

# 03

---

## DES PARTICULES AUX NOYAUX

ANDRÉ ROUGÉ

*Président de la section*

LOUIS FAYARD

*Rapporteur*

Pierre Aguer

Jean-Pierre Barbe

Michel Baubillier

Robert Baumgarten

Dominique Boutigny

Pierre-Jean Carlos

Marie-Claude Cousinou

Jean Dolbeau

Guy Fontaine

Evelyne Gerlic-Thuriere

Dominique Guillemaud Mueller

Frédéric Kapusta

Serge Kox

François Le Diberder

Isabelle Linck

Bernard Remaud

Guy Roche

Yves Schutz

Daniel Vignaud

Nous avons pris le parti – sans chercher à être totalement exhaustif – d’aborder dans ce rapport l’ensemble des principaux sujets de physique de notre discipline plutôt que de choisir seulement certains thèmes illustratifs. Un glossaire des termes techniques se trouve en appendice.

C’est essentiellement de physique subatomique qu’il sera question ici. Celle-ci étudie la matière à des échelles inférieures à  $10^{-14}$  m. Cette matière est formée à partir de *constituants fondamentaux* formant trois familles de quarks (les seuls sensibles à l’interaction “forte”) et de leptons. Tous sont sensibles à la gravitation et à l’interaction électrofaible (unissant les forces faible et électromagnétique). A partir de ces quarks sont formés les *hadrons* (comme le proton et le neutron) qui sont des assemblages de quarks et d’antiquarks par interaction forte. Finalement les hadrons interagissant entre eux constituent la *matière nucléaire*.

Ces trois niveaux de description qui, en raison des difficultés théoriques, ne se déduisent pas simplement les uns des autres correspondent à trois domaines de recherche détaillés dans les trois premiers chapitres :

- La *physique des particules* dont la thématique principale est actuellement celle de l’origine des masses. Elle étudie le Modèle Standard électrofaible et cherche à déceler les signaux attendus de

supersymétrie ou des effets révélant une autre nouvelle physique.

- La *physique hadronique* dont les principaux enjeux sont la compréhension de l'interaction forte dans son régime non perturbatif et la construction des hadrons à partir de leurs constituants.

- La *physique de la matière nucléaire*. Elle étudie principalement les états hors de l'équilibre. Par ailleurs les applications de l'énergie nucléaire posent des questions à l'ensemble de la société et nous conduisent à développer des recherches sur les options innovantes dans le domaine du traitement des déchets.

Ces trois thèmes de recherche se développent en symbiose et en faisant éclater les frontières entre les disciplines traditionnelles. Pour pouvoir répondre aux questions posées, les physiciens sont conduits à s'engager auprès de grands instruments scientifiques, la plupart du temps uniques au monde, le grand collisionneur LHC en construction au CERN étant l'exemple le plus frappant et le plus récent.

Par ailleurs il est clair, de par la nature même des modèles de "big bang", que des connexions très fortes existent entre la physique de l'Univers et la physique subatomique, cette dernière pouvant recréer en laboratoire des conditions qui existaient au début de l'expansion. Une nouvelle thématique apparaît et sera développée dans le quatrième chapitre :

- *astrophysique, cosmologie et physique subatomique* concentrée autour de l'étude de la nucléosynthèse, de la physique des neutrinos, de la matière noire et des particules émises par les régions lointaines de l'Univers.

# 1 - PHYSIQUE DES PARTICULES : LE MODÈLE STANDARD ET AU-DELÀ

## 1. 1 LES GRANDES QUESTIONS EN 1996

Depuis la mise en évidence au CERN, il y a treize ans, des bosons vecteurs W et Z, le Modèle Standard électrofaible a été testé à un très grand degré de précision et de façons très variées. Aucun désaccord concluant entre ses prédictions et les mesures n'a encore pu être trouvé. Dans sa version la plus simple, il est également presque complet : depuis la découverte il y a deux ans du sixième quark (quark "top") au TeVatron à Chicago, il ne manque plus que le *boson de Higgs* H, le responsable – s'il existe – de la génération des masses des particules et de la brisure spontanée de la symétrie électrofaible.

Cependant, dans ce cadre, de nombreuses questions sont sans réponse, comme les grandes différences entre les masses des particules élémentaires. Par ailleurs, la violation observée de la symétrie CP – reliant particules et antiparticules – n'est pas suffisante pour expliquer le rapport entre le nombre de photons et le nombre de baryons (constituant la matière) observés dans l'Univers. D'un point de vue conceptuel, le Modèle Standard seul ne semble également pas satisfaisant : les forces fortes et électrofaibles ne sont pas unifiées, la gravité n'est pas incluse... Les théoriciens ont été conduits à développer les théories *supersymétriques*, qui englobent le Modèle Standard. Certains effets de ces théories seraient caractérisés par de nouvelles particules avec des masses inférieures au TeV sans doute bientôt accessibles. Le grand collisionneur proton-proton LHC du CERN en construction doit être l'instrument permettant d'explorer le mieux possible cette nouvelle zone d'énergie.

## Le secteur électrofaible

La validité du Modèle Standard a pu être démontrée à LEP-I (et au SLC et au TeVatron) avec une très grande précision. La théorie décrit toutes les données, dans leurs détails. Une très large variété d'analyses a permis de mesurer les paramètres de la théorie à un degré tel que par exemple : une estimation indirecte de la masse du boson de Higgs  $m_H$  ( $\approx 300$  GeV) est obtenue par la détermination de  $\sin^2\theta_{\text{eff}}$ , paramètre caractérisant les asymétries observées au niveau de la résonance Z et mesuré à LEP-I avec une précision de l'ordre du pour mille.

Dans le cadre du Modèle Standard dans sa version minimale il ne reste qu'une inconnue, mais elle est de taille : *le boson de Higgs* qui n'a pas été observé jusqu'à une masse de 65 GeV à LEP-I et qui est actuellement recherché à LEP-II. Mais, comme on l'a vu plus haut, ce Modèle est incomplet et de nouveaux phénomènes doivent apparaître.

## Le secteur de l'interaction forte

La Chromodynamique Quantique (QCD), théorie de jauge décrivant l'interaction forte, a pu, ces dernières années, être testée de manière plus quantitative. De nouvelles approches, tant expérimentales que théoriques, ont conduit à une détermination de sa constante de couplage  $\alpha_s$  à la masse du Z avec une précision de quelques pour cents. Les modèles de fragmentation développés à plus basses énergies ont pu décrire l'essentiel des gerbes hadroniques de hautes énergies, sans pour autant demander une redéfinition complète de leurs paramètres. La structure fine des gerbes a pu être sondée et reproduite par des modèles qui reposent sur QCD. Pour citer un exemple, il a été possible d'isoler des échantillons de gerbes produites par des gluons et de les comparer aux gerbes de quarks.

L'interaction forte sera étudiée en détail plus loin (chapitre 2 et 3).

Il est cependant frappant de constater ici que les mesures de précision comme celle de  $\sin^2\theta_{\text{eff}}$  sont maintenant souvent limitées par notre manque de maîtrise de l'interaction forte.

## Les traits généraux du Modèle Standard

Une caractéristique remarquable du Modèle Standard est qu'il impose une interpénétration des deux secteurs électrofaible et fort. En effet, la quantification de la théorie électrofaible n'a de sens que si les leptons et les quarks sont regroupés en familles.

Le nombre de familles à neutrinos non-lourds a été déterminé à LEP avec une grande précision ( $N_F = 3 \pm 0,5\%$  près). Ce résultat indique que, s'il existe une quatrième famille de leptons et de quarks, alors elle n'est pas du type des trois précédentes : son neutrino associé doit être plus lourd que  $m_Z/2$ .

L'existence du top a pu être décelée à travers les effets quantiques de la théorie qui impliquent des corrections très faibles, mais mesurables en pratique. La masse du quark top a ainsi pu être déduite de l'ensemble des mesures de précision réalisées ces dernières années. Le quark top lui-même, qui a été l'objet d'une longue traque, a été mis en évidence directement auprès du TeVatron ( $m_{\text{top}} = 175 \pm 10$  GeV). La détermination indirecte, obtenue avec les données d'annihilation électron-positron, est en excellent accord avec la mesure directe réalisée plus tard avec les données d'annihilation proton-antiproton. *Cet accord constitue sans doute le résultat le plus significatif des dix années écoulées.* Il indique que le Modèle Standard est à même de décrire la structure quantique électrofaible de la nature et il fournit ainsi le fondement expérimental décisif des théories de jauge.

La composante électrofaible à courant chargé des interactions entre quarks fait intervenir des constantes qui sont les éléments d'une matrice de mélange (dite CKM). Les éléments de cette matrice, comme tous les autres paramètres du Modèle Standard, doivent être déterminés expérimentalement avant de pouvoir être comparés à d'éventuelles prédictions de théories unifiées.

Pour un nombre de familles supérieur ou égal à trois, le Modèle Standard (à travers la matrice CKM ci-dessus) entraîne une brisure naturelle de la symétrie CP, et peut de ce fait expliquer qualitativement la violation de CP observée actuellement dans le système des  $K^0$ .

Les tests quantitatifs concernant la violation de CP restent cependant peu nombreux. En particulier aucun effet indiscutable n'a encore été observé concernant la violation directe de CP dans les  $K^0$ , l'effet étant extrêmement ténu et difficile à mesurer...

Les progrès réalisés dans la détermination des éléments de matrice CKM sont encore loin de permettre de démontrer que la violation de CP prend bien sa source dans le Modèle Standard. Le problème principal est d'abord de nature théorique ; quoique des avancées significatives aient été réalisées, on ne comprend toujours pas suffisamment l'interaction forte pour corriger ses effets. Par ailleurs, le Modèle Standard prédit une violation de CP dans d'autres systèmes que celui des  $K^0$ , comme celui des  $B^0$ . Sa mise en évidence sera donc très importante.

### Les développements techniques

Les expériences futures, décrites au paragraphe 1.2 (prévues par exemple auprès des usines à B ou du LHC), sont actuellement en cours d'étude, ainsi que les accélérateurs associés. De nombreuses techniques se sont développées à ces occasions.

- Le Tevatron et HERA ont des aimants dipolaires supra-conducteurs. L'expérience acquise sera utilisée par l'anneau de collision pp au LHC.

- De nombreux développements concernant les méthodes d'accélération d'électrons, comme ceux reliés aux cavités supra-conductrices ont prospéré. Par ailleurs, l'intérêt exprimé par les physiciens pour un futur collisionneur linéaire  $e^+e^-$  d'énergie totale  $\sim 500$  GeV a conduit à effectuer (partout dans le monde : aux États-Unis, au Japon et en Europe) un très gros effort de R & D dans le but de le définir. Parallèlement, des procédés plus futuristes d'accélération basés sur des faisceaux laser dans un plasma sont développés.

- Des développements importants concernant les détecteurs ont eu lieu ces dernières années, suscités en particulier par la préparation des expériences LHC. L'utilisation intensive des circuits intégrés ASIC s'est étendue. Les détecteurs LHC, en particulier, nécessitent un développement en

électronique résistante aux radiations (comme DMILL). La préparation de ces détecteurs a également généré de nouvelles méthodes de travail et de gestion de programmes adaptés à la taille de ces projets.

### Les pistes ouvertes

Il faut citer en particulier le fait que les trois constantes de couplages électrofaible et fort, quand on projette leurs valeurs aux très hautes énergies, ne se croisent pas en un point unique d'unification. Par contre, elles peuvent se rencontrer très aisément dans le cadre étendu du Modèle Standard Super-Symétrique Minimal (MSSM) avec une brisure de la *supersymétrie* (symétrie associant bosons et fermions) de l'ordre du TeV. Les théories liées à cette symétrie, étroitement connectées à la gravitation, peuvent aider à comprendre pourquoi l'échelle de masse de la théorie électrofaible ( $\sim m_W$ ) est très inférieure à l'échelle d'unification  $m_U$ . Ces théories conduisent à associer aux particules habituelles d'hypothétiques superpartenaires qui en diffèrent par le spin et par la masse, tel le squark qui est le partenaire du quark ou le gluino qui est celui du gluon. Ces superpartenaires, dont la masse est sans doute  $> 1$  TeV, sont actuellement recherchés activement au LEP et au Tevatron et le seront également plus tard au LHC.

La recherche d'effets d'une physique au-delà du Modèle Standard s'effectue sur deux fronts :

- On essaie de mettre en évidence directement de nouvelles particules (comme les particules supersymétriques et le boson de Higgs) auprès d'accélérateurs comme HERA, LEP, le Tevatron ou le LHC.

- On essaie de mettre en évidence des différences entre les prédictions précises du Modèle Standard et les mesures expérimentales. Elles pourraient alors s'expliquer par une modification des prédictions dans le cadre de modèles différents. Les mesures de précision à LEP/SLC ont été citées plus haut, mais les désintégrations rares de  $\mu$ , K ou B, la violation de CP, la désintégration double beta (voir chapitre 4) et le moment dipolaire électrique du neutron en particulier peuvent contraindre

différents modèles. Actuellement il n'existe aucune déviation expérimentale significative, mais l'écart (faible) entre la mesure à LEP du taux de désintégration du Z en quarks b et la prédiction nous incite à être vigilants.

## 1. 2 LES GRANDES ÉTAPES À VENIR

Les étapes à venir sont actuellement perçues comme devant être les suivantes :

### • 1996-2000

Exploitations de LEP-II par les quatre expériences (ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL) y fonctionnant qui ont été perfectionnées, en particulier dans le domaine de la détection des vertex secondaires grâce à des détecteurs en silicium. Démarrage de DA NE. Premières prises de données de HERA-B (à DESY), du nouvel injecteur du TeVatron, montée en luminosité de CESR, et démarrage de PEP-II et de KEK-B. Décision concernant la construction d'une usine  $\tau$ /charm à Beijing.

- LEP II va fonctionner jusqu'en 1999. Il devrait être à même de contribuer aux mesures de précision en déterminant la masse du W avec une précision de l'ordre de 40 MeV, voisine de celle visée par le TeVatron avec son nouvel injecteur. LEP II pourra également étendre le domaine couvert dans la recherche du boson de Higgs jusqu'à 100 GeV, zone où les modèles supersymétriques commenceront à être testés sérieusement. Mais en abordant un nouveau domaine d'énergie, il convient d'être attentif. Les grandes surprises sont toujours possibles.

- En 1997, devrait être effectif le démarrage du collisionneur italien électron-positron DA NE – une usine à mésons K – qui se propose de continuer à explorer la violation de CP dans ce système, avec une nouvelle méthode expérimentale (en parallèle avec des expériences plus "standard" au CERN et à Fermilab).

- En 1998, le détecteur HERA-B va commencer à fonctionner. Son objectif est d'observer la viola-

tion de CP dans le système  $B_0\bar{B}_0$ . La précision de mesure escomptée est modeste, mais peut s'avérer suffisante pour permettre à cette expérience d'être la première à mettre en évidence la violation de CP dans ce système. Un autre intérêt de l'expérience est de tester en grandeur réelle certaines des techniques envisagées pour l'expérience LHC-B qui sera installée au LHC et dédiée à la physique des B.

L'année 1999 sera une année charnière : elle verra une remontée très forte de la Physique des particules aux États-Unis, avec les démarrages successifs suivants :

- Le TeVatron avec son nouvel injecteur : il sera le seul à avoir accès au top, qui plus est avec des statistiques importantes, jusque vers 2005. Il mesurera de façon très précise la masse du W et recherchera de façon intensive la Supersymétrie (tout en scrutant les signes de violation de CP dans les paires  $b\bar{b}$  produites).

- La montée en luminosité de CESR : combinée à un rajeunissement de son détecteur unique, elle lui ouvrira une fenêtre nouvelle sur la physique du B.

- Le démarrage des collisionneurs électron-positron asymétriques PEP II ET KEK-B, usines à B pouvant mesurer les paramètres liés à la violation de CP aux États-Unis et au Japon à l'aide des expériences BABAR et BELLE.

D'autre part, c'est vers 1998 que la Chine devrait prendre la décision de se lancer ou non dans la construction d'une usine  $\tau$ /charm, collisionneur électron-positron à haute luminosité permettant de créer un très grand nombre de particules charmées et de leptons  $\tau$ .

A la fin du siècle, mais peut-être avant, les diverses expériences de recherche et de développement des techniques nécessaires à la réalisation du prochain collisionneur linéaire électron-positron (elles ont lieu partout dans le monde, aux États-Unis, au Japon, en Europe) devraient être suffisamment avancées pour permettre de définir la machine à construire.

Par ailleurs, cette période sera également fortement marquée par la construction des expériences LHC, en particulier ATLAS et CMS, qui ont vocation de couvrir l'ensemble de la physique accessible. La communauté espère que les discussions entre le CERN et les pays non membres permettront d'effectuer la construction de la machine en une seule étape et d'accélérer celle des détecteurs. Pour l'expérience LHC-B, des développements sont encore nécessaires avant de finaliser le détecteur qui devra mesurer les paramètres caractérisant la violation de CP pour les mésons B avec une précision inégalée.

Notons que, parallèlement aux grands collisionneurs, un effort sera fait dans d'autres directions comme celle, par exemple, de la physique des K au Japon et aux États-Unis.

De même la construction d'un ensemble décélérateur d'antiprotons aura lieu au CERN et permettra d'étudier les propriétés de l'antihydrogène (découvert il y a moins d'un an au CERN) – et l'effet de la gravité appliqué à l'antimatière.

- 2000

Arrêt de LEP II. La période qui va suivre l'arrêt de LEP II et qui précédera l'arrivée du LHC sera principalement consacrée à l'analyse des données de LEP et à l'exploitation des machines décrites ci-dessus qui devraient alors fonctionner, comme le TeVatron avec son nouvel injecteur ou les usines à B.

- 2005

Démarrage du LHC qui sera l'outil privilégié pour aborder les questions liées à la brisure de symétrie électrofaible (boson de Higgs ?) et à la supersymétrie. À ce moment, vraisemblablement, la construction d'un collisionneur linéaire dont on espère qu'il complétera les études/mesures effectuées au LHC pourrait avoir été décidée.

La construction des trois expériences CMS, ATLAS et LHC-B (pour ALICE, voir au chapitre 3) sera terminée, et une décennie d'exploitation de données pourra ainsi commencer.

## 2 - LA PHYSIQUE HADRONIQUE

La physique hadronique est à la frontière entre la physique nucléaire et la physique des particules. Le thème d'étude est la compréhension des interactions fortes entre hadrons qui sont décrites par la théorie QCD – ChromoDynamique Quantique, et la manière dont les quarks et les gluons (bosons vecteurs de l'interaction) s'organisent pour former les hadrons. Selon la résolution spatiale avec laquelle on sonde la matière, on observera des objets élémentaires libres (limite de la *liberté asymptotique*) ou des objets composites et non colorés (limite du *confinement*), ces derniers étant décrits par le régime non perturbatif de QCD.

Le principal enjeu actuel et à long terme est de joindre ces deux domaines en étudiant l'évolution de l'un à l'autre en insistant spécialement sur le domaine non-perturbatif et la compréhension du confinement, en connection très étroite avec les évaluations théoriques, en particulier basées sur les calculs de QCD placés sur réseau.

### 2. 1 LA SPECTROSCOPIE DES HADRONS

La structure hadronique peut être étudiée par des méthodes spectroscopiques. En particulier QCD prédit des états purement gluoniques ("glueballs"). La recherche de ces états a constitué un effort très important de la communauté des spectroscopistes ces dernières années. Le  $f_0(1500)$  qui a été étudié par l'expérience Crystal Barrel à LEAR au CERN pourrait être un mélange entre le "glueball" de masse la plus faible, et un autre méson. Les recherches des "glueballs" vont continuer encore, en particulier dans les désintégrations du charmonium  $J/\psi$  à BEPC.

Un programme sur la nature des résonances baryoniques (états avec ou sans gluons) sera engagé auprès du Jefferson Lab TJNAF (précédemment appelé CEBAF) avec le détecteur CLAS.

La spectroscopie de hadrons peut également se développer auprès de collisionneurs  $e^+e^-$  comme des "usines  $e^+e^-$  à beauté" ou des "usines à tau-charme". Notons que la mise en œuvre, dans le cadre de HQET, de techniques de calcul adaptées au traitement des quarks lourds va permettre des tests plus détaillés de la théorie.

## 2. 2 LES FONCTIONS DE STRUCTURE

Les expériences de diffusion inélastique sont un outil efficace pour étudier la structure de la matière. HERA, qui est l'unique collisionneur électron-proton existant, est une machine privilégiée pour sonder la structure interne du proton dans de nouveaux domaines cinématiques. Les densités de quarks et de gluons (appelées *fonctions de structure*) dans le proton sont fonction de  $Q$  (transfert d'impulsion) et de la variable de Bjorken  $x$ , la fraction du moment du proton emportée par le constituant interagissant. HERA a étendu le domaine cinématique de deux ordres de grandeur en  $x$  et  $Q^2$  par rapport aux expériences sur cibles fixes du CERN et a déjà permis de mesurer au niveau de quelques pour cents la fonction de structure  $F_2(x, Q^2) = d\sigma/dxdQ^2$ . On a pu déterminer la densité de gluons dans le proton et tester les "prédictions" de QCD perturbatif. Le domaine cinématique va être bientôt encore étendu, en particulier grâce à une détection de l'électron diffusé à plus petit angle. Signalons également l'observation d'événements où aucune énergie n'est déposée dans une grande région de rapidité dans la direction du proton (intervalle en rapidité). Ces événements trouvent une explication décrite en terme d'échange du *Poméron*.

À HERA et au LEP, la fonction de structure du photon est aussi étudiée et permettra de tester QCD et la transition entre les régimes perturbatifs et non perturbatifs. LEP200 donnera accès aux collisions photon-photon qui permettront de contraindre les paramétrisations de densités partoniques du photon.

L'intérêt pour la mesure de la *fonction de structure polarisée*  $g_1$  en diffusion profondément inélastique de leptons polarisés sur cible polarisée a été motivé par le résultat de l'expérience EMC du

CERN en 1988 : les quarks ne portaient qu'une très petite fraction du spin du proton. Grâce aux progrès techniques réalisés sur la polarisation des cibles et des faisceaux, de nouvelles expériences performantes utilisant le faisceau d'électrons du SLAC et le faisceau de muons du CERN (SMC) ont été réalisées pour vérifier et dépasser le résultat d'EMC. La possibilité de disposer de cibles de neutrons polarisés par l'intermédiaire de cibles nucléaires permettait aussi de tester pour la première fois la règle de somme de Bjorken. Cette équation relie les intégrales sur  $x$  de  $g_1^p$  (proton) et  $g_1^n$  (neutron) à la constante de couplage d'interaction faible. Considérée comme fondamentale en QCD, cette règle de somme a été vérifiée à mieux qu'un écart-type par les expériences actuelles après prise en compte des corrections d'ordre supérieur de QCD. Ces expériences montrent aussi que *les quarks portent environ un tiers du spin du nucléon*.

Les perspectives dans le domaine de la diffusion inélastique polarisée portent sur plusieurs axes de recherche. À court terme, les mesures se poursuivent, au SLAC et au CERN (fin de SMC), pour améliorer la précision et étendre le domaine couvert en  $x$  et  $Q^2$ . Un programme de même nature est en cours de réalisation par la collaboration HERMES à DESY, en diffusant les électrons de HERA sur un jet gazeux interne. À plus long terme, des mesures à très petit  $x$ , par exemple à HERA, en disposant de protons polarisés dans l'anneau, permettraient de résoudre les incertitudes liées à l'extrapolation des données à bas  $x$ . Enfin, des propositions d'expériences sont en cours d'élaboration au SLAC, à l'AGS et au CERN pour déterminer la fonction de structure polarisée des gluons, nécessaire à une compréhension complète de la structure en spin du nucléon.

À  $Q^2=0$ , le test de la règle de somme reliant la structure en hélicité des sections efficaces de photoabsorption au moment magnétique anormal du nucléon (dite de Drell-Hearn-Gerasimov) sera engagé en utilisant des cibles (de protons et neutrons) polarisées et des faisceaux de polarisés dans deux programmes de mesure : auprès de MAMI (Mayence) et ELSA (Bonn), et auprès de LEGS (Brookhaven) et de GRAAL (Grenoble).

## 2. 3 DES ÉNERGIES INTERMÉDIAIRES VERS LA PHYSIQUE SUBNUCLÉONIQUE

À SATURNE, grâce aux qualités de ses faisceaux de hadrons polarisés, un programme important sur l'interaction NN et les résonances (effet du milieu nucléaire, propagation, influence du spin, ...) a été mené et interprété en termes de degrés de libertés nucléonique et mésonique. Parallèlement, des expériences sont menées auprès de machines à électrons avec des énergies de l'ordre du GeV pour déterminer les facteurs de forme électromagnétique des nucléons et des noyaux légers et les corrélations dans les noyaux. Dans le domaine en moment transféré ( $Q$ ) étudié, plusieurs effets ont été mis en évidence (limite d'une description du noyau en termes de particules indépendantes, courants d'échange mésoniques, ...). La séparation des facteurs de charge et quadrupolaire du deuton, dans un domaine de transfert sensible à la description à courte portée du noyau, a aussi pu être faite. Dans plusieurs expériences, l'apport des observables de polarisation s'est révélé déterminant.

Durant la prochaine décennie, le Jefferson Lab sera le laboratoire privilégié où se fera l'étude de la matière hadronique à l'échelle des *quarks constituants*. Cet accélérateur fournit un faisceau intense (200  $\mu$ A) d'électrons, à l'énergie nominale de 4 GeV ainsi que des faisceaux de  $\gamma$  monochromatiques. Le cycle utile de 100 % rend possible les expériences *exclusives* où la détection en coïncidence des particules émises permet de sélectionner et d'étudier les phénomènes les plus intéressants. Ses possibilités techniques lui permettant d'atteindre dans un futur proche des énergies de l'ordre de 6 GeV, TJNAF est donc une étape importante dans le mouvement de montée en énergie vers ELFE. Les thèmes de physique, qui y seront étudiés, sont multiples : facteurs de forme du neutron, des mésons ou relatifs à l'excitation de résonances baryoniques, facteurs de forme des noyaux légers et étude des corrélations à courte portée dans les noyaux, violation de parité en liaison avec la composante étrange du nucléon, polarisabilité du proton. L'extension à plus grand  $Q$  (et donc à plus courte distance) de la mesure des observables permettrait d'être sensible aux degrés de liberté subnucléoniques des baryons, au caractère hybride de certains états, voire au

caractère plus ou moins précoce de la validité du régime perturbatif de QCD.

Concernant le thème de l'étrangeté, un large programme est aussi entrepris à SATURNE, à DA NE, et avec les nouveaux faisceaux de d'énergie 300-1500 MeV et fortement polarisés de GRAAL (ESRF, Grenoble). L'étude de la production et des modes de décroissance rares du  $\eta$  et des kaons et la photoproduction d'étrangeté s'inscrivent dans le cadre de processus hadroniques à basse énergie que la théorie des perturbations chirales permet de relier aux observables non-perturbatives de QCD.

## 2. 4 UNE PERSPECTIVE PRIVILÉGIÉE : ELFE

Les récentes avancées dans le domaine des accélérateurs supra-conducteurs permettent de proposer une nouvelle stratégie expérimentale, basée sur l'étude des réactions exclusives dures jusqu'alors pratiquement irréalisables, pour comprendre le confinement.

L'enjeu de ce programme est la compréhension du confinement par la mesure de la fonction d'onde des quarks à l'intérieur des hadrons (nucléons, pions, etc.). Vus d'un repère se déplaçant à la vitesse de la lumière, ceux-ci sont décrits par une superposition d'états (3 quarks, 3 quarks + 1 gluon, etc) pour le nucléon par exemple. La composante la plus simple (3 quarks) peut être isolée dans une réaction exclusive dure. Cette étude sera menée dans des expériences de diffusion élastique d'électrons, de diffusion Compton virtuelle ou réelle ainsi que d'électroproduction de mésons.

Le programme de *transparence de couleur* est un autre aspect important de l'étude du confinement. Il consiste à sélectionner, par une diffusion élastique à grand transfert, la composante la plus simple du proton et d'observer l'apparition progressive des composantes plus complexes qui, en se superposant, vont former le proton normal. On utilise pour cela le noyau comme un filtre dont on peut faire varier les dimensions. En effet, les diverses composantes interagissent différemment

avec la matière nucléaire, ce qui modifie l'absorption du proton par le noyau.

C'est pour réaliser les expériences évoquées ci-dessus que le projet ELFE (Electron Laboratory For Europe) a été conçu après la recommandation de NuPECC. ELFE serait un accélérateur délivrant un faisceau d'électrons d'une énergie de 15 à 30 GeV, d'une intensité de 30 mA avec un fort cycle utile. Ces caractéristiques permettraient de continuer le programme commencé au Jefferson Lab.

Une solution technique actuellement à l'étude serait d'implanter ELFE au laboratoire DESY (Hambourg) dans une structure plus large qui utiliserait certaines installations existantes, permettant de réduire le coût du projet. Ainsi ELFE serait constitué d'un accélérateur linéaire supra-conducteur de 30 GeV qui servirait d'injecteur pour l'anneau HERA utilisé comme anneau de lissage. Cette proposition élargirait considérablement la communauté intéressée par ce projet, car le linéaire de 30 GeV pourrait d'une part constituer la première section du collisionneur linéaire  $e^+e^-$  supra-conducteur TESLA, et d'autre part serait utilisé pour alimenter un laser à électrons libres LEL délivrant un faisceau cohérent dans la gamme du nanomètre. Les perspectives d'applications industrielles de pointe d'un tel laser, également à l'étude au Jefferson Lab, sont immenses, mais son fonctionnement exige un faisceau d'électrons de 30 GeV d'une qualité d'émission que seul un accélérateur supra-conducteur peut produire. La convergence d'intérêt des communautés ELFE, TESLA, LEL est donc manifeste.

### 3 - PHYSIQUE DE LA MATIÈRE NUCLÉAIRE

Pendant des décennies, la physique nucléaire s'est attachée à l'étude de la matière nucléaire telle qu'elle apparaît dans notre environnement, c'est-à-dire sous la forme de noyaux assez stables et proches de leur état fondamental. Désormais, la physique nucléaire étudie la matière loin de son équilibre en faisant varier 3 paramètres principaux :

son *énergie d'excitation* (densité baryonique et densité d'énergie), son *spin* (vitesse de rotation), et son *isospin* (rapport du nombre de protons au nombre de neutrons). Les trois sections suivantes présentent les grandes orientations de la recherche mondiale dans ces domaines.

#### 3. 1 MATIÈRE NUCLÉAIRE CHAUDE ET DENSE

La compréhension de la formation de la matière à partir de ses constituants les plus fondamentaux constitue l'enjeu scientifique de ce programme.

Depuis les années 1970, la mise en service dans le monde d'accélérateurs d'ions lourds de plus en plus performants permet d'explorer, dans des gammes très étendues, l'énergie d'excitation déposée dans les systèmes nucléaires formés lors de la collision de deux ions lourds. Ainsi, à travers l'étude des propriétés fondamentales de la matière nucléaire, on aborde l'étude d'objets stellaires denses (étoiles à neutrons) ou chauds (explosion de supernovae, matière primordiale) et de leur évolution. Les accélérateurs les plus en vue actuellement sont le GANIL à Caen, SIS à Darmstadt, AGS à Brookhaven et le SPS au CERN, et bientôt le RHIC à Brookhaven, puis le LHC au CERN, couvrant un vaste domaine en énergie allant de quelques dizaines de MeV par nucléon à quelques TeV par nucléon.

Les propriétés attendues et observées de la matière nucléaire varient en général de manière douce, lorsque l'on augmente son énergie d'excitation ; cependant, pour des valeurs bien définies, des ruptures dans ces évolutions sont prédites. La majeure partie des programmes des grands laboratoires dans le monde s'est structurée autour de la recherche et de l'étude de ces phénomènes critiques (parfois trop rapidement appelés transitions de phase).

La première transition est d'abord la perte de cohésion des nucléons entre eux (réminiscence de la transition d'un liquide vers un gaz), dissociation attendue aux énergies accessibles en Europe au

GANIL ou à SIS (plusieurs dizaines de MeV par nucléon incident). La seconde est la dissociation des nucléons eux-mêmes en quarks et gluons (analogue à la dissociation d'un gaz d'atomes en plasma d'ions et d'électrons) prédite à des énergies beaucoup plus élevées, comme celles du RHIC et du CERN (plusieurs centaines de GeV). Ces deux transitions diffèrent considérablement par leurs signatures expérimentales.

La dissociation du noyau se produit avec émission de particules légères, de gammas et de fragments. Les signatures de comportement critique sont recherchées dans l'analyse statistique des produits détectés et dans leurs corrélations spatiales ou dynamiques. Les lieux privilégiés pour cette étude sont le MSU aux États-Unis, le GSI à Darmstadt, et le GANIL ; la France dispose des détecteurs les plus performants au monde, comme le multidétecteur INDRA ou comme TAPS (commun avec des laboratoires européens). Désormais, de nombreuses données de très grande qualité sont disponibles, et les années à venir seront dédiées à l'analyse approfondie des résultats pour sélectionner les événements les plus significatifs. Déjà, on a pu mettre en évidence la formation de noyaux proches de l'équilibre thermodynamique à des énergies d'excitation très élevées. La connaissance de l'équation d'état de la matière nucléaire a ainsi fortement progressé (densité de niveaux des noyaux chauds, module d'incompressibilité, limite en énergie des noyaux). Récemment, les processus de multifragmentation et de vaporisation ont été expérimentalement établis (explosion du noyau non réductible aux processus de fission et d'évaporation bien connus depuis des décennies). La détermination des caractéristiques thermodynamiques des noyaux chauds proches de leur régime critique est l'axe de recherche prioritaire des prochaines années.

La dissociation (le déconfinement) des nucléons, est attendue à des énergies telles qu'un nombre considérable de particules ou de résonances est créé par la collision : la théorie prédit que les taux de production de ces particules, leurs caractéristiques dynamiques, peuvent être très différents selon qu'un plasma quark-gluon est formé ou non. Les signatures du plasma de quarks et de gluons sont donc à rechercher dans les variations du processus de création des particules, en

particulier de celles produites dans la phase la plus énergétique de la réaction. Les faisceaux actuellement disponibles à Brookhaven (AGS) et au CERN (SPS) ont des énergies à peine suffisantes pour former le plasma de quarks et de gluons : cette physique aura son plein développement au tournant du siècle prochain, lorsque le RHIC et le LHC seront en fonctionnement ; une grande activité autour des détecteurs associés (en particulier ALICE pour le LHC) est en cours. Les faisceaux de plomb actuellement disponibles au CERN permettent déjà de progresser vers la compréhension de phénomènes tels que d'une part l'étude de la suppression de la résonance  $J/\psi$  dans la matière nucléaire très chaude et, d'autre part, l'observation de la formation de baryons triplement étranges à des taux inattendus. Très récemment – cela mérite confirmation –, une suppression inattendue du  $J/\psi$  beaucoup plus forte que celle étudiée depuis la fin des années 80 avec des faisceaux plus légers (qui peut être expliquée par les modèles d'absorption en milieu hadronique, ne faisant pas appel à la présence de plasma) a été observée au CERN et a relancé le débat. Aux énergies du LHC viendra s'ajouter l'étude de la suppression des résonances  $\rho$ ,  $\omega$ , ... alors accessibles à la mesure.

### 3. 2 STRUCTURE NUCLÉAIRE AUX LIMITES

L'étude de la structure nucléaire s'est considérablement enrichie depuis quelques années par la possibilité de créer, *via* des modes d'excitation individuels ou collectifs, des noyaux dans des états extrêmes d'énergie d'excitation, de vibration, de rotation ou d'asymétrie neutron-proton.

Ainsi les Résonances Géantes dans les noyaux (de type multiphonons, géante dipolaire "chaude" ou monopolaire-isovectorielle...) sont une manifestation spectaculaire de mouvements de *vibration* hautement collectifs dans un système à petit nombre de fermions.

L'étude de la structure du noyau est dominée par l'étude des noyaux en forte *rotation* (noyaux de haut spin), rendue possible par l'avènement de multidétecteurs de rayons  $\gamma$  de très grand pouvoir

de résolution associés à des systèmes d'acquisition en ligne sophistiqués. Le détecteur franco-britannique EUROGAM (en fonctionnement auprès du VIVITRON à Strasbourg jusqu'à la fin de 1996 et qui deviendra EUROBALL au sein d'une collaboration européenne élargie, en gagnant environ un ordre de grandeur en pouvoir de résolution) et l'ensemble américain GAMMASPHERE sont sans conteste les plus performants.

Cette évolution technologique a été impulsée par la découverte en 1985, à Daresbury, de la première cascade d'une vingtaine de transitions gamma régulièrement espacées en énergie, typique de la désexcitation d'états superdéformés de très haut spin.

Les propriétés de symétrie du champ moyen, stabilisé par les nucléons de valence, donnent aux noyaux diverses formes d'équilibre qui peuvent coexister (sphérique, "oblate" et "prolate"). La superdéformation (SD) – ellipsoïde ayant un rapport des demi-axes  $\sim 2$  – mise en évidence dans certaines régions de masse se révèle une forme particulièrement stable, même à très grande vitesse de rotation, comme l'ont montré les récentes mesures de moment quadrupolaire. Le moment d'inertie dynamique est une sonde extrêmement fine des effets nucléaires car sensible à tout changement dans la régularité des niveaux quantiques. Par exemple, dans les noyaux de la région de masse  $A \sim 190$ , il a permis clairement d'observer les effets de la présence de l'appariement nucléaire et de sa disparition à haut spin. L'existence de *bandes rotationnelles identiques* (présentant des énergies constantes d'un isotope à l'autre) s'est révélée un phénomène inattendu et excitant : il est probablement lié à l'effet de polarisation de certains nucléons de valence non appariés (que de récentes mesures de moment magnétique ont permis d'identifier sans ambiguïté).

Ces comportements sont liés à des *symétries intrinsèques du champ moyen nucléaire*, non encore élucidées et que les développements théoriques actuels s'efforcent d'approfondir. Par ailleurs, la découverte d'états "hyperdéformés" (déformations quadrupolaires pour laquelle le rapport des demi-axes de l'ellipsoïde vaut  $\sim 3$ ), prédits par les calculs, demeure un défi auquel le détecteur

européen EUROBALL pourrait permettre d'apporter une réponse positive.

Les bandes SD, constituées de cascades faiblement peuplées mais très pures, sont localisées dans une région d'énergie d'excitation (quelques MeV à quelques dizaines de MeV) où la densité des autres états nucléaires est extrêmement élevée. Au bas de chaque cascade, la transition, entre cette séquence très régulière et les états désordonnés correspondant au champ moyen peu ou pas déformé, s'est révélée très difficile à étudier en raison de sa très grande fragmentation. Déterminer avec précision l'énergie et le spin des états SD et, à terme, caractériser le *couplage entre états présentant des symétries différentes* est un des objectifs majeurs des recherches aux États-Unis et en Europe dans les prochaines années.

Les études des noyaux superdéformés en rotation avec EUROBALL et GAMMASPHERE sont essentielles pour la compréhension approfondie des symétries du champ moyen et donc des interactions effectives entre nucléons, notamment les termes d'appariement et ceux dépendant de la rotation.

Ainsi, les recherches sur les noyaux superdéformés et, celles sur les états nucléaires dans le continu seront bientôt réalisables sur l'accélérateur franco-hollandais AGOR. Enfin la possibilité de disposer de faisceaux radioactifs permettant de combiner les effets de spin et d'isospin va donner une impulsion toute nouvelle à l'étude de la structure nucléaire.

### 3. 3 NOYAUX EXOTIQUES ET FAISCEAUX SECONDAIRES

Ce domaine de la physique du noyau est en plein développement grâce à la disponibilité d'intenses faisceaux d'ions lourds – y compris d'isotopes rares – combinée, au plan de la détection, avec une innovation instrumentale : les spectromètres de recul (en particulier LISE au GANIL). Les réactions exploitées sont la fragmentation du projectile (GANIL, GSI, MSU ou RIKEN au Japon) ou encore la fission coulombienne de l'uranium auprès du SIS à GSI. Par ailleurs, les méthodes plus

traditionnelles de fragmentation de cibles (comme ISOLDE au CERN) continuent d'être exploitées avec succès.

Les expériences avec des noyaux exotiques permettent d'aborder de façon précise l'étude du noyau en fonction d'un degré de liberté nouveau : l'isospin ; ce degré de liberté décrit la dissymétrie entre le nombre de protons et de neutrons formant un noyau. Il est ainsi possible pour un même élément ( $Z$  fixé) de produire et d'étudier divers isotopes possédant un nombre différent de neutrons et donc parcourir, pour les noyaux légers, toute la gamme possible depuis le plus déficient en neutrons jusqu'au plus riche en neutrons. Grâce à ce balayage, on peut mesurer les propriétés de noyaux éloignés de la vallée de stabilité, au croisement des nombres magiques connus pour les noyaux les plus stables, et vérifier si ces nombres ont encore un caractère de renforcement de stabilité. A titre d'exemple, on peut citer récemment la mise en évidence des noyaux doublement magiques à la fois en nombre de protons et de neutrons  $^{78}\text{Ni}$  et  $^{100}\text{Sn}$ , la non stabilité de l'isotope doublement magique  $^{28}\text{O}$  ainsi que la disparition de la magicité autour de  $N = 28$  pour les isotones du  $^{48}\text{Ca}$ .

Par ailleurs, des mesures de masse de haute précision ont été réalisées grâce à de nouvelles techniques (trappes, cryostats, anneaux de stockage).

La variation du degré d'isospin pour une chaîne isotopique permet de contraindre très fortement les modèles nucléaires théoriques construits pour décrire des noyaux situés près de la vallée de stabilité nucléaire. Ces noyaux exotiques très éphémères (période radioactive très courte) jouent un rôle tout à fait privilégié puisqu'ils interviennent dans les processus explosifs de nucléosynthèse stellaire et sont donc responsables des abondances isotopiques observées dans l'Univers (cf. l'exemple des isotones de  $^{48}\text{Ca}$ ). Ainsi les propriétés (comme la masse et la durée de vie) de certains de ces noyaux permettent de valider ou non les modèles de nucléosynthèse élaborés par les astrophysiciens nucléaires.

Il y a quelques années, il a été mis en évidence que les noyaux légers de lithium et de béryllium, très riches en neutrons, de masse  $A = 11$  développaient un halo et que leur densité neutronique s'étendait à des distances anormalement grandes. Ces études se sont tout récemment poursuivies pour des masses plus élevées ( $A = 19$ ) et également pour les noyaux déficients en neutrons afin d'appréhender des phénomènes de halo de protons. On peut espérer produire et étudier d'autres systèmes à halo, leur étude offrant la possibilité unique d'approfondir nos connaissances sur la matière neutronique, l'interaction neutron-neutron, les systèmes à densité anormalement faible. Là encore l'interaction effective nucléaire, qui dépend de la densité nucléaire, devrait être affinée par les études futures.

Au cours de ces toutes dernières années un grand pas a été franchi dans le domaine de la production d'éléments lourds en utilisant les réactions de fusion froide. Ainsi on a mis en évidence récemment les éléments  $Z = 110, 111, 112$  à GSI. Les périodes de ces éléments, supérieures à la microseconde, permettent de les détecter et de les identifier sans ambiguïté. Toutefois il faut les produire aussi froids que possible de façon à ce qu'ils ne fissionnent pas lors de leur désexcitation. Les calculs théoriques, rendus de plus en plus fiables par ces études, confirment pour les éléments très lourds la prévision d'une zone de stabilité autour de  $Z = 114$  et  $N = 184$ . Ainsi ces éléments super-lourds, recherchés depuis plus de vingt ans, seraient peut-être accessibles dans le futur grâce aux faisceaux radioactifs puisque, eux seuls, permettent un choix adéquat du couple projectile-cible.

En effet, depuis quelques années il a été montré que les noyaux exotiques formés dans des réactions "primaires" pouvaient à leur tour servir de faisceaux pour induire des réactions "secondaires" encore plus exotiques. De tels faisceaux ont déjà permis d'étudier des excitations du noyau dans des conditions extrêmes d'isospin et de commencer à tester la limite de validité des modèles de base (modèle en couches et modèles collectifs) élaborés et perfectionnés progressivement à partir des noyaux proches de la stabilité. Ils devraient offrir un champ de recherche jamais atteint avec les faisceaux stables. En effet en disposant de faisceaux

secondaires radioactifs, il est possible de varier les combinaisons cible-projectile en fonction de la réaction que l'on souhaite étudier. Ainsi la dépendance en isospin de l'interaction effective pourra être complètement cernée. Ceci aura certainement d'importantes implications sur notre compréhension actuelle de la structure nucléaire, de ses symétries et de ses brisures puisque cette interaction effective est à la base de toute description théorique moderne.

Il convient cependant de souligner que les faisceaux secondaires disponibles aujourd'hui dans le monde (GANIL, RIKEN, MSU) ont des énergies supérieures à 25 MeV/nucléon et des qualités optiques très modestes. La communauté internationale de physique nucléaire a donc souhaité disposer, dans un avenir très proche, d'accélérateurs de faisceaux secondaires de façon à pouvoir induire des réactions par ces faisceaux. À très faible énergie (inférieure à 2 MeV/nucléon), un premier pas a été franchi en Belgique par la méthode d'une production à l'arrêt suivie d'une post-accelération. La France disposera dès fin 1998 de faisceaux post-accelérés avec l'ensemble SPIRAL dans la gamme d'énergie de 2 à 25 MeV/nucléon. Par ailleurs, une importante R & D est en cours à Grenoble avec le projet PIAFE 1 de façon à valider la méthode de production intense et prometteuse de noyaux très riches en neutrons par fission en utilisant le réacteur de l'ILL. D'autres projets sont à l'étude aux États-Unis et au Japon.

### **3. 4 LES OUVERTURES DE LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE**

La physique nucléaire a été et est traditionnellement une source très riche de techniques utilisées dans d'autres domaines (matériaux, biologie, médecine etc.). L'exploitation des faisceaux de protons ou d'ions pour le dépôt d'énergie ou de matière dans les matériaux ou tissus vivants, l'utilisation en biologie des techniques de détection de particules ou de rayonnements développées en physique nucléaire sont actuellement les axes majeurs de ces recherches. Dans le monde, de 15 à 30 % des temps de faisceaux des accélérateurs de la physique nucléaire y sont consacrés.

La physique des agrégats constitue un exemple frappant d'un domaine de physique transversal en émergence : celui des systèmes finis (ni trop petits ni trop grands) que l'on rencontre à toutes les échelles de l'univers et dont le noyau est l'exemple le plus caractéristique. Cette physique récente (développée par exemple, auprès d'accélérateurs adaptés à Orsay et Lyon) illustre l'impact de la physique nucléaire sur les autres disciplines.

Les agrégats sont des structures mésoscopiques rassemblant quelques dizaines à quelques milliers d'ions et, donc, intermédiaires entre la molécule et l'état liquide. Ils diffèrent par la nature des forces assurant leur cohésion : les agrégats de van der Waals d'hydrogène ou d'hélium, les agrégats "métalliques" de sodium, sont les plus étudiés. Ils partagent beaucoup de propriétés des noyaux à un facteur d'échelle près ; comme les noyaux, ce sont des gouttelettes ayant des structures en couches bien marquées, des modes collectifs d'excitation, de désexcitation et de fragmentation très comparables. Cette similitude a permis d'importer très efficacement dans la physique des agrégats, les concepts théoriques et des techniques d'accélération et de détection de la physique nucléaire. En outre, les agrégats accélérés sont déjà des outils très prometteurs pour l'étude des matériaux par leur faculté de déposer de l'énergie d'une manière cohérente et localisée à leur surface.

Une des applications les plus connues de la physique nucléaire est la production d'énergie nucléaire. Depuis les années 50, les physiciens nucléaires "académiques" avaient délaissé ces recherches au profit des organismes spécialisés ; on assiste actuellement à un regain d'intérêt lié d'une part à une demande du public concerné par le problème des déchets nucléaires, et d'autre part au manque de perspective des ressources énergétiques mondiales à moyen terme.

C'est ainsi que, dans la ligne d'études menées aux États-Unis et au Japon, l'IN2P3, le CEA et des organismes européens, dont le CERN, se sont engagés dans des recherches innovantes concernant les déchets (GEDEON), en particulier sur la possibilité d'utiliser un accélérateur de particules couplé à un système multiplicateur de neutrons, l'ensemble constituant ce qu'on appelle un système hybride,

pour produire de l'énergie et pour détruire certains déchets nucléaires.

Un système hybride a la propriété d'être sous-critique (valeurs de  $k$  entre 0.95 et 0.98) et de produire une énergie proportionnelle au nombre de neutrons apportés au système (neutrons de spallation obtenus par bombardement d'une cible par des particules légères de haute énergie). Le système hybride est donc théoriquement plus sûr et d'une plus grande flexibilité d'utilisation. Il présenterait les avantages suivants par rapport aux réacteurs classiques :

- risques d'accidents minimisés grâce à l'utilisation d'un accélérateur et d'un système sous-critique ;
- très faible production d'actinides car les réactions en "brûlent" une grande partie ;
- très faible production de  $^{239}\text{Pu}$  évitant ainsi la prolifération nucléaire ;
- peu de besoins de séparation isotopique.

La première expérience test, qui a été effectuée au CERN, a montré que le système peut produire de l'énergie et un gain de l'ordre de 30 a été mesuré justifiant ainsi sa dénomination "Amplificateur d'énergie".

En parallèle avec le projet de construction d'un prototype et les études expérimentales et théoriques qui y sont liées, d'autres projets axés sur l'utilisation du même concept pour la destruction de certains déchets nucléaires, en particulier les produits de fission à durée de vie longue, sont en cours.

Ainsi s'est constitué le programme TARC qui se prépare au CERN et à Grenoble dans le cadre d'une collaboration européenne (France, Italie, Grèce et Espagne) dirigée par C. Rubbia.

## 4 - ASTROPHYSIQUE, COSMOLOGIE ET PHYSIQUE SUBATOMIQUE

Au début des années 80, on parlait de *physique hors accélérateurs* dont le fleuron était la recherche de la désintégration du proton, suscitée par les théories de grande unification. Le domaine s'est considérablement enrichi, avec en particulier la question de la nature de la matière noire, et le terme de *physique des astroparticules* est apparu il y a quelques années. Si aucun de ces deux vocables ne décrit complètement les liens entre l'astrophysique, la cosmologie et la physique des particules, ces liens se resserrent chaque fois qu'un pas décisif est franchi dans la compréhension des phénomènes abordés dans l'un ou l'autre de ces domaines. Trois thèmes principaux, qui ne sont pas indépendants, vont nous servir de guide :

### • Les neutrinos sont-ils massifs ?

Dans le Modèle Standard minimal des particules, le neutrino est sans masse, mais, en tant que brique de matière (comme les quarks et les leptons chargés), il serait surprenant qu'il en soit ainsi. Une masse pour les neutrinos permettrait de fortement contraindre les extensions du Modèle Standard et le futur de la théorie. Mais le neutrino joue également un rôle clé en astrophysique (dans le Soleil, les explosions de supernovae ou comme possible source d'information sur des sources ponctuelles comme les noyaux actifs de galaxie AGN) et en cosmologie (lien entre la densité de l'Univers et la masse des neutrinos).

### • La matière noire

Les astrophysiciens sont presque unanimes aujourd'hui à penser que l'essentiel de la masse de l'Univers et une grande partie du halo de notre Galaxie sont sombres (échappent à l'observation). Deux directions complémentaires se dessinent : la matière noire est-elle baryonique, sous forme de naines brunes par exemple, ou non baryonique et

constituée de particules, les wimps (“weakly interacting massive particles”) qui pourraient ouvrir des perspectives vers les théories supersymétriques ?

### • L'étude des objets massifs

Les ondes gravitationnelles et le rayonnement à haute énergie  $> 1$  GeV ( $\gamma$ ,  $\nu$  ou rayons cosmiques chargés) sont des sources d'informations uniques sur la nature et le mécanisme de fonctionnement d'objets comme les pulsars binaires ou les AGN.

## 4. 1 LES NEUTRINOS

La question de la masse des neutrinos est primordiale, car a) elle est susceptible d'ouvrir des perspectives essentielles vers les extensions du Modèle Standard, et b) elle a de fortes implications cosmologiques. En effet, pour que la densité de l'Univers soit inférieure à la densité critique (correspondant à un univers ouvert), il faut que la masse du neutrino le plus lourd soit  $< 92 h^2$  eV où  $h$  est la constante de Hubble en unités  $100 \text{ km}^2 \text{ s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  ( $0,4 < h < 1$ ).

Les limites expérimentales actuelles sur la masse du  $\nu_e$  ( $\sim 5$  eV), du  $\nu_\mu$  ( $\sim 250$  keV) ou du  $\nu_\tau$  ( $\sim 23$  MeV) semblent difficiles à dépasser de manière significative. Une piste un peu moins directe permettra peut-être de gagner un ordre de grandeur pour les  $\nu_e$  : la radioactivité double beta sans émission de neutrino. L'observation de ce phénomène prouverait à la fois que le neutrino a une masse et est sa propre antiparticule (neutrino dit “de Majorana”). De nombreuses expériences sont en cours ou en projet. La meilleure limite actuelle est obtenue par la collaboration Heidelberg-Moscou avec une vingtaine de kg de germanium enrichi en  $^{76}\text{Ge}$  :  $m(\nu_e) < 1,1$  eV. Des projets utilisant du  $^{76}\text{Ge}$  (IGEX), du  $^{116}\text{Cd}$  (Heidelberg-Kiev) ou du  $^{130}\text{Te}$  (Milan) se préparent. La collaboration NEMO prévoit d'atteindre une limite de 0,1 eV avec 10kg de  $^{100}\text{Mo}$  et doit commencer à prendre des données en 1998 dans le Laboratoire Souterrain de Modane.

On peut également faire appel au mécanisme d'oscillation des neutrinos qui pourrait démontrer,

de manière indirecte, qu'ils ont une masse. Ce mécanisme permet à une des trois espèces de neutrinos de se transformer dans une autre. L'oscillation est fonction du rapport entre la distance parcourue et l'énergie du neutrino  $E$  ; elle est caractérisée par deux paramètres, la différence des carrés des masses des neutrinos ( $m^2 = m_1^2 - m_2^2$ ) et un angle de mélange. Les nombreuses sources de neutrinos possibles (accélérateurs ( $E$  entre 100 MeV et 1 TeV), réacteurs (entre 3 et 10 MeV), Soleil (entre 0 et 14 MeV), atmosphère (entre 1 et 10 GeV) pour les neutrinos issus des interactions de rayons cosmiques dans la haute atmosphère), permettent de sonder différentes échelles de  $m^2$  selon la distance à laquelle se trouve le détecteur.

Il existe aujourd'hui trois indications d'oscillation des neutrinos (sans doute incompatibles) à confirmer, citées ci-dessous par ordre décroissant de confiance :

- le déficit des mesures du flux de neutrinos solaires par rapport aux prédictions des modèles du Soleil ; ce déficit est aujourd'hui observé par quatre expériences (Chlore, Kamiokande au Japon, GALLEX et SAGE), plus ou moins sensibles aux différentes sources de neutrinos plus ou moins énergiques (pp,  $^7\text{Be}$ ,  $^8\text{B}$ ) ; l'effet MSW (extension du mécanisme d'oscillation lorsque les  $\nu$  traversent la matière du Soleil) est une explication séduisante (qui reste à démontrer) des résultats expérimentaux, attribuant une masse  $m(\nu_\mu) \sim 10^{-3}$  eV ;

- l'observation par Kamiokande d'un déficit du rapport des  $\nu$  atmosphériques  $(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu)/(\nu_e + \bar{\nu}_e)$  comparé aux prédictions liées au flux des rayons cosmiques entrant dans l'atmosphère ; une confirmation pourrait conduire à  $m(\nu_\mu) \sim 10^{-1}$  eV ;

- l'expérience LSND, à Los Alamos, annonce, au milieu d'un fort scepticisme, avoir observé des oscillations entre  $\bar{\nu}_\mu$  et  $\bar{\nu}_e$  qui pourraient induire  $m(\nu_\mu) \sim$  quelques eV.

Dans le domaine des neutrinos solaires, les prochaines années devraient apporter du nouveau : SuperKamiokande vient de démarrer au Japon, SNO doit démarrer en 97 au Canada ; ces deux expériences sont susceptibles de confirmer ou infirmer si l'effet MSW est la clé du problème des

$\nu$  solaires. Pour la suite, Borexino (sensible aux  $\nu$  du  ${}^7\text{Be}$ ) devrait être financé prochainement au Gran Sasso en Italie et HELLAZ (également sensible aux  $\nu_e < 1 \text{ MeV}$ ) est un projet très prometteur, actuellement en R & D.

Pour les neutrinos atmosphériques, Super-Kamiokande devrait clarifier la situation et compléter les résultats de Kamiokande. Dans le même domaine de paramètres d'oscillations, les expériences auprès des réacteurs sont attendues avec impatience ; la plus importante est aujourd'hui celle qui démarre auprès du réacteur de Chooz (Ardennes).

Auprès des accélérateurs, ce sont les expériences CHORUS et NOMAD, qui fonctionnent au CERN depuis 1995, qui semblent les plus importantes : elles recherchent des oscillations entre  $\nu_\mu$  et  $\nu$  et pourraient mettre en évidence des  $\nu$  de quelques eV. Une telle masse contribuerait de manière significative à la masse de l'univers, en accord qualitatif avec des modèles cosmologiques impliquant environ 30 % de matière noire chaude ( $\nu$ ) et 70 % de matière noire froide (WIMP's). On commence également à penser à des expériences placées très loin des sources de neutrinos. Le faisceau de neutrinos du CERN pourrait être utilisé avec un détecteur (comme ICARUS) placé au Gran Sasso en Italie (à 700 km).

Les neutrinos de supernovae, témoins privilégiés de la mort des étoiles massives, sont activement attendus, après l'observation d'une vingtaine d'interactions de  $\nu$  issus de SN1987A par Kamiokande et IMB. Outre SuperKamiokande et SNO, il y a aujourd'hui LVD et MACRO au Gran Sasso.

## 4. 2 LA MATIÈRE NOIRE

Le problème de la matière noire est une des principales interrogations de l'astrophysique actuelle. L'existence de cette matière manquante, représentant au moins 90 % de la masse de l'Univers, est attestée par plusieurs méthodes différentes. Il semble que cette matière invisible soit présente à toutes les échelles. Les solutions possibles à ce problème se divisent en deux catégories,

la première basée sur des objets formés à partir de matière baryonique, la deuxième comprenant les solutions non baryoniques, issues de la physique des particules.

La *matière noire baryonique* est recherchée au sein de notre Galaxie, des nuages de Magellan et de la galaxie d'Andromède en utilisant l'effet de microlentille gravitationnelle par les expériences AGAPE, EROS, MACHO et OGLE : lorsqu'un objet sombre passe par la même ligne de visée qu'une étoile, il joue le rôle de lentille pour l'observateur terrestre. La contribution trouvée semble faible.

Les deux principaux candidats à la *matière noire non baryonique* sont les neutrinos de masse très faible (cf. supra 4.1, matière noire "chaude") et les WIMP's (matière noire massive et "froide"). Le candidat le plus sérieux de ce dernier type est un neutralino, particule supersymétrique la plus légère dont la masse doit être supérieure à une vingtaine de GeV. Ces particules lourdes produisent par diffusion élastique sur un noyau du détecteur des énergies de recul de quelques keV. L'énergie de recul peut alors être détectée soit par échauffement du détecteur, à très basse température pour profiter de la très faible chaleur spécifique (c'est la méthode bolométrique utilisée dans EDELWEISS), soit convertie en lumière par scintillation dans des cristaux (type NaI ou  $\text{CaF}_2$ ) et mesurée par des photomultiplicateurs.

Les neutralinos peuvent être également détectés de façon indirecte. Ils peuvent être capturés par le potentiel gravitationnel du Soleil ou de la Terre et s'annihiler en paires de neutrinos qui seraient alors détectés par des expériences comme ANTARES, NESTOR, AMANDA, DUMAND et lac Baïkal.

Par ailleurs des mesures à grande échelle doivent être faites. Une distribution à grande échelle de la matière noire est une partie du programme MEGACAM de caméra CCD à grand champ pour le télescope CFHT. A l'échelle cosmologique, la matière noire se manifeste par son effet sur la géométrie de l'Univers. Les supernovae peuvent permettre d'évaluer la constante de Hubble  $H_0$  et éventuellement le paramètre de décélération  $q_0$ .

Des cartographies du ciel dans le domaine submillimétrique – avec une sensibilité près de 100 fois plus grande que celle du satellite COBE – devront avec COBRAS/SAMBA mesurer l'amplitude des anisotropies du fond diffus cosmologique (rayonnement fossile de corps noir). On pourra alors accéder à  $H_0$ ,  $q_0$  et au paramètre de densité de l'Univers  $\Omega_0$ .

### 4. 3 ETUDES DES OBJETS MASSIFS ET RAYONNEMENTS DE HAUTE ÉNERGIE

L'étude des particules émises par des régions lointaines de l'Univers nous apporte des informations sur les phénomènes extrêmement violents qui y ont lieu et qui accélèrent ces particules. Leur détection permet d'étudier les objets compacts dans lesquels la matière est soumise à des conditions exceptionnelles comme les AGN hébergeant probablement un trou noir géant, les supernovae et les étoiles à neutrons. Deux axes peuvent être distingués : la recherche d'ondes gravitationnelles et l'astronomie de haute énergie ( $\gamma$ , rayons cosmiques).

Plusieurs approches sont actuellement poursuivies en vue de permettre la détection d'ondes gravitationnelles. L'objectif premier est de mettre en évidence, directement, ce phénomène physique fondamental dont l'existence, prédite par la Relativité Générale, a été indirectement démontrée par l'étude d'un système binaire massif. L'approche la plus prometteuse consiste à réaliser des interféromètres de très grande sensibilité : deux grands projets sont en cours de réalisation, l'un en Europe (VIRGO), l'autre aux U.S.A. (LIGO). L'objectif second, plus ambitieux mais à plus long terme, est d'ouvrir une nouvelle voie d'exploration du cosmos : un observatoire international des sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles. Un très gros effort de R & D lié à ces détecteurs a actuellement lieu, et leur construction est en cours.

L'Astronomie de haute énergie est un champ d'étude interdisciplinaire en émergence où les efforts de R & D qui ont déjà donné des fruits sont encore nécessaires. Les activités de cet axe peuvent être classées en fonction de la particule messagère détectée :

#### Rayonnements X et $\gamma$

La gamme d'énergie couverte est très vaste : de  $10^2$  eV pour les X à  $10^{13}$  eV pour les rayonnements les plus énergétiques connus. L'observation à basse énergie se fait à l'aide de satellites (CGRO, INTEGRAL). L'extension des observations à des énergies plus élevées permet d'étudier la variété des mécanismes en jeu. Celle-ci peut être réalisée à l'aide des systèmes de détecteurs de grandes gerbes atmosphériques par imagerie, ou échantillonnage du front d'onde Cerenkov (CELESTE, CAT, THEMISTOCLE, HEGRA, Observatoire Whipple en Arizona, ...).

#### Neutrinos de haute énergie

Émis par des sources compactes du type AGN, ils ne peuvent être détectés que par des très grands détecteurs (on pense déjà à  $\sim 1$  km<sup>3</sup>). Une possibilité est d'instrumenter des grands volumes de glace (AMANDA) ou d'eau (NESTOR, DUMAND, lac Baïkal), pour détecter la lumière Cerenkov émise par les muons provenant de l'interaction de neutrinos. Des développements (ANTARES) sont entrepris en France, dans un esprit interdisciplinaire, en association avec les sciences de la mer.

#### Particules chargées cosmiques

Les rayons cosmiques dans la partie extrême du spectre d'énergie ( $E > 10^{19}$  eV) sont très rares mais extrêmement intéressants. Vraisemblablement extra galactiques, pointant dans la direction de leur source (étant donné leur énergie, ils ne sont que très peu déviés par les champs magnétiques galactiques et extra-galactiques), aucun mécanisme conventionnel ne semble convenir pour expliquer leur origine. Le projet d'Observatoire Auger a pour but de détecter ces particules cosmiques de hautes énergies au moyen de deux réseaux (en Argentine et aux États-Unis) composés chacun de 1500 détecteurs répartis sur 3000 km<sup>2</sup>. Par ailleurs la composante d'antimatière dans les rayons cosmiques de plus faible énergie ( $E \sim 10^{10}$  eV) pourrait être étudiée à partir de l'an 2001 à l'aide du détecteur AMS. Équipé d'un aimant permanent, il devrait alors être installé dans la Station Spatiale.

## 4. 4 L'ASTROPHYSIQUE NUCLÉAIRE

Le projet de l'astrophysique nucléaire est de rendre compte de l'abondance des éléments dans l'Univers grâce à des modèles d'évolution : évolution des premières minutes du Big-Bang, évolution d'une étoile, évolution d'une supernovae... La modélisation de ces phénomènes passe par la connaissance de sections efficaces dont certaines sont difficiles à mesurer, soit en raison de leur faible valeur à basse énergie, soit en raison de la nature instable des projectiles concernés.

Les études de ces dernières années ont été axées sur les processus explosifs de combustion, pour lesquels les noyaux radioactifs formés pendant la combustion n'ont pas le temps de décroître et sont impliqués dans la réaction suivante de capture de proton (ou d' ). Elles sont caractérisées par l'éclosion d'expériences utilisant des faisceaux radioactifs. Ces expériences concernent essentiellement :

- celles de Louvain-la-Neuve, où une machine spécifiquement dévolue aux expériences d'astrophysique nucléaire a été conçue et construite. Ces expériences ont concerné les réactions  $^1\text{H}(^{13}\text{N}, \ ) ^{14}\text{O}$  et  $^1\text{H}(^{19}\text{Ne}, \ ) ^{20}\text{Na}$ , toutes deux réactions du *processus CNO chaud*. Les développements de nouveaux faisceaux (  $^{18}\text{F}$  par exemple) sont en cours ;

- les réactions de break-up coulombien (GANIL, RIKEN), où, pour des objectifs similaires,

on étudie la réaction inverse (photo-dissociation d'un faisceau radioactif).

Ce travail réalisé avec les matériaux radioactifs (tant cibles que faisceaux) doit se poursuivre les prochaines années (faisceaux et cibles de  $^7\text{Be}$ , faisceau de  $^8\text{B}$ ... ), en particulier au moyen de SPIRAL.

Parallèlement d'autres études se poursuivent. Elles concernent soit les noyaux stables dont l'abondance est mesurée avec précision dans les étoiles, ce qui en fait des indicateurs précieux (isotopes d'oxygène par exemple) ; soit la grande question du taux de la réaction  $^{12}\text{C} + \text{ }^4\text{He}$  à la température de combustion de l'hélium qui est toujours présente de façon agaçante. Mettre dans des souterrains les machines consacrées à ces études est à l'ordre du jour.

Une autre approche est basée sur l'identification des noyaux dans l'Univers par l'observation de raies gamma nucléaires caractéristiques ( $E \sim \text{MeV}$ ). Déjà la détection de la raie caractéristique de la décroissance de  $^{26}\text{Al}$  a déclenché une réflexion sur la genèse de cet élément, et posé bien des questions sur les incertitudes des taux des réactions qui amènent à construire cet élément dans les novae ou supernovae. Les résultats du satellite COMPTEL, ainsi que la perspective du lancement en 2001 du satellite INTEGRAL, devraient déclencher un travail d'astrophysique nucléaire fortement couplé à la réflexion des astrophysiciens qui travaillent dans le domaine de la modélisation stellaire.

## Glossaire

- AGN : Active Galactic Nuclei
- AGAPE: Andromeda Gravitational Amplification Experiment (site d'observation : Pic du Midi)
- AGOR : Accélérateur Groningen ORsay : cyclotron supra-conducteur construit à Orsay, installé à Groningen (Hollande)
- AGS : Alternating Gradient Synchrotron (Brookhaven, USA)
- ALEPH : Apparatus for LEP PHysics : expérience fonctionnant au LEP
- ALICE : A Large Ion Collider Experiment : expérience ions lourds au LHC étudiant les collisions Pb Pb de 2.7 TeV/nucléon + 2.7 TeV/nucléon
- AMANDA : Antarctic Muon And Neutrino Detector Array
- AMS : AntiMatter Spectrometer
- ANTARES : Abyssal Neutrino Telescope And Research on Environment in deep Sea
- ATLAS : A Toroidal Lhc Apparatus : expérience LHC pp
- ASIC : Application Specific Integrated Circuit
- BABAR: Détecteur en construction qui sera installé sur le collisionneur  $e^+e^-$  PEP-II (Stanford, USA)
- BELLE: Détecteur en construction qui sera installé sur le collisionneur  $e^+e^-$  KEK-B (Tsukuba, Japon)
- BEPC: Beijing Electron Positron Collider (Pekin, Chine), collisionneur  $e^+e^-$  produisant des  $J/\psi$  et des  $\psi'$ . Le détecteur BES (BEijing Spectrometer) y est installé
- CAT : Cerenkov Array at Themis (Font Romeu)
- CELESTE : CErenkov Low Energy Sampling & Timing Experiment (Font Romeu)
- CERN : Laboratoire Européen de Physique des Particules (Genève). CERN est historiquement l'acronyme de Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
- CESR : Cornell Electron Storage Ring (Cornell, USA) : collisionneur  $e^+e^-$  = 5 + 5 GeV (Masse du  $e^-$ )
- CFHT : Canada France Hawaiian Telescope (site : Hawaï)
- CGRO : Compton Gamma Ray Observatory
- CHORUS : Cern Hybrid Oscillation Research apparatus (CERN)
- Matrice CKM : matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa reliant les quarks  $u^l = (u, c, t)$  aux quarks  $d^l = (d, s, b)$ . L'amplitude  $W^+ \rightarrow u^l d^l$  est proportionnelle à l'élément de matrice CKM entre  $u^l$  et  $d^l$ .
- CLAS : Cebaf Large Angle Spectrometer
- CMS : Compact Muon Solenoid : expérience LHC pp et ions lourds
- COBE : COsmic Background Explorer
- COBRAS/SAMBA : COsmic Background Radiation Anisotropy Satellite/Satellite for Measurement of Background Anisotropies
- COMPTEL : COMPTon TELESCOPE
- DA NE: Double Annular factory for Nice Experiments : anneau de  $e^+e^-$  de 510 MeV + 510 MeV (Masse du  $e^-$ ). Le détecteur KLOE (KLONG Experiment) y est installé (Frascati, Italie).
- DELPHI : DEtector with Lepton PHoton Identification: expérience fonctionnant au LEP
- DESY : Deutsch Elektron Synchrotron (Hambourg)
- DMILL : Durci Mixte sur Isolant Logico Linéaire.Processus (analogique et digital) résistant aux radiations développé par le Commissariat à l'Énergie Atomique.
- DUMAND : Deep Underwater Muon And Neutrino Detector (Hawaï, USA)
- EDELWEISS: Expériences pour DEtecter Les "WImps".En Site Souterrain (Laboratoire Souterrain de Modane au tunnel du Fréjus).
- ELFE : Electron Laboratory For Europe
- ELSA : Electron Stretcher Accelerator (Bonn, Allemagne)
- EMC : European Muon Collaboration (CERN)
- EROS: Expérience de Recherche d'Objets Sombres (site d'observation: ESO, La Silla, Chili)
- ESRF : European Synchrotron Radiation Facility (Grenoble)
- EUROBALL: Multidétecteur gamma européen dont le premier site d'exploitation sera le laboratoire de Legnaro (Italie)
- EUROGAM : Multidétecteur gamma franco-britannique installé actuellement auprès du Vivitron à Strasbourg
- GALLEX : GALLium EXperiment (Gran Sasso, Italie)
- GAMMASPHERE: Multidétecteur gamma américain installé actuellement à Berkeley (USA)
- GANIL : Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (Caen)
- GEDEON : GEstion des DEchets par des Options Nouvelles
- GRAAL : GRenoble Anneau Accelerator Laser (CESRF)
- GSI : Gesellschaft fur Schwerionenforschung (Darmstadt, Allemagne)
- HEGRA : High Energy Gamma Ray Astronomy (Canaries)
- HELLAZ : HELium at Liquid AZote temperature
- HERA: Hadron Elektron Ring Accelerator (DESY) : collisionneur  $e^\pm p$  de 30 + 800 GeV
- HQET : Heavy Quark Effective Theory, basée sur une nouvelle symétrie (symétrie de Isgur-Wise) QCD qui apparaît quand  $m_Q \gg \Lambda_{QCD}$
- ICARUS : Imaging Cosmic And Rare Underground Signals (Gran Sasso, Italie)
- IGEX : International Germanium EXperiment (Homestake, North Dakota, USA)
- ILL : Institut Laue Langevin (Grenoble)
- IMB: Irvine Michigan Brookhaven: détecteur ayant fonctionné de 1982 à 1991 dans la mine de Fairport (Ohio, USA)
- INDRA : Identification de Noyaux et Détection avec Résolutions Accrues (GANIL)
- INTEGRAL : INTernational Gamma Ray Laboratory
- ISOLDE : Isotope Separator On Line facility for production of radioactive ion beams (CERN)

KEK: Koh-Enerugii butsurigaku Kenkyuusho (Tsukuba, Japon). Laboratoire National de Physique des Hautes Énergies

LEAR: Low Energy Antiproton Ring (CERN)

LEGS: Laser Electron Gamma-ray Source (Brookhaven, USA)

LEP: Large Electron Positron collider (CERN): collisionneur  $e^+e^-$  ayant fonctionné à 90 GeV = masse du Z (LEP-I) et devant atteindre 90 + 90 GeV (LEP-II). Quatre détecteurs sont installés auprès de LEP: ALEPH, DELPHI, L3 et OPAL.

LHC: Large Hadron Collider (CERN): collisionneur pp de 7 TeV + 7 TeV pouvant fonctionner en mode ions lourds

LIGO: Laser Interferometer Gravitational wave Observatory (USA)

LISE: Ligne d'Ions Super Epluchés (GANIL)

LSND: Liquid Scintillator Neutrino Detector (Los Alamos, USA)

LVD: Large Volume Detector (Gran Sasso, Italie)

L3: Lep proposal 3, expérience fonctionnant au LEP

MACHO: MASSive Compact Halo Objects (site d'observation: Mont Stromlo, Australie)

MACRO: Monopole Astrophysics and Cosmic Ray Observatory (Gran Sasso, Italie)

MAMI: MAInz Microtron (Mayence, Allemagne)

MSU: Michigan State University (East Lansing, USA)

MSW: Mikheev, Smirnov, Wolfenstein: nom des trois auteurs du mécanisme d'oscillation des neutrinos traversant la matière du soleil. Une différence importante entre les saveurs apparaît car les  $\nu_e$  ont des interactions différentes des  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$  avec les  $e^-$  de la matière

NEMO: Neutrinoless Experiment on MOlybdenum (tunnel de Fréjus)

NESTOR: NEutrinos from Supernovae and Tevsources Ocean Range (Pylos, Grèce)

NOMAD: Neutrino Oscillation MAgnetic Detector (CERN)

NuPECC: Nuclear Physics European Collaboration Committee

OPAL: Omni Purpose Apparatus for Lep: expérience fonctionnant au LEP.

OGLE: Optical Gravitational Lensing Experiment (Site d'observation: Las Campanas, Chili)

PEP: Proton Electron Positron project (SLAC). Il n'y a en fait pas eu de protons.

PIAFE: Production Ionisation Acceleration de Faisceaux Exotiques (Grenoble)

QCD: Quantum Chromo Dynamics: théorie de jauge décrivant l'interaction forte qui a lieu entre les gluons, qui en sont les bosons vecteurs, et les quarks.

RHIC: Relativistic Heavy Ion Collider (Brookhaven, USA) produira des collisions Pb Pb de 200 GeV/nucléon + 200 GeV/nucléon

RIKEN: Rikagaku KENkyusho (Saitama, Japon). Institut de Recherche Physique et Chimique

SAGE: Soviet American Gallium Experiment (Baksan, Russie)

SATURNE: Accélérateur fournissant des faisceaux de hadrons, devant fermer en 1997 (Saclay)

SDSS: Sloan Digital Sky Survey

SIS: Schwerlonen Synchrotron (Darmstadt, Allemagne)

SLAC: Stanford Linear Accelerator Center (Stanford, USA)

SLC: Stanford Linear Collider (Stanford, USA): collisionneur linéaire  $e^+e^-$  de 45 GeV + 45 GeV étudiant le  $Z^0$

SMC: Spin Muon Collaboration (CERN)

SNO: Sudbury Neutrino Observatory (Canada): détecteur à  $D_2O$

SPiRAL: Système de Production d'Ions Radioactifs Accélérés en Ligne (GANIL)

SPS: Super Proton Synchrotron (CERN)

TAPS: Two Arm Photon Spectrometer

TARC: Transmutation by Adiabatic Resonance Crossing

TESLA: TeV Energy Superconducting Linear Accelerator, le prototype est actuellement testé à Hambourg

TeVatron: Collisionneur pp de 1 TeV + 1 TeV à Fermilab (Chicago)

THEMISTOCLE: Tracking High Energy Muons In Showers Triggered On Cerenkov Light Emission (Font Romeu)

TJNAF: Thomas Jefferson National Accelerator Facility, nouveau nom donné à l'ancien CEBAF: Continuous Electron Beam Accelerator Facility (Newport News, Virginie, USA)

VIRGO: Antenne gravitationnelle franco-italienne (Cascina - Pise)

VIVITRON: Accélérateur électrostatique situé au Centre de Recherches Nucléaires de Strasbourg

VLT: Very Large Telescope. Ensemble de 4 télescopes devant être installés dans le désert d'Atacama (Chili)

WIMP: Weakly Interactive Massive Particle