

03

DES PARTICULES AUX NOYAUX

Pierre LUTZ
Président

Jean-Pierre Barbe
Michel Baubillier
Robert Baumgarten
Yann Benhammou
Monique Bex
Philippe Chomaz
Guy Coignet
Maryvonne de Jesus
Jacques Dumarchez
Alain Falvard
Robert Frascaria
Denis Jouan
Amel Korichi
Jacques Lefrançois
Stéphane Monteil
Jean Peter
Philippe Quentin
Alexandre Rozanov
Vanina Ruhlmann-kleider
Jean-Pierre Thibaud

Le développement de la physique subatomique s'articule actuellement autour de trois interrogations fondamentales :

– quelle est la structure élémentaire de notre Univers ?

– comment ces particules élémentaires s'organisent-elles pour former la matière ?

– quels sont les liens de ce micro cosmos avec le Cosmos en général ?

La première interrogation correspond au champ d'investigation de la **Physique des Particules**. La seconde se rapporte à la **Physique Nucléaire** et la troisième à l'**Astroparticule et l'Astrophysique Nucléaire**.

La discipline s'est en outre forgé une place dans deux domaines essentiels pour son développement : les **Accélérateurs** et l'**Informatique**. Son savoir-faire expérimental lui permet aussi d'avoir des contributions importantes à travers l'interface physique médecine et dans d'autres domaines de la physique, par exemple dans les **Agrégats**. Enfin, elle considère que l'**Énergie Nucléaire**, à la fois sur le plan des développements et sur le plan de la sûreté et de l'environnement, est une question pour laquelle la **Société est en droit d'attendre des réponses de sa part**.

1 – LA STRUCTURE ÉLÉMENTAIRE DU COSMOS

La physique des particules requiert des expériences lourdes, longues, coûteuses, rassemblant de nombreux physiciens et ingénieurs. Les détecteurs font l'objet de R&D mettant en œuvre des techniques de pointe en électronique, informatique et matière condensée. Trois thèmes dominant actuellement cette physique :

1.1 LE BOSON DE HIGGS, LA SUPER SYMÉTRIE ET AU-DELÀ

L'arrêt du programme LEP a marqué la fin d'une étape importante dans la recherche sur les composants et les lois régissant la structure ultime de la matière. En dix années les quatre expériences ont publié au total plus de 1 000 articles dont les sujets couvrent tous les domaines de la physique des particules. La conclusion des expériences LEP est une description extrêmement cohérente de l'infiniment petit dans le cadre du **Modèle Standard** de la Physique des particules (théorie quantique des champs qui traite dans un même cadre formel trois des quatre interactions fondamentales), dont les prédictions ont été validées à des niveaux de précision remarquables, tout au moins pour ce qui concerne les couplages de la matière aux bosons intermédiaires W et Z . Les succès du Modèle Standard constituent une avancée vers l'unification des interactions fondamentales, préjugé esthétique et historique de la physique. Selon ce modèle, les particules qui composent la matière sont au nombre de douze, classées en trois familles et celles ci sont complétées par douze antiparticules (correspondantes). Chaque famille comprend deux quarks et deux leptons ; la première de ces familles, dont les constituants sont les plus légers, explique la matière qui nous entoure. Il manque aujourd'hui la manifestation expérimentale

de la pierre d'angle de l'édifice Modèle Standard : le **boson de Higgs**, particule dont l'existence fournirait une explication élégante à la masse des particules. Il a été activement recherché au LEP et les mesures de précision électrofaibles prédisent sa masse autour de $120 \text{ GeV}/c^2$, ce qui le rendrait accessible auprès des futurs collisionneurs.

L'étape suivante, qui s'étendra jusqu'en 2008 environ, comporte d'abord l'expérience **D0** au **Tevatron**, le collisionneur proton (1 TeV)-antiproton (1 TeV) à Fermilab près de Chicago. La plupart des laboratoires français de physique des particules ont désormais une équipe travaillant auprès de D0. L'objectif est de prendre part aux recherches expérimentales les plus performantes actuellement dans le monde, pour l'étude du quark top (le plus lourd), la poursuite des recherches du boson de Higgs et la recherche de nouvelles particules, en particulier supersymétriques. D'autres équipes prendront aussi part à l'expérience H1 auprès de Hera II, collisionneur électron-proton de Hambourg.

Suivront les expériences **ATLAS** et **CMS** au **LHC**, le collisionneur proton (7 TeV)-proton (7 TeV) en construction au CERN qui commencera à fonctionner en 2007. La contribution française porte essentiellement sur la construction de grands ensembles de détection pour ATLAS et CMS. Enfin la communauté scientifique mondiale, de notre discipline, a clairement indiqué la nécessité, à plus long terme, d'un collisionneur linéaire e^+e^- afin de procéder à une étude complète et exhaustive des nouveaux phénomènes observés. Le projet le plus avancé sur le plan technologique est sans nul doute **TESLA** permettant d'atteindre des énergies de collisions de constituants de l'ordre du TeV.

Les insuffisances théoriques du Modèle Standard réclament une théorie supérieure à l'échelle d'énergie de l'ordre du TeV, précisément le domaine d'énergie couvert par les projets de futurs collisionneurs. Parmi les théories les plus prometteuses et qu'il conviendra de tester auprès de ces machines, se trouvent les modèles supersymétriques et les théories

de dimensions supplémentaires. Les Modèles Supersymétriques postulent l'existence de partenaires supersymétriques pour toutes les particules élémentaires observées à ce jour : des partenaires bosoniques pour les fermions (squarks et sleptons), des partenaires fermioniques pour les bosons (gluinos et gauginos). Les modèles prévoient également un plus grand nombre de bosons de Higgs : au moins cinq appelés communément h , H , A et H^\pm . En outre, si la supersymétrie est impliquée dans la brisure de symétrie électrofaible, les masses des particules supersymétriques doivent être inférieures à/ou de l'ordre de 1 TeV. Cette hypothèse sera donc vérifiable prochainement. L'étude des modèles supersymétriques rassemble une large fraction des physiciens, de notre communauté et de celle de physique théorique, au sein d'un **Euro-GDR** pluridisciplinaire appelé **GDR SUSY**. On peut finalement s'interroger sur la pertinence d'une Théorie de Grande Unification réunissant les quatre interactions fondamentales qui seraient équivalentes, à la haute énergie de l'échelle de Planck (10^{19} GeV). Depuis quelques temps une nouvelle idée a été proposée pour expliquer la faiblesse de la gravitation à nos énergies ainsi que la grande valeur de l'énergie de Planck. Elle consiste en l'introduction de **dimensions supplémentaires** dans un super espace au-delà de notre espace 3D. Dans ce cadre on peut traiter toutes les interactions (y compris la gravitation) dans un cadre théorique unique en utilisant par exemple la théorie des cordes. Le graviton, vecteur de l'interaction gravitationnelle, peut alors se manifester d'abord comme particule virtuelle dans des mécanismes d'échanges et/ou dans une production caractéristique de résonances dans des réactions au LHC par exemple.

Ces recherches se dérouleront sur au moins une dizaine d'années et mobiliseront une fraction importante de la communauté scientifique de notre discipline. Bien sûr l'immense quantité de données accumulées permettra aussi de nombreuses analyses en parallèle avec celles dédiées aux objectifs principaux cités ci-dessus : Physique des quarks lourds, physique de l'interaction forte (QCD) etc.

comme ce fut le cas pour les données du LEP. En augmentant de plus d'un ordre de grandeur les caractéristiques des collisions (en énergie et en intensité) on franchira une nouvelle étape dans la connaissance de « la Structure élémentaire du Cosmos ».

1.2 LA BRISURE DE SYMÉTRIE CP ET LE DÉFICIT D'ANTIMATIÈRE DANS L'UNIVERS

La brisure des symétries discrètes par les interactions faibles est un champ fécond de recherches depuis bientôt un demi-siècle. Après la mise en évidence de la violation de la parité P au milieu des années 1950, il a été montré que la conjugaison de charge C était également violée. Cette transformation fait passer de la particule à l'antiparticule, c'est-à-dire de la matière à l'antimatière. L'enjeu est donc considérable pour la compréhension du déficit d'antimatière dans l'Univers. En 1964 C. Andersen, J. Cronin, V. Fitch et R. Turlay ont observé que la symétrie CP était brisée dans la désintégration des kaons neutres (K). Kobayashi et Maskawa ont montré qu'une phase complexe, qui s'introduit naturellement dans la matrice unitaire (matrice CKM) reliant les états de saveur aux états de masse, peut expliquer ce phénomène dès lors que l'on postule l'existence d'une troisième famille de quarks. Cette troisième famille a bien été mise en évidence quelques années plus tard. Cette phase est le **paramètre du Modèle Standard** qui permet de rendre compte des effets observés violant CP. L'origine de cette phase est toujours un mystère. Le « **triangle d'unitarité** » utilisé pour représenter graphiquement l'une des relations d'unitarité de la matrice CKM a une surface non nulle si l'explication de la violation de CP par le Modèle Standard est correcte.

La violation de CP directe dans les désintégrations des kaons neutres a été mesurée, en 2001 au CERN par l'expérience NA48.

L'expérience BaBar, à laquelle participe un important groupe français de l'IN2P3 et du CEA, installée sur le collisionneur e^+e^- asymétrique à SLAC (USA), a mesuré pour la première fois, aussi en 2001, en même temps que l'expérience BELLE au Japon, la violation de CP dans les désintégrations des mésons B_d . La comparaison entre la mesure directe de la phase maintenant connue à mieux que 7 % grâce à BaBar et Belle et sa mesure indirecte déduite dans le cadre du Modèle Standard des longueurs des cotés du triangle mesurées en particulier à LEP conduit à un accord remarquable.

La période 2007-2015 sera dominée par une expérience de seconde génération installée auprès du collisionneur hadronique LHC, qui doit permettre de mesurer tous les paramètres du triangle. C'est l'objectif de l'expérience **LHCb**, un détecteur dédié à la physique du quark b, à laquelle prennent part des laboratoires de l'IN2P3. Elle fonctionnera pendant toute la période LHC avec un programme complet d'étude des désintégrations des mésons B_d et B_s .

1.3 L'INTRIGANT ET MYSTÉRIEUX COMPORTEMENT DES NEUTRINOS

L'étude des neutrinos est un troisième thème incontournable. Ces particules ne sont sensibles qu'à l'interaction faible, celle qui régit une réaction importante au sein du Soleil par exemple. Depuis plus de 30 ans le déficit de neutrinos ν_e produits par le soleil et observés par les laboratoires terrestres a été une énigme que l'hypothèse d'oscillations pouvait expliquer : il s'agit de la transformation de neutrinos d'un saveur donnée en une autre, exemple ν_e en ν_τ , selon une théorie quantique proposée par B. Pontecorvo. En 1998 l'expérience Superkamiokande au Japon présentait en outre des évidences d'oscillations de neutrinos atmosphériques, ces neutrinos produits à la suite des réactions des rayons cosmiques dans les hautes couches de l'atmosphère. En effet le rapport ν_μ/ν_e indiquait

une dépendance azimutale prouvant que des neutrinos muoniques produits de l'autre côté de la terre étaient détectés moins nombreux que ceux qui nous parviennent directement. La recherche d'oscillations de neutrinos est alors devenue un sujet prioritaire. SuperKamiokande et SNO au Canada, en 2002 ont alors mis en évidence les oscillations de neutrinos solaires (neutrinos de type électronique).

De nombreux modèles faisant appel aux théories de grande unification, GUTs, existent pour rendre compte des masses de neutrinos, lesquelles rendent possibles des oscillations. Une étude détaillée de la phénoménologie des oscillations des 3 saveurs de neutrinos (type ν_e, ν_μ, ν_τ) permettrait donc un accès à cette physique à l'échelle des GUTs ($10^{15} - 10^{17}$ GeV). Elle pourrait aussi contribuer à expliquer l'excès de matière sur l'antimatière dans notre univers via la leptogénèse.

Dans cette dernière décennie, la France a joué un rôle important dans l'étude des neutrinos solaires, intéressant à la fois l'astrophysique, la physique des particules et la physique nucléaire. L'expérience Gallex, installée dans le tunnel du Gran Sasso situé près de Rome, a confirmé le déficit apparent (40 %) de neutrinos ν_e observés sur terre dans le domaine des neutrinos de basse énergie produits au cœur du soleil. Les équipes françaises prennent également part à d'autres expériences en phase de construction comme BOREXINO également sur le même site. L'expérience OPERA va rechercher (à partir de 2006), toujours au Gran Sasso l'apparition de ν_τ dans un faisceau de ν_μ de haute énergie envoyée depuis le Cern distant de 700 km. Les oscillations de ν_μ en ν_e n'ont pas encore été observées et leur taux est forcément faible comme l'a montré une expérience effectuée près de la centrale nucléaire de CHOOZ.

Le Laboratoire Souterrain de Modane, commun au CEA et au CNRS, a également permis aux équipes françaises de rechercher la double désintégration bêta sans neutrino dans les expériences NEMO 1 et 2. Cette désintégration, très rare, est possible si le neutrino est massif et s'il est sa propre antiparticule, ce que

privilégie la théorie (neutrinos de Majorana). L'observation d'oscillations par SNO apporte un regain d'intérêt pour ces expériences car elles permettent de mesurer la masse des neutrinos (et non une différence de masse comme dans le cas des oscillations). Elles se poursuivent avec NEMO 3 qui est en phase de démarrage. Cette dernière occupera le devant de la scène mondiale pendant quelques années puisqu'elle possède la plus grande quantité dans le monde d'isotopes radioactifs double bêta.

2 – L'ORGANISATION DE LA MATIÈRE EN INTERACTION FORTE

La physique nucléaire cherche à comprendre l'organisation des constituants élémentaires dans la matière, particules et noyaux atomiques. Frontière entre le microscopique et le macroscopique, elle est une composante essentielle de l'étude des systèmes complexes quantiques. De par cette nature, elle est riche en interfaces avec d'autres disciplines : agrégats métalliques, condensats de Bose superfluides et supraconducteurs, transitions de phase, phénomènes critiques, etc. Cette interdisciplinarité se fait souvent au niveau conceptuel requérant un effort théorique important qui doit être soutenu.

2.1 DES PARTICULES COMPOSÉES DE QUARKS ET DE GLUONS

La **physique hadronique** a pour objet l'étude des constituants de la matière interagissant à travers l'interaction « forte ». À l'intersection de la physique nucléaire et de la physique des particules, elle étudie les systèmes composites à diverses échelles : des

noyaux légers (pour lesquels l'interaction entre les nucléons est décrite par l'échange de mésons) à la structure interne du nucléon (dont les degrés de liberté sont les quarks et les gluons interagissant à travers la **chromodynamique quantique**, la théorie fondamentale de l'interaction forte). Malgré les progrès des calculs et des expériences, la compréhension des propriétés des nucléons en termes de quarks interagissant par l'intermédiaire des gluons n'a cependant pas encore abouti. Un des problèmes conceptuels essentiels est le confinement, le fait qu'il semble impossible pour les quarks de s'échapper des particules qu'ils constituent. Cette question est au cœur de la recherche sur la transition vers un plasma de quarks et de gluons abordée au 2-3 et des études sur la structure des particules.

Le nucléon, proton ou neutron, est le sujet d'étude privilégié. Nous le croyons composé essentiellement de trois quarks, mais ceci ne suffit pas à expliquer toutes ses propriétés et de nombreux mystères subsistent. Quelle est sa distribution interne de charge ? Quelle est l'origine du moment magnétique, 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 ?, des « glueballs » formés uniquement de gluons ?, des « molécules » de hadrons ?, etc.

Des particules sans structure comme les électrons et les photons sont des sondes privilégiées pour ces études grâce à la maîtrise des interactions électrofaibles. Cinq thèmes mobilisent, à moyen terme, les équipes françaises :

- les expériences de « violation de parité » destinées à étudier le contenu en quark étrange du nucléon (PVA4 à MAMI-Mainz et G0 à TJNAF aux USA) ;

- les expériences « DVCS » et « Deep ρ » dédiées à l'étude des distributions de partons généralisées reliées à la problématique du spin total du nucléon (toujours à TJNAF) ;

– l'étude du spectre des hadrons et le problème des résonances manquantes du nucléon (GRAAL à ESRF de Grenoble) ;

– l'étude de la modification éventuelle des propriétés des hadrons dans la matière nucléaire (HADES à GSI en Allemagne) ;

– mesure du contenu en quarks et gluons du proton à HERA à DESY dans des domaines inexplorés jusqu'à présent.

À plus long terme, ces recherches pourraient être poursuivies auprès du laboratoire TJNAF aux USA avec une montée en énergie à 12 GeV. La coordination européenne de la physique nucléaire, NUPPEC, réfléchit à cette perspective ainsi qu'à d'autres plus ambitieuses qui pourraient comprendre une nouvelle machine.

2.2 DES NOYAUX COMPOSÉS DE PARTICULES

La structure nucléaire a pour objectif de comprendre les organisations des nucléons dans les noyaux. Elle s'oriente vers des configurations nucléaires extrêmes comme bancs d'essais de nos modèles actuels. De nouveaux champs d'investigation s'ouvrent grâce aux avancées technologiques comme l'avènement des faisceaux de noyaux radioactifs, et au développement de systèmes de détection innovants notamment pour les rayonnements électromagnétiques et les neutrons. La complexité du système nucléaire implique une collaboration étroite entre expérience et théorie. En effet, l'intérêt d'une accumulation de données physiques n'apparaît que si une théorie en rend compte d'une manière synthétique et prédictive.

Les noyaux exotiques, noyaux qui n'existent pas à l'état naturel sur Terre, présentent des cohésions, des propriétés et des formes inattendues : noyaux entourés d'un halo de neutrons ou états quasi-moléculaires comme celui du ^{12}Be qui correspond à une quasi-

molécule de deux noyaux d'hélium liés grâce à 4 neutrons de valence. L'un des paradigmes de la structure nucléaire, l'existence de couches et de nombres magiques associés à leur fermeture, semble perdre sa validité pour les noyaux très riches en neutrons ainsi que pour ceux qui sont en forte rotation. 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. Par exemple on essaie de confirmer l'indication récente (publiée) d'un état étonnant : le « tétranéutron », système de 4 neutrons préformé dans le ^{14}Be . Enfin on peut aussi citer la découverte possible d'une nouvelle « radioactivité 2p » : observation de l'émission (non séquentielle) de deux protons ou d'un di-proton par le noyau ^{45}Fe .

Les noyaux exotiques peuvent maintenant être aussi étudiés et utilisés grâce aux accélérateurs de noyaux radioactifs. La France est au meilleur rang mondial. Elle dispose de la première machine versatile du domaine, **Spiral 1** installée au **GANIL**. Le projet **Spiral 2** devrait suivre à partir de 2007. Il devrait comporter un accélérateur linéaire. **À l'horizon 2015 enfin, la communauté des physiciens nucléaires européens envisage une machine européenne de seconde génération : EURISOL. La France devrait pouvoir jouer un rôle clef dans cette perspective en s'appuyant sur les acquis du GANIL. L'option actuellement retenue pour le projet Spiral 2 donnera des atouts décisifs pour la France sur la place européenne.**

Les états extrêmes en masse et charge des noyaux, les **Super-lourds**, sont recherchés depuis longtemps dans des réactions de fusion. La possibilité de production par d'autres réactions de fusion incomplète, également de transferts massifs, ainsi que l'éventuelle utilisation de faisceaux riches en neutrons est actuellement étudiée expérimentalement et théoriquement. D'ores et déjà, la recherche systématique de noyaux plus lourds que l'élément 112 devient possible grâce au progrès des accélérateurs.

La rotation des noyaux superdéformés est un moyen unique pour étudier la cohésion des noyaux. Un des résultats théoriques qui motive les expérimentateurs à aller de l'avant est la prédiction de l'existence de noyaux à déformation stable encore plus extrême. C'est le cas notamment des **noyaux Hyperdéformés**, trois fois plus longs que larges, qui malgré les efforts expérimentaux n'ont pas encore été observés.

Des progrès spectaculaires dans le domaine de la structure nucléaire sont attendus grâce au développement d'une nouvelle génération de détecteurs de photons permettant de les localiser avec précision. De plus on attend pour ce nouveau spectromètre γ , **AGATA** (Advanced GAMMA Tracking Array), un gain en efficacité de détection considérable, 50 % au lieu de 9 % pour les détecteurs actuels. Ces caractéristiques procurent un pouvoir de résolution qui permettra d'étudier des structures très rares, en particulier pour la caractérisation des **noyaux Super lourds et Hyperdéformés**. **AGATA** pourrait être opérationnel vers 2010. Ces domaines de physique plaident pour le développement d'une **nouvelle machine de faisceaux stables de haute intensité** qui ne pourra se concevoir elle aussi qu'à l'échelle européenne. Globalement des efforts importants de R&D sont à réaliser autant pour cette machine que pour les détecteurs qui lui seront associés, à l'image, avec une réduction d'échelle d'un ordre de grandeur, de ceux qui ont été engagés pour le LHC.

2.3 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 (température, 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 le liquide qui compose les noyaux et un gaz de particules (accessible au GANIL) ;

– à haute température (1 000 milliards de degrés) avec la libération des quarks et la création d'un plasma de quarks et de gluons.

La première est étudiée en France auprès du GANIL et ailleurs dans le monde (USA, Allemagne, Japon, Italie et Chine). Un succès remarquable vient d'être remporté grâce à l'impulsion de la communauté française avec la mise en évidence de phénomènes nouveaux comme l'existence de capacités calorifiques négatives et des indications sur la dynamique de la transition de phase. *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 est tout d'abord dans un progrès expérimental visant à construire des détecteurs plus puissants. Ensuite, l'avènement de faisceaux de noyaux exotiques suffisamment intenses permettra d'étudier les propriétés « chimiques » de la matière c'est-à-dire l'influence d'une variation relative de neutrons et de protons.

La seconde est étudiée grâce aux collisions noyau noyau auprès de divers accélérateurs de très haute énergie. Un premier résultat a été obtenu avec l'accélérateur du Cern parvenant à accélérer jusqu'à des noyaux de Plomb. Les équipes françaises, issues des deux communautés de physique nucléaire et de physique des particules, ont eu un rôle majeur dans l'observation des premiers indices très convaincants qu'un plasma de quark et de gluon pouvait avoir été produit. L'avenir se déroulera principalement au RHIC de Brookhaven (expérience STAR et PHENIX) et ensuite surtout à **ALICE**, la quatrième expérience auprès du LHC. L'objectif est de comprendre le confinement des quarks et donc d'observer les « transitions de phase » : transition liquide – gaz de la matière nucléaire et transition matière hadronique – plasma de quarks et de gluons. Ces recherches amènent de nombreux défis : techniques par la complexité des réactions produisant des centaines de particules dont il faut mesurer les caractéristiques

simultanément et théoriques par la diversité et l'addition des processus des réactions parmi lesquelles il faut trouver des signatures aussi fiables que possible.

Un aspect important de cette physique est que les transitions de phase 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 recherchés.

3 – LES LIENS ENTRE LE MICROCOSMOS ET L'UNIVERS

Cet axe de recherche aurait pu être appelé à ses débuts : « **Physique subatomique dans des conditions extrêmes** ». L'objectif est désormais plus vaste et ambitieux. Cette thématique illustre ce que sera la recherche au XXI^e siècle. Les frontières entre disciplines traditionnelles sont en effet gommées ouvrant la voie à un espace de recherche neuf. Elle a l'ambition de chercher à répondre à des interrogations fondamentales en réunissant les efforts et les compétences de disciplines initialement étrangères les unes aux autres.

3.1 ÉVOLUTION ET CONTENU DE L'UNIVERS : EXPANSION, MATIÈRE ET ÉNERGIE NOIRES, ANTIMATIÈRE

La recherche et le comptage de « **chandelles standard de l'univers** » ont permis récemment de contraindre encore mieux,

en association avec l'étude du fond diffus cosmologique, les paramètres fondamentaux des modèles d'évolution de l'univers. De ces résultats est apparu un bouleversement de nos idées, avec un univers plat dominé par une nouvelle forme d'énergie définie par son équation d'état et appelée énergie noire. Son origine reste l'objet d'intenses conjonctures rejoignant la théorie des champs. L'étude des supernovae se traduit par la formation d'un groupe de physiciens issus de divers laboratoires de la discipline s'engageant dans la mise en œuvre et l'exploitation de la caméra **MEGACAM à Hawaï**, des expériences **SNIFS** et finalement **SNAP** sur satellite. Cette évolution se mène en parallèle avec les observations de l'expérience **ARCHEOPS** et les développements de **PLANCK** pour l'étude « ultime » du fond diffus cosmologique. Ces études sont deux exemples marquant de la nécessité d'une double implication des chercheurs de l'INSU et de l'IN2P3. L'exploitation de ces expériences devrait permettre de contraindre les modèles d'univers avec une très grande précision au cours de la décennie.

Les modèles décrivant l'univers chaud et son évolution à partir du Big Bang s'appuient sur les extensions du Modèle Standard de la physique des particules dont on pense que le LHC va fournir une étape importante de validation expérimentale. La concomitance temporelle du démarrage du LHC et de ces grands projets spatiaux devant éclairer le panorama de la cosmologie est à bien des égards passionnante. Les objets exotiques présents entre autres dans les modèles supersymétriques pourraient bien être les acteurs privilégiés de la cosmologie moderne. Ils pourraient apparaître sous forme de manifestation de défauts topologiques de l'univers primordial (par exemple monopôles magnétiques) ou comme source de la matière noire non conventionnelle (Weakly Interacting Massive Particle : WIMP) apparemment présente en grande quantité. Une avancée importante pour ce scénario pourrait être obtenue dès cette décennie par les développements dont **EDELWEISS** est le précurseur pour découvrir des WIMPs dans notre environnement local. Par ailleurs l'expérience

AMS, à laquelle participent trois laboratoires de l'IN2P3, va être installée sur la Station Spatiale Internationale : en plus de la mesure précise des spectres de rayons cosmiques, elle a pour but la recherche de composantes exotiques telles que WIMPs et Antimatière primordiale. Ces instruments issus directement de la culture instrumentale et de traitement du signal de la physique nucléaire et de la physique des particules apporteront des résultats permettant de tester les différents modèles cosmologiques. Un programme national de cosmologie a été créé sous la responsabilité principale de l'INSU auquel participe l'IN2P3.

3.2 ASTRONOMIES NOUVELLES

Ces activités ont pour but de compléter la connaissance des objets célestes et ont l'ambition de déceler des phénomènes ou des objets nouveaux dont l'exemple typique est encore une fois les particules supersymétriques. La détection de rayonnements cosmiques électriquement chargés ou neutres aux énergies considérables actuellement observées (plusieurs joules) pose évidemment la question de leur origine : sont-ils les signaux de particules primordiales ou les résultats de l'accélération dans des sites tels les trous noirs ou d'autres objets très compacts ? Tel est l'enjeu des études d'un vaste ensemble de nouveaux instruments complémentaires. Que ce soit pour l'étude des rayons cosmiques chargés avec **AUGER et AMS**, des photons de très haute énergie (**HESS, AMS- γ , GLAST**) ou pour le développement de l'astronomie neutrino (**ANTARES**) ou gravitationnelle (**VIRGO**) la décennie en cours devrait voir les chercheurs français en première ligne d'une série de découvertes importantes. Elles seront générées par l'exploration exhaustive de ces nouvelles frontières. Ces instruments ont également un fort potentiel de découverte des objets exotiques mentionnés précédemment. Évaporation de trous noirs primordiaux, tests de physique fondamentale avec les sursauts γ , recherche de la matière noire non baryonique en dehors de notre environnement local sont

quelques exemples du champ d'investigation ouvert par les nouvelles générations d'instruments. L'arrivée des télescopes à neutrinos (**AMANDA, ANTARES, Km³**) devrait en particulier ouvrir une nouvelle fenêtre pour l'étude d'objets tels que noyaux actifs de galaxie, blazars, etc. sources probables de rayons cosmiques de très haute énergie. L'étude des neutrinos se révèle donc très interdisciplinaire, touchant la physique des particules, la cosmologie et l'astrophysique. Un programme interdisciplinaire a été créé sous la responsabilité de l'IN2P3. Il concerne outre le département PNC-IN2P3, SPM, STIC et SDU-INSU. Il a pour objectif l'expérience « Observatoire AUGER » ainsi que des contributions aux expériences **HESS, ANTARES** et **VIRGO**.

Un **GDR « Phénomènes Cosmiques de Hautes Énergies »** regroupant IN2P3, INSU et SPM d'une part, et le DAPNIA du CEA d'autre part s'est aussi constitué. Enfin une coordination au niveau européen a été créée sous l'impulsion de l'IN2P3 : c'est l'ApPEC (Astroparticle Physics European Coordination).

Il ne faut néanmoins pas se cacher que d'ores et déjà on doit réfléchir aux générations futures d'appareillages, au sol ou embarqués, qui seront nécessaires dans ces divers domaines de recherche sur lesquels nous ouvrons des fenêtres qui ne sont pas prêtes d'être complètement explorées. L'acquisition de la **culture spatiale**, souvent indispensable pour travailler efficacement dans ces projets est maintenant très largement réalisée dans de nombreux laboratoires de l'IN2P3 et au CEA/DAPNIA. La construction d'une communauté associant physiciens nucléaires et des particules, astrophysiciens, cosmologistes, théoriciens et expérimentateurs est déjà une réalité en France et se développe dans tous les pays européens leaders à l'échelle internationale. Les conditions sont réunies pour que les efforts déjà engagés puissent être efficacement investis dans des projets encore plus ambitieux.

Une conséquence de ces astronomies nouvelles est le regain d'activités en **Astro-physique Nucléaire**. L'apparition de données astrophysiques toujours plus contraignantes

fait naître en retour de nouveaux besoins de données nucléaires. Ainsi, des mesures de masse et de durée de vie d'isotopes loin de la vallée de stabilité apparaissent aujourd'hui nécessaires pour décrire le processus « r » (capture rapide de neutrons) dont le site astrophysique demeure discuté. Le rôle du processus « rp » (capture rapide de protons et photodissociation) dans l'enrichissement de la Galaxie en quelques noyaux excédentaires en protons doit être confirmé par une modélisation astrophysique réaliste. Ces travaux nécessitent une étude des réactions nucléaires clés. Ce type de recherches devrait grandement bénéficier du développement actuel d'accélérateurs de faisceaux radioactifs.

Les modélisations des supernovae à effondrement gravitationnel (de type Ib, Ic, ou II) ont également mis en lumière l'importance des réactions induites par les neutrinos dont les sections efficaces doivent être précisées. Une meilleure connaissance de l'équation d'état de la matière nucléaire est par ailleurs requise pour rendre compte de ces explosions stellaires ainsi que de la structure des étoiles à neutrons résiduelles. Le mécanisme d'explosion des supernovae de type Ia doit également être précisé, étant donnée l'importance de ces objets considérés comme des Chandelles Standards pour la cosmologie. L'observation de nouvelles raies γ de radioactivités produites dans les novæ et les supernovae enrichira encore la compréhension de ces sites de nucléosynthèse.

À côté des processus thermiques, les réactions nucléaires induites par le rayonnement cosmique occupent une place grandissante dans les préoccupations de l'astrophysique nucléaire. Le rôle primordial reconnu aux rayonnements cosmiques dans l'équilibre énergétique du milieu interstellaire contraste avec l'incertitude persistante quant à leur origine, leur composition et leur spectre à basse énergie où les effets valeur sont les plus importants. L'astronomie γ apparaît ici comme un outil de choix pour identifier ces rayons cosmiques à travers les raies nucléaires qu'ils produisent dans le milieu interstellaire. La richesse des observations actuelles sur l'émission γ associée aux éruptions solaires

ainsi que la réussite du lancement du satellite européen INTEGRAL augure du grand intérêt des prochaines détections de raies γ d'origine galactique. Des mesures spécifiques de sections efficaces de quelques réactions nucléaires de spallation suivie de production γ s'avéreront nécessaires pour rendre compte en détail de ces observations.

4 – PÉRINUCLÉAIRE : TOTALEMENT PLURIDISCIPLINAIRE

Bien qu'indissociables de notre spécificité, plusieurs axes de recherche se sont vigoureusement développés au-delà de nos domaines traditionnels de recherche.

4.1 PHYSIQUE DES ACCÉLÉRATEURS

Principalement concentrées dans 3 laboratoires (IPNO, ISN et LAL), ces activités sont d'un grand intérêt pour le développement d'accélérateurs tels que TESLA ou la R&D associée au développement d'accélérateurs de protons de haute intensité (injecteur IPHI, cavités supraconductrices). Ceci requiert des études pointues sur les éléments supraconducteurs, cavités accélératrices et coupleurs. Par ailleurs, le développement de sources d'ions (PARNNE, SIRA-SPIRAL et ECR-PHOENIX) est également indispensable. Ce savoir faire donne lieu à de nombreuses applications (exploitées par exemple par la société « Pantechnik » de Caen). Il faut signaler que les retombées à long terme de ces R&D sont importantes pour toute la Société : sur près de 10 000 accélérateurs en fonctionnement dans le monde, une centaine seulement sont consacrés principalement à la recherche fondamentale ! Ces études sont également parmi les moteurs des développe-

ments pratiques en **supraconductivité**. Le groupe de R&D accélérateurs organisé autour de DESY à Hambourg – pour lequel la contribution française est importante – a d'ores et déjà conçu des cavités accélératrices avec un gradient de champ adéquat pour TESLA en collaboration avec Thomson.

4.2 INFORMATIQUE DÉVELOPPÉE EN PHYSIQUE SUBATOMIQUE

L'émergence récente d'une nouvelle technologie de calcul distribué, la grille de calcul, qui offre à tout utilisateur un accès transparent à l'ensemble des ressources informatiques disponibles sur le réseau, ouvre 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, participent activement à son développement dans le cadre du programme européen DATAGRID. Le centre de calcul de Lyon sera ainsi un des nœuds importants de cette structure en grille qui traitera un volume très important de données (100 petaoctets). Cette technologie a été retenue comme modèle de base pour le calcul auprès du LHC qui requiert des volumes de ressources sans précédent. De très nombreuses retombées dans le monde de la recherche et industriel sont attendues. Elles seront explorées en détail dans les programmes du 6^e PCDRT européen dont elles constituent l'une des priorités affichées et où l'Institut joue un rôle moteur. Ces efforts ne sont pas récents : le Web a été inventé par notre discipline (au CERN).

4.3 LES INTERFACES PHYSIQUE NUCLÉAIRE-BIOLOGIE-MÉDECINE

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 certain nombre de techniques de détection et d'analyse de données dont certaines ont de manière naturelle des implications dans le domaine de l'imagerie médicale et de la biologie. On recense dans les techniques de détection :

- pour la biologie : l'autoradiographie, la radio-chromatographie, l'imagerie des petits animaux *in vivo* (radiotomographes et scanner X), la cristallographie, l'analyse à l'échelle cellulaire et subcellulaire par micro-faisceau d'ions, l'imagerie appliquée aux sondes fluorescentes (séquençage de l'ADN, analyse protéique cellulaire) ;

- pour la médecine : l'imagerie oncologique interventionnelle exploitant une mini γ -caméra portable, la tomographie (caméra PET et SPECT), la scintigraphie, la dosimétrie, la radio-graphie, la radiothérapie et l'hadronthérapie.

À ces développements instrumentaux, s'ajoute une implication de l'Institut dans la modélisation et l'analyse des données que l'on retrouve aujourd'hui développées en neurosciences, en génomique et post-génomique et en radiobiologie.

Le nombre des laboratoires de l'IN2P3 impliqués dans ce domaine a augmenté sensiblement durant ces dernières années : sur les 18 laboratoires de l'IN2P3, 10 d'entre-eux possèdent aujourd'hui une activité identifiée à l'interface physique-biologie-médecine et une cinquantaine de physiciens apportent leur contribution à ce thème de recherche. Pour la plupart, les activités sont développées en collaboration étroite et locale avec des centres hospitaliers (CHU et centres anti-cancéreux) et/ou avec des laboratoires de biologie (INSERM, CNRS SDV, CEA DSV) et ont abouti ces dernières années à plus de 40 publications publiées dans des revues biomédicales. Enfin, signe d'évolution de la volonté de travaux réalisés à l'interface, un chargé de recherche en neurobiologie vient d'intégrer l'un des laboratoires de l'Institut avec pour motivation de développer ses travaux conjointement avec les physiciens.

4.4 ÉTUDES SUR LES AGRÉGATS ET LEURS APPLICATIONS DANS UN CADRE PLURIDISCIPLINAIRE

Il y a 4 équipes regroupées à l'IPN de Lyon et à l'IPN d'Orsay qui étudient et utilisent les ions poly-atomiques. Deux domaines de recherche sont abordés : l'un concerne les collisions agrégat – atome ou molécule – atome avec pour but de traiter l'excitation et l'ionisation des agrégats ou molécules et de déduire les mécanismes de fragmentation de ces entités, l'autre s'attache à l'étude de l'interaction des ions poly-atomiques (agrégats et molécules) avec le solide. Les objectifs sont la compréhension des mécanismes conduisant aux émissions secondaires (photons, électrons, ions atomiques et moléculaires et les espèces neutres) induites par l'impact de ces particules et les applications potentielles. Les quatre équipes participent au GDR Agrégats, Dynamique et Réactivité. Un nouveau projet expérimental est développé depuis deux ans sur les effets biologiques des rayonnements ionisants à l'échelle moléculaire. Ces recherches se développent dans le cadre de réseaux européens (**RADAB-net**, **Réseau COST**) financées par l'Union européenne en collaboration avec le Laboratoire de Génétique Moléculaire Humaine de l'ISPB, dans le cadre du plan pluriformation « Biomolécules, interactions moléculaires hors équilibre » de l'Université Claude Bernard - Lyon. Enfin un effort important se concentre sur l'étude de l'interaction Ion-Solide accompagné par le développement d'un accélérateur d'ions polyatomique : c'est le projet **Tancrede à ORSAY**.

5 – ÉNERGIES NUCLÉAIRES ET ENVIRONNEMENT

La France a misé dans les années 1970 sur l'énergie nucléaire pour la production d'une très large fraction (80 %) de son électricité. Le

problème de la gestion ou de la destruction des déchets nucléaires est alors devenu un problème majeur de société et notre communauté s'y est progressivement consacrée. Il apparaît en outre maintenant que l'on ne peut raisonner sur la gestion des déchets sans envisager des scénarios de production d'énergie. Notre discipline s'investit très fortement dans la recherche de sources d'énergie nucléaires pour le futur. Elle en a les compétences et c'est aussi pour elle un devoir vis-à-vis de la société, de même qu'elle a le devoir de prendre part à la sûreté vis-à-vis de l'environnement. Sous l'impulsion du Ministère de la Recherche, le CNRS a créé un programme interdisciplinaire sur l'Aval du Cycle électronucléaire (**PACE**) dont le directeur est le Directeur de l'IN2P3. Il est prévu que ce programme encourage et coordonne les recherches de plusieurs GDR consacrés à ces questions jusqu'en 2006, échéance prévue par la loi Bataille de 1991 sur les scénarios de traitement des combustibles nucléaires usés et des déchets nucléaires.

- Le **Programme PACE** regroupait initialement 4 GDR (**GEDEON** – Physique Nucléaire – **PRACTIS** et **NOMADE** – Chimie – et **FORPRO** – Géosciences). En 2001, un fait marquant a été la création du GDR **MOMAS** (Modélisations Mathématiques et Simulations) qui fournira aux quatre autres des méthodes et des outils essentiels aux analyses de faisabilité et de risque. Ces différents GDR sont l'occasion de recherches pluridisciplinaires et de collaboration avec d'autres organismes comme le **CEA** et **EDF**, **COGEMA** et **l'ANDRA** ou **FRAMATOME**. La structure en GDR permet l'évaluation, par des Conseils Scientifiques spécialisés, des actions proposées par les équipes avant leur soutien financier par les Conseils de Groupement regroupant les acteurs du domaine. Le Programme Pace assure l'approche commune des thèmes, la couverture des sujets et la tenue d'ateliers réunissant l'ensemble des chercheurs. Un très fort soutien de l'Union Européenne (5^e PCRD) a pu être obtenu et les équipes CNRS sont entrées dans de nombreuses collaborations internationales. 170 chercheurs, techniciens et doctorants (en hommes-années) travaillaient en 2001 dans le Programme PACE, doté au CNRS d'un budget de 1 MEuros.

• Le **GDR GEDEON** (Gestion des Déchets par des Options Nouvelles) était d'abord impliqué dans le projet d'un réacteur sous-critique piloté par un accélérateur de protons de haute intensité et proposé comme incinérateur innovant et efficace d'actinides mineurs. Les équipes de **GEDEON** (CEA, CNRS FRAMATOME et EDF) ont acquis dans les dernières années des données indispensables relatives à ce projet : taux de production et compréhension du rôle des résidus de spallation, de l'hydrogène et de l'hélium dans la tenue des matériaux du dispositif, mesures de probabilités de fission et de capture de noyaux transuraniens et de déchets nucléaires et mesures sur les éléments du cycle du Thorium. Elles ont pris part, par exemple, au système expérimental « n-TOF » du CERN, comportant essentiellement une ligne de faisceau de neutrons et un spectromètre, pour répondre à cette nécessité de données expérimentales très exhaustives. Elles ont réalisé le couplage de l'accélérateur GENEPI (réalisé à l'ISN de Grenoble) au réacteur MASURCA (à Cadarache) et commencé la prise des données de l'expérience MUSE IV destinée à mettre au point des moyens de mesure et de contrôle de la réactivité de réacteurs sous-critiques. Des travaux importants (source IPHI, cavités accélératrices, cibles) sont également réalisés dans le domaine de l'accélérateur de protons de haute intensité et des cibles de spallation pour la production des neutrons (projet MEGAPIE). Les laboratoires principalement concernés par ces études sont l'ISN de Grenoble, l'IPN d'Orsay, Subatech à Nantes, le LPC Caen, le CENBG de Bordeaux et l'IRES de Strasbourg. Récemment le GDR a pris le nom de **GEDEPEON** : « Gestion des déchets et Production d'Énergie par des Options Nouvelles ». Dans les études sur le retraitement des combustibles usés, en particulier à cause du plutonium, à la fois déchet et combustible, la question du futur du nucléaire ne peut être ignorée, puisqu'elle détermine le volume et la nature des déchets produits. Si le nucléaire doit être pérennisé, les équipes du CNRS proposent que ce soit à travers des filières sobres utilisant des noyaux fertiles, produisant le minimum de déchets (en particulier, un minimum d'actinides mineurs) et présentant des conditions de sûreté

accrues. Les voies actuellement étudiées dans le monde sont les **réacteurs à neutrons rapides basés sur le Plutonium** (le CEA propose qu'ils soient refroidis au gaz He) et les **réacteurs à sels fondus au Thorium** qui peuvent être surrégénérateurs en spectre thermique et produisent peu d'actinides mineurs. Des laboratoires de l'IN2P3 s'investissent fortement dans les études de base nécessaires au développement d'une telle filière.

• La stratégie dépasse désormais largement 2006, échéance initialement prévue pour les recherches et développement sur le traitement des déchets. La collaboration avec des laboratoires de chimie, à commencer par ceux de radiochimie de l'IRES, de Subatech, de l'IPN d'Orsay et de l'IPN de Lyon devient vitale et stimulante. Enfin la perspective de construction d'un démonstrateur qui a donné lieu dans le 5^e PCRD européen au programme « PDSXADS », se concrétise. Il s'agit d'un avant projet. Il est d'ores et déjà acquis que ces travaux se poursuivent dans le cadre du 6^e PCRD. L'activité « Énergie Nucléaire et Environnement » est devenue une des activités majeures de la discipline. En parallèle avec ces développements, il existe des services de mesures de radioactivité et souvent de faibles radioactivités. Cette physique appliquée, activité de service, à l'IRES, Subatech, IPNO, ISN et IPNL est très utile et appréciée de la société en général qui reconnaît la compétence et la crédibilité de notre discipline.

6 – BILANS ET PROSPECTIVES

Sur les 18 laboratoires du département, la plupart ont des activités qui se répartissent sur au moins deux des trois thèmes, physique des particules, physique nucléaire ou astrophysique. Il en résulte une certaine mobilité interne, une mise en commun de connaissances à la fois théoriques et technologiques et finalement

l'émergence de nouvelles activités. En outre les laboratoires du département PNC ont une longue tradition de collaboration scientifique avec des laboratoires semblables du CEA : CEA/DAPNIA, CEA/DEN, CEA/DAM, CEA à Cadarache etc. Des installations communes ont été réalisées comme dans le tunnel du Fréjus : le Laboratoire Souterrain de Modane et aussi dans la mer avec ANTARES. Dans ces deux derniers cas, l'INSU est aussi devenu un partenaire. Le **GANIL** est l'exemple le plus prestigieux de la collaboration IN2P3 – CEA. Il a permis aux chercheurs français de figurer parmi les leaders mondiaux des recherches sur les noyaux exotiques. La France a l'opportunité d'y créer un **pole d'excellence européen**.

- La **Physique des Particules** est engagée dans le projet LHC, entreprise immense par sa durée de préparation et son coût, les développements techniques lourds et le nombre de physiciens, ingénieurs et techniciens impliqués. Environ 150 physiciens français participent à l'une des trois expériences : ATLAS, CMS et LHCb et au moins autant d'ingénieurs et de techniciens se répartissant entre mécaniciens, électroniciens et informaticiens. À cause de ses enjeux scientifiques et technologiques, ce projet est l'un des principaux moteurs de développement des laboratoires, comme par exemple en informatique avec l'implication dans DATAGRID. Ce programme ne doit pas cependant occulter les résultats récents :

- les caractéristiques du boson de Higgs comme particule virtuelle ont été déterminées grâce aux dernières données de LEP ;

- la violation de CP dans la désintégration des B.(BaBar) ;

- la première évidence d'oscillation de Neutrinos (SNO).

- La **Physique Nucléaire** est le thème majeur pour 10 des 18 laboratoires. La **spectroscopie** de noyaux de plus en plus exotiques a apporté une masse importante de résultats grâce à des machines telles le Vivitron et son détecteur principal Euroball, et le Ganil avec Exogam. Les rotations des noyaux

superdéformés ont été largement étudiées et divers types de noyaux inconnus jusqu'alors mis en évidence : noyaux à halo de neutrons « noyaux Boroméens », ^{48}Ni et ^{132}Sn « doublement magiques », noyaux superlourds etc. Les perspectives avec les faisceaux radioactifs et les multidétecteurs associés tel AGATA sont la voie d'avenir. Les projets Spiral2 au GANIL et EURISOL sont la priorité. Les équipes françaises ont été par ailleurs moteurs pour la découverte du plasma de quark et de gluon au CERN et la participation aux expériences à RHIC à Brookhaven. ALICE auprès du LHC constitue désormais un élément important et promoteur du programme de physique nucléaire.

- L'« **Astroparticule** » est une science récente. Elle constitue désormais l'activité de près d'un tiers des physiciens de notre discipline. En 1998, un vol test de 11 jours sur la navette spatiale DISCOVERY a permis à l'expérience **AMS-phase1** d'effectuer des mesures de spectres de particules chargées et d'améliorer la limite sur la quantité d'antimatière dans l'univers. En 1999 la collaboration « **Supernovae Cosmologie Project** », à laquelle participaient également des physiciens de l'IN2P3, publiait un célèbre article remettant en cause le modèle d'expansion de l'Univers, et marquant la maturité de cette nouvelle science. Par la suite en 2002 le ballon **ARCHEOPS** lancé à partir de la base de Kiruna étudiait le fond cosmologique de près d'un tiers du ciel pendant un vol de 18 jours pour mesurer la courbure de l'Univers et la densité de baryons. Les limites (négatives) sur l'observation des WIMP's ont été considérablement améliorées par les résultats de l'expérience **EDELWEISS**. La mise en route des expériences : HESS, AUGER, ANTARES et VIRGO doit intervenir en 2003-2004. Les expériences embarquées Glast/AMS/EUSO et Planck et SNAP sont en plein développement : Le spatial est devenu la nouvelle frontière de notre discipline. L'Astroparticule est exemplaire comme activité pluridisciplinaire du XXI^e siècle. Elle semble cependant indissociable de la physique des particules par les objets et processus qu'elle peut révéler et de la physique nucléaire par le biais de l'Astrophysique Nucléaire. Elle fournit en effet un

champ « d'expérimentation » beaucoup plus vaste que celui que l'on peut réaliser sur terre. Le cadre de ces recherches est bien sûr mondial !

- Les recherches et développements dans le domaine des accélérateurs s'inscrivent dans un cadre très pluridisciplinaire. Déjà le GANIL est utilisé à 20 % de son temps pour des expériences non nucléaires (études de surfaces, etc.) et le soutien aux installations de hadron-thérapie d'Orsay est important. Plus de 100 physiciens, surtout ingénieurs et techniciens se consacrent à ces programmes. La contribution directe d'équipes de l'IN2P3 à la construction du LHC est également conséquente. Enfin le projet à plus long terme de collisionneur linéaire TESLA comportant un laser X à électrons libres pourrait devenir un instrument précieux pour la recherche en biologie en particulier. Enfin une communauté s'est créée sur les questions d'énergie nucléaire, de traitement des combustibles usés et des nouvelles filières. Elle est en expansion et recrute sur des postes dont le profil est affiché et attire des physiciens confirmés de notre discipline. Elle a des liens forts avec le CEA et aussi avec le CERN. Elle a un rôle à jouer à l'avenir et son développement est très important pour l'ensemble de la discipline.

7 – RÉPONDRE À LA DEMANDE SOCIALE

Qu'est en droit d'attendre de nous la Société ?

7.1 FAIRE PROGRESSER LA SCIENCE FONDAMENTALE

Elle attend de nous des réponses sur les énigmes de l'infiniment petit et l'infiniment

grand, sur la phase primordiale de l'Univers et sur le gigantesque et complexe « mécano » qu'il constitue aujourd'hui.

7.2 FAIRE PROGRESSER LA TECHNOLOGIE ET DONC VALORISER LES DÉVELOPPEMENTS EXPÉRIMENTAUX

- En direction du Nucléaire et de l'Environnement, de la Biologie-Médecine et de la Haute Technologie en électronique, cryogénie, mécanique et informatique ;

- et augmenter les collaborations dans les domaines où cela est possible comme en supraconductivité et en imagerie, avec certaines grosses entreprises comme Thomson, ST Microelectronics, IBM et aussi pour la création de jeunes entreprises.

7.3 ÉTENDRE L'ENSEIGNEMENT

Les laboratoires de l'IN2P3 ont tous le statut d'UMR. Leurs actions de création d'enseignements nouveaux : DEA, DESS et autres modules de formation permanente sont très nombreuses. En moyenne chaque laboratoire accueille et organise un DEA et un DESS, et de plus en soutient d'autres. Dans toutes les Universités hébergeant un des 18 laboratoires une politique volontariste fait que le transfert des connaissances et des savoir-faire technologiques est efficace. En outre ces enseignements ont des programmes débordant largement les frontières de notre discipline. **Cependant dans un pays ou 80 % de l'électricité est d'origine nucléaire, 80 % des Universités ignorent cette discipline**, parce qu'aucun de nos laboratoires n'est présent sur leur campus ! Il s'agit de faire en sorte que tout scientifique appartenant au monde universitaire ait une compréhension claire (et si possible non polémique) des phénomènes en jeu. Un effort

d'innovation est nécessaire dans ce domaine. Le concept d'Université virtuelle pourrait s'appliquer dans ce cas.

7.4 FAIRE PROGRESSER LA TRANSMISSION DE LA CONNAISSANCE

La société appréhende la science globalement et par suite les réponses que nous formulons doivent-elles se faire dans un cadre aussi pluridisciplinaire que nécessaire. Les laboratoires assumeront progressivement cette mission de diffusion des connaissances auprès d'un plus grand nombre en rompant avec le mode traditionnel jusqu'alors, qui de limite à des échanges confidentiels entre spécialistes, en marge du tissu social. Les chercheurs ont des devoirs envers la société qui soutient leurs activités.

À ce jour, l'IN2P3 a enclenché ce processus dans ses laboratoires en menant un éventail d'actions de communication : Journées portes ouvertes, bars des sciences et informations dans les lycées (conférences NEPAL). À ce titre, nous devons aussi citer l'École d'été de PHYsique (E2PHY) dont les thèmes ont été « physique et énergie » en 2001 et « physique et santé » en 2002 : accueillant chaque fois plus de 300 participants (chercheurs, enseignants-chercheurs et professeurs du secondaire), cette école a pour objectif de réunir les acteurs de l'enseignement de la physique subatomique pour faire le point sur un sujet donné, avec la perspective d'un transfert de connaissances. Les chercheurs s'investissent dans l'écriture d'articles de vulgarisation, dans un domaine particulièrement difficile à illustrer. Certains se lancent même depuis peu dans la rédaction de romans scientifiques diffusés par les éditeurs commerciaux et donc accessibles au plus grand nombre.