line proton est relativement mieux connue que la drip line neutron, son étude est néanmoins particulièrement intéressante parce que des radioactivités exotiques ont été mises en évidence à proximité de la ligne  $N = Z$ , et que ces noyaux permettent d'extraire des informations sur l'appariement proton-neutron, encore largement inconnu. Les physiciens français fournissent une contribution essentielle à cette thématique, du point de vue expérimental comme théorique.

Les noyaux lourds montrent quant à eux une grande variété de phénomènes collectifs, qui ne s'expliquent pas

de façon satisfaisante par des méthodes microscopiques de type modèle en couches, lesquels mettent plutôt en exergue les propriétés de particules indépendantes du noyau. L'approche fondée sur l'utilisation de fonctionnelles de densité fournit une description des états fondamentaux et excités, ainsi que des mécanismes de réaction, avec un pouvoir prédictif inégalé sur la table des nucléides tout entière. L'enjeu actuel, dans lequel les physiciens français sont en première ligne, consiste en la construction de fonctionnelles fiables pour les noyaux exotiques et fondées sur des interactions effectives dérivées avec des approches du groupe de renormalisation.

La réponse collective du noyau révèle des informations importantes sur cette interaction effective, et par conséquent sur les propriétés de la matière nucléaire, telle qu'elle pourrait se trouver au cœur des astres compacts. Si la réponse des noyaux stables est dominée par les résonances géantes de différentes multipolarités, une réponse dipolaire additionnelle a été observée, pour des noyaux riches en neutrons, et située à basse énergie d'excitation à proximité du seuil d'émission de particule. Cette « résonance dipolaire pygmée » a été attribuée à un nouveau mode d'excitation lié à l'asymétrie d'isospin et interprétée comme une vibration d'un halo de neutrons autour d'un cœur saturé en isospin. Plus généralement, la partie isovectorielle de la fonctionnelle (énergie de symétrie) est encore très peu connue et peut être contrainte par des expériences de diffusion d'isospin, étudiées actuellement par les physiciens français et leurs collègues américains. Les investigations des propriétés collectives en fonction du spin et de la température jouent un rôle crucial dans la compréhension de la structure nucléaire au-delà du champ moyen. Les expériences passées montrent que les noyaux peuvent subir plusieurs transitions de forme à très hauts moments angulaires, et une transition de type liquide-gaz à haute température. Les physiciens français ont fourni des contributions cruciales à ces études, qui doivent être poursuivies dans le domaine des noyaux exotiques.

Aux limites extrêmes d'existence du noyau atomique, des effets fins de structure nucléaire sont à l'origine de la prédiction de l'existence d'éléments super-lourds, stabilisés contre la fission spontanée par des effets combinés de déformation et de fermeture de couche. Un programme de recherche a été conduit conjointement à JYFL, GSI, Dubna et Ganil pour étudier les noyaux autour du  $^{254}\text{No}$ , à proximité de la fermeture de couche déformée  $N = 152$ . Il s'agit ici des systèmes les plus lourds pour lesquels il est possible d'effectuer une spectroscopie détaillée, et des faisceaux stables de haute intensité dédiés sont nécessaires pour avancer ce programme.

Toutes ces études ont de nombreuses applications. En astrophysique, elles sont diverses et particulièrement importantes. On peut citer la nucléosynthèse des éléments légers et lourds, la physique des explosions stellaires

(supernovae), la nature des objets compacts comme les étoiles à neutrons, les réactions induites par les neutrinos. Les ingrédients nucléaires introduits dans les modèles astrophysiques nécessitent la connaissance détaillée des propriétés de nombreux noyaux situés à la drip line neutron, ainsi que des processus d'interaction forte et électrofaible qui jouent un rôle fondamental dans l'évolution des objets stellaires. La précision des mesures expérimentales et des prédictions théoriques est alors cruciale, en ce qui

concerne les masses nucléaires, les modes d'excitation, les densités de niveaux, les décroissances  $\alpha$  et  $\beta$ , les probabilités de fission, les captures électroniques et de neutrinos.

Ces recherches ambitieuses nécessitent la disponibilité complémentaire de faisceaux d'ions radioactifs et d'ions stables de haute intensité. Une moisson de nouveaux résultats a déjà été récoltée dans les dernières années grâce aux installations d'ions radioactifs de première génération, en particulier Spiral au Ganil. Les physiciens français sont actuellement investis dans l'amélioration de Spiral et la construction de la nouvelle installation Spiral2, qui permettra d'étendre ces études en fournissant entre autres des faisceaux intenses de fragments de fission riches en neutrons à basse énergie (Desir) ou ré-accélérés à des énergies de l'ordre de 10 AMeV, ainsi que dans l'instrumentation associée. Plusieurs détecteurs et spectromètres de nouvelle génération sont en phase de construction (Agata, S3) ou de R&D (Gaspard, Paris, Fazia, Actar...). Les physiciens français sont aussi impliqués dans la réalisation de l'installation de nouvelle génération Fair auprès du GSI, et à plus long terme dans la construction du projet complémentaire Eurisol. Un travail important de R&D autour des faisceaux d'ions radioactifs est également mené auprès d'Alto.

La finalisation de ces projets, et l'exploitation de la physique qui en découlera, ne pourra pas être menée avec succès sans un soutien constant de théoriciens qui, en physique nucléaire, sont particulièrement proches des expériences et contribuent de façon importante à définir des objectifs pour les nouveaux projets.

Cette recherche n'est pas limitée à l'échelle française ni européenne, et de nombreux projets sont en cours de réalisation de par le monde (RI@RIKEN, ISAC2, FRIA).

## 1.2 DES PARTICULES COMPOSÉES DE QUARKS ET DE GLUONS

Les nucléons sont au premier ordre composé de trois quarks, mais de nombreuses questions se posent, dès qu'on les étudie à plus petite échelle. Quelles sont leurs distributions de charge ? Quel est le rôle des gluons ? Des quarks étranges participent-ils à leurs structures ? Quelle est l'origine de leurs moments magnétiques ? L'environnement des noyaux influe-t-il sur leurs propriétés ? Pourquoi le nucléon présente-t-il moins de modes d'excitation que la théorie n'en prédit ? Existe-t-il des formes exotiques de matière hadronique ?

Pour aborder ces questions, les nucléons sont sondés avec des hadrons (GSI à Darmstadt) ou des leptons (JLab aux USA, Mami à Mayence). Trois thèmes ont mobilisé ces dernières années les équipes françaises : mesure du contenu en quark étrange du nucléon, étude des distributions de partons généralisées (GPD), et caractérisation des effets 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 à JLab se sont terminées en 2008. Les résultats montrent une contribution pratiquement nulle des quarks étranges aux propriétés électriques du proton, comme observé également à Mami. En revanche, cette contribution semble atteindre quelques pourcents pour les propriétés magnétiques à grand transfert

d'impulsion. Une série de mesures pionnières d'électro-production de photons (diffusion Compton virtuelle) et de mésons sur le nucléon, permettant en principe d'accéder aux GPDs, ont été entreprises ces dernières années à JLab et ont mené à plusieurs publications qui apportent les premières contraintes sur la modélisation et l'extraction des GPDs. L'expérience Hades au GSI, pour l'étude de la modification éventuelle des propriétés des hadrons dans la matière, est en phase de production de données et les premiers résultats sur les systèmes les plus légers sont déjà publiés. Après la modification du détecteur, les systèmes plus lourds seront étudiés (fin 2010) et des expériences avec faisceaux de pions seront réalisées (2011).

À moyen et long termes, les physiciens du CNRS ont décidé de se concentrer sur deux projets d'étude de la structure du nucléon : étude des GPDs à une énergie incidente plus élevée (12 GeV) à JLab (à partir de 2013), et l'expérience Panda prévue auprès du nouvel accélérateur Fair qui entrera en service à partir de 2017 en Allemagne. Un groupe français y propose un programme de mesure des facteurs de forme électromagnétiques du nucléon du genre temps en utilisant un faisceau d'antiprotons. Des contributions techniques très significatives sont prévues et concerneront soit de nouveaux détecteurs (Panda) soit des améliorations majeures prévues sur les machines existantes (JLab).

## 1.3 - UNE MATIÈRE DE QUARKS ET DE GLUONS DÉCONFINÉS

Les partons, constituants élémentaires des hadrons, n'ont jamais pu être observés à l'état libre. Ils restent ainsi confinés pour former les hadrons (voir 1.2). Néanmoins, lorsqu'entrent en collision des noyaux lourds à très haute énergie, une transition vers un état où quarks et gluons sont déconfinés doit avoir lieu. Ce « plasma de quarks et de gluons » prévalait dans l'Univers quelques microsecondes après le Big-Bang et peut être décrit dans un cadre thermodynamique par une équation d'état incluant température, énergie, pression, densité, composition, etc. Les équipes françaises, issues des deux communautés de physique nucléaire et de physique des particules, ont eu un rôle majeur dans l'observation au SPS du Cern de premiers indices (comme la suppression du méson  $J/\psi$  par effet d'écrantage) montrant qu'un nouvel état de la matière a bien été produit. L'existence de cet état a été confirmée, à plus haute énergie et par de nombreuses signatures (comme l'absorption des jets par le milieu formé), au RHIC de Brookhaven, USA. L'ensemble des résultats du RHIC – une quinzaine de physiciens du CNRS ont participé activement aux expériences Brahm, Star ou Phenix – indique la production d'un état liquide de quarks et de gluons en interaction, différent du gaz parfait prédit et attendu.

Les énergies plus élevées (presque 30 fois celles du RHIC) mises en jeu dans les collisions d'ions lourds au LHC du Cern, qui débiteront fin 2010, permettront d'étendre ce domaine d'étude à des densités d'énergie toujours plus extrêmes. Il s'agira non seulement de confirmer la création d'un plasma mais surtout d'étudier quantitativement ses propriétés thermodynamiques. 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.

Dans ce domaine, la majeure partie de la communauté française est rassemblée aujourd'hui autour du LHC. Ce sont d'abord une cinquantaine de physiciens exploitant le détecteur Alice, un instrument optimisé pour couvrir l'ensemble des questions posées par cette physique. Cette communauté a une bonne visibilité grâce à ses contributions importantes aux niveaux de détection, traitement des données et implications dans les thèmes de physique étudiés, qui sont la physique des muons, des particules étranges, des photons.

Un petit groupe s'implique depuis peu dans cette recherche sur le détecteur CMS, et a également acquis une bonne visibilité.

Parallèlement à ces études de longue haleine, s'amorcent des réflexions sur la modification de quelques dispositifs d'Alice afin d'améliorer leurs performances et de les rendre compatibles avec les caractéristiques du LHC lorsque, autour de 2015, les intensités de ses faisceaux seront accrues.

## 2 - PHYSIQUE DES PARTICULES

La physique des particules s'attache à l'étude des interactions entre constituants fondamentaux de la matière, à la compréhension de l'origine de leur masse, et enfin aux symétries discrètes d'espace et de temps. Elle tisse des liens entre l'observation au niveau microscopique et la compréhension de l'Univers, en recherchant des particules susceptibles de constituer la matière noire.

Les avancées parallèles et couplées des observations expérimentales et des progrès théoriques enregistrés depuis les années 60 ont permis l'élaboration de ce qui est appelé le « modèle standard ». Il s'agit d'une théorie quantique des champs, traitant dans un cadre formel unifié trois interactions fondamentales : l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte. Dans ce modèle, les particules élémentaires se classent en particules dites de matière, les fermions, et en particules médiatrices des forces, les bosons. Il y a trois familles de particules de matière, chaque famille comprenant deux quarks, les composants essentiels des hadrons et des nucléons, et deux leptons, un chargé et son neutrino associé. Pour chaque particule de matière, il existe également une antiparticule. Seule la première famille constitue la matière stable et suffit au premier ordre à la description de notre environnement. Les particules des deux autres familles ne peuvent être créées, et donc observées, que lors de collisions, dans l'Univers ou les accélérateurs de particules. Les interactions fondamentales (forte, faible, électromagnétique) sont véhiculées par des bosons dits intermédiaires (gluons, W et Z faibles, photon). Finalement, le modèle standard comprend un boson supplémentaire, non encore observé, le boson de Higgs qui est à l'origine des masses des particules. Bien que ce modèle donne une description très satisfaisante des phénomènes observés dans les expériences, il reste toutefois une théorie incomplète :

- il ne justifie pas l'existence de trois familles ;
- il ne permet pas de prédire les valeurs observées des

masses des particules ;

- il ne rend pas compte de la gravitation ;
- il n'explique pas l'asymétrie entre matière et antimatière observée dans l'Univers.

Pour répondre à ces questions, de nombreuses théories permettant d'aller « au-delà du modèle standard » sont développées. En général, elles prédisent l'existence de nouvelles particules ainsi que des déviations fines dans les mesures de certaines observables par rapport aux prédictions du modèle standard. Cette « nouvelle physique » devrait apparaître vers une énergie de l'ordre du TeV. La recherche de nouvelles particules qui pourraient constituer la masse manquante dans l'univers se fait auprès des accélérateurs ainsi que dans les observations d'astrophysique et de cosmologie (voir § 3).

Le modèle standard a été profondément testé, tout particulièrement au cours des deux dernières décennies. Les expériences menées auprès du LEP (Cern, Genève) mais aussi de Hera (Desy, Allemagne) ont permis de vérifier sa cohérence interne et de mesurer de nombreux paramètres avec une très grande précision et beaucoup de redondance. Ces tests du modèle standard se prolongent actuellement par certaines des mesures menées auprès du Tevatron (Fermilab, USA) et continueront au LHC (Cern, Genève). 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. Il devrait se traduire par l'existence d'un boson de Higgs dont la signature expérimentale est actuellement activement recherchée. D'autre part, la recherche de signaux de physique au-delà du modèle standard est un des buts principaux de la recherche en physique des particules pour les prochaines années.

Mais augmenter l'énergie disponible de manière à produire et observer de nouvelles particules n'est pas la seule façon de chercher des signaux de nouvelle physique. La signature de l'existence de nouvelles particules peut prendre la forme d'effets quantiques dans des processus n'impliquant dans l'état final que des particules du modèle standard. Pour ce type de recherche, dites indirectes, le seuil de production en énergie n'est pas l'enjeu principal. La diminution des effets quantiques avec l'augmentation de la masse des particules virtuelles entraîne la nécessité d'une très grande précision. Les expériences de précisions auxquelles participent les physiciens français se déroulent auprès des collisionneurs mais on peut également mentionner les expériences auprès des sources des neutrons ultra froids en France (ILL) et à l'étranger (PSI, Suisse) qui cherchent le moment électrique dipolaire du neutron ou étudient ses états quantiques dans le champ de pesanteur.

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 R&D mettant en œuvre des techniques de pointe en électronique, en informatique, et sur les matériaux utilisés. Entre les premières idées et la période de prise de données, une période d'au moins une dizaine d'années devient ainsi nécessaire.

## 2.1 MESURES À HAUTE ÉNERGIE

Le LHC n'a produit ses premières collisions à haute énergie qu'à la fin de 2009 et jusque là, le Tevatron était le collisionneur le plus puissant au monde. Une luminosité intégrée d'environ  $7 \text{ fb}^{-1}$  y a été accumulée par les expériences CDF et DØ. L'IN2P3 et le CEA-IRFU contribuent de manière importante à l'expérience DØ et à un moindre degré à l'expérience CDF. Au-delà de la recherche du boson de Higgs, le champ de mesures au Tevatron comprend la détermination précise de paramètres fondamentaux du modèle standard tels que la masse du boson W et celle du quark top. Ces mesures 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. Enfin, toute manifestation de nouvelle physique au-delà du modèle standard est et sera encore naturellement et activement recherchée auprès de l'accélérateur fournissant la plus haute statistique disponible à ce jour.

La mise en service du LHC couronne finalement près de vingt ans de R&D et de production de détecteurs, auxquelles les équipes de l'IN2P3 ont largement participé. Deux expériences auprès du LHC, Atlas et CMS sur lesquelles les ingénieurs et physiciens de l'IN2P3 et du CEA-IRFU travaillent, s'orientent principalement vers la mise en évidence du boson de Higgs et la recherche de nouvelle physique. En 2009, après des centaines de milliers de collisions à l'énergie d'injection (900 GeV), des collisions à une énergie de 2,36 TeV ont été enregistrées par les quatre expériences (Alice, Atlas, CMS et LHCb). Ces premières données sont activement utilisées pour la compréhension des détecteurs. Cette période se poursuit en 2010 avec une énergie de 7 TeV et une augmentation graduelle de la luminosité. Tenant compte de la complexité des systèmes mis en jeu, ceci constitue une étape déterminante pour la qualité des résultats futurs. En parallèle avec l'alignement et l'étalonnage des appareillages, les caractéristiques des collisions enregistrées pour la première fois à cette énergie seront étudiées attentivement afin de parfaire les simulations. Au cours de l'année 2010, les expériences espèrent enregistrer environ  $200 \text{ pb}^{-1}$ , ce qui ouvrira la porte aux premières analyses. Des événements contenant des bosons W et Z commencent déjà à être enregistrés et fourniront des muons, des électrons et des jets de particules qui permettront de caractériser les différentes échelles d'énergie (visible et manquante) et d'étudier l'uniformité des réponses des détecteurs. Lorsque la luminosité sera de  $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  une statistique d'environ  $10 \text{ fb}^{-1}$  sera accumulée par an et devrait donner accès aux premières découvertes : celle du boson de Higgs tel qu'il est prédit par le modèle standard mais aussi les premières signatures possibles d'une nouvelle physique. L'amélioration progressive des performances de l'accélérateur en termes de luminosité et de stabilité, donnera ensuite accès à des études de plus grande précision.

À plus long terme, quand le LHC aura produit ses premiers résultats et donné éventuellement des indications sur la présence de nouvelle physique, la construction d'un collisionneur linéaire électron-positron est envisagée : l'ILC dont l'énergie ira du pic du Z (90 GeV) jusqu'au TeV. Un autre projet, le CLIC, pourrait permettre d'étendre le domaine d'énergie de collision au-delà du TeV. Des

ingénieurs et des chercheurs de l'IN2P3 et du CEA-IRFU se sont impliqués dans les développements nécessaires à l'ILC, en collaboration avec des industriels mais aussi dans les études sur les techniques novatrices d'accélération, telles que CLIC. Les expériences prévues auprès de ces accélérateurs bénéficieront d'une connaissance particulièrement précise de l'état initial des collisions, d'une grande souplesse d'ajustement de l'énergie et de la polarisation des faisceaux, ainsi que d'un bruit de fond ne perturbant que modérément les processus étudiés. Elles permettront à la fois d'étudier en détail les phénomènes nouveaux révélés par le LHC, mais aussi d'étendre la sensibilité expérimentale à des processus de physique nouvelle qui n'y sont guère accessibles. Une collaboration mondiale a été mise en place pour organiser et diriger le travail sur l'ILC. Ce groupe doit produire vers la fin 2012 deux Technical Design Reports, un pour l'accélérateur et un pour le détecteur. Ils seront utilisés pour les décisions concernant le futur du projet.

## 2.2 PHYSIQUE DE LA SAVEUR : LES QUARKS

La physique des saveurs est un des meilleurs candidats pour la recherche indirecte des signes de physique au-delà du modèle standard. En effet, plusieurs phénomènes tels que les courants neutres changeant la saveur, ou la violation de la symétrie CP (produit des symétries de parité et de conjugaison de charge) apparaissent via des effets quantiques d'ordre supérieur et sont potentiellement sujet à des contributions dues à la nouvelle physique. Ces mesures de haute précision se font auprès d'accélérateurs fournissant un grand nombre d'événements. Elles ont lieu actuellement au Tevatron et auprès des usines à B, et dans le futur proche au LHC.

La violation de la symétrie CP est un des ingrédients majeurs de la baryogénèse. Aujourd'hui, nous savons que la violation de CP du modèle standard n'est pas suffisante pour décrire l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. Une explication pourrait être l'existence d'autres sources de violation de CP. Il faut donc chercher une faille dans la description des phénomènes liés à la violation de la symétrie de CP dans le modèle standard dans lequel les états propres de saveur sont reliés aux états propres de masse par une matrice unitaire : la matrice CKM. Plusieurs quantités, qui dépendent des paramètres de cette matrice, peuvent être mesurées et, si le modèle standard est correct, elles doivent donner des valeurs compatibles. L'étude du méson Bs a déjà fourni des contraintes significatives sur les extensions envisageables du modèle standard. L'étude de ce méson se poursuivra auprès du LHC en particulier avec l'expérience LHCb à laquelle participent des ingénieurs et physiciens de l'IN2P3.

Les autres mésons B ont été étudiés très en détail auprès des « usines » qui les produisent en grand nombre (environ 2,5 milliards de mésons B ont été produits). Des ingénieurs et physiciens de l'IN2P3 et du CEA-IRFU participent à l'expérience Babar à Slac en Californie. La violation de CP dans les mésons B a été mise en évidence pour la première fois en 2001 et les mesures sont maintenant de grande précision. Ces multiples mesures seront poursuivies par l'expérience LHCb dès 2010. Dans le futur, un collisionneur électron-positron à très haute luminosité permettra aussi

de poursuivre ces mesures de précision et un TDR sera écrit en 2010.

## 2.3 PHYSIQUE DE LA SAVEUR : LES NEUTRINOS

La découverte récente des oscillations de neutrinos montre qu'ils ont une masse qui les distingue et qui permet de les mélanger. Comme pour les quarks, le mélange des familles est décrit par une matrice unitaire dont deux des quatre paramètres sont relativement bien mesurés. Seule une limite supérieure est connue pour le troisième (l'angle  $\theta_{13}$ ) et il est très important de le mesurer, d'autant qu'il est associé à une violation de CP. De plus, si les oscillations établissent une hiérarchie de masse entre les neutrinos, elles ne donnent pas d'indication sur leur échelle absolue ni sur la nature des neutrinos (Dirac ou Majorana). Toutes ces questions font l'objet de plusieurs expériences.

La collaboration T2K (à laquelle trois laboratoires de l'IN2P3 participent) utilise des neutrinos produits grâce à l'accélérateur JParc (Japon) et dirigés vers le détecteur Super-Kamiokande, situé à plus de 130 km de distance. À la fin de l'année 2009, le détecteur proche (INGRID, situé à 280 m de l'accélérateur) a détecté ses premiers neutrinos. Une première estimation de  $\theta_{13}$  est prévue pour 2015. Parallèlement, la collaboration Double Chooz (à laquelle trois laboratoires de l'IN2P3 participent) se propose de mesurer cet angle en détectant le flux de neutrinos en provenance de la centrale nucléaire de Chooz, à la fois grâce à une station proche et à une station distante (d'environ 1 km). Cette dernière est prévue de fonctionner à la fin 2010 et la station proche en 2012. À plus long terme, des projets de type mégatonne sont en gestation. Un faisceau de neutrinos pointe du CERN en direction du laboratoire souterrain du Gran Sasso (Italie), pour rechercher l'apparition de neutrinos-tau à 730 km d'une source de neutrinos-mu. Le détecteur Opera, complété mi-2008, y acquiert des données depuis cette date. L'analyse des données 2008-2009 est en cours et la première régénération d'un neutrino-tau a été mise en évidence en mai 2010. Les laboratoires français ont une contribution essentielle aux détecteurs à scintillation, à la manipulation des cibles, à l'acquisition et à l'analyse des données. L'expérience Opera continuera à prendre des données jusqu'en 2012 pour démontrer sans ambiguïté le changement direct de saveur de neutrino-mu en neutrino-tau et tenter de contraindre l'angle  $\theta_{13}$ .

Enfin, la collaboration Nemo3 étudie les propriétés du neutrino (nature et masse) au travers de la recherche de la double désintégration bêta sans émission de neutrino  $\beta\beta(0\nu)$ . Le détecteur (en fonctionnement depuis 2003) est unique par sa capacité à identifier les électrons émis dans la double désintégration bêta et à mesurer leur distribution angulaire qui pourrait permettre de déterminer le processus conduisant à la désintégration  $\beta\beta(0\nu)$  si celle-ci était découverte. À ce jour, cette collaboration a atteint une limite inférieure sur le temps de vie de ce processus d'environ  $10^{24}$  ans, au meilleur niveau mondial. L'objectif du projet SuperNemo qui reprend les principes de détection de Nemo3 est d'atteindre une sensibilité de  $10^{26}$  ans sur la période de la désintégration  $\beta\beta(0\nu)$  correspondant à une masse effective du neutrino de 50 à 100 meV. Le premier

démonstrateur est prévu pour 2012 et l'ensemble de l'expérience pourrait être en fonctionnement en 2014.

## 3 - ASTROPARTICULE, ASTROPHYSIQUE DE HAUTE ÉNERGIE ET COSMOLOGIE

L'Univers est devenu un laboratoire incontournable pour l'étude de la physique au delà du modèle standard. La mesure du rayonnement diffus cosmologique et l'analyse de la luminosité des supernovae ont montré que l'univers serait euclidien et que son expansion s'accélère sous l'effet d'une « énergie noire ». La matière composant l'univers serait elle-même dominée par une composante invisible, la « matière noire ». Les extensions du modèle standard (supersymétrie, cordes, dimensions supplémentaires...) contiennent des candidats potentiels pour cette nouvelle physique. Des mesures très précises sur les caractéristiques du fond diffus cosmologique, le diagramme de Hubble ou la détection directe de matière noire pourraient apporter la solution à cette énigme.

Une autre énigme, contemporaine de la découverte de la radioactivité, est l'origine du rayonnement cosmique. Sa définition a été aujourd'hui élargie, au-delà des particules chargées, aux photons de haute énergie, aux neutrinos et dans une certaine mesure, aux ondes gravitationnelles. Ces messagers donnent accès à des énergies hors de portée des accélérateurs. Les sites extrêmes de production de ce rayonnement pourraient remettre en cause nos idées sur les lois fondamentales. La détection des ondes gravitationnelles, prédites par la relativité générale, ouvrirait une nouvelle fenêtre sur la compréhension des événements cosmiques violents, des phénomènes au voisinage de l'horizon des trous noirs aux ondes gravitationnelles venant de l'origine de l'Univers.

### 3.1 ASTRONOMIE GAMMA

L'astronomie gamma scrute les phénomènes les plus violents du cosmos dans la gamme allant du MeV à la centaine de TeV. Elle a fait l'objet ces dernières années d'avancées considérables, grâce notamment à l'exploitation de plusieurs instruments au sol tels que Hess, Magic et Veritas, ou en orbite tels que Integral et plus récemment Fermi. Le CNRS, et en particulier l'IN2P3, assurent une forte participation française dans les expériences Hess et Fermi.

Le retour scientifique associé au détecteur Hess est considérable. La France, avec neuf laboratoires impliqués (cinq IN2P3, trois INSU, un CEA) a joué un rôle majeur dans la construction de l'expérience et a une excellente position dans l'exploitation des résultats. Hess a véritablement ouvert le champ de l'astronomie gamma au TeV avec la découverte de dizaines d'accélérateurs cosmiques parsemés dans notre galaxie et dans l'espace extragalactique. Ces découvertes, ainsi que de nombreuses études associant de multiples longueurs d'onde, ont conduit à d'indéniables progrès dans la compréhension des processus en jeu au sein de ces différents systèmes et dans la recherche de l'origine des rayons cosmiques. La deuxième phase de Hess – un télescope de 30 mètres sera ajouté en 2011 au centre du réseau actuel

– permettra d'élargir la gamme en énergie et de gagner en sensibilité, ce qui devrait augmenter significativement le nombre de sources découvertes. Le domaine devrait connaître une nouvelle révolution dans quelques années avec l'avènement du Čerenkov Telescope Array (CTA) aujourd'hui en phase d'étude, et concentrant les efforts d'une large communauté internationale.

Le satellite Fermi a été mis sur orbite en juin 2008 avec succès. Avec six laboratoires, dont trois de l'IN2P3, la France a joué un rôle important dans la construction du principal instrument, le Large Area Telescope, et s'est avantageusement positionnée dans toutes les thématiques scientifiques pour l'exploitation des résultats. Au terme de 18 mois d'observations, le premier catalogue de sources émettant entre 100 MeV et 100 GeV compte 1451 objets, à comparer avec les 271 sources vues par son prédécesseur Egret en plus de cinq années de prise de données. On peut s'attendre, dans les années à venir, à une augmentation du nombre de sources découvertes aux énergies de Fermi et à un retour scientifique remarquable.

## 3.2 RAYONS COSMIQUES D'ULTRA HAUTE ÉNERGIE

L'exploitation de l'observatoire Pierre Auger, en Argentine, a démarré en 2004 par une phase de construction, et se poursuit à pleine sensibilité depuis fin 2007. Avec six laboratoires de l'IN2P3, la France a joué un rôle majeur dans la construction de l'observatoire et se situe au premier plan dans l'analyse et l'interprétation des résultats. Les données cumulées à ce jour ont permis la détermination du spectre des rayons cosmiques au-delà de 10<sup>18</sup> eV, caractérisant avec une précision sans précédent la région de la « cheville » (durcissement du spectre dont la nature est toujours sujette à débat) et une cassure spectrale brutale à environ 3×10<sup>19</sup> eV. Cette dernière est conforme à la manifestation attendue de l'effet GZK. L'expérience Auger a également mis en évidence l'apparition vers 5×10<sup>19</sup> eV d'une anisotropie des directions d'arrivée des rayons cosmiques, avec vraisemblablement une corrélation avec la distribution de matière extragalactique dans l'Univers proche, ainsi qu'une évolution de la nature (du proton au fer) avec l'énergie. L'expérience a également déterminé une limite contraignante à la fraction de photons et de neutrinos aux plus hautes énergies.

## 3.3 ONDES GRAVITATIONNELLES

Après plus de dix ans de développements, le détecteur Virgo a atteint pleinement ses objectifs technologiques, notamment aux basses fréquences où l'impact des vibrations sismiques et environnementales est redoutable. Le fait d'avoir parfaitement réussi à satisfaire ce cahier des charges laisse penser que cette communauté saura réussir les prochaines étapes : Virgo+ et Advanced Virgo. En les attendant, un partenariat solide a été construit avec la collaboration Ligo située aux USA, qui se traduit par la coordination des périodes d'observation et l'analyse conjointe des données collectées depuis mai 2007. La sensibilité atteinte permet d'établir des limites contraignantes pour la fraction d'énergie émise sous forme d'ondes gravitationnelles par le pulsar du Crabe

ou de rechercher la présence de coalescences d'étoiles à neutrons jusque dans l'amas de galaxies Virgo. Avec l'avènement proche d'Advanced Virgo et d'Advanced Ligo, augmentant le volume d'observation d'un facteur mille, une détection effective d'ondes gravitationnelles vers 2015 est une quasi certitude. Dans le cas contraire, notre compréhension de l'Univers sera à revoir.

## 3.4 TÉLESCOPES À NEUTRINOS

Un autre exemple de réussite technique est le détecteur européen Antares, en activité depuis 2008. La France a joué un rôle majeur dans la construction de l'expérience, qui a permis de démontrer la faisabilité de la technique de détection de neutrinos de très haute énergie (du TeV au PeV), grâce à un ensemble de photo-détecteurs placés au fond de la Méditerranée sur des lignes regroupant une centaine de détecteurs chacune. La détection de sources astrophysiques paraît cependant difficile du fait du dimensionnement limité du réseau, et la collaboration travaille à l'amélioration de la sensibilité par un accroissement du volume sensible (projet KM3NeT) et par la mise en réseau d'Antares avec d'autres instruments.

## 3.5 MATIÈRE NOIRE

La collaboration internationale Edelweiss, portée par participant des équipes françaises, vise la détection directe, à l'aide de détecteurs cryogéniques, de la composante non-baryonique (constituée a priori de particules interagissant faiblement surnommées WIMPs) du halo de matière noire galactique via l'observation de collisions élastiques de WIMPs sur des cibles en laboratoire. Méthode très complexe en raison du bruit de fond important provenant de la radioactivité naturelle, elle permet une analyse individuelle de chaque recul détecté. La sensibilité actuelle, 5×10<sup>-8</sup> picobarn environ, devrait être portée à 5×10<sup>-9</sup> pour la mesure de la section efficace WIMP-nucléon. Des technologies alternatives de détection de la matière noire sont aussi à l'étude ou en R&D. La détection directionnelle ouvre des perspectives intéressantes qui sont à l'étude. Ces recherches directes sont complétées par des recherches indirectes par la voie neutrino et gamma.

## 3.6 FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Le satellite Planck a été lancé en 2009. Après le succès indéniable de Cobé et de WMap (observation du fond diffus cosmologique ou CMB) et des détections de supernovae (SNF, SNLS...), qui ont permis de mesurer de façon concordante les paramètres essentiels ( $\Omega_\Lambda$ ,  $\Omega_M$ ...) de l'évolution de l'Univers, Planck permettra d'atteindre une précision proche du pourcent sur ces paramètres. Il a la capacité non seulement de cartographier les fluctuations de température avec une résolution angulaire de cinq minutes d'arc mais également d'améliorer considérablement les mesures de polarisation, permettant ainsi de d'aborder l'étude de la phase inflationnaire qui a suivi immédiatement le Big-Bang. Les premiers résultats de Planck sont prévus pour la fin 2010 et la période de mesure se prolongera jusqu'en 2012. Des expériences de mesure de la polarisation du fond cosmologique au sol

(Qubic) préparent les étapes suivantes susceptibles de sonder l'échelle à laquelle se déroule l'inflation.

### 3.6 ÉNERGIE NOIRE

L'exploitation de SuperNova Factory (SNF) ainsi que le SuperNova Legacy Survey (SNLS) au télescope Canada-France-Hawaï vont arriver à leur terme en 2011. Cela permettra de contraindre l'équation d'état de l'énergie noire avec une précision proche de 5 %. La variété des méthodes de détermination des paramètres d'énergie noire permises avec le Large Synoptic Survey Telescope (LSST, à l'horizon 2016) va amener la précision sur ces paramètres à 1 %. De nouvelles stratégies de mesure des paramètres cosmologiques voient leur importance augmenter comme par exemple la détection des oscillations des baryons (BAO à travers Boss). La situation programmatique autour d'une expérience spatiale reste incertaine mais une participation aux missions spatiales JDem (Nasa) ou Euclide (Esa) est envisagée.

### 3.7 ÉTUDES MULTI-MESSAGERS

La compréhension des phénomènes au sein des sites astrophysiques extrêmes va passer de plus en plus par la mise en place d'approches multi-longueurs d'onde. La communauté s'organise également pour mettre en place des approches multi-messagers, comme la recherche de coïncidences entre les détecteurs Antares et Virgo/Ligo (projet GWHEN) ou la recherche de contreparties optiques à des candidats neutrinos (TAToO) ou ondes gravitationnelles (LOOCUP). Par ailleurs, plusieurs instruments tels les détecteurs Antares, IceCube, Virgo/Ligo, Integral, Hess, Magic, Veritas et Fermi, font aujourd'hui partie du réseau d'alertes GCN (Gamma-ray Burst Coordination Network), constitué en outre de différents instruments radio, optiques et X.

### 3.8 PERSPECTIVES

Dans les deux années prochaines, les premiers résultats de Planck (2010), le lancement d'AMS (2010), la fin de construction de Hess2 (2011) et le lancement de la mission précurseur d'un observatoire d'ondes gravitationnelles (LisaPathFinder, 2012) viendront compléter ce tableau. Par ailleurs, les années à venir seront des années de préparation et de construction de la nouvelle génération d'observatoires des astroparticules (Advanced Virgo, télescope neutrino KM3Net, télescope de photons de haute énergie CTA, extensions de l'observatoire Auger) avec des fins de construction en 2015-2016. L'IN2P3 participe aussi à une expérience de détection des rayons cosmiques de très haute énergie dans l'espace (2015, Jem-Euso). Dans un avenir plus lointain (2020) le projet spatial Lisa étendrait la gamme des ondes gravitationnelles accessibles à la détection en ouvrant notamment l'étude des systèmes de trous noirs super-massifs en coalescence.

## 4 - DÉVELOPPEMENT D'OUTILS

### 4.1 ACCÉLÉRATEURS

Les accélérateurs sont des outils essentiels pour la physique nucléaire et des particules, et font l'objet d'une très grande activité de R&D, de construction et d'exploitation au sein de l'IN2P3 et du CEA-IRFU. Cette activité, au rôle à la fois scientifique et sociétal, s'exprime tant dans les programmes nationaux comme Spiral2, qu'internationaux comme les projets de futurs collisionneurs, où le savoir-faire des laboratoires français est largement reconnu.

Les activités de R&D portent d'une part sur les techniques classiques d'accélération, répondant aux exigences des futures machines de forte puissance. Des études et réalisations sont menées dans le domaine des coupleurs radiofréquence, des cavités supraconductrices à fort gradient et des machines non supraconductrices à fort courant (Iphi). Nous citerons, de manière non exhaustive, le développement des coupleurs TTF (projet XFel), des cavités « spoke » pour les protons intenses de basse énergie (Eurotrans), des cavités quart d'onde pour Spiral2, ou celui des diagnostics pour fortes intensités. Ce large programme répond aux besoins de la physique nucléaire et des particules mais également à certains de ceux de l'aval du cycle électronucléaire, et il repose sur des moyens importants, comme la plateforme Supratech à Orsay.

La R&D porte également sur les techniques dites « innovantes » associées, comme le projet ELI d'étude de l'interaction laser matière, qui présente, pour l'accélération, toutes les potentialités offertes par les lasers exawatt / attoseconde, ou le projet ThomX, développé en collaboration avec Soleil, d'une machine à rayons X monochromatique compacte et fondée sur l'interaction laser-électrons.

Enfin, la R&D porte sur les sous ensembles très spécifiques comme les cibles sources, les photo-injecteurs et les canons à électrons haute-fréquence, les sources d'ions mono ou multichargés, et les sources de positrons polarisés. Nous mentionnerons enfin une participation aux projets de machines de thérapie par protons ou carbonées.

L'IN2P3 dispose de nombreuses plateformes reconnues internationalement. Alto-tandem à Orsay permet, outre l'étude de la photofission, de caractériser les cibles sources du type Spiral2. Jannus au CSNSM d'Orsay, offre à la communauté des moyens d'irradiation, d'implantation, et de caractérisation structurale et chimique (RBS ou PIXE). Aifira à Bordeaux offre un spectre allant de la physique des matériaux à la radiobiologie, pour la caractérisation, l'irradiation, l'imagerie et la production de neutrons mono énergétiques. Anafire à Lyon est un plateau d'expertises sur les rayonnements ionisants, avec des outils de mesure et d'analyses accrédités (développement durable, environnement, électronucléaire du futur). Peren à Grenoble fournit des neutrons rapides destinés au nucléaire innovant. Son principe a été repris pour le projet Guinevere de couplage au réacteur Venus à MOL en Belgique.

### 4.2 CALCUL INTENSIF

Le développement des grilles de calcul (utilisation optimale de moyens informatiques intensifs et distribués)

touche de nombreuses autres disciplines que la physique des particules.

Le CCIN2P3 a un rôle majeur sur la structuration au niveau national. De plus, la création récente au CNRS de l'Institut des grilles, dans lequel l'IN2P3 joue un rôle important, fournit le cadre nécessaire à la mise en place d'une grille française. La structuration opérationnelle de cette grille, ainsi que la diffusion de l'expérience acquise dans le traitement massif des données vers d'autres communautés scientifiques et les régions, sont des objectifs prioritaires qui doivent se coupler au développement de collaborations sur la simulation, la modélisation et l'analyse de grands volumes de données à l'interface avec les géosciences et les sciences du vivant.

## 5 - LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE ET LA SOCIÉTÉ

Les recherches interdisciplinaires, menées d'une part par les laboratoires de l'IN2P3, souvent en liaison avec leur université et leur région, et d'autre part dans un cercle plus large de laboratoires sur appel d'offres, impliquent (si l'on inclut les activités sur les accélérateurs) près d'un quart du personnel de l'Institut et se développent sur trois fronts principaux :

- l'énergie (en particulier nucléaire) en s'appuyant sur les compétences de l'Institut en la matière ;
- l'interface entre physique, biologie et médecine où l'Institut fait bénéficier les sciences du vivant de ses compétences en instrumentation, accélérateurs, capteurs et traitement des données ;
- l'interface avec les géosciences où l'Institut, en synergie avec les sciences de l'Univers, déploie des grands réseaux de capteurs ou étudie des phénomènes rares qui peuvent, parallèlement aux recherches de physique fondamentale, assurer le suivi des paramètres climatiques et géologiques, la prévention des risques et la datation des processus climatiques et géologiques.

### 5.1 ÉNERGIE NUCLÉAIRE

En France, environ 80 % de l'électricité est produite par la filière des centrales nucléaires. En 1991, la loi Bataille encadrait pour quinze ans les recherches menées autour des déchets nucléaires. Cette loi a été révisée en 2006, en prenant comme référence le stockage géologique profond pour les déchets existants. Néanmoins, la transmutation des déchets nucléaires reste à l'étude pour les futurs déchets, avec comme échéance le choix en 2012 entre des réacteurs rapides au sodium qui assurent la transmutation de leurs propres déchets ou des réacteurs hybrides (ADS) dédiés à la transmutation. Les physiciens de l'IN2P3 sont impliqués dans cette thématique à travers différents axes de recherche, en particulier dans le programme national PACEN. Le premier concerne les mesures de données nucléaires : il s'agit de la détermination expérimentale des sections efficaces des diverses réactions mises en jeu pour des réacteurs utilisant les cycles de l'uranium ou du thorium (filière étudiée au sein de l'IN2P3), ainsi que pour les déchets produits. Ces mesures alimentent les bases de données utilisées pour les simulations de réacteurs innovants. Le second axe de recherche comprend non seulement la simulation

de différents types de réacteurs (à sels fondus, rapides ou à eau) envisagés pour la production d'énergie ou la transmutation des déchets, mais également les études de scénarii impliquant diverses sources de production d'énergie. Enfin, les physiciens de l'IN2P3 sont fortement impliqués dans l'étude expérimentale de la physique des réacteurs, en particulier dans le cadre du projet Guinevere déjà mentionné. Par ailleurs, des travaux de radiochimie et d'études de matériaux sous irradiation sont également menés dans les laboratoires de l'IN2P3, dans le cadre du stockage des déchets radioactifs ainsi que de la séparation des éléments du combustible.

La poursuite de ce programme électronucléaire engendre un besoin de compétences chez les acteurs publics ou privés du domaine. De nouvelles formations universitaires sont mises en places et les chercheurs de l'IN2P3 sont fortement sollicités pour y jouer un rôle moteur.

### 5.2 INTERFACE PHYSIQUE - BIOLOGIE - MÉDECINE

La lutte contre le cancer fait partie des grandes causes nationales. Parmi les nombreuses pistes prometteuses qu'a dégagées la recherche récemment, les techniques de médecine « nucléaire » figurent de façon préminente. Or, elles peuvent très souvent bénéficier du transfert assez direct des dernières avancées en recherche fondamentale, aussi bien en matière de détecteurs, de faisceaux de particules que de simulation de l'interaction particule-matière. La période 2008-2009 a été mise à profit afin de structurer les activités de l'IN2P3 à l'interface avec la médecine dans le cadre du GDR MI2B. Le projet « Instruments et méthodes nucléaires pour la lutte contre le cancer » décrit des axes de recherche innovants en radiothérapie, curiethérapie, hadron-thérapie, imagerie médicale et simulation (Gate) à poursuivre activement.

L'interaction de particules chargées avec le milieu vivant joue un rôle prépondérant dans l'étude de la cohérence des systèmes vivants mais aussi dans de nombreux domaines : exposition aux rayonnements naturels (radon), exposition professionnelle, cancérogenèse, thérapie anticancéreuse par particules chargées. Comprendre comment de telles radiations agissent, notamment lors de l'exposition à de très faibles doses, reste un enjeu majeur passant par des études à l'échelle cellulaire. La structuration des activités à l'interface avec la biologie est donc une nécessité pour la période 2010-2013 pour coordonner les efforts des équipes de l'IN2P3 en bioinformatique, radiobiologie et dans l'étude des systèmes biologiques (biomatériaux, épiderme, organismes modèles) sur (micro) faisceaux (Aifira, Ganil) et par la modélisation (Geant4-DNA).

## 6 - CONCLUSIONS

La physique subatomique est en train de vivre une étape majeure dans son développement. Après de nombreuses années de travail préparatif, des équipements et des instruments majeurs sont en train de démarrer pour apporter des réponses aux questions fondamentales que nous nous posons.

La mise en service du LHC et de ses expériences devrait

nous éclairer sur l'existence du chaînon manquant du modèle standard (le boson de Higgs), et de physique au delà de ce modèle... Le LHC sera également un outil remarquable pour étudier les transitions de phases de la matière hadronique et les collisions d'ions lourds constituent désormais un des axes forts du programme de physique nucléaire.

Sur la lancée des résultats importants apportés par des expériences comme Hess et Auger, et des réussites techniques que constituent la mise sur orbite de Planck et de Fermi, la réussite technique remarquable de Virgo ou encore le démarrage d'Antares, la communauté s'organise pour la préparation du futur. Il en est ainsi de la préparation des futurs réseaux CTA ou KM3NET, de l'extension d'Auger, ainsi que du développement de projets terrestres dédiés à la mesure de la polarisation du CMB. Concernant l'étude des propriétés des neutrinos, Double Chooz et T2K donneront probablement la première valeur de l'angle de mélange des neutrinos  $\theta_{13}$ .

Les études avec les faisceaux radioactifs et de nouveaux multi-détecteurs sont la voie ouverte par SPIRAL2 qui est en construction au GANIL.