

PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET PHYSIQUE DES PARTICULES

Directeur scientifique du département PNPP
Michel SPIRO

Président du Conseil scientifique de département
Jacques DUMARCHEZ

Membres du Conseil scientifique de département

Ursula BASSLER
Bertram BLANK
Sylvain DAVID
Jean-Pierre DELAHAYE
Lucia DI CIACCIO
Umberto DOSSELLI
Jens Jorgen GAARDHOJE
Philippe GHEZ
Jérôme GIOVINAZZO
Denis JOUAN
Frédéric KAPUSTA
Anne LEFEBVRE-SCHUHL
Michel LION
Frédérique MARION
Philippe MORETTO
Luc PERROT
Christophe PRÉVOST
Michael PUNCH
Marie-France RIVET
Christelle ROY
Daniel SANTOS
Charling TAO
Marc WINTER

1 – LES ENJEUX

1.1 L'ÉTAT DE L'ART

Le xx^e siècle a vu naître les deux théories majeures qui forment le cadre, encore indépassable, de notre connaissance de l'infiniment petit et de l'infiniment grand : la mécanique quantique et la relativité générale.

Il a aussi vu la découverte de deux interactions qui interviennent à l'échelle subatomique, l'interaction forte (ou nucléaire) et l'interaction faible : avec l'interaction électromagnétique elles régissent la physique de l'infiniment petit. Leur formulation a évolué en un cadre théorique très élaboré, appelé le modèle standard de la physique des particules, et qui a reçu une confirmation spectaculaire vers la fin du siècle.

La compréhension expérimentale et théorique de la structure du noyau atomique, système complexe de nucléons en interactions a permis d'expliquer toute une série de processus cosmiques qui vont de la naissance des éléments à l'équilibre des corps stellaires comme notre soleil et à leur mort sous forme d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Mais elle a aussi permis l'invention capitale de nouveaux modes de production d'énergie.

À l'autre extrémité du spectre des échelles, celle de l'infiniment grand, la relativité générale a permis de prendre l'Univers comme objet d'étude et de décrire sa naissance et son évolution. Le Big Bang, devenu aujourd'hui le modèle standard de la cosmologie, a été confirmé de manière spectaculaire à travers la compréhension de la nucléosynthèse primordiale des éléments et la détection du fond diffus cosmologique et de ses fluctuations.

1.2 ENJEUX POUR LE XXI^e SIÈCLE

- Pourtant, à l'aube de ce nouveau siècle, on ne peut pas considérer la compréhension de la physique fondamentale des deux infinis comme une tâche accomplie.

Les nombreuses observations cosmologiques accumulées convergent aujourd'hui vers un modèle d'univers où la matière connue ne représente qu'environ 4 % de la densité d'énergie de l'Univers. L'Univers serait composé principalement de matière noire (21 %) et d'énergie noire (74 %) dont la nature nous échappe.

Nous nous trouvons aujourd'hui dans une situation similaire à celle de la fin du XIX^e siècle quand les lois sur les gaz étaient connues mais qu'on ignorait encore la nature des particules qui les composaient. En ce début de XXI^e siècle la thermodynamique de l'Univers est connue mais pas tous ses constituants élémentaires. Du côté de la matière noire, des pistes existent avec les extensions du modèle standard de la physique des particules (supersymétrie, dimensions supplémentaires, cordes) qui toutes prédisent des particules nouvelles, activement recherchées auprès des accélérateurs ou dans des expériences souterraines dédiées. Pour ce qui concerne l'énergie noire, c'est le rôle de la constante cosmologique einsteinienne, de l'énergie du vide, voire de modifications de la gravité newtonienne qui sont explorées. De même, le mécanisme de création des grandes structures du cosmos à partir d'infimes fluctuations quantiques (à travers le mécanisme dit d'inflation) nous reste toujours

inconnu. Les champs qui seraient à l'origine de l'inflation présentent plusieurs points en commun avec les champs qui seraient à l'origine du mécanisme d'attribution des masses aux particules.

Quant à ces derniers, la décennie écoulée a été marquée par la détermination avec une précision sans précédent des paramètres de l'interaction électrofaible et de l'interaction forte et auprès des accélérateurs. Il manque pourtant encore une pièce maîtresse à l'architecture du Modèle Standard de la physique des particules : le mécanisme d'attribution de la masse. Ce mécanisme associe la propriété de masse et donc d'inertie des particules à leurs interactions avec la structure quantique du vide, plus précisément avec les fluctuations quantiques associées à une particule, un champ quantique, le boson de Higgs, non encore découvert.

- L'univers est constitué principalement de matière. L'antimatière n'est présente qu'à l'état de traces, de rayons cosmiques. D'où vient cette asymétrie alors que les lois de la physique sont quasi identiques pour les particules et les antiparticules ? La petite différence provient de ce que l'on appelle la violation de la symétrie CP, observée et étudiée en laboratoire sur différents systèmes particule-antiparticule. Cette violation de CP dans les premiers instants de l'Univers pourrait avoir conduit à la disparition de l'antimatière dans l'Univers.

Le LHC, dont la mise en exploitation est imminente, sera au front des découvertes de la physique des particules pour la décennie à venir.

Parmi les particules élémentaires, les neutrinos posent encore des problèmes fondamentaux. L'existence de masses non nulles et de mélanges des différents types de neutrinos est maintenant acquise. Pourtant, l'échelle absolue des masses est encore inconnue, de même que certains paramètres de mélange. Le neutrino est-il sa propre antiparticule ? Quel est son rôle cosmologique ?

Enfin le modèle standard des particules ayant réussi à unifier la description théorique des interactions électromagnétiques avec celle des interactions faibles, la question naturelle

est de savoir si on peut inclure les interactions fortes dans une unification à une énergie plus élevée. Cette Grande Unification, dont plusieurs modèles sont élaborés, aurait comme conséquence remarquable la possibilité pour le proton de se désintégrer. L'étape suivante de l'unification, celle incluant la gravité, serait le but ultime unifiant les deux théories majeures du xx^e siècle. L'ensemble de ces théories d'unification prédisent de façon générique des particules et champs candidats pour les pièces manquantes du modèle cosmologique. Il est fort possible que nous nous trouvions devant des développements théoriques importants analogues à ceux qui ont bouleversé le début du xx^e siècle.

Si on s'éloigne du niveau fondamental pour rejoindre le front de la complexité dans le domaine de la physique nucléaire, l'étude de la structure du noyau fait preuve d'une vitalité exceptionnelle, grâce au développement des faisceaux radioactifs. Des propriétés inattendues (systèmes granulaires, halos, nouvelles magicités) sont observées pour des noyaux liés mais instables (loin de la «vallée de stabilité» dans la table des noyaux). Ces découvertes imposent une profonde évolution des théories nucléaires. Les interactions mises en jeu doivent être enrichies (dépendance en isospin, forces à 3 corps). Les modèles doivent intégrer de nouveaux concepts : couplage au continuum, corrélations.

Les noyaux exotiques ont un impact profond sur notre compréhension de la nucléosynthèse stellaire, en particulier dans les phénomènes violents où sont élaborés nombre d'éléments lourds. Des mesures de masse, de durées de vie, de section efficace, de spectres d'excitation et d'états isomériques, loin de la vallée de stabilité des noyaux, sont aujourd'hui nécessaires pour la physique nucléaire et l'astrophysique nucléaire. L'étude de la radioactivité β de ces noyaux exotiques permet également d'affiner notre connaissance des interactions fondamentales.

De façon complémentaire, la physique hadronique a pour objet l'étude des hadrons en termes de degrés de liberté de la Chromodynamique Quantique (quarks et gluons). Leur

structure et leur comportement, encore mal compris, font l'objet de projets expérimentaux importants. En particulier, l'étude du plasma primordial de quarks et gluons déconfinés, tel que présent dans les premiers instants du Big Bang, sera un thème important de la recherche auprès du collisionneur LHC. Différentes transitions de phase de la matière nucléaire ont déjà été observées, mais l'accès aux collisions d'ions lourds au LHC, et donc aux densités d'énergie extrême devrait permettre une étude détaillée de la transition de phase du plasma de quarks et gluons vers les particules hadroniques.

Enfin, les observations de ces dernières années montrent que des processus non-thermiques ou «violents» jouent un grand rôle dans l'évolution de l'Univers. Ils impliquent plusieurs processus qui vont de l'hydrodynamique à l'accélération violente des particules.

Contemporaine de la découverte de la radioactivité, l'étude des rayons cosmiques s'est poursuivie tout au long du xx^e siècle et a permis la découverte de plusieurs particules élémentaires. Mais leur origine reste débattue et le champ a été étendu au-delà des particules chargées, aux gerbes d'ultra haute énergie, aux gammas (photons de très haute énergie), aux neutrinos et aux ondes gravitationnelles. Ces «nouveaux messagers» donnent accès à des énergies hors d'atteinte des accélérateurs d'aujourd'hui et les sites extrêmes de production de ces rayonnements sont donc aussi des lieux de test des lois fondamentales. Parmi ces messagers cosmiques, les ondes gravitationnelles, prédites par la relativité générale, pourraient à long terme jouer un rôle important en ouvrant une nouvelle fenêtre vers des événements cosmiques violents : la coalescence de systèmes binaires, la formation de trous noirs ou l'univers primordial sont le lieu de production d'ondes gravitationnelles qui seront détectables un jour.

1.3 LES APPLICATIONS SOCIÉTALES

La recherche fondamentale, telle qu'elle est pratiquée par l'IN2P3 a toujours donné lieu

et continuera à donner lieu dans le futur à diverses applications et innovations utiles pour la société. Parmi elles on peut citer évidemment les développements autour de l'énergie nucléaire. Plus récemment le World Wide Web a été inventé au CERN pour les besoins de communication entre les physiciens des particules. Le CERN et la physique des particules jouent un rôle majeur dans la mise en place des grilles mondiales de calcul. Les accélérateurs, au départ instruments de physique fondamentale, ont essaimé vers d'autres disciplines et servent maintenant couramment aux besoins de la physique des matériaux, des sciences du vivant ou de la médecine. Les développements ambitieux des futures machines imaginées pour la physique apporteront inévitablement des retombées pour la société, retombées pas forcément prévisibles d'ailleurs. Autre exemple, les compétences de l'IN2P3 en matière de capteurs pour la détection de particules dans les grandes expériences de physique fondamentale sont aujourd'hui mises au service d'autres domaines, en particulier dans le biomédical pour l'imagerie et la mesure des radio-traceurs isotopiques ou encore dans l'environnement pour la mesure et l'évaluation des expositions chimiques ou radiologiques.

2 – OBJECTIFS ET PRIORITÉS

2.1 LA RECHERCHE FONDAMENTALE

Physique des Particules

Thèmes

- Structure quantique du vide, origine de la masse des particules élémentaires, recherche du boson de Higgs, modèle standard de la physique des particules

La compréhension approfondie du mécanisme de brisure spontanée de la symétrie élec-

trofiable passe par la découverte de nouvelles particules (comme le ou les bosons de Higgs à l'origine de la masse des particules) et/ou par des mesures de précision. Le TeVatron est actuellement la seule machine qui explore cette frontière des hautes énergies et les résultats fins des analyses des données de HERA sont attendus dans les prochaines années. Avec l'arrivée du LHC, le « grand collisionneur de hadrons » du CERN en 2008, ce programme va s'intensifier et s'élargir grâce à l'énergie et l'intensité sans précédent attendues. De nombreux groupes de l'IN2P3 (CNRS) et du DAPNIA (CEA) sont impliqués dans ce programme auprès des expériences H1 (HERA) et D0 (TEVATRON), mais surtout dans la préparation des expériences ATLAS et CMS au LHC.

- Unification des interactions fondamentales : au-delà du modèle standard

Le Modèle Standard, malgré son succès incontestable, n'est pas une théorie parfaite. Les pistes pour pallier ses imperfections passent par des « extensions » : supersymétrie, dimensions supplémentaires liées à une nouvelle théorie de la gravité, particules composites, etc. Toutes ces hypothèses prévoient l'existence de familles de nouvelles particules, dont, par exemple, la variété neutre la plus légère serait la matière noire. Parallèlement à cet effort théorique intense, la recherche expérimentale des signes d'une physique au-delà du modèle standard représente une fraction importante de l'analyse des expériences en cours : le démarrage du LHC devrait amplifier encore cette tendance, puisque des détecteurs comme ATLAS et CMS ont été conçus pour y être sensibles.

- Matière et antimatière

Après sa mise en évidence dans le système des mésons K, la violation de la symétrie CP est extensivement étudiée dans le système des mésons B par les expériences BABAR et BELLE. Cette étude sera complétée au LHC par l'expérience LHCb et devrait conduire à la maîtrise des paramètres de la violation de CP dans le secteur des quarks. Mais là encore, ces mesures de précision s'accompagnent de

recherches actives de déviations par rapport aux prédictions du Modèle Standard qui pourraient être induites par la présence de nouvelles particules à l'échelle du TeV. L'effort théorique nécessaire se double d'un investissement informatique important pour mener à bien les calculs de type QCD sur réseau.

- Futur à long terme

Un accord mondial, noté par le conseil des ministres de la recherche de l'OCDE en janvier 2004, s'est dessiné sur le choix d'un collisionneur linéaire électron-positron comme futur accélérateur de la physique des particules. Cette machine, l'ILC, d'une énergie de 500 GeV dans le centre de masse dans une première phase (qui pourrait être étendue à 1 TeV dans une deuxième phase), permettrait une étude exhaustive des interactions électrofaibles, ainsi qu'une caractérisation approfondie de toute nouvelle particule découverte au LHC, sans oublier son propre potentiel de découverte permis par une excellente sensibilité combinée de l'accélérateur et des détecteurs envisagés.

Cette stratégie prolonge et amplifie le «schéma» des succès des années 1980-1990 au CERN: construction du SPPBARS, collisionneur hadronique qui a permis la découverte des bosons W et Z en 1983, suivie de celle du LEP (1989) qui a non seulement mesuré les caractéristiques de ces bosons avec un très haut degré de précision, mais également permis, à partir de ces mesures de précision, de lancer la traque du boson de Higgs et d'en restreindre considérablement le domaine de masse possible.

Les études machines de l'ILC ont été largement défrichées en Europe, avec une contribution notable des laboratoires français dans la mise au point d'une solution à cavités supraconductrices (projet TESLA initié à DESY), technologie retenue par l'ICFA en août 2004 pour servir de base à l'effort de design commun au niveau mondial (GDE) en cours. La définition des futures expériences auprès de l'ILC fait également l'objet d'un intense effort mondial et la France y est fortement impliquée.

Un autre projet d'accélérateur, le CLIC, nécessitant un intense effort de R&D, permettrait d'atteindre une énergie de 5 TeV. Cet effort doit être soutenu et développé dans le cadre d'une collaboration autour du CERN de l'IN2P3 et du DAPNIA.

Objectifs

- **Court Terme: Exploiter pleinement le potentiel des programmes de physique électrofaible et de structure du nucléon en cours à FNAL, SLAC et DESY.**

- **Moyen Terme: Réaliser nos engagements techniques pour les expériences au LHC:**

- *fin de la construction et de l'installation des détecteurs,*

- *préparation des analyses,*

- *démarrage des détecteurs.*

- **À partir de 2008, assurer une exploitation optimale du potentiel de physique:**

- *recherche du Higgs, de phénomènes au-delà du Modèle Standard, etc. avec ATLAS et CMS;*

- *étude de l'asymétrie matière-antimatière avec LHCb;*

- *préparation d'une amélioration de la machine et de ses détecteurs à un horizon de 5 ans.*

- **Long Terme: Participer aux développements pour l'ILC. Concevoir et développer de nouveaux détecteurs de précision. Participer à la R&D accélérateur pour CLIC.**

Priorité

- **Focaliser les activités vers le CERN, «capitale mondiale de la physique des particules», avec le démarrage des expériences au LHC.**

Physique Nucléaire

Thèmes

- Noyaux exotiques, structure nucléaire, astrophysique nucléaire

La physique des noyaux loin de la stabilité connaît avec SPIRAL1 au GANIL une période faste où l'on peut étudier des états quasi-moléculaires, des noyaux à halo de neutrons, de nouvelles radioactivités (2 protons), etc. Dans cette quête des extrêmes, la recherche des limites en masse (superlourds) et en déformation (hyperdéformation) se fait dans des réactions de fusion. Le temps de faisceau nécessaire à ces études plaide en faveur du développement d'une nouvelle machine de faisceaux stables de haute intensité.

Avec SPIRAL1, seule une fraction limitée d'espèces rares est accessible avec des intensités suffisantes. Pour étendre la gamme des ions radioactifs disponibles vers les noyaux lourds riches en neutrons et augmenter considérablement les intensités, le projet SPIRAL2 a été conçu et engagé. D'importants investissements ont été programmés pour les prochaines années, ainsi qu'un nouveau spectromètre gamma, AGATA, basé sur la reconstruction de trajectoires, et qui permettra de tirer pleinement partie des faisceaux produits. C'est une étape primordiale avant EURISOL, projet européen de faisceaux radioactifs de nouvelle génération. Parallèlement, une implication limitée dans le projet FAIR développant l'approche complémentaire de la fragmentation du projectile est envisagée.

- La matière nucléaire et ses transitions de phase

Les collisions d'ions lourds permettent de sonder les transitions de phase de la matière nucléaire. Aux énergies du GANIL il s'agit d'une transition liquide – gaz de nucléons. L'effort expérimental vise le développement de nouveaux détecteurs (FAZIA) et l'utilisation des nouveaux faisceaux radioactifs (SPIRAL1 puis SPIRAL2) pour étudier l'influence de la proportion de neutrons et de protons sur cette transition.

Une transition de la matière nucléaire vers un plasma de quarks et gluons est possible aux énergies relativistes. Les résultats obtenus auprès du SPS (expériences NA50 et WA98) ont effectivement apporté des éléments de preuves « de l'existence d'un nouvel état de la matière nucléaire dans des collisions entre ions lourds ». À plus haute énergie, l'ensemble des résultats actuels des expériences à RHIC (BRAHMS, STAR et PHENIX) indique la production d'un état inattendu, un liquide de partons (quarks et gluons) en interaction, différent du plasma prédit et recherché (gaz parfait de quarks et gluons).

Les énergies plus élevées mises en jeu au LHC dans l'expérience ALICE permettront d'étendre le domaine d'étude des propriétés du plasma à des densités d'énergie extrême avec l'espoir de produire un gaz quasi parfait de quarks et de gluons. Cela permettra d'étudier cet état de la matière qui aurait existé dans l'univers primordial et de comprendre le confinement des quarks.

- Structure du proton en quarks et gluons

La description fine de la structure du nucléon utilise le formalisme des distributions de partons (quarks et gluons) généralisées (GPD) qui permet de comprendre le nucléon en tant qu'objet dynamique à trois dimensions. Les calculs de QCD sur réseau effectués sur des calculateurs dédiés au niveau européen, semblent prometteurs et des progrès considérables sont attendus dans un futur proche.

Expérimentalement on utilise des sondes leptoniques, souvent polarisées, (électrons au TJNAF, à MAMI et à DESY, muons au CERN) ou hadroniques (antiprotons dans le futur sur FAIR). À moyen et long terme, la communauté française se rassemble autour de trois projets : l'extraction des GPD avec une énergie incidente plus élevée à TJNAF, l'expérience COMPASS sur la mesure du spin du nucléon et enfin l'expérience PANDA à partir de 2012 (démarage de FAIR).

Objectifs

- **Court Terme:** Exploiter au maximum le potentiel scientifique offert par les expériences menées au GANIL, notamment avec SPIRAL1 (faisceaux exotiques), et les expériences PHENIX et STAR à RHIC.
- **Moyen Terme:** Lancer et construire SPIRAL2 (faisceaux exotiques de deuxième génération), inscrit sur la liste ESFRI des infrastructures européennes, et étape primordiale avant EURISOL.
- **Moyen Terme:** Comprendre la structure du nucléon (distributions des partons, spin) et plus généralement des hadrons, par un effort à la fois expérimental et théorique. Exploiter les premiers résultats d'ALICE auprès du LHC et compléter le détecteur.
- **Long Terme:** Se préparer à EURISOL, machine européenne pour l'horizon 2015-2020. Concevoir et réaliser des détecteurs européens de gamma (AGATA) et de particules chargées.

Priorité

- Faire du GANIL un centre européen de recherche sur les noyaux exotiques via SPIRAL1 et le projet SPIRAL2.

Astroparticules, Cosmologie et Neutrinos

Thèmes

- Les neutrinos

Pour répondre à la question : neutrinos et antineutrinos sont-ils identiques ? l'expérience NEMO3 tente de mettre en évidence la double désintégration β sans neutrino au laboratoire souterrain de Modane (LSM). Accroître la sensibilité d'un ordre de grandeur passe par des développements de techniques de très basse

radioactivité : le projet SuperNEMO en France explore la voie tracking-calorimètre.

Le phénomène des oscillations de neutrinos étant établi, en comprendre les détails se fera en 3 phases. À court terme, l'expérience OPERA vise à confirmer avec un faisceau de neutrinos les oscillations observées avec les neutrinos atmosphériques. À moyen terme les expériences Double CHOOZ, en cours d'installation auprès d'un réacteur nucléaire, et T2K, en construction auprès du nouveau complexe d'accélérateurs JPARC au Japon, chercheront à mesurer le troisième angle de mélange, encore inconnu. À plus long terme, l'accès à une éventuelle violation de CP dans le secteur leptonique nécessitera de nouveaux accélérateurs (bêta beams et/ou usines à neutrinos) et détecteurs (de type « mégatonne »). Une étude est lancée pour une implantation dans le tunnel du Fréjus, couplée avec de nouveaux faisceaux de neutrinos venant du CERN (SPL, bêta beams).

- L'univers non-thermique ou univers violent

La résolution de l'énigme séculaire de l'origine des rayons cosmiques ainsi que la compréhension des sites de production et d'accélération des particules les plus énergétiques de l'Univers (particules chargées, photons, neutrinos) ont impulsé un programme riche en création d'observatoires au sol (HESS en Namibie, Auger en Argentine, ANTARES dans le sud de la France) et dans l'espace (GLAST, AMS, CREAM). Des premiers résultats spectaculaires ont été obtenus : HESS a quadruplé le catalogue des sources de rayons gamma de très haute énergie et Auger commence à mettre en évidence la coupure de spectre attendue, dite coupure GZK. D'autres résultats sont attendus grâce à la mise en service de tous ces observatoires. Au-delà, des projets d'observatoires ultimes, CTA pour les rayons gamma ou KM3 pour les neutrinos, sont à l'étude.

Par ailleurs, l'observation directe des ondes gravitationnelles sera une confirmation majeure de la relativité générale. L'expérience interférométrique franco-italienne VIRGO, TGE depuis 1999 et en phase de « commissioning », va pouvoir détecter la déformation de l'espace-

temps induite par des phénomènes cosmiques violents proches (fusion de systèmes d'étoiles binaires, supernovae). Le fonctionnement en coïncidence avec les autres détecteurs gravitationnels mondiaux (LIGO et GEO) est en place. Un programme de développements pour l'amélioration de la sensibilité (VIRGO+) est également lancé. Dans un avenir plus lointain, le projet spatial LISA complètera la gamme des fréquences couvertes, et ouvrira la voie à l'étude des ondes émises par l'univers primordial.

Les décisions de réalisation des grandes infrastructures demandées par ces thématiques seront prises à l'horizon de 2010-2012 dans un contexte européen (ApPEC et ERANET ASPERA) et mondial.

- L'astrophysique nucléaire

Diverses questions restent en suspens pour comprendre la composition de l'Univers (anomalies isotopiques de grains dans certaines météorites, sections efficaces de réactions à des énergies stellaires, site du processus r de capture rapide de neutrons, équation d'état de la matière dense, interaction des neutrinos avec la matière, etc.). Leur résolution ainsi que celle d'autres questions liées à l'astrophysique nucléaire nécessitent des études spécifiques pour accompagner les progrès en observation et en modélisation. Elles associeront des accélérateurs de faisceaux stables ou radioactifs avec des instruments très performants comme les nouvelles générations de multi-détecteurs de rayonnements gamma ou de particules chargées et, pour certaines, bénéficieront du développement des « β beams» de basse énergie.

- La structure et le contenu énergétique de l'Univers

La mesure du rayonnement cosmologique diffus, et l'analyse de la luminosité des supernovae ont montré que l'univers serait euclidien, en expansion accélérée sous l'effet de ce qu'on appelle faute de mieux, une énergie noire. Quant à l'essentiel de la matière composant l'univers, elle est invisible ; c'est la matière noire. Comprendre ces deux énigmes

est donc l'objet des programmes en cours ou à l'étude.

Pour accroître la précision de la mesure avec les supernovae, il est nécessaire d'augmenter les détections de supernovae aussi bien proches que lointaines. C'est le programme des observations en cours avec le Supernova Legacy Survey (SNLS) et le Supernova Factory (SNF). À plus long terme, les projets LSST, au sol et SNAP, dans l'espace, permettront une détermination précise de l'équation d'état de l'énergie noire. De façon complémentaire, l'étude du cisaillement gravitationnel et surtout l'étude du fond diffus cosmologique (CMB) va permettre de contraindre les paramètres cosmologiques avec une grande précision : le satellite PLANCK sera lancé en 2008 dans ce but. Au-delà c'est la mesure des polarisations du CMB qui permettra d'appréhender la phase de l'inflation et des ondes gravitationnelles primordiales. Le développement de techniques bolométriques au sol (projets BRAIN ou CLOVER) est nécessaire avant la définition d'une mission spatiale spécifique.

Différentes technologies sont utilisées pour la détection directe de matière noire non baryonique. L'expérience EDELWEISS, installée au laboratoire souterrain de Modane, maîtrise la technologie bolométrique pour un détecteur de 10 kg. Un R&D est engagé pour concevoir un détecteur d'une tonne, au niveau européen, avec le matériau le plus favorable et utilisant plusieurs méthodes de réjection de bruit de fond simultanées. Des techniques alternatives (TPC à liquide noble) sont à l'étude. De façon complémentaire, les observatoires peuvent être utilisés pour une détection indirecte de matière noire, grâce à son annihilation en photons (HESS, GLAST ou AMS), ou en neutrinos (ANTARES, KM3).

Objectifs

- **Court Terme : Assurer le retour scientifique des grands projets arrivant en fin de construction ou en prise de données : NEMO3 et OPERA pour les neutrinos, HESS I, AUGER, ANTARES, VIRGO et GLAST**

pour les astroparticules et PLANCK, SNLS/SNF et EDELWEISS-II pour la cosmologie.

- **Moyen Terme:** Achever la construction et le démarrage des expériences de seconde génération pour les oscillations de neutrinos (Double CHOOZ et T2K) et les astroparticules (HESS II, VIRGO+). Poursuivre un programme de R&D pour les détecteurs de la génération suivante: les photodétecteurs, les bolomètres, les matériaux de basse radioactivité, la cryogénie et les éléments optiques nécessaires pour la réalisation des antennes gravitationnelles.

- **Long Terme:** Préparer la nouvelle génération de grands projets en astronomie gamma (CTA), astronomie neutrino (KM3), rayons cosmiques d'ultra-haute énergie (Auger-Nord), détecteurs de matière noire, antennes gravitationnelles (LISA), détection de supernovae (SNAP/LSST), détection de la polarisation du CMB. Étudier la modernisation et l'agrandissement du laboratoire souterrain de Modane dans un cadre international et pouvant éventuellement accueillir un détecteur de neutrinos et de durée de vie du proton.

Priorité

- Renforcer les liens avec les autres communautés d'astrophysique et de cosmologie.

2.2 VERS LA SOCIÉTÉ

Dans le programme de recherche de l'IN2P3, les applications directement ou indirectement profitables à la société, sont concentrées sur 4 grands thèmes: l'énergie nucléaire, les technologies de l'information, les accélérateurs et les détecteurs de particules.

L'énergie nucléaire

Thèmes

L'objectif de la communauté des physiciens et chimistes nucléaires engagés dans les recherches concernant la fission nucléaire est le développement de concepts innovants. La réduction de la quantité et de la radiotoxicité des déchets est un enjeu majeur pour le développement de l'énergie nucléaire. Un des outils de ce développement pourrait venir des réacteurs pilotés par accélérateur (programme européen EUROTRANS) pour la transmutation des déchets de haute activité et vie longue (HAVL). En ce qui concerne les filières de production d'énergie, sans négliger les autres filières, la communauté IN2P3 porte son effort sur la filière Th-U3, en particulier dans sa version sels fondus qui permet par ailleurs de développer des recherches génériques ayant beaucoup d'autres applications.

Dans ce contexte, la radiochimie développe de nouvelles recherches sur la chimie des actinides appliquée à la fois à la séparation des matières radioactives issues des combustibles usés et à l'étude de leur comportement, leur diffusion dans les sites de stockage. Des études seront par ailleurs poursuivies dans le domaine de la fusion (soutien au projet ITER) ainsi que dans d'autres domaines comme le démantèlement des installations nucléaires et la caractérisation-non destructive de matériaux (photofission).

Objectifs

- Développer les recherches amont dans le domaine de l'électronucléaire (fission), en particulier par l'acquisition de données fondamentales (spallation, capture, fission). Étudier des systèmes hybrides pour la transmutation et renforcer la contribution de l'institut à l'étude des systèmes innovants pour l'énergie nucléaire du futur;

- Contribuer pleinement aux bases de données thermodynamiques et à la phy-

sico-chimie des radionucléides pour les systèmes innovants (liquides ioniques, sels fondus et nouveaux combustibles).

Le calcul scientifique

Thèmes

Les expériences futures de physique des hautes énergies et d'astroparticules vont conduire à des flux de données considérables qu'il convient de mettre à la disposition de l'ensemble des chercheurs français. Le stockage et le traitement de ces données supposent un accroissement important des moyens mis à la disposition de la communauté. En particulier, la perspective de traitement des données du LHC a conduit à déployer une infrastructure informatique distribuée à l'échelle mondiale basée sur la technologie de « grille ». Les données produites au CERN par les expériences du LHC seront d'abord transmises et traitées par une dizaine de grands centres informatiques dans le monde. Le Centre de Calcul de l'IN2P3 à Lyon est l'un d'eux. Il jouera donc le rôle principal pour le traitement des données en France mais aussi pour leur redistribution vers les centres de taille moyenne en France mais aussi dans d'autres pays du monde. L'IN2P3 et le DAPNIA contribuent activement à l'animation au niveau européen des applications scientifiques de la grille informatique et à son développement. Elle regroupera plusieurs dizaines de milliers d'ordinateurs en 2008.

Objectifs

- **Assurer la contribution française au déploiement de la grille de calcul pour le LHC (projet « LHC Computing Grid France ») pour le traitement des données des quatre expériences du LHC, en renforçant en particulier le centre de calcul CC-IN2P3 de Lyon ;**
- **Relayer cette action au niveau régional et/ou interrégional par la création de pôles de calcul insérés dans la grille ;**

- **Faire diffuser vers d'autres communautés scientifiques l'expérience acquise dans les technologies de grille de calcul pour le traitement massif des données (EGEE).**

Accélérateurs

Thèmes

Les accélérateurs sont des outils essentiels du développement scientifique dans les domaines de la physique nucléaire et des hautes énergies. Une intense activité de R&D existe au sein de la DSM et de l'IN2P3. Elle vise à accompagner les besoins exprimés à travers les évolutions de nos champs scientifiques. La réalisation des accélérateurs n'est envisageable que grâce à la compétence des équipes de mécanique, d'électronique et d'informatique qui interviennent de la conception à la réalisation des appareillages.

Ces compétences sont également utilisées dans le cadre d'activités pluridisciplinaires qui s'appuient sur la mise en œuvre des techniques instrumentales de la physique nucléaire et des particules, pour aborder des domaines scientifiques variés : matériaux, agrégats, chimie, sciences de la vie, médecine (proton et hadron-thérapie).

Objectifs

- **Poursuivre la R&D sur les cavités accélératrices supraconductrices de fort gradient et les coupleurs de puissance (ILC, EURISOL) ainsi que sur les sources de protons et d'ions lourds intenses (> 1 mA). Contribuer à la prochaine génération de FEL (lasers à électrons libres en partenariat avec DESY) ;**
- **Construire un injecteur de protons de haute intensité pour le CERN (IPHI, 3 MeV, 100 mA, 2007-2008) en vue d'augmenter l'intensité des machines du CERN. Appliquer ces développements – après des tests de fiabilité – à la transmutation des**

déchets radioactifs HAVL avec des réacteurs hybrides ;

- Participer à la R&D sur CLIC avec le CERN et poursuivre la R&D sur les techniques innovantes d'accélération, par plasma notamment ;
- Contribuer à la réalisation de centres de proton et d'hadronthérapie ;
- Contribuer à l'émergence sur le territoire français, de plateformes pluridisciplinaires basées sur les faisceaux d'ions pour la caractérisation, l'irradiation et la modification des matériaux en couplage fort avec des techniques de microscopie ou d'imagerie.

Instrumentation

Thèmes

L'ensemble des programmes scientifiques du futur exige le développement (dans la mesure du possible en partenariat avec des industriels) de nouvelles techniques de détection assurant des performances de pointe en termes de résolution spatiale et temporelle, une intégration accrue, une complexité croissante et un coût maîtrisé : détecteurs CMOS et à micropattern, photodétecteurs de nouvelle génération, détecteurs bolométriques, développements en microélectronique, etc.

Objectifs

- Poursuivre les recherches de technologies innovantes de détection ;
- Développer des techniques innovantes d'imagerie en biologie et en médecine en relation avec les SDV ;

- Développer des techniques innovantes de métrologie pour un suivi des expositions dans l'environnement en relation avec l'INSU et l'EDD.

Priorités

- S'affirmer en tant qu'acteur à part entière des recherches sur l'énergie nucléaire (Programme interdisciplinaire sur l'Aval du Cycle et sur l'Énergie Nucléaire : PACEN) ;
- Accroître la R&D sur les accélérateurs et l'instrumentation, amplifier les transferts de technologie vers l'industrie en provenance de ces deux secteurs. Renforcer les ouvertures, notamment avec EDD, INSU et SDV.

3 – CONCLUSIONS

Les thèmes et les domaines d'intervention de l'IN2P3 ont évolué et se sont élargis avec le temps pour recouvrir aujourd'hui :

- Physique des particules ;
- Physique nucléaire et hadronique ;
- Astroparticules, cosmologie et neutrinos ;
- Accélérateurs et instrumentation ;
- Ouvertures interdisciplinaires.

Ces thèmes mobilisent l'ensemble des personnels de l'IN2P3 de façon équilibrée, comme en témoigne la répartition en équivalents temps pleins dans ces activités. Cet équilibre sera préservé dans l'avenir.

