

PHYSIQUE NUCLÉAIRE ET CORPUSCULAIRE

Gérard SMADJA

Michel Baubillier
Yorrick Blumenfeld
Christian Le Brun
Fabrice Piquemal
Tiina Suomijarvi

L'essentiel des efforts expérimentaux de l'IN2P3 a jusqu'à présent été mené dans le cadre de grandes collaborations auprès d'accélérateurs, et parmi ceux-ci, le GANIL (France), le LHC (CERN) ont un programme scientifique très riche au delà des dix prochaines années. Les projets mondiaux considérés à plus long terme sont déjà en cours de préparation, et une fraction des physiciens et des ITA y contribue activement.

L'étude des rayons cosmiques, ou celle des neutrinos solaires, rapproche depuis longtemps la physique des particules de l'astrophysique. Inversement, certains phénomènes de la physique stellaire requièrent des mesures plus fines des propriétés des noyaux. L'évolution des questions fondamentales de la physique des particules impose maintenant de compléter les informations obtenues auprès des accélérateurs présents et futurs par la mesure des propriétés de l'univers. Le département s'ouvre ainsi naturellement à la thématique des « astroparticules », et toute une effervescence est observée dans ces nouveaux domaines.

1 – LA PHYSIQUE NUCLEAIRE

La physique nucléaire comporte aujourd'hui trois thèmes principaux : la structure nucléaire, la physique hadronique, les collisions d'ions lourds.

La structure nucléaire étudie les systèmes à nombre fini de nucléons. Ce sujet fait actuellement preuve d'une vitalité exceptionnelle, grâce à l'avènement des faisceaux radioactifs, tant en France que dans le monde. Des propriétés inattendues sont observées loin de la stabilité, amenant à étendre les modèles actuels du noyau. Ces mesures ont également un impact profond sur notre compréhension de la nucléosynthèse stellaire, en particulier dans les phénomènes violents où sont élaborés les éléments lourds. Des mesures de masse, de durées de vie, de section efficace, et d'états isomériques, loin de la vallée de stabilité des noyaux, sont aujourd'hui nécessaires. La recherche d'éléments plus lourds (superlourds) et de noyaux très déformés constitue un des objectifs majeurs de la discipline. D'importants investissements interviendront dans les prochaines années. L'ensemble SPIRAL II au GANIL, étendra le programme de SPIRAL vers les noyaux lourds avant l'arrivée d'EURISOL, accélérateur de nouvelle génération conçu au niveau européen. Un nouveau spectromètre gamma, AGATA, permettra de tirer pleinement partie des faisceaux produits.

Les progrès récents en théorie perturbative chirale relient aujourd'hui la théorie QCD de l'interaction forte aux modèles non relativistes qui décrivent avec succès la structure des noyaux. Ces modèles peuvent ainsi être fondés sur l'interaction forte, et une ambition naturelle pour les prochaines années sera d'utiliser cet ancrage pour mieux contraindre ces théories, et prédire les propriétés nucléaires, en particulier loin de la stabilité, là où des données importantes (pour l'astrophysique par exemple) resteront difficiles à obtenir.

La physique hadronique a pour objet l'étude des hadrons en terme de quarks et de gluons. Leur structure et leur comportement, encore mal compris, font l'objet de projets importants. Les accélérateurs utilisés sont ceux de la physique des particules ou d'autres plus spécialisés (TJNAF aux USA, GSI en Allemagne). Des projets de calculateurs dédiés à QCD pourraient fertiliser l'activité des théoriciens.

Les collisions d'ions lourds sondent les transitions de phase de la matière nucléaire ; transitions liquide-gaz aux énergies de GANIL, transitions vers un plasma de quarks et gluons aux énergies élevées obtenues au CERN ou à RHIC. Grâce aux faisceaux radioactifs, l'influence de la proportion de neutrons et de protons sur la transition liquide-gaz sera étudiée. Le détecteur ALICE, en construction, permettra l'étude de la transition hadron-plasma auprès du LHC. Cette expérience, où se manifestent des aspects complexes de la théorie QCD des interactions fortes, associe physiciens des particules et physiciens nucléaires.

2 – LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Après la détermination des paramètres du modèle standard avec une très grande précision au LEP (CERN), la mise en évidence des composantes du secteur de Higgs, c'est à dire du système de bosons scalaires associés à la brisure spontanée de la symétrie électrofaible, est une priorité. La découverte de ce (ou ces) boson(s) est à portée du Large Hadron Collider (CERN), avec les expériences ATLAS et CMS. Ce sont les résultats expérimentaux qui détermineront l'évolution de la théorie, que l'on sait incomplète.

La mise en service du LHC à partir de 2007 devrait éclairer les modifications à apporter au modèle standard, par la découverte de particules supersymétriques ou composites

(technicouleur, etc.). L'existence de matière noire non baryonique dans l'univers reste un argument incontournable pour l'existence d'une matière exotique, neutre, interagissant faiblement, autant de propriétés qui évoquent des « neutralinos » supersymétriques : le LHC contribuera à élucider leur rôle éventuel.

La cosmologie suggère la présence d'autres champs scalaires associés à l'inflation ou à la constante cosmologique. Ces nouveaux champs peuvent être fondamentaux, ou s'interpréter comme une manifestation des interactions de cordes. Le LHC permettra de mieux contraindre les échelles de distance qui interviennent dans ces théories à dimensions supplémentaires. À plus court terme, de nombreux groupes de l'IN2P3 sont impliqués dans les expériences DO à Fermilab (USA) et HI à DESY, à des énergies intermédiaires entre LEP et le LHC.

Un accord mondial s'est fait sur le choix d'un collisionneur linéaire comme futur accélérateur de physique des particules, à une énergie supérieure à 500 GeV dans le centre de masse. Cette machine, associée au LHC, permettrait une étude exhaustive des interactions électrofaibles, ainsi qu'une caractérisation approfondie des nouvelles particules produites. Les études machines 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). D'autres solutions sont développées à SLAC (USA), à KEK (Japon), et CLIC (CERN et IN2P3) Un autre effort mondial, où la France est fortement impliquée, vise à la définition des futurs détecteurs.

Les paramètres de la violation de CP devraient être maîtrisés dans le secteur des quarks à l'issue des expériences BaBar (à SLAC, Stanford) et LHCb (au CERN). L'existence de masses et de mélanges des différents types de neutrinos est maintenant acquise (prix Nobel 2002), ouvrant, comme entre les trois familles de quarks, la possibilité d'une violation de CP dans l'oscillation des trois familles de neutrinos. Celle-ci pourrait jouer un rôle dans l'asymétrie matière-antimatière observée dans l'univers. Des expériences telles KAMLAND (Japon)

et OPERA (au Gran Sasso) contribueront à préciser les paramètres de ce mélange, mais compte tenu de la difficulté des mesures, cette deuxième génération préparera des appareillages plus massifs. Neutrinos et antineutrinos sont-ils identiques ? Si la réponse est positive, on devrait observer la double désintégration β sans neutrino. L'expérience NEMO-III tente de mettre en évidence ce phénomène à Modane, et les détecteurs futurs auront une sensibilité 10 fois supérieure. L'évolution de la physique des neutrinos nécessitera de nouveaux équipements (accélérateurs, faisceaux, laboratoires souterrains) en cours d'étude aux USA, en Europe, et au Japon.

3 – VERS L'UNIVERS : LA COSMOLOGIE ET LES ASTROPARTICULES

La mesure du rayonnement cosmologique diffus, et l'analyse de la luminosité des supernovae ont montré que l'univers est euclidien, et que son expansion s'accélère sous l'effet d'une énergie noire (ou constante cosmologique), dotée d'effets gravitationnels. C'est la réponse à des questions qui se posaient depuis l'aube de la cosmologie, après la naissance de la relativité générale. L'exploitation de plusieurs expériences sur les supernovae (SNIFS, CFHLS et le projet SNAP/JDEM) et l'étude du fond diffus cosmologique par le satellite PLANCK avec sa résolution excellente devraient contraindre (avec d'autres expériences dans le monde) les paramètres cosmologiques avec une très grande précision.

La matière composant l'univers est elle-même dominée par une composante invisible, la matière noire. Elle serait responsable de la plus grande partie de la masse des halos de galaxie, et pourrait être constituée de particules prédites par les théories se situant au delà du modèle standard. Des efforts importants sont

en cours pour les détecter, et l'expérience EDELWEIS, dans le laboratoire souterrain de Modane prépare une nouvelle génération d'appareillages, à l'échelle européenne. Des expériences spatiales de détection de photons d'annihilation, telles GLAST et AMS, apporteront aussi des contraintes significatives.

Les techniques de la physique subatomique ouvrent de nouvelles fenêtres en astrophysique par la détection de particules chargées, de rayons γ , de neutrinos de haute énergie. Ces particules et rayonnements sont produits dans les phénomènes violents de l'univers, et permettent de tester les lois physiques dans un environnement extrême, inaccessible sur Terre. Ces « messagers » peuvent également être une manifestation de Particules inconnues.

Les milieux utilisés au sol pour détecter ces rayonnements rares sont la Terre, l'atmosphère, la mer, ou la glace des pôles. Le Télescope HESS, dont la construction vient d'être achevée en Namibie, détectera des rayons γ de haute énergie. L'observatoire Pierre Auger, en construction en Argentine, et le futur projet EUSO pourront observer des particules d'énergie extrême, dont on ignore l'origine. L'expérience ANTARES détectera des neutrinos de haute énergie à l'aide d'un télescope installé dans la Méditerranée. Une réflexion est déjà engagée dans un cadre européen pour préparer les projets futurs et accroître la sensibilité des détecteurs.

Les observations spatiales complètent à plus basse énergie les observations au sol, et elles en sont indissociables. Les satellites constituent l'outil privilégié pour l'étude fine des objets de l'univers, révélant en X ou en γ l'état physique de la matière, des noyaux d'atomes, et des champs magnétiques présents. Pour l'étude du rayonnement γ , Le satellite INTEGRAL vient d'être lancé, et le projet GLAST est en préparation. L'expérience AMS sera installée sur la station spatiale internationale. Elle mesurera le spectre des rayons cosmiques, et recherchera aussi la présence d'antimatière et de matière noire.

La première indication indirecte d'ondes gravitationnelles a été fournie par les pulsars binaires, et ces ondes devraient aussi être produites dans certains phénomènes violents

(supernovae, AGN). L'observation directe des ondes gravitationnelles sera une confirmation majeure de la théorie, et permettra de mieux comprendre le déroulement de ces événements. L'expérience franco-italienne VIRGO peut détecter la déformation de l'espace temps qu'elles induisent, grâce à des performances techniques exceptionnelles dans les lasers, l'optique, et l'ingénierie. La coïncidence des observations entre des détecteurs répartis sur la Terre permettra de confirmer les signaux obtenus. Dans un avenir plus lointain, le projet spatial LISA complètera la gamme des fréquences couvertes, et permettra peut-être d'étudier des ondes émises par l'univers primordial.

4 – PROGRAMMES SCIENTIFIQUES FRANÇAIS ET COOPÉRATIONS EUROPÉENNES

L'activité de recherche et développement sur les accélérateurs se déroule à l'échelle européenne, et elle répond aux défis de précision et de gain en énergie du futur collisionneur linéaire, ainsi qu'aux besoins des accélérateurs de protons de très haute intensité étudiés pour la production de faisceaux intenses de noyaux radioactifs, de neutrons ou de neutrinos. La majorité de ces instruments fait appel à des cavités supraconductrices où se rejoignent des expertises très diversifiées. L'IN2P3 joue un rôle important dans ces divers projets : I3 CARE (cavités, injecteurs), IP EUROTRANS (transmutation des déchets), Design study EURISOL où se rejoignent ions lourds et faisceaux protons intenses, ainsi que de nombreux accords bilatéraux (DESY/TESLA pour les FEL, GSI).

Le CERN est l'institution de référence pour la physique des particules en Europe, mais son rôle est désormais mondial. Une coordination des infrastructures et des programmes au niveau européen s'est mise en place pour la

physique nucléaire (NUPECC : Nuclear Physics European Coordination Committee), et pour les astroparticules (ApPEC : Astroparticle Physics Coordination). Sous l'égide de ces comités, quatre initiatives d'infrastructures intégrées (I3) ont été soumises à la commission européenne pour le 6ème programme cadre : EURONS (Structure Nucléaire), I3HP (Physique hadronique) pour la Physique Nucléaire, EUROMEDIM (Imagerie médicale), et la proposition de l'ApPEC : ILIAS, pour les astroparticules.

Pour faciliter la collaboration interdisciplinaire, un groupement de recherche sur les Phénomènes cosmiques de haute énergie (PCHE), un Programme National d'Astroparticules, et un Programme National de Cosmologie ont été créés. Un groupement de Recherche regroupant Astrophysique et Physique Nucléaire est également en gestation.

5 – LES OUVERTURES PLURIDISCIPLINAIRES DU DÉPARTEMENT

Le cœur de notre activité technique reste le soutien aux projets qui visent à la compréhension de l'univers aux petites distances, et désormais aussi aux distances cosmologiques. La réalisation des détecteurs modernes n'est envisageable que grâce à la compétence des équipes qui contribuent à la conception et à la construction des appareillages, où leurs interventions portent sur tous les aspects : détecteurs, mécanique, électronique.

Les activités pluridisciplinaires à l'IN2P3 s'appuient sur la mise en œuvre des techniques instrumentales de la physique nucléaire et des particules, pour aborder des domaines scientifiques variés : matériaux (programme Tancrede, agrégats), chimie, sciences de la vie, médecine (proton- et hadron-thérapies), environnement. Ces développements permettent d'initier des collaborations pluridisciplinaires où l'apport des groupes IN2P3 contribue à l'optimisation des méthodes expérimentales et des analyses. Les détecteurs, les outils de simulation, et les traitements de données appliqués dans l'imagerie médicale sont ainsi issus de l'expérience des physiciens. Une UMR d'imagerie fonctionnelle du cerveau est en cours d'incubation sur le campus d'Orsay.

Les nécessités de calcul liées au LHC ont incité le CERN à coordonner le déploiement d'une infrastructure informatique distribuée : la grille. L'IN2P3 et le STIL animent au niveau européen les applications scientifiques de cette grille informatique, qui regroupera plusieurs dizaines de milliers d'ordinateurs dès 2004.

Les recherches concernant la production d'énergie par fission nucléaire sont maintenant bien ancrées dans le département. La réduction de la quantité et de la radiotoxicité des déchets est un enjeu majeur pour le développement de l'énergie nucléaire, et la mise au point de réacteurs pilotés par accélérateur est une des voies qui suscite le plus d'intérêt. Les nouveaux systèmes de production d'énergie devront être plus sûrs, plus efficaces, plus propres. Les travaux de l'IN2P3 porteront notamment sur la filière Thorium-Uranium 233 en régime thermique, particulièrement prometteuse.

ANNEXE

LISTE DES ACRONYMES

AGATA	(Advanced Gamma Ray Tracking Array) Détecteur avancé de rayonnement γ avec une efficacité accrue.	CFHTLS	(Canadian French Hawaii Telescope Legacy Survey) Télescope équipé d'une caméra CCD extrêmement performante à Hawaii (USA)
AGN	(Active Galactic Nucleus) Galaxie émettant une énorme quantité d'énergie	CERN	Centre Européen de Recherches Nucléaires
ALICE	(A Large Ion Collider Experiment) Expérience installée auprès du LHC pour la recherche du plasma de quarks et de gluons	CLICTF	(Compact Linear Collider Test Facility) Facilité de test pour l'étude de la prochaine génération de collisionneurs linéaires (CERN)
AMS	(Alpha Magnetic Spectrometer) Expérience installée sur la station spatiale pour la détection de hadrons, d'électrons et de photons	CMS	(Compact Muon Solenoid) Expérience auprès du LHC (CERN) pour la recherche de nouvelles particules
ANTARES	(Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental REsearch) Détecteur de neutrinos de haute énergie installé en mer Méditerranée (France)	CP	(Charge Parity) produit des opérations de conjugaison de charge et de parité (présence de phases)
APEC	Astroparticle Physics European Coordination	DO	Grand appareillage auprès du collisionneur proton-antiproton (Tevatron) du Fermilab (USA)
ATLAS	(A Toroidal LHC ApparatuS) Expérience installée auprès du LHC pour la recherche de nouvelles particules.	DESY	(Deutsche Elektronen-SYNchrotron) Synchrotron Centre regroupant plusieurs accélérateurs majeurs à Hambourg (Allemagne)
BaBar	Production de paires de mésons de beauté B – <i>anti</i> B pour mesurer la violation de la symétrie CP (au collisionneur électron-positron du SLAC, USA)	TESLA	(Tera electron volt Energy Superconducting Linear Accelerator) Projet de collisionneur linéaire électron-positron à DESY (Allemagne)
CARE	Coordinated Accelerator Research in Europe, Initiative Européenne pour les cavités haute fréquence supraconductrices	EDELWEIS	(Expérience pour DEtecter les WIMPS En Site Souterrain) Détecteurs bolométriques de la matière noire installés au Laboratoire Souterrain de Modane (France)
CDF	(Collider Detector at Fermilab) Grand appareillage auprès du collisionneur proton-antiproton (Tevatron) du Fermilab (USA)	EURISOL	(EUROpean Isotope Separation On-Line) Projet de production et d'accélérateur d'ions radioactifs
		EUROMEDIM R&D	Imagerie médicale(prototypes, validation clinique)
		EURONS	EUROpean Nuclear Structure

EUROTRANS	Projet d'Integrated Project européen sur la transmutation des déchets nucléaires	KEK	Centre d'accélérateurs à Tsukuba (Japon)
EUSO	(Extreme Universe Space Observatory) Satellite pour l'observation des rayons cosmiques de très haute énergie	LEP	(Large Electron-Positron Collider) Collisionneur électron-positron au CERN (arrêté en 2000)
FEL	Free Electron Laser	LHC	(Large Hadron Collider) Collisionneur proton et ions au CERN
GANIL	Grand Accélérateur National d'Ions Lourds à Caen (France)	LHCb	Expérience auprès du LHC pour la recherche de la violation de CP dans les mésons de beauté au CERN
GLAST	(Gamma Ray Large Area Space Telescope) satellite dédié à la détection des sources émettrices de γ (Energie > 10 MeV)	NEMO-III	(Neutrinoless Experiment with MOlybdenium) Expérience cherchant à mesurer la masse et la nature du neutrino, au Laboratoire Souterrain de Modane (France)
GSI	(Gesellschaft für Schwerionenforschung) Centre d'accélérateurs d'ions lourds à Darmstadt (Allemagne)	OPERA	(Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) Mesure de l'oscillation ν_μ vers ν_τ au laboratoire du Gran Sasso (Italie)
HESS	(High Energy Stereoscopic System) Mesure de l'énergie des particules cosmiques dans l'atmosphère par détection du rayonnement Cerenkov émis (Namibie)	PLANCK	Satellite mesurant à grande précision la radiation à 3K de l'univers
I3	Integrated Infrastructure Initiatives : projets européens	QCD	(Quantum ChromoDynamics) Interaction liant les quark dans les nucléons et les nucléons dans les noyaux atomiques
I3HP	Integrated Infrastructure Initiatives HadronPhysics	RHIC	(Relativistic Heavy Ion Collider) Collisionneur d'ions lourds au Brookhaven National Laboratory (USA)
ILIAS	Integrated Large Infrastructure Initiative for Astroparticle Science regroupe plusieurs appareillages de détection de matière noire et de neutrinos	SLAC	(Stanford Linear Accelerator Center) Accélérateur linéaire d'électrons à Stanford (USA)
INTEGRAL	(INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory Photon) Satellite pour la détection de photons (Energie[10 MeV)	SNAP/JDEM	(SuperNovae Acceleration Probe/ Joint Dark Energy Mission) Projet de satellite pour la mesure de l'énergie noire (DOE, NASA, France ?)
ITA	le personnel d'aide aux projets : Ingénieurs, Techniciens, Administratifs		
KAMLAND	(KAMioka Liquid Antineutrinos Detector) Détecteur d'anti-neutrinos émis par les centrales nucléaires installé à Kamiokande (Japon)	SNIFS	(Supernovae Integral Field Spectrograph) Expérience de mesure de la lumière venant des supernovae

SPIRAL-II	(Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne) Projet d'accélérateur d'isotopes radioactifs à Caen (France)	VIRGO	Très grand interféromètre pour la détection d'ondes gravitationnelles installé à Cascina (Italie)
TJNAF	(Thomas Jefferson National Accelerator Facility) Accélérateur d'électrons à Newport (USA)		