

LA PHYSIQUE NUCLEAIRE THEORIQUE EN FRANCE :
ETAT DES LIEUX ET PERSPECTIVES

*Document rédigé par le Bureau des Théoriciens de Physique Nucléaire
(Novembre 2004)*

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
ETAT DES LIEUX PAR DOMAINE DE RECHERCHE	
I. Structure des noyaux	5
II. Réactions nucléaires à basses et moyennes énergies : fusion, fission, multifragmentation	9
III. Physique hadronique	13
IV. Equation d'état de la matière nucléaire et de la matière de neutrons, astrophysique nucléaire	18
V. Plasma de quarks et de gluons, collisions noyau-noyau à haute énergie	21
VI. Développements de la théorie du problème à N corps nucléaire et impact sur les autres disciplines	25
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	30
ANNEXE: Pyramides des âges	35

INTRODUCTION

Cet état des lieux de la physique nucléaire théorique en France a été préparé par le Bureau des Théoriciens de Physique Nucléaire à l'initiative de ses membres. Il est motivé par la volonté d'assurer le développement des connaissances dans un domaine où la communauté scientifique française a des compétences spécifiques, participe à d'ambitieux projets expérimentaux et rejoint fructueusement d'autres secteurs de recherche fondamentale ou appliquée.

Cette volonté s'inscrit naturellement dans un cadre européen. Les théoriciens de physique nucléaire français (nous entendons par là travaillant dans les laboratoires français) participent activement aux réseaux mis en place dans le cadre du 6ème PCRD. L'ECT* de Trento en Italie (European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas) fournit par ailleurs depuis 10 ans un lieu où les théoriciens de physique nucléaire français rencontrent leurs collègues européens, nouent des collaborations et forment de jeunes chercheurs.

Le domaine de recherche couvert par la physique nucléaire théorique s'est considérablement élargi au-delà de ses composantes traditionnelles que sont la structure des noyaux, la description des réactions nucléaires et la physique hadronique liée à la dynamique des noyaux. Il rejoint maintenant plusieurs aspects non perturbatifs de la chromodynamique quantique (QCD), tels que la structure des hadrons, les modifications des fonctions spectrales associées dans le milieu nucléaire et le diagramme de phase de la matière hadronique à haute température et grande densité baryonique ; ceci constitue plus que jamais une interface particulièrement importante avec la physique des particules. Les programmes de physique hadronique des expérimentateurs français se déroulent principalement au Jefferson Laboratory et au CERN. L'étude expérimentale des collisions d'ions lourds ultrarelativistes et la recherche du plasma de quarks-gluons est en cours à RHIC (Brookhaven) et en projet au CERN (ALICE).

Dans le domaine des plus basses énergies, la production de faisceaux de noyaux radioactifs a permis d'accéder à une quantité d'états et de phénomènes nouveaux dans les noyaux, notamment dans les noyaux exotiques. Leur interprétation a suscité le développement de nouvelles méthodes théoriques de structure. Les noyaux loin de la ligne de stabilité ont également rapproché la physique nucléaire de l'étude de l'évolution stellaire et de la synthèse des éléments. Les possibilités expérimentales ouvertes au GANIL par les faisceaux de SPIRAL et le projet SPIRAL II inscrivent la communauté scientifique française dans ce rapprochement. Les aspects transdisciplinaires du problème à N corps nucléaire se sont multipliés, permettant des développements originaux notamment dans la description de la dynamique des agrégats métalliques et des atomes froids piégés.

L'étendue et la spécificité des sujets couverts par la physique nucléaire théorique en France requièrent un effectif suffisant de chercheurs. Nous avons comptabilisé 76 chercheurs permanents (non-retraités) dans l'ensemble des disciplines relevant de cet état des lieux. Il faut noter que certains de ces chercheurs ne travaillent qu'à temps partiel sur les sujets

considérés et que les frontières entre disciplines (physique nucléaire et physique des particules notamment) sont parfois floues. Ces 76 théoriciens se répartissent comme suit dans les différents organismes : 26 sont au CNRS (17 dépendant de la Section 02 et 9 de la Section 03), 30 à l'Université, 8 à la Direction des Sciences de la Matière du CEA et 12 à la Direction des Applications Militaires du CEA. 33 travaillent en région parisienne (ce sont principalement des chercheurs du CNRS et du CEA) et 43 en province (ce sont principalement des universitaires). Les pyramides des âges pour l'ensemble de l'effectif et par sujet sont données en annexe. Sur les 76 chercheurs mentionnés ci-dessus, la moitié environ ont 50 ans ou plus. Les départs à la retraite prévisibles dans les années qui viennent toucheront principalement les physiciens travaillant sur la structure du noyau, la physique hadronique et l'équation d'état de la matière nucléaire, des axes où la collaboration théorie/expérience est essentielle pour interpréter les phénomènes observés. Certains laboratoires vont être plus particulièrement affectés par cette vague de départs à la retraite. C'est notamment le cas du CENBG, de l'IREM, du LPSC de Grenoble et du DAPNIA. Par ailleurs, la vitalité de la discipline se traduit par une action importante de formation. Il y actuellement 22 doctorants et 7 post-doc ou ATER en physique nucléaire théorique qui peuvent assurer la relève dans les secteurs de la discipline où il convient de mettre des forces.

Il faut mentionner enfin qu'un certain nombre de chercheurs retraités, toujours actifs dans les laboratoires, figurent parmi les personnes citées dans les chapitres I à VI dans la partie centrale de ce document. Leur nombre s'élève à une dizaine.

L'objet de ce document est de répertorier les sujets actuellement étudiés par les physiciens nucléaires français, de les situer par laboratoire, de dégager les thèmes amenés à se développer dans les différents domaines et de mettre en regard l'activité théorique et les programmes expérimentaux.

Nous indiquons en conclusion les directions de recherche où il nous semble prioritaire d'engager des recrutements, d'une part pour atteindre des objectifs intellectuels importants pour la discipline auxquels la France peut apporter une contribution remarquable, et d'autre part pour assurer l'interprétation théorique des données expérimentales attendues dans les années à venir de la part des groupes expérimentaux français.

Une dernière remarque s'impose: Les physiciens des particules ont suivi préalablement la même démarche que les théoriciens nucléaires et ont produit un état des lieux de leur communauté. A cause d'un assez fort recouvrement des deux communautés, particules et nucléaires, notamment en ce qui concerne les chapitres III et V du présent document, apparaissent une vingtaine de noms simultanément dans les deux états de lieux. Il faut souligner que les démarches des deux communautés ont été entreprises d'une manière coordonnée.

ETAT DES LIEUX PAR DOMAINE DE RECHERCHE

I. Structure des noyaux

Ce domaine de la physique nucléaire théorique a pour objet de décrire l'état fondamental et les différents états excités des noyaux, d'étudier leurs propriétés et leurs modes de désintégration. Il fait, en France, une large part à la mise au point de forces nucléaires effectives qui déterminent la description microscopique des états nucléaires à l'approximation du champ moyen nonrelativiste. La dépendance en isospin de ces forces est particulièrement étudiée dans le but de comprendre les propriétés des noyaux loin de la ligne de stabilité.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

Nicolae Carjan, Philippe Quentin, David Samsøen

Calculs microscopiques de type champ moyen non relativiste

Corrélations d'appariement

Noyaux à haut spin (de nature collective ou isomères-K)

Fission

CEA-Bruyères-le-Châtel

Jean-François Berger, Bernard Ducomet, Michel Girod, Héloïse Goutte, Sophie Péru-Désenfans, Nathalie Pillet

Approches microscopiques de type champ moyen avec la force de Gogny

Méthodes RPA et QRPA, mélanges de configurations

Noyaux exotiques, isomères, fission, super-lourds

CEA-Saclay: Service de Physique Théorique

Paul Bonche, Bertrand Giraud

Approches microscopiques de type champ moyen

Méthodes de mélange de configurations et méthodes de projection

Interactions effectives

Noyaux exotiques, bandes superdéformées, noyaux lourds et super-lourds

GANIL, Caen

Philippe Chomaz, Marek Ploszajczak, Piet Van Isacker

Modèle en couches avec couplage au continuum

Symétries dans les systèmes nucléaires

Modes collectifs dans les noyaux

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Karim Bennaceur, Jacques Meyer

Forces effectives et théories de champ moyen

Etude du noyau dans des conditions extrêmes de spin et d'isospin

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Elias Khan, Monique Lassaut, Jean Libert, Roland Lombard, Van Giai Nguyen, Peter Schuck, Michael Urban, Nicole Vinh Mau, Cristina Volpe

Appariement dans les noyaux, continuum HFB, conservation du nombre de particules

Fonctions de réponse : QRPA et RPA dans les noyaux instables, modes ciseaux, QRPA dans les atomes piégés

Spectroscopie des noyaux instables légers, halos

Décroissance β et courants de seconde classe

Condensation de deutons et de particules α dans les systèmes nucléaires

Théorie du potentiel et forces effectives

Institut de Recherches Subatomiques, Strasbourg

Johann Bartel, Etienne Caurier, Jerzy Dudek, Hervé Molique, Frédéric Nowacki, Neil Rowley, Andrès Zuker

Calculs microscopiques de type modèle en couches

Calculs microscopiques de type champ moyen : approches relativiste, non relativiste, semi-classique

Etude des noyaux à hauts spins

Structure des noyaux en fonction de leur énergie thermique et rotationnelle

Applications de la théorie des groupes

Spectroscopie des noyaux instables légers, halos

Modèle en clusters et décroissance α

Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen

Denis Lacroix

Calculs microscopiques de type champ moyen et extension du champ moyen

Modes collectifs dans les noyaux

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie, Grenoble

Jaume Carbonell

Calculs microscopiques de type Faddeev-Yakubovsky ($A=3,4$)

Interactions réalistes et clusters de neutrons

SUBATECH, Nantes

Guy Royer

Noyaux à haut spin (de nature collective)

Fission : barrières macro-microscopiques des actinides

Emission de particules alpha et de clusters

Remarques sur la communauté scientifique concernée

Les travaux théoriques de structure nucléaire en France couvrent un grand nombre de sujets et font usage de différentes techniques de description des systèmes à N-corps. Le nombre de physiciens permanents s'élève actuellement à une trentaine.

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

Les années récentes ont vu une activité intense dans le domaine des noyaux et des états nucléaires "exotiques": noyaux loin de la stabilité riches en protons ou en neutrons, noyaux super-lourds, états nucléaires très excités, très déformés ou en rotation rapide, états isomériques. Les nombreuses expériences réalisées dans ce domaine ont fait apparaître des phénomènes inattendus : déplacement ou disparition des nombres magiques, inversion de parité, halos et peaux de neutrons, existence de la symétrie dite pseudo-SU(3) et, indépendamment, de la symétrie pseudo-SU(2). De nouvelles hypothèses théoriques ont été formulées concernant le phénomène de chiralité dans les noyaux en rotation et plusieurs travaux prédisent l'existence de symétries géométriques de haut rang telles que les symétries tétraédrique et octaédrique (ces deux dernières en attente de confirmation expérimentale). Une nouvelle phase des noyaux, un gaz très dilué de particules alpha condensées, a été récemment mise en évidence (état de Hoyle dans le ^{12}C , par exemple) et fait l'objet de travaux intensifs. La recherche de nouvelles symétries ainsi que l'étude du phénomène de brisure spontanée de symétries et l'existence de nouveaux types de radioactivité sont également étudiées dans plusieurs groupes théoriques. Des travaux plus ponctuels concernent la stabilité d'édifices comme les molécules nucléaires ou le tétraneutron dont l'existence n'est pas confirmée expérimentalement. Ces différents sujets remettent en cause beaucoup des concepts traditionnels de la structure des noyaux. Ils sont à l'origine d'un renouveau important des programmes théoriques actuels dans ce domaine.

Les approches utilisées par les groupes théoriques français sont essentiellement les techniques *ab initio* (résolution directe de l'équation de Schrödinger à 3 ou 4 nucléons) ou microscopiques (modèle en couches, théorie du champ moyen et ses extensions : RPA, mélanges de configurations) de la structure nucléaire. Des efforts importants sont réalisés pour étendre ces méthodes afin de mieux décrire les états et systèmes exotiques : introduction du couplage des états liés au continuum, brisure de nouvelles symétries, approches RPA auto-cohérentes, nouveaux types de mélanges de configurations. Surtout, un effort considérable est en cours afin de repenser la nature de l'interaction nucléaire effective et

d'en établir de nouvelles formes. L'objectif est de déterminer des paramétrisations relativement simples, capables de décrire aussi bien les propriétés globales des noyaux que les différents types de corrélations dont ils sont le siège – appariement, coexistence de formes, sous-structures α –, et fournissant un comportement en fonction de l'isospin plus réaliste que les paramétrisations actuelles.

Ces études ont de nombreux prolongements : description microscopique de phénomènes collectifs de grande amplitude comme la fission ou les collisions d'ions lourds à basse énergie, prédictions sur l'existence des noyaux superlourds, un sujet d'une très grande actualité, dérivation du potentiel optique nucléon-noyau, propriétés des noyaux chauds, avec d'importantes applications à l'astrophysique (structure de l'écorce des étoiles à neutrons, interaction neutrino-noyau) et à la physique d'autres systèmes de fermions (agrégats atomiques, "clusters" et gouttelettes d'hélium, atomes dans des pièges magnétiques).

La compétence acquise sur ces sujets est indispensable pour les évaluations de données nucléaires nécessaires aux applications technologiques : dispositifs de production électro-nucléaire innovants, techniques d'incinération des déchets, applications militaires (programme Simulation du CEA-DAM).

c. Adéquation de l'activité théorique aux programmes expérimentaux

L'effort français en structure nucléaire expérimentale est concentré en premier lieu au GANIL auprès de SPIRAL I/II (après la fermeture récente du VIVITRON) et concerne les problématiques des noyaux exotiques mentionnées plus haut. D'autres expériences (spectroscopie γ , fission) ont lieu auprès d'ISOLDE au CERN et GSI à Darmstadt, ainsi qu'à Catania, Legnaro et Louvain-la-Neuve.

L'activité théorique dans les différents domaines est indispensable au soutien de ces thématiques et un grand nombre de théoriciens travaillent en collaboration étroite avec les groupes expérimentaux. Par exemple, les mesures concernant les noyaux exotiques étant difficiles (bien souvent l'observation de quelques raies gamma), le dépouillement même de l'expérience s'appuie sur un calcul théorique. Dans d'autres cas, l'interprétation des résultats expérimentaux est réalisée dans le cadre d'un modèle théorique, soit en collaboration directe, soit de manière indépendante. Il est à noter que cette forte interaction entre expérience et théorie a lieu aussi bien entre groupes français qu'avec des groupes internationaux. Enfin, certains développements théoriques ont un lien plus indirect avec les expériences. C'est le cas notamment des travaux sur l'interaction nucléaire effective et des approches nouvelles de résolution du problème à N corps.

Un point très important est à souligner concernant le futur: dans dix ans, une fraction importante des théoriciens de structure nucléaire actuellement en activité (environ 40%) sera partie à la retraite. Il est donc crucial qu'un effort d'accompagnement des programmes expérimentaux ait lieu, notamment par un recrutement régulier de jeunes théoriciens. Dans le cas contraire, l'investissement expérimental deviendra rapidement inexploité.

II. Réactions nucléaires à basses et moyennes énergies : fusion, fission, multifragmentation

L'étude des réactions nucléaires a pour objectif de comprendre la dynamique des collisions nucléon-noyau ou noyau-noyau en fonction de l'énergie du projectile et de la nature des états finaux (réactions élastiques ou quasi-élastiques, fusion, fission, multifragmentation du noyau composé, etc...). Cette étude est importante pour les applications, notamment en astrophysique ou en neutronique, et pour la synthèse des noyaux superlourds. Elle concerne le domaine cinématique où l'énergie incidente du nucléon ou des ions est inférieure au seuil requis pour la production de mésons dans la collision.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

CEA-Bruyères-le-Châtel

Eric Bauge, Jean-Paul Delaroche, Pierre Dos Santos Uzarralde, Helder Duarte, Stéphane Hilaire, Colette Le Luel, Benjamin Morillon, Pascal Romain

Modèles de réactions nucléaires à basse énergie
Construction de potentiels optiques semi-microscopiques et phénoménologiques
Modèles de cascade/évaporation
Densités de niveaux microscopiques
Evaluation de données nucléaires et leur validation

CEA-Saclay: DAPNIA/SPhN

Jean-Christophe David

Réactions de spallation

GANIL, Caen

David Boilley, Philippe Chomaz, Marek Ploszajczak

Dynamique stochastique
Réactions de capture radiative dans le modèle en couches avec continuum
Multifragmentation statistique avec contraintes
Fusion et fission, formation des éléments superlourds

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Rui da Silveira

Potentiels optiques, diffusion d'ions lourds à basse énergie

Institut de Recherches Subatomiques, Stras bourg

Johann Bartel, Marianne Dufour-Fournier, Neyl Rowley

Réactions élastiques et inélastiques

Modèle optique, théorie de Regge, diffraction
Modèle en amas et réactions d'intérêt astrophysique

Laboratoire de Physique Corpusculaire, Caen

Daniel Cussol, Francesca Gulminelli, Denis Lacroix

Théorie de transport (semiclassique et quantique)

Mécanismes des réactions nucléaires

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble

Jaume Carbonell

Calcul ab-initio des réactions nucléaires avec des noyaux légers ($A \leq 4$)

SUBATECH, Nantes

Jörg Aichelin, Virginia de la Mota, Pol-Bernard Gossiaux,

Christoph Hartnack, Guy Royer, François Sébille

Théories de transport à basse et moyenne énergie

Physique des réactions entre noyaux lourds

Multifragmentation

Fusion

Voies d'entrée et de sortie pour les noyaux superlourds

Modèle macro-microscopique de la goutte liquide généralisée

Remarques sur la communauté scientifique concernée

La communauté des théoriciens travaillant sur les réactions nucléaires en France compte, au sens large, 24 physiciens permanents actifs. La plupart de ces chercheurs sont également largement engagés dans d'autres problématiques.

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

Une partie des théoriciens étudie les réactions à basse énergie à Bruyères-le-Châtel, Caen et Strasbourg. A Bruyères-le-Châtel, un effort important est consenti depuis quelques années afin de déterminer le potentiel optique nucléon-noyau (et deutéron-noyau) à partir des théories microscopiques de la structure nucléaire pour des énergies incidentes allant jusqu'à 200 MeV. Ces études sont appliquées à la fission des noyaux lourds, aux réactions sur les états fondamentaux et les états isomériques, et à l'évaluation des données nécessaires aux applications civiles et militaires du nucléaire.

Les théoriciens de Caen et de Strasbourg travaillent sur les collisions noyau-noyau à des énergies inférieures à 50 MeV par nucléon. Ces énergies correspondent à celles disponibles au GANIL. Les travaux actuels portent sur le développement de modèles fondés sur le champ moyen ou ses extensions, qui permettent la description de phénomènes aussi variés que la fusion, la fission ou la multifragmentation. Plus récemment, avec la possibilité d'utiliser des faisceaux exotiques avec SPIRAL et la réflexion autour de SPIRAL II, de nombreux efforts théoriques ont été réalisés afin de comprendre l'influence des effets d'isospin

sur les réactions. Parmi les travaux concernés, on peut citer l'étude des réactions faisant intervenir les noyaux à halos, l'effet des états quasi-moléculaires dans les noyaux légers ainsi que la formation des noyaux super-lourds.

Une autre partie de cette communauté effectue des études fondées sur les théories de transport et le problème à N corps (modèles de Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck ou de Dynamique Quantique Moléculaire) et les applique aux collisions noyau-noyau à des énergies supérieures à 50 MeV par nucléon.

c. Adéquation de l'activité théorique aux programmes expérimentaux

Comme les autres pays européens, la France concentre ses activités expérimentales aux basses énergies autour de quelques thématiques très précises. A côté des activités nécessaires aux applications industrielles (production d'électricité au moyen de dispositifs innovants, traitement des déchets) et militaires (programme Simulation) du nucléaire, les points forts de la recherche française concernent l'étude des noyaux exotiques et des réactions induites par des faisceaux radioactifs.

Les théories des réactions à basse énergie qui ont été développées jusqu'ici doivent être étendues afin d'être applicables à l'étude des réactions faisant intervenir des noyaux exotiques. En ce qui concerne les réactions nucléon-noyau (diffusion de neutron, spallation, réactions de fission), leur étude théorique s'effectue principalement au CEA en relation étroite avec des programmes expérimentaux menés dans les mêmes laboratoires ou en collaboration avec des laboratoires étrangers (Los Alamos, GSI, par exemple). Une partie de ces études (réactions neutron-actinides, spallation, production de résiduels) a été effectuée dans le cadre du projet HINDAS du 5^{ème} PCRD européen et devrait se poursuivre avec le 6^{ème} PCRD.

Des travaux sont également toujours en cours afin de déterminer l'origine de la multifragmentation, un sujet considéré par NUPECC comme le défi le plus important posé par les réactions nucléaires à basse énergie. Signalons que les physiciens français jouent un rôle de premier plan dans les études statistiques des systèmes finis, un domaine ayant des applications importantes concernant la multifragmentation (voir paragraphe 2.4).

III. Physique hadronique

Nous entendons ici par physique hadronique l'activité située à la frontière entre la physique nucléaire et la physique des particules consacrée aux aspects non perturbatifs de la chromodynamique quantique. L'un de ses objectifs actuels est l'élaboration de théories effectives de basse énergie incorporant les propriétés essentielles (symétrie chirale) de la chromodynamique quantique, tout en prenant en compte les modifications des propriétés des hadrons induites par une densité baryonique et/ou une température finies. L'ambition est, entre autres, d'utiliser QCD sur réseau afin de comprendre les propriétés des hadrons. Ce domaine de recherche est aussi fortement corrélé avec la matière hadronique dense et chaude étudiée dans les collisions d'ions lourds relativistes ; il se nourrit également des développements récents en physique hadronique au sens le plus large, cette discipline étant dans une phase particulièrement prometteuse en raison de la découverte de nouveaux hadrons (pentaquark, baryons doublement charmés, mésons D_s) qui ne s'interprètent pas facilement dans le modèle des quarks.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

Centre d'Etudes Nucléaires de Bordeaux Gradignan

Jean-Christophe Caillon, Patricia Gabinski, Jean Labarsouque

Théories hadroniques relativistes non-linéaires
Propagateur des mésons dans le milieu nucléaire, fonctions de réponse

Centre de Physique Théorique de l'Ecole Polytechnique

Bernard Pire

Structure du nucléon, diffusion Compton virtuelle
QCD dans le domaine perturbatif, processus diffractifs

CEA-Saclay: DAPNIA/SPhN, DAPNIA/SPhT et DAPNIA/DIR

Pierre Guichon, Jean-Marc Laget, Bijan Saghai, George Ripka, Manque Rho, Madeleine Soyeur, Egle Tomasi

Structure du nucléon, diffusion Compton virtuelle
Restauration de la symétrie chirale dans le milieu nucléaire
Photoproduction des mésons vectoriels, des kaons
Production de paires de leptons sur des cibles de protons
Résonances baryoniques

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Guy Chanfray, Dany Davesne, Claude Fayard, Sonia Fleck, Magda Ericson

Etats collectifs en théorie des champs
Restauration de la symétrie chirale dans les noyaux et la matière nucléaire
Interactions kaon-nucléon et kaon-deuton, production d'étrangeté
Systèmes à un petit nombre de bosons

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Bachir Moussallam, Hagop Sazdjian, Peter Schuck, Jan Stern

Théorie des perturbations chirale
Diffusion pion-pion et pion-kaon à basses énergies
Dynamique chirale dans le milieu nucléaire
L'étrangeté dans la ChPT
Théorie effective de la brisure électrofaible et de l'origine des masses

Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand

Jean-François Mathiot

Forces à trois corps
Quarkonia lourds

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble

*Bertrand Desplanques, Jaume Carbonell, Jean-Marc Richard,
Bernard Silvestre-Brac*

Etats liés relativistes et propriétés électromagnétiques des systèmes à quelques corps
Physique antiproton-nucléon, antiproton-deuton et antiproton-noyau à basse énergie
Spectroscopie et désintégration des hadrons, modèles de quarks constituants
Interactions faibles dans les noyaux

Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies, Paris

Benoît Loiseau

Diffusion pion-pion et nucléon-nucléon à basse énergie
Couplage pion-hypéron

SUBATECH, Nantes

Jörg Aichelin, Pol-Bernard Gossiaux, Thierry Gousset, Christoph Hartnack

Quarkonia lourds, J/ψ dans les noyaux
Structure du nucléon, diffusion Compton virtuelle
QCD dans le domaine perturbatif
Modèles microscopiques de transport pour l'étude des mésons dans le milieu

nucléaire

Université Louis Pasteur (Strasbourg I), Institut de Physique

Véronique Bernard

Théorie des perturbations chirale
Diffusion pion-nucléon à basse énergie

Remarques sur la communauté scientifique concernée

La communauté des théoriciens de physique hadronique listée ci-dessus compte 27 physiciens permanents et quatre physiciens Emérites. Bien qu'extrêmement vivante, elle est relativement âgée. Il n'y a que 7 physiciens de moins de 45 ans. Parmi les 20 autres permanents, 12 ont plus de 55 ans. Elle se trouve majoritairement en région parisienne et en région Rhône-Alpes. Cela étant, la délimitation de cette communauté comporte une part d'arbitraire ; il existe en effet une communauté importante de physiciens des particules travaillant en physique hadronique mais nous n'avons listé ici que ceux d'entre eux entretenant des relations très étroites avec les physiciens nucléaires (par exemple ceux cohabitant avec des physiciens nucléaires dans des laboratoires de l'IN2P3).

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

L'impact sur la physique nucléaire étant le dénominateur commun de cette activité, les sujets traités couvrent des domaines allant naturellement de la structure du nucléon jusqu'à l'application des théories chirales ou relativistes à la matière nucléaire. On peut ainsi citer les distributions de partons généralisées accessibles par la diffusion Compton virtuelle, la spectroscopie des hadrons (incluant ceux formés de quarks lourds), la dynamique des résonances baryoniques, l'étude de différents processus de diffusion à basse énergie notamment par la théorie des perturbations chirale, les systèmes à quelques nucléons, et la restauration de la symétrie chirale dans le milieu nucléaire et ses manifestations telles que les modifications des fonctions spectrales hadroniques induites par une densité et/ou une température finies. Les théoriciens de physique hadronique s'investissent également dans la mise au point de descriptions de la matière nucléaire ou de la matière hadronique incorporant des effets relativistes, des contraintes relatives à la symétrie chirale ou encore des effets liés à la polarisation des nucléons dans le milieu nucléaire.

Il convient de remarquer que l'élaboration et la validation des théories effectives appropriées dans le plan température-densité nécessitera un effort théorique vigoureux combinant notamment les techniques du groupe de renormalisation et les méthodes de la Chromodynamique sur réseau. Cette dernière approche, actuellement la seule capable de relier les propriétés de basse énergie des hadrons aux degrés de liberté de QCD, mériterait une plus forte implication des théoriciens français de la communauté de physique hadronique.

c. Adéquation de l'activité théorique aux programmes expérimentaux

L'interprétation théorique des expériences de diffusion Compton virtuelle au seuil a été établie à Saclay il y a une dizaine d'années. Les expériences de ce type réalisées par des collaborations CEA-IN2P3 à MAMI (Mayence) et à JLab bénéficient donc naturellement d'un bon support théorique. Il en va de même pour la diffusion Compton virtuelle et la production de mésons dans le régime profondément inélastique dont les expériences sont soit en cours à JLab, soit en projet au CERN dans une évolution future du détecteur COMPASS.

La diffusion profondément inélastique de leptons polarisés sur cible polarisée a soulevé la question de l'origine du spin du nucléon dont une faible partie seulement semble portée par les quarks. Pour répondre à cette question, des équipes françaises du CEA et de l'IN2P3 participent à de grands programmes expérimentaux visant à déterminer d'une part la contribution des gluons au spin (expérience COMPASS au CERN) et d'autre part la composante étrange dans le nucléon (expériences de violation de parité HAPPEX et G0 à JLab et PVA4 à MAMI). Pour des raisons historiques, la France n'avait pas un rôle moteur à l'époque lointaine où ces programmes ont été définis, ce qui explique le peu d'implication des théoriciens français dans ces expériences. Cependant la problématique est la même que celle de la diffusion Compton virtuelle et donc le support théorique pour ces expériences est potentiellement présent.

Les expériences de photoproduction de mésons à GRAAL et à JLab donnent lieu à quelques travaux théoriques. La physique associée à la production de paires de leptons (HADES au GSI-Darmstadt et G7 à JLab) dans ses différents aspects (couplages des mésons vectoriels aux résonances baryoniques, propagation des mésons vectoriels dans le milieu nucléaire, restauration de la symétrie chirale à hautes densité et température) est assez largement étudiée en France.

L'utilisation des antiprotons pour l'étude du nucléon est possible avec le projet PANDA à GSI. Une participation des équipes françaises à ce projet justifierait un développement des activités théoriques autour de cette physique, en particulier la spectroscopie des mésons charmés, qui sera une part importante de ce programme de recherche.

Une activité théorique soutenue existe en liaison avec l'étude expérimentale des effets hadroniques dans les désintégrations des mésons K: Expériences NA48 au CERN (LAL, Dapnia), E865 au BNL, DAPHNE à Frascati. En particulier, les déphasages pion-pion à basse énergie sont au centre d'intérêt théorique et expérimental (voir l'expérience DIRAC au CERN). Notons aussi un intérêt traditionnel de certains théoriciens Français pour la Physique hadronique auprès des collisionneurs e^+e^- (dans le passé LEP, dans l'avenir BABAR, entre autres) concernant la polarisation hadronique du vide et les fonctions spectrales mesurées dans les désintégrations hadroniques du lepton tau.

Remarquons finalement que la phénoménologie s'appuie souvent sur des travaux théoriques associés à des programmes expérimentaux avec une faible ou sans participation française. C'est le cas des développements des lagrangiens effectifs et de la théorie de perturbation

chirale. Exemples: E865/BNL (pion-pion), DIRAC/CERN (pion-pion), DAPHNE Frascati (mésons scalaires et la règle de Zweig), PSI et DEAR (pion- et K-atomes).

d. Ouverture: Interface et liens avec la physique des particules

Du fait de la nature spécifique de cet état des lieux associé à une communauté donnée, nous n'avons présenté ci-dessus que les activités en relation la plus directe avec la physique nucléaire. Cela étant ces travaux se nourrissent largement des avancées en physique des particules et il est crucial que les physiciens issus des différentes communautés (nucléaire et particules) entretiennent ou développent des relations étroites. Il nous a donc semblé utile de dresser une brève description de la communauté très active de physiciens des particules travaillant dans le domaine de la physique hadronique tel qu'il est défini ici.

Ce domaine présente des recouvrements avec la théorie et la phénoménologie de la QCD à température et densité finies telle qu'elles peuvent être étudiées dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes (RHIC et ALICE). Ces aspects, ainsi que la liste des physiciens impliqués sont décrits plus loin.

Un aspect important pour la physique hadronique concerne les approches numériques de la QCD sur réseaux, avec les études spectroscopiques, la violation de CP dans le système des K et dans celui des B, par exemple. Plusieurs équipes développent actuellement cette direction de recherche en France, au LPT à Orsay (A. Abada, D. Becirevic, P. Boucaud, J. P. Leroy, A. Le Yaouanc, J. Micheli, O. Pene), au CPT à Marseille (L. Giusti, L. Lellouch), au CPT de l'Ecole Polytechnique (C. Roiesnel) et au LPSC de Grenoble (J. Carbonell).

Des activités théoriques liées à la spectroscopie des états charmés, et à la physique des saveurs lourdes en général, dans le cadre des théories effectives des quarks lourds, sont représentées au LPT à Orsay (D. Becirevic, S. Descotes-Genon, A. Le Yaouanc, L. Oliver, O. Pene, J.-C. Raynal), au CPT de Marseille (J. Charles), au LPC de Clermont-Ferrand (V. Morenas), ainsi qu'à l'IPN de Lyon (A. Deandrea).

Les théoriciens de particules en France ont une participation traditionnellement forte dans les études de la 'Structure du nucléon, diffusion Compton virtuelle, QCD dans le domaine perturbatif': LPT à Orsay (M. Fontannaz, D. Schiff, S. Wallon, G. Korchemsky), SPhT Saclay (H. Navelet, R. Peshansky), CPT Marseille (J. Soffer), CPTH-X (S. Munier, B. Pire), LPTHE/P6 (Y. Dokshitzer, G. Salam).

Enfin, les approches non perturbatives des interactions fortes à basse énergie (théorie des perturbations chirale, limite de grand nombre de couleurs) sont développées au LPT d'Orsay (S. Descotes-Genon) et au CPT de Marseille (M. Knecht, E. de Rafael) et appliquées dans diverses circonstances (diffusion des mésons pseudoscalaires à basse énergie, corrections radiatives aux désintégrations semileptoniques, désintégrations non leptoniques et modes rares des K, moment magnétique anormal du muon).

IV. Equation d'état de la matière nucléaire et de la matière de neutrons, astrophysique nucléaire

Ce chapitre concerne les travaux relatifs à l'équation d'état de milieux tels que la matière nucléaire et la matière de neutrons, aux propriétés superfluides de ces milieux, ainsi qu'à la physique des noyaux chauds. Un champ d'application de ces études particulièrement porteur est l'astrophysique nucléaire avec notamment la physique des étoiles à neutrons. Ce domaine est appelé à se développer dans le futur.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

ENS Lyon

Gilles Chabrier

Equation d'état et évolution stellaire

GANIL et LPC, Caen

Philippe Chomaz, Francesca Gulminelli, Marek Ploszajczak

Description du processus 'r' à partir du modèle en couches avec continuum

Comportements critiques et lois d'échelle dans les systèmes finis

Equation d'état des petits systèmes en général et des noyaux en particulier

Chaleurs spécifiques négatives

Transition liquide-gaz et courbe calorique

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Jacques Meyer

Fonctionnelle de Skyrme pour la matière de neutrons

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Elias Khan, Van Giai Nguyen, P. Schuck, Cristina Volpe, Jérôme Margueron

Description à partir des forces réalistes de l'appariement dans la matière nucléaire et dans les étoiles à neutrons

Propagation des neutrinos dans la matière de neutrons et dans les explosions stellaires

Traitement HFB des noyaux immergés dans la matière de neutrons et dans les étoiles à neutrons

Etude du processus 'r' à partir de calculs microscopiques (QRPA)

LUTH Observatoire de Paris-Meudon

Brandon Carter

Equation d'état et dynamique de la matière des étoiles à neutrons

Structure et évolution des étoiles compactes

Remarques sur la communauté scientifique concernée

Les approches microscopiques des systèmes infinis tels que la matière nucléaire, les phases de la matière des étoiles à neutrons, l'équation d'état, etc... mériteraient d'être plus étudiées en France. Cette physique est actuellement pratiquée par un petit nombre de personnes, malgré la moisson d'observations reliées à cette problématique (satellites XMM-Newton et INTEGRAL). Il faudrait se doter des moyens supplémentaires pour développer cette discipline, conformément à la volonté affichée de l'IN2P3 de donner une impulsion à l'astrophysique nucléaire (voir 'Proposition pour le Renouveau du Programme Interdisciplinaire du CNRS 'Astroparticules' ; création d'un GDR (éventuellement européen) en astrophysique nucléaire programmée).

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

L'étude de la matière nucléaire ou de la matière de neutrons avec les méthodes microscopiques du problème à N corps est non seulement utile pour décrire la physique des objets stellaires compacts, mais également à la base de la compréhension des noyaux finis (à travers l'approche de la densité locale, par exemple).

Pour ce qui est des étoiles à neutrons, les astrophysiciens français sont intéressés par l'équation d'état de la matière de neutrons afin de mieux comprendre les explosions stellaires telles que les supernovae. Un ensemble de problèmes résultent de ce que la matière des étoiles à neutrons est superfluide, ce qui a une influence majeure sur leur dynamique. Ainsi, comprendre l'évolution des 'glitches' nécessiterait de savoir calculer l'appariement 'ab initio' à partir de la force nucléon-nucléon libre. De même, la connaissance de la phase superfluide des neutrons est importante pour décrire l'écoulement du fluide de neutrons à travers le réseau cristallin formé par les noyaux dans l'écorce d'une étoile à neutrons. Des physiciens du LUTH tentent dans ce contexte d'étudier l'écoulement d'un gaz normal-fluide pour y mettre de la superfluidité ultérieurement. A l'IPN Orsay, des études généralisent à l'état superfluide l'approche initiée par Negele et Vautherin qui considère des noyaux immergés dans un gaz de neutrons. Y sont également étudiés : le processus 'r' avec l'approche microscopique de la quasi-particule RPA à grande échelle (voir aussi chapitre sur la spectroscopie des noyaux), la propagation des neutrinos dans les étoiles à neutrons et les supernovae, ainsi que d'autres processus impliquant l'interaction faible. La connaissance des libres parcours moyens des neutrinos dans la matière stellaire est en effet une donnée fondamentale des calculs de simulation de refroidissement des proto-étoiles à neutrons et des explosions stellaires.

Les études concernant la superfluidité de la matière de neutrons sont aussi directement liées à celle de la superfluidité de la matière nucléaire et donc à celle des noyaux finis. Réseaux de vortex, réalité de configurations exotiques comme les "spaghettis", "lasagne", etc., sont d'autres thèmes où seule une approche microscopique poussée peut apporter des réponses.

L'équation d'état de la matière nucléaire s'obtient avec les mêmes outils théoriques que celle

de la matière de neutrons. La première a cependant l'avantage de pouvoir être confrontée dans une certaine mesure à des expériences faites dans nos laboratoires avec des ions lourds. Aux énergies non relativistes la France possède, avec le GANIL, une position forte sur le plan expérimental. Les noyaux chauds, la multifragmentation, la transition liquide-gaz, ont été et sont toujours largement étudiés. On a 'vu' des noyaux qui se vaporisent complètement, et on a étudié et mis en évidence la courbe calorique et la décomposition spinodale. Des avancées remarquables ont été réalisées dans la compréhension de la matière chaude et dense grâce à une collaboration étroite entre les physiciens de SUBATECH, du GANIL et du LPC Caen. L'interprétation des résultats expérimentaux de collisions d'ions lourds est évidemment d'une complexité extrême et les approches théoriques combinent équations de transport, méthodes statistiques et phénoménologie. On a notamment pu conclure que, dans les collisions centrales, en dépit du caractère éphémère de la réaction, les 'noyaux' produits sont en équilibre thermodynamique, avant de décroître par vaporisation, expansion, multifragmentation, etc La physique des noyaux chauds a également eu pour conséquence une grande activité théorique au GANIL et au LPC Caen autour de la thermodynamique et des 'transitions de phase' dans les systèmes à petit nombre de particules (noyaux, agrégats métalliques).

V. Plasma de quarks et de gluons, collisions noyau-noyau à haute énergie

Ce chapitre regroupe les recherches théoriques sur la matière nucléaire à grande densité baryonique et/ou haute température, telle qu'on peut la produire dans des collisions noyau-noyau à haute énergie (quand les degrés de liberté internes des nucléons interviennent dans la dynamique des collisions). Ce domaine a des recouvrements avec au moins trois autres chapitres (Réactions nucléaires, Physique hadronique, Equation d'état de la matière nucléaire), ainsi qu'avec la physique des particules.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

CEA-Saclay: Service de Physique Théorique

Jean-Paul Blaizot, François Gélis, Edmond Iancu, Jean-Yves Ollitrault

Théorie des champs à température finie

Saturation en QCD

Phénoménologie des collisions d'ions lourds ultrarelativistes

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Guy Chanfray, Dany Davesne

Restauration de la symétrie chirale à haute densité

IRSAMC, Toulouse

Mohamed Belkacem

Modèles microscopiques de transport pour les collisions ultrarelativistes (UrQMD)

Laboratoire d'Annecy-Le-Vieux de Physique Théorique

Patrick Aurenche

Théorie des champs à température finie

Laboratoire de Physique Théorique, Orsay

Dominique Schiff

Théorie des champs à température finie

Théorie des champs hors d'équilibre

Thermalisation dans les collisions d'ions lourds ultrarelativistes

Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies, Paris

Yuri Dokshitzer, Jean Letessier

Perte d'énergie des partons dans la matière ("jet quenching")

Modèle statistique pour la production de particules dans les collisions noyau-noyau

SUBATECH, Nantes

Jörg Aichelin, Pol-Bernard Gossiaux, Thierry Gousset, Klaus Werner

Modèles microscopiques pour les collisions ultrarelativistes hadron-hadron et noyau-noyau (NEXUS)

Modèles statistiques pour la production de particules dans les collisions proton-proton et noyau-noyau

Modèles effectifs (Nambu–Jona-Lasinio) pour étudier la transition de phase chirale

Production de charmonium dans les collisions proton-proton et noyau-noyau

Remarques sur la communauté scientifique concernée

Plusieurs des physiciens de la liste ci-dessus ne travaillent que partiellement dans ce domaine, et on peut considérer que les thèmes d'activité décrits ci-dessous occupent l'équivalent d'au plus 8 physiciens à temps plein. Parmi ceux-ci, moins de la moitié travaillent sur les collisions d'ions lourds à proprement parler. Cela semble peu, en regard de l'investissement considérable de la France dans les expériences d'ions lourds du CERN (SPS et LHC) et de Brookhaven (RHIC).

Cette communauté est relativement jeune, puisque la moitié des physiciens de la liste ci-dessus ont moins de 40 ans. Elle comprend aussi plusieurs personnes appartenant à la communauté des physiciens des particules. Sa répartition géographique est inégale. Elle se concentre essentiellement, pour les éléments les plus jeunes, sur deux pôles : Subatech à Nantes et le SPhT à Saclay, qui ont chacun leurs spécificités thématiques. Des départs à la retraite non compensés par des embauches ont affaibli le poids du LPT Orsay pour ce domaine.

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

On peut ébaucher une classification thématique en sous-rubriques, suivant les outils théoriques utilisés :

Applications de la chromodynamique quantique

Un noyau accéléré à très haute énergie est vu comme un gaz de partons, qu'on peut étudier au moyen de la théorie fondamentale des interactions fortes, la chromodynamique quantique. La spécificité nucléaire est ici simplement liée à la densité de partons, plus grande que pour un proton, qui peut entraîner le phénomène de "saturation", très étudié ces dernières années tant sur le plan théorique que phénoménologique. Une approche semi-classique de ce phénomène (dite du "condensat de verre coloré"), représentée essentiellement à Saclay, peut permettre des calculs *ab initio* de plusieurs quantités observables (notamment la production de particules dans les collisions proton-noyau, la production de dileptons dans les collisions noyau-noyau...). On peut également étudier d'un point de vue théorique la thermalisation des particules produites dans une collision d'ions lourds ultrarelativistes,

la perte d'énergie d'un parton rapide traversant un milieu, la production de charmonium, qui sont autant de phénomènes d'un intérêt crucial pour les collisions d'ions lourds ultrarelativistes. La France joue, pour ce domaine d'activité, un rôle de tout premier plan au niveau mondial.

Théorie des champs à température finie

Des calculs perturbatifs de chromodynamique quantique permettent de calculer analytiquement *ab initio* de nombreuses propriétés physiques d'un système de quarks et de gluons à l'équilibre thermodynamique à haute température. On s'intéresse notamment aux propriétés thermodynamiques (équation d'état), qui sont plus souvent obtenues numériquement par des calculs sur réseaux ; on calcule également des quantités directement utiles pour la phénoménologie des collisions d'ions lourds, telles que le taux de production thermique de dileptons ou de photons. On cherche également à établir un formalisme permettant d'étudier les phénomènes hors d'équilibre. Pour cette rubrique également, la France est en position de leader.

Théories effectives

Des théories effectives incorporant au mieux les contraintes phénoménologiques ont été utilisées pour décrire la matière hadronique dense et chaude et étudier la restauration de la symétrie chirale. Des travaux ont porté sur le corrélateur vectoriel et son mélange au corrélateur axial pour interpréter en termes de restauration chirale les expériences de production de dileptons au CERN/SPS. Une problématique similaire, quoique dans un régime de plus haute densité baryonique et de plus basse température, se retrouve dans les expériences en cours auprès de HADES au GSI. Des théories effectives sont aussi utilisées pour étudier le diagramme de phase du plasma de quarks et de gluons dans la limite des basses températures et très hautes densités, où l'on attend le phénomène de supraconductivité de couleur.

Modèles microscopiques pour les collisions d'ions lourds

Divers codes numériques, basés sur des théories de transport, permettent de calculer la production de particules dans diverses collisions (notamment proton-proton ou noyau-noyau) et de comparer avec l'ensemble des résultats expérimentaux (contrairement aux calculs plus fondamentaux mentionnés plus haut, qui ne s'appliquent qu'à des observables très particulières). Cette activité, qui couvre toute la gamme d'énergie du SIS de Darmstadt jusqu'à RHIC et LHC, est maintenant concentrée à Nantes.

Autres approches phénoménologiques

Des modélisations plus simples sont également à l'étude pour des observables particulières : modèles statistiques pour les taux de production de hadrons, production du charmonium, phénomènes de "flow", etc. Une partie de l'activité phénoménologique concerne également les méthodes utilisées pour analyser les données expérimentales, notamment les corrélations multiples.

c. Adéquation de l'activité théorique aux programmes expérimentaux

La France s'est largement engagée dans les programmes expérimentaux d'étude des collisions d'ions lourds ultrarelativistes. Cet engagement, d'abord au SPS du CERN et ensuite

à RHIC (Brookhaven) et dans le projet ALICE au LHC du CERN, implique de plus en plus de laboratoires. L'activité théorique dans ce secteur n'a pas du tout suivi la même évolution, ce qui n'est pas sans inconvénient pour les groupes expérimentaux. Il convient de distinguer les travaux de théorie des champs, traitant principalement de QCD à température finie, et les études, plus phénoménologiques, de la dynamique des collisions. Ce second aspect est très important pour interpréter des données nécessairement complexes et apparaît très insuffisamment développé en France actuellement. Il s'agit d'un domaine où les collaborations entre physiciens nucléaires et physiciens des particules peuvent être particulièrement fructueuses et où la frontière entre les deux communautés a tendance à disparaître.

VI. Développements de la théorie du problème à N corps nucléaire et impact sur les autres disciplines

En physique nucléaire, la théorie du problème à N corps a connu et connaît encore un développement important qui est spécifique aux systèmes de fermions fortement corrélés mais *de taille finie*. Ce développement concerne surtout la brisure de symétries et leur restauration par les méthodes qui vont au-delà des approches traditionnelles comme la projection et la RPA. Les méthodes mises au point en physique nucléaire sont aujourd'hui largement reprises dans d'autres domaines comme celui de la matière condensée. L'inclusion des fluctuations quantiques est également particulièrement développée en physique nucléaire et des méthodes originales et nouvelles y sont élaborées et appliquées à des domaines aussi variés que les théories des champs effectives hadroniques et la physique des agrégats métalliques.

a. Physiciens permanents par laboratoire et objets des travaux

CSNSM Orsay

Hubert Flocard

Méthodes variationnelles

CEA-Saclay: Service de Physique Théorique

Jean-Paul Blaizot, Edmond Iancu

Méthodes variationnelles

Gaz de Bose

Approches self-consistantes pour la thermodynamique du QGP

GANIL et LPC, Caen

Philippe Chomaz, Olivier Juillet, Francesca Gulminelli, Marek Ploszajczak

Approches stochastiques du problème quantique à N corps

Théorie des fluctuations universelles

Fragmentation à l'équilibre et hors équilibre

Théorie des systèmes quantiques ouverts

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

Guy Chanfray, Dany Davesne

Méthodes non perturbatives appliquées à la théorie des champs

Brisures et restauration de symétries et RPA self-consistante

Institut de Physique Nucléaire d'Orsay

Cécile Martin, Peter Schuck, Michael Urban, Marcel Vénéroni

Méthodes non perturbatives appliquées à la théorie des champs
Brisures et restauration de symétries et RPA self-consistante
Méthodes variationnelles
Méthodes semi-classiques : noyaux atomiques, grains métalliques
supraconducteurs et atomes froids dans les pièges

IRSAMC Toulouse

Mohamed Belkacem, Mai Dinh, Eric Suraud

Dynamiques des agrégats métalliques
Descriptions cinétiques des systèmes finis de fermions

LPSC Grenoble

Jaume Carbonell, Bernard Sylvestre-Brac

Problèmes à petits nombres de corps

SUBATECH Nantes

Thierry Gousset, Klaus Werner

Modélisations de l'interaction entre les rayons cosmiques de haute énergie
et les noyaux

Remarques sur la communauté scientifique concernée

Du fait des remarques introductives les contours de la communauté travaillant dans ce domaines peuvent fluctuer. Il est cependant intéressant de noter qu'elle est relativement jeune. En effet parmi les 19 physiciens dénombrés, 7 ont moins de quarante ans et 4 ont entre quarante et cinquante ans. Les forces vives dans ce domaine sont donc bien présentes et réparties dans un éventail assez large de laboratoires.

b. Thèmes de recherche, objectifs et perspectives

Les noyaux sont des systèmes quantiques finis qui nécessitent des approches théoriques particulières, généralement fondées sur les techniques du problème à N corps. Ces approches théoriques doivent par exemple tenir compte des fluctuations quantiques, de la restauration de symétries spontanément brisées ou encore de la non-homogénéité des systèmes. Les théoriciens nucléaires ont donc consenti, au cours des années passées, des efforts conséquents afin de développer des approches du problème à N corps incluant ces différents aspects. Ce sont, par exemple, les méthodes de projection, les extensions self-consistantes de la RPA et les méthodes semiclassiques. Ces approches sont encore explorées et étendues de manière intensive de nos jours. Elles sont également largement reprises dans d'autres

domaines traitant de systèmes quantiques de taille finie comme les agrégats métalliques, les atomes froids dans les pièges, etc... La technique de projection sur un bon nombre de particules de l'ansatz BCS, développée en physique nucléaire, a été ainsi appliquée aux nano-grains supraconducteurs par les théoriciens de la matière condensée, pour ne citer qu'un seul exemple.

Nous décrivons ci-dessous quelques développements spécifiques récents qui concernent des méthodes de théorie des champs appliquées à la matière hadronique ou de quarks, des travaux sur le problème à N corps nucléaire proprement dit et des développements importants dans le problème à petit nombre de corps nucléaire.

Les méthodes variationnelles et non perturbatives issues de la physique nucléaire appliquées aux théories quantiques des champs sont activement étudiées à Orsay et Lyon. Cela va des approches HFB (approximation Gaussienne pour les théories bosoniques) jusqu'à TDHF et à la RPA renormalisée. Des premiers résultats très encourageants pour les théories de jauge ont été obtenus. Un effort important est consacré au problème des brisures spontanées de symétrie et des transitions de phase. La RPA appliquée aux théories chirales a ainsi permis des applications phénoménologiques concernant l'évolution du condensat chiral à densité finie en relation avec des expériences de production de deux pions. Ce même problème des brisures de symétries a aussi conduit à des progrès notables dans le problème à N corps lui-même, *via* l'application de la RPA complètement self-consistante, à des modèles simples de superfluidité nucléaire. L'approche self-consistante de Luttinger et Ward permettant le calcul des grandeurs thermodynamiques à partir des propagateurs habillés a été adaptée au plasma de quarks et de gluons ; elle donne des résultats remarquablement proches de ceux obtenus sur réseau dès que la température n'est pas en deçà de deux fois la température critique.

Des études basées sur une approche stochastique du problème quantique à N corps sont poursuivies à Caen. Ce formalisme permet de réinterpréter la solution exacte des problèmes quantiques à N-corps comme la moyenne d'un processus stochastique à un corps gouverné par des équations de champ moyen augmentées d'un bruit gaussien directement déduit du Hamiltonien. L'objectif est clairement pluridisciplinaire et concerne les propriétés quantiques de systèmes en interaction comme les atomes ultra-froids, les noyaux, les agrégats métalliques ou les systèmes de spins. Des résultats intéressants, corrigeant certains défauts des méthodes Monte-Carlo ont été obtenus et ont permis entre autre une meilleure compréhension de cette approche en vue d'une application au problème à N corps nucléaire. Ces travaux visent aussi à appréhender les transitions de phase dans les systèmes fermioniques de petite taille, comme les noyaux ou les agrégats métalliques.

En parallèle les techniques de résolution exacte de l'équation de Schrödinger pour les systèmes à petit nombre de corps ("Few-nucleon problem") continuent de se développer. Elles ont mis en évidence la nécessité de composantes à trois corps dans la force nucléaire. Les calculs réalisés pour les noyaux légers ($A = 2, 3, 4, \dots$) ont en effet montré que les forces à deux corps sont incapables de reproduire l'énergie de liaison de ces noyaux, l'écart expérience-théorie augmentant avec A . Des calculs de diffusion, limités pour l'instant à $A = 4$, montrent que, même avec des corrections à trois corps, il n'est pas possible d'obtenir une description satisfaisante des états résonants (présents par exemple dans le

système $n + t$). Notre compréhension du noyau atomique repose actuellement sur des approches théoriques *a priori* distinctes, qui dépendent du nombre, petit ou grand, de nucléons. On s'attend à ce que ces deux types d'approches deviennent de plus en plus complémentaires dans le futur.

c. Impacts sur les autres disciplines

Les exemples précédents présentent un certain aspect transdisciplinaire mais on peut aussi citer un certain nombre de travaux de théoriciens nucléaires qui ont un impact direct sur d'autres disciplines.

Le problème à N-corps est étudié à Toulouse dans le cadre de l'interaction de champs lasers intenses avec des agrégats atomiques. Une description microscopique détaillée contenant toutes les corrélations électroniques étant hors de portée, l'étude est menée ici dans le cadre de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT) dans une approche dynamique. Plusieurs études ont été réalisées pour différents types d'agrégats et différentes intensités laser avec des résultats très prometteurs. Ce formalisme a été étendu à la limite semi-classique, donnant lieu à une équation de type Vlasov, ce qui a permis par la suite d'inclure les corrélations dynamiques sous la forme d'un terme de collisions de type Uehling-Uhlenbeck, comme c'est depuis longtemps l'usage en physique nucléaire.

Les atomes froids fermioniques montrent beaucoup d'analogies avec les systèmes nucléaires. Un certain nombre de théoriciens, en particulier à l'IPN d'Orsay, mettent depuis quelques années leur savoir-faire à contribution dans ce domaine. L'un des exemples les plus jolis de transdisciplinarité est la découverte de l'analogie dans les systèmes d'atomes piégés du mode de ciseau nucléaire et sa description utilisant une approche analogue à celle de la physique nucléaire.

Citons encore plusieurs développements récents relatifs au problème à N corps et les applications qui en ont été faites à des systèmes non nucléaires. L'emploi de méthodes semi-classiques a permis d'obtenir, simultanément dans les cas des grains métalliques supraconducteurs et des noyaux superfluides, une nouvelle formule qui rend compte de la dépendance *a priori* surprenante du gap par rapport à la taille du système. Les méthodes de projection et de restauration de symétries spontanément brisées développées en physique nucléaire sont également largement reprises et amplement citées à propos de ces systèmes. De nouvelles approches variationnelles permettant le traitement des fluctuations quantiques ont aussi été développées pour ce type de problème. Mentionnons également les progrès que ces méthodes ont récemment permis de réaliser dans le calcul de la température critique d'un gaz de Bose homogène dilué.

Les activités des théoriciens de physique nucléaire ont de façon générale des implications multiples. La physique à petit nombre de corps est par essence de nature transdisciplinaire et son domaine d'application couvre, outre la physique nucléaire et hadronique, différentes branches de la physique atomique ou moléculaire. L'équipe du LPSC de Grenoble spécialiste du problème à quelques nucléons a ainsi pu prédire l'existence d'un nouvel état lié de l'ion moléculaire H_2^+ ayant une énergie extrêmement faible. Les théoriciens

nucléaires jouent aussi un rôle crucial dans la modélisation d'interactions mettant en jeu des noyaux, destinée à interpréter les expériences de détection de rayons cosmiques de très haute énergie. L'apport de la physique nucléaire théorique au niveau des expériences ayant pour but de mesurer ou de contraindre la masse des neutrinos (désintégration double beta, détection des neutrinos solaires ou atmosphériques, ...) a été et reste également très important.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au cours des deux dernières décennies, la physique nucléaire théorique a connu une évolution considérable. Elle a profondément réorienté ses activités et développé un grand nombre d'approches théoriques originales.

L'avènement de faisceaux de **noyaux exotiques** va, à terme, enrichir par milliers la carte des noyaux aussi bien du côté riche en protons que, et surtout, du côté riche en neutrons. Des phénomènes nouveaux comme les systèmes borroméens, les halos et peaux de neutrons, la structure des états faiblement liés ou résonants près des drip-lines, les décroissances exotiques, l'apparition de nouveaux nombres magiques et la découverte de nouveaux types d'excitations collectives doivent encore être étudiés et compris. L'interprétation de ces phénomènes requiert une description unifiée des états faiblement liés et du continuum, c'est-à-dire une théorie commune de la structure et des réactions nucléaires à basse énergie. Parallèlement aux développements du modèle en couches et aux extensions des théories de champ moyen, la mise au point de nouvelles formes d'interactions effectives constitue en outre un supplément nécessaire à la compréhension des noyaux exotiques.

L'extension de la carte des noyaux inclut aussi les noyaux super-lourds, un sujet d'une très grande actualité. La structure de ces noyaux, leurs modes de désexcitation, et surtout, la description des mécanismes permettant de les produire, représentent un enjeu majeur en physique nucléaire.

La France occupe depuis longtemps une position de premier plan en **structure nucléaire** et les travaux qu'elle réalise sont à l'avant-garde de ce qui se fait dans le monde. Cependant, pour l'avenir, l'adéquation de l'effectif des chercheurs aux objectifs scientifiques va requérir un effort de recrutement puisque, en 2015, près de 50% des théoriciens de structure nucléaire auront pris leur retraite. Pour l'instant, seul le CEA-DAM a une politique de renouvellement conséquente.

En plus des outils classiques comme les approches de champ moyen, le traitement des corrélations d'appariement, la RPA et le modèle en couches, de nouvelles méthodes théoriques du problème à N corps appliqués aux noyaux sont en cours de développement. D'importants progrès ont déjà été réalisés et ces méthodes se propagent vers d'autres disciplines confrontées aux mêmes problématiques des systèmes quantiques finis comme la physique des nano-grains métalliques ou des atomes froids dans des pièges magnétiques. On constate un développement et un essaimage analogues en ce qui concerne les approches à petit nombre de corps.

Une branche de la physique nucléaire qui, en France, est particulièrement appelée à se développer rapidement dans les années à venir est l'**astrophysique nucléaire** théorique. En effet, la France consent actuellement un très grand effort d'investissement expérimental dans ce domaine (satellites XMM et INTEGRAL entre autres) et, pour le rentabiliser, la

théorie devra suivre. La structure des noyaux exotiques est particulièrement concernée (processus "r", nucléosynthèse, ...), mais le sont également la compréhension des étoiles compactes (étoiles à neutrons par exemple), leur équation d'état, la fusion d'objets compacts, etc... L'astrophysique nucléaire occupe une place importante dans la CID 'Astroparticules' du CNRS créée en 2003. Cependant, le nombre de théoriciens français travaillant en astrophysique nucléaire dépasse à peine la demi-douzaine. La plupart d'entre eux sont des chercheurs issus de la structure nucléaire qui consacrent une partie de leur temps à l'astrophysique nucléaire. Un centre théorique en astrophysique nucléaire, comme il en existe par exemple à l'Université Libre de Bruxelles, fait certainement défaut en France. Il serait extrêmement souhaitable de remédier à cette situation dans le futur.

Les **réactions nucléaires** à basse, voire à très basse énergie sont actuellement dans une phase de renaissance en relation avec les descriptions des noyaux faiblement liés près des drip-lines, où les problématiques de structure et de réaction sont inséparables. La compréhension de la structure des noyaux à halo requiert en effet une connaissance des couplages au continuum, de même que la description des réactions demande une connaissance des couplages aux états discrets corrélés. Un effort théorique concernant l'étude de ces réactions sera également profitable à l'astrophysique nucléaire. Dans le cas des réactions à très faible nombre de corps, les méthodes de résolution exacte de l'équation de Schrödinger constituent l'approche la plus puissante, et il est important que le savoir-faire existant actuellement en France dans ce domaine soit préservé.

Dans la physique des réactions noyau-noyau à l'énergie de Fermi, l'un des problèmes les plus importants reste la compréhension théorique de la **multifragmentation**. Les enjeux associés à cette étude sont multiples. D'une part les états fragmentés formés par collision sont un objet d'étude *per se*, qui permettent une métrologie quantitative de l'équation d'état de la matière nucléaire en conditions extrêmes de pression et énergie d'excitation. D'autre part les réactions de fragmentation constituent un laboratoire unique pour le domaine pluridisciplinaire de la mécanique statistique hors équilibre des femto-systèmes. Des applications aussi variées que le développement de corrélations dans les systèmes quantiques denses, les invariances d'échelle associées aux phénomènes critiques et la coexistence de phases dans les petits systèmes sont développés par les théoriciens français, en étroite collaboration avec les équipes expérimentales engagées sur ces sujets.

Avec l'avènement de faisceaux radioactifs de haute énergie à FAIR (GSI) et la proposition d'EURISOL, une nouvelle frontière s'ouvre pour la dynamique et la thermodynamique des noyaux. La variation du degré de liberté d'isospin dans les réactions fournira des contraintes décisives sur le diagramme de phase et de nouvelles observables pour la détermination de l'équation d'état en conditions extrêmes de N/Z. La fragmentation des noyaux avec un rapport N/Z extrême est attendue pour des excitations relativement faibles, un régime où les effets quantiques dans la production des amas sont cruciaux. Cet aspect n'a pas été suffisamment développé jusqu'au présent et il constitue un enjeu théorique majeur. Un effort dans la construction d'une théorie quantique de la fragmentation va aussi permettre d'étendre les théories d'échelle développées pour les systèmes classiques avec des applications allant bien au-delà de la physique nucléaire. La connaissance de la dépendance en isospin des propriétés macroscopiques de la matière nucléaire dans des

régions éloignées de la saturation est aussi de grande importance pour la nucléosynthèse et la dynamique des objets stellaires. Nous pouvons donc nous attendre à une importante synergie entre les communautés d'astrophysique, de structure et des réactions nucléaires dans les prochaines années.

Le domaine des réactions nucléon-noyau est actuellement relativement peu développé en France. Dans ce domaine, des progrès considérables ont été réalisés dernièrement à travers l'affinement des théories statistiques de la désexcitation nucléaire d'une part, et la mise au point de nouveaux potentiels d'interaction – potentiels optiques notamment – d'autre part. Etant donné les investissements réalisés dans le retraitement des **déchets nucléaires**, un support théorique accru dans ce domaine et aussi dans celui de la fission des actinides se révélera probablement nécessaire dans un futur proche.

L'avènement d'accélérateurs d'ions lourds dans le domaine du GeV par nucléon a fait apparaître l'insuffisance des degrés de liberté purement nucléoniques. A haute densité, dans la matière nucléaire, des résonances baryoniques sont excitées, qui se désintègrent en émettant des mésons dont les propriétés dans le milieu nucléaire peuvent être totalement différentes de celles observées à l'état libre. D'où l'importance d'étudier la structure des hadrons dans le milieu nucléaire. Un aspect intéressant de cette étude est la manifestation de la restauration partielle de la symétrie chirale dans le milieu nucléaire.

La découverte récente de **nouveaux hadrons** et l'étude de plus en plus fine de leur structure suscitent de très nombreux travaux théoriques. A basse énergie, la théorie des perturbations chirale fournit une approche effective et prédictive de la description de différents processus de diffusion (méson-méson et méson-baryon). Elle apporte par ailleurs d'importantes contraintes à d'autres approches dans la limite chirale. A haute énergie, des modèles de la structure du nucléon en termes de quarks et de gluons permettent de décrire le très grand nombre de résultats obtenus à HERA sur les distributions de partons de Feynman. Les distributions de partons généralisées vont permettre d'ajouter de nouvelles dimensions cinématiques. Elles contiennent des informations sur l'origine du spin du nucléon et sa structure transverse. Des mesures de processus exclusifs durs sont entreprises à JLab, à HERA et au CERN pour les déterminer. Le très petit nombre de jeunes théoriciens de physique hadronique paraît tout à fait insuffisant pour épauler ces programmes à terme. Une approche prometteuse de ces problèmes, malheureusement dotée de peu de moyens en France, est la **Chromodynamique Quantique sur Réseau**. Cette technique est importante pour la validation des théories effectives notamment en combinaison avec les méthodes du groupe de renormalisation, et il serait du plus grand intérêt qu'elle soit fortement développée. Dans ce domaine, comme dans celui des collisions ultrarelativistes évoqué plus loin, la frontière entre physique nucléaire et physique des particules est en train de s'estomper.

Avec la mise en route du nouvel accélérateur RHIC, la physique nucléaire a de nouveau franchi un pas. Ce collisionneur ultrarelativiste permet de poursuivre l'étude du **plasma de quarks et de gluons** entreprise au SPS du CERN. Les équipes de théoriciens français sont très bien placées dans la compétition mondiale pour décrire les processus mis en jeu. Elles ont participé au développement de plusieurs approches originales: ceci concerne surtout

la théorie du "condensat de verre coloré" et de la théorie des champs à température finie. Les modèles de transport tels que VENUS, NEXUS et URQMD, très utiles à l'interprétation de réactions où l'expansion de la matière atteint la moitié de la vitesse de la lumière, ont été développés ou co-développés en France. Nos théories effectives permettent de prédire les taux de production de particules, les effets de thermalisation, la perte d'énergie des particules et l'étude de la transition de phase chirale. L'équation d'état du système de quarks et de gluons à haute température ainsi que des phénomènes comme la supraconductivité de couleur et le comportement des hadrons au voisinage de la transition de phase sont aussi des thématiques abordées en France.

Sur le plan expérimental, la France effectue, et surtout va encore effectuer, un investissement considérable. Elle est présente au RHIC et aura un rôle très important au LHC. Sur le plan théorique, les embauches n'ont malheureusement pas suivi au même rythme puisque les effectifs français sont restés constants ces quatre dernières années. Cette situation est d'autant plus regrettable que les expériences au RHIC (et plus tard au LHC) requièrent une collaboration entre expérimentateurs et théoriciens beaucoup plus étroite que ce ne fut le cas dans le passé. Ceci concerne surtout le développement des programmes de simulation sans lesquels l'interprétation des résultats expérimentaux est pratiquement impossible. Un effort dans ce sens est réalisé aux États-Unis où presque tous les laboratoires impliqués dans la physique des hadrons et du plasma de quarks et de gluons ont renforcé leurs groupes de théorie créant une collaboration forte entre théorie et expérience. Le programme RHIC a ainsi permis d'embaucher une douzaine de théoriciens. La Communauté Européenne va dans le même sens car elle finance, dans le cadre de l'I3HP du 6ème PCRD, trois réseaux de théorie qui ont pour objectif de développer les approches nécessaires à l'interprétation des données expérimentales. Etant donné le nombre des problèmes ouverts et la complexité des réactions mises en jeu, un accroissement de la participation française à cet effort serait très souhaitable. Compte tenu de ce qui a été dit plus haut, cette implication devrait concerner à la fois les physiciens nucléaires et les physiciens des particules.

En ce qui concerne les nécessités de la communauté dans l'immédiat, nous voyons actuellement se profiler quatre domaines où un effort urgent de recrutement de théoriciens est nécessaire:

i) Afin de soutenir les programmes expérimentaux du GANIL (en particulier ceux de SPIRAL II), avec la vague des départs à la retraite prévisible dans les toutes prochaines années, la structure nucléaire devra être renforcée de façon à maintenir l'effectif actuel.

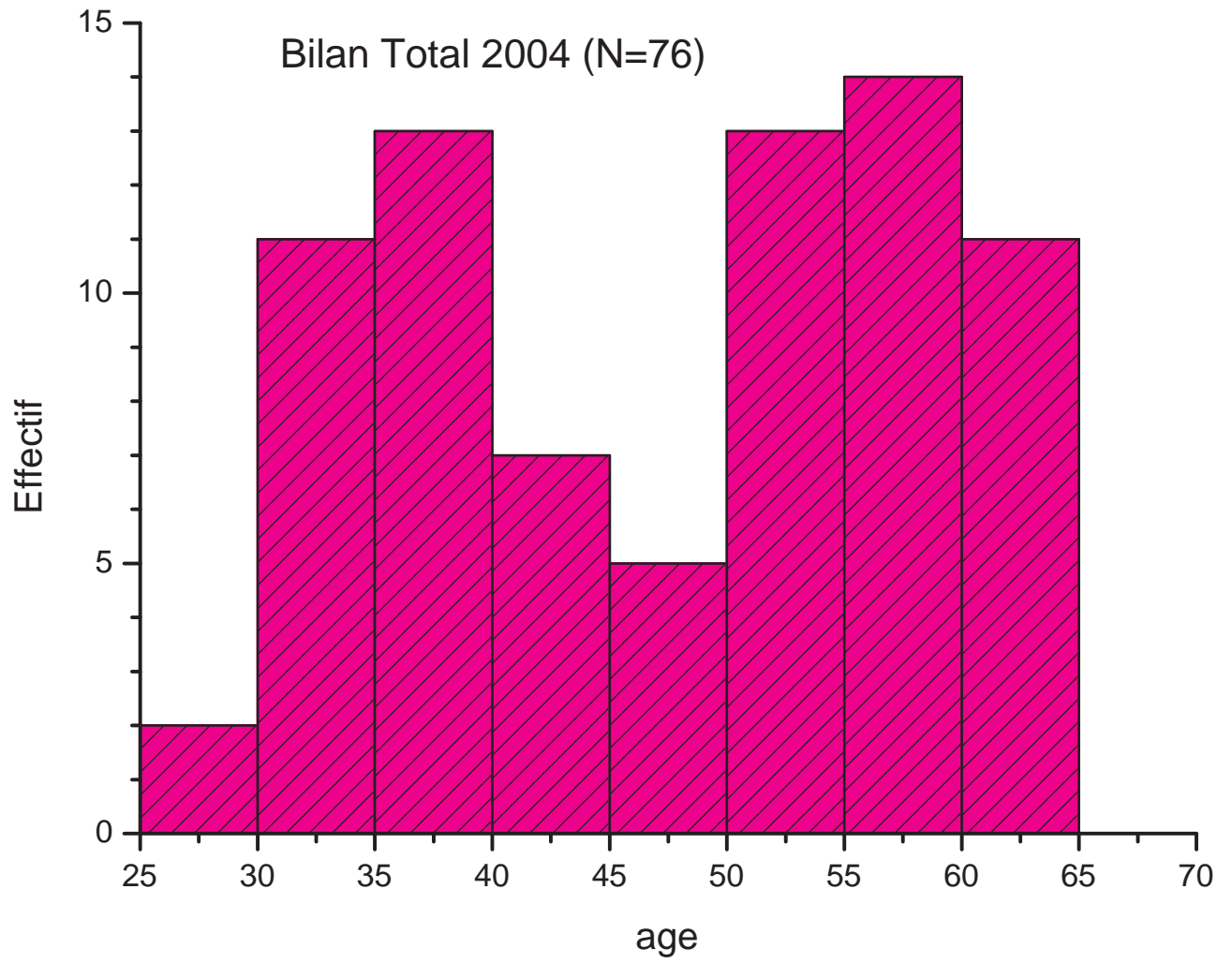
Nous attirons particulièrement l'attention sur le fait que le savoir-faire relatif à deux méthodes théoriques de base, le modèle en couches et la résolution exacte des systèmes à quelques nucléons, ne reposent plus que sur quelques personnes.

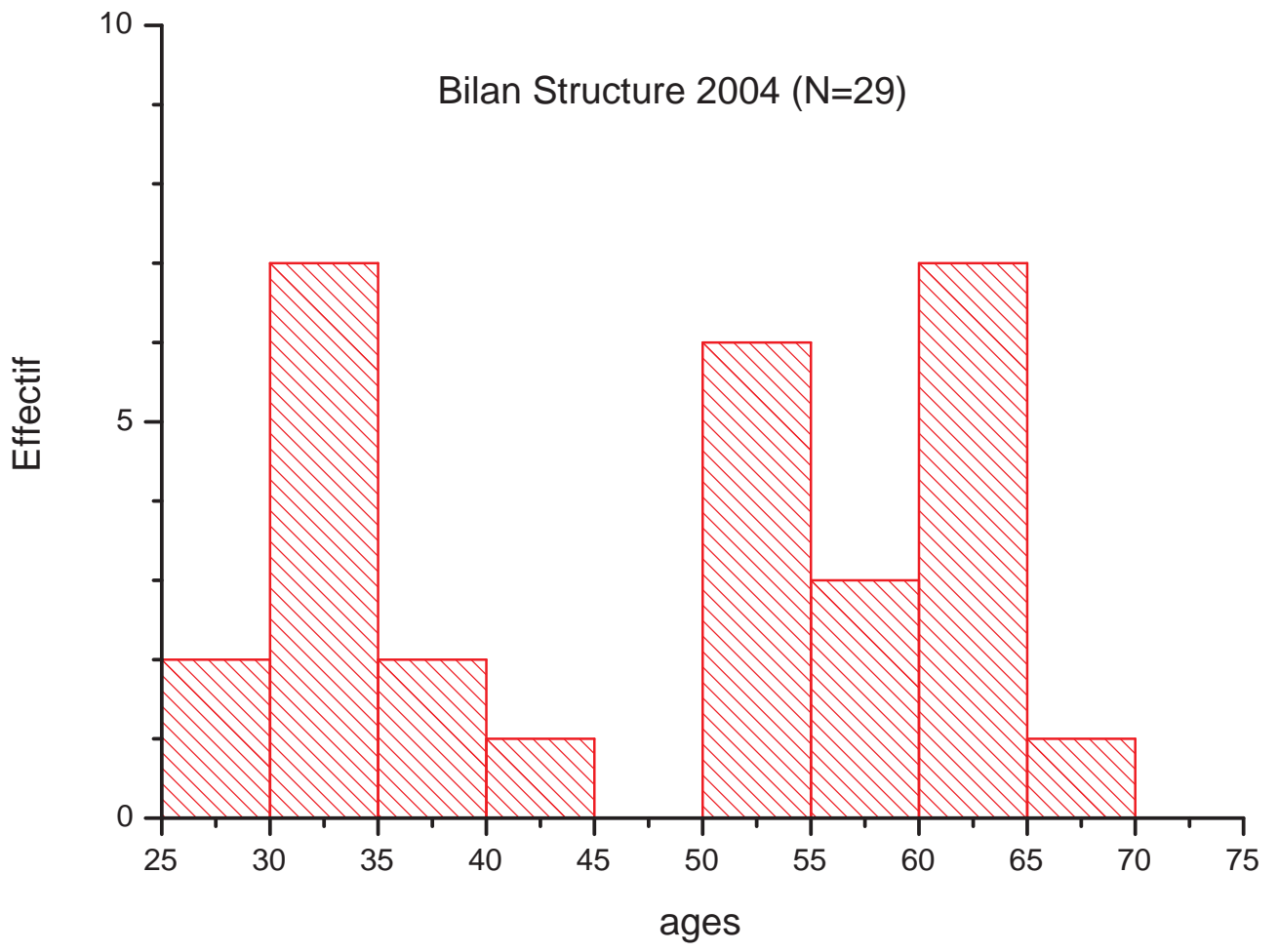
ii) Etant donné le très grand investissement fait par la France dans les programmes de collisionneurs relativistes (RHIC, LHC), le développement d'un accompagnement théorique, surtout en ce qui concerne la simulation numérique des collisions, est extrêmement souhaitable. Cet effort devrait être fait en concertation avec la communauté des physiciens des particules.

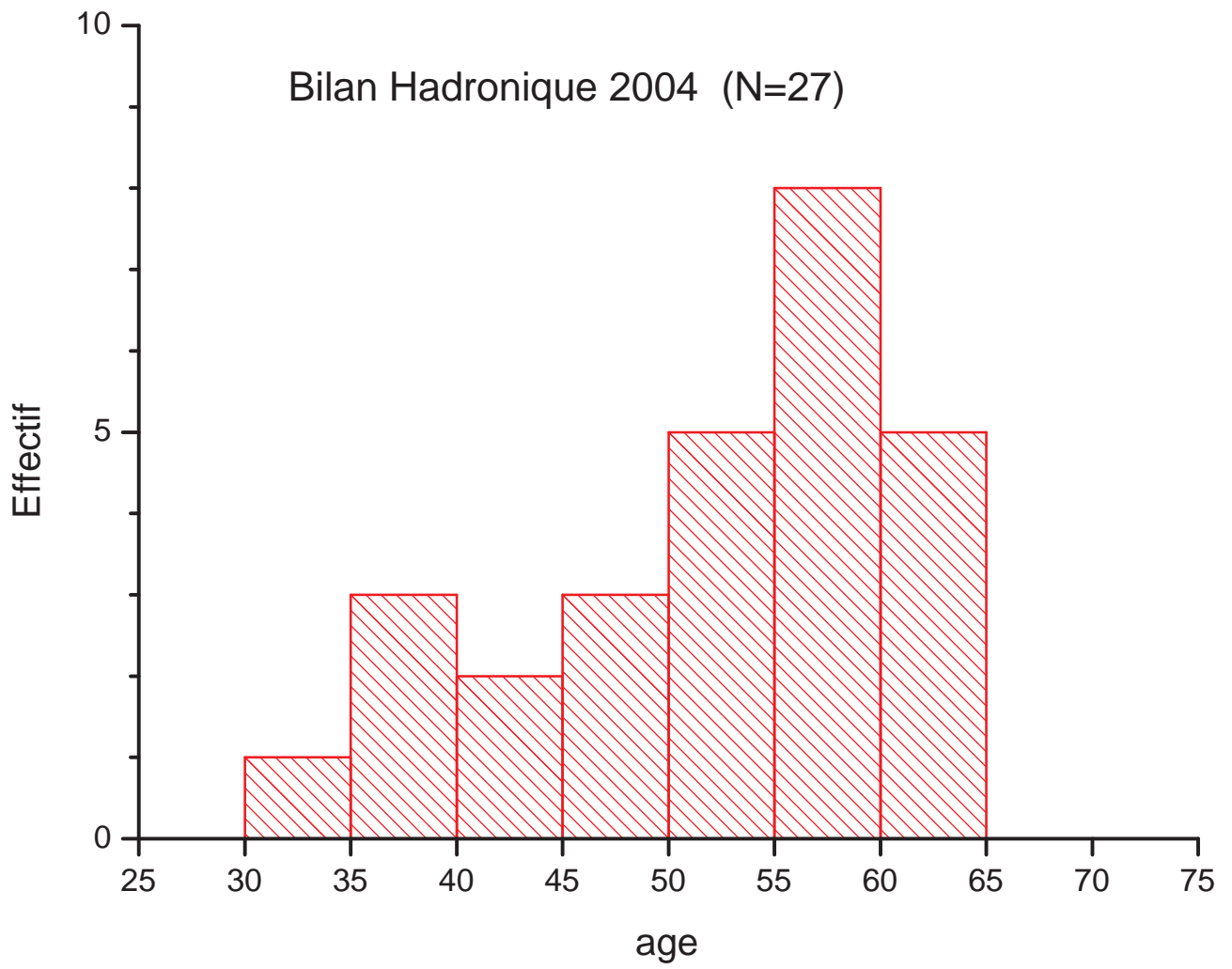
iii) Le renouvellement de la communauté des théoriciens de physique hadronique, particulièrement pour l'étude de la structure du nucléon qui sous-tend les programmes expérimentaux à JLab et au CERN, est indispensable.

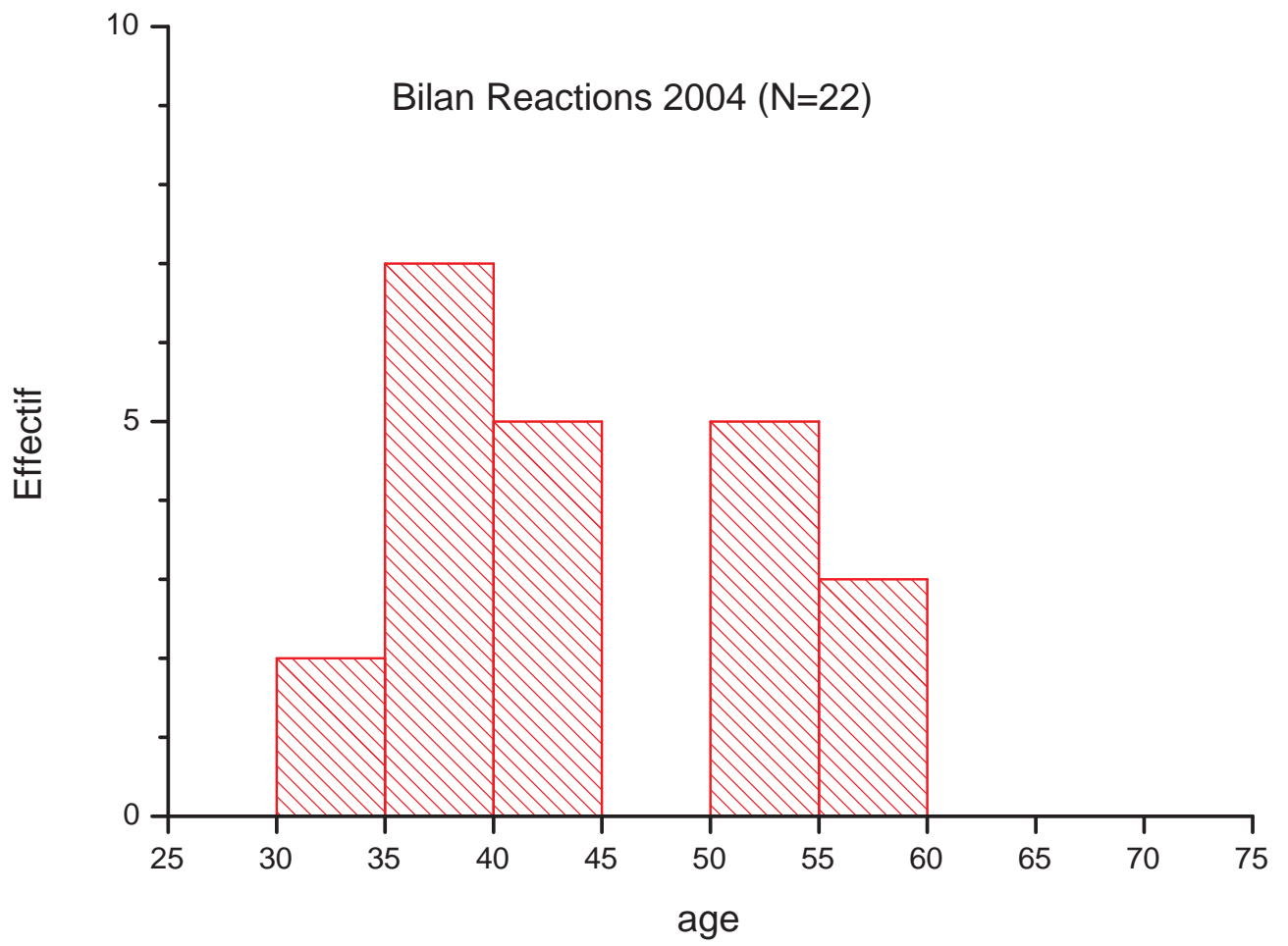
iv) Au regard des investissements très importants effectués par la France dans le domaine de l'astrophysique nucléaire, il serait très souhaitable de fédérer et d'élargir la communauté trop peu nombreuse des théoriciens français travaillant dans ce domaine.

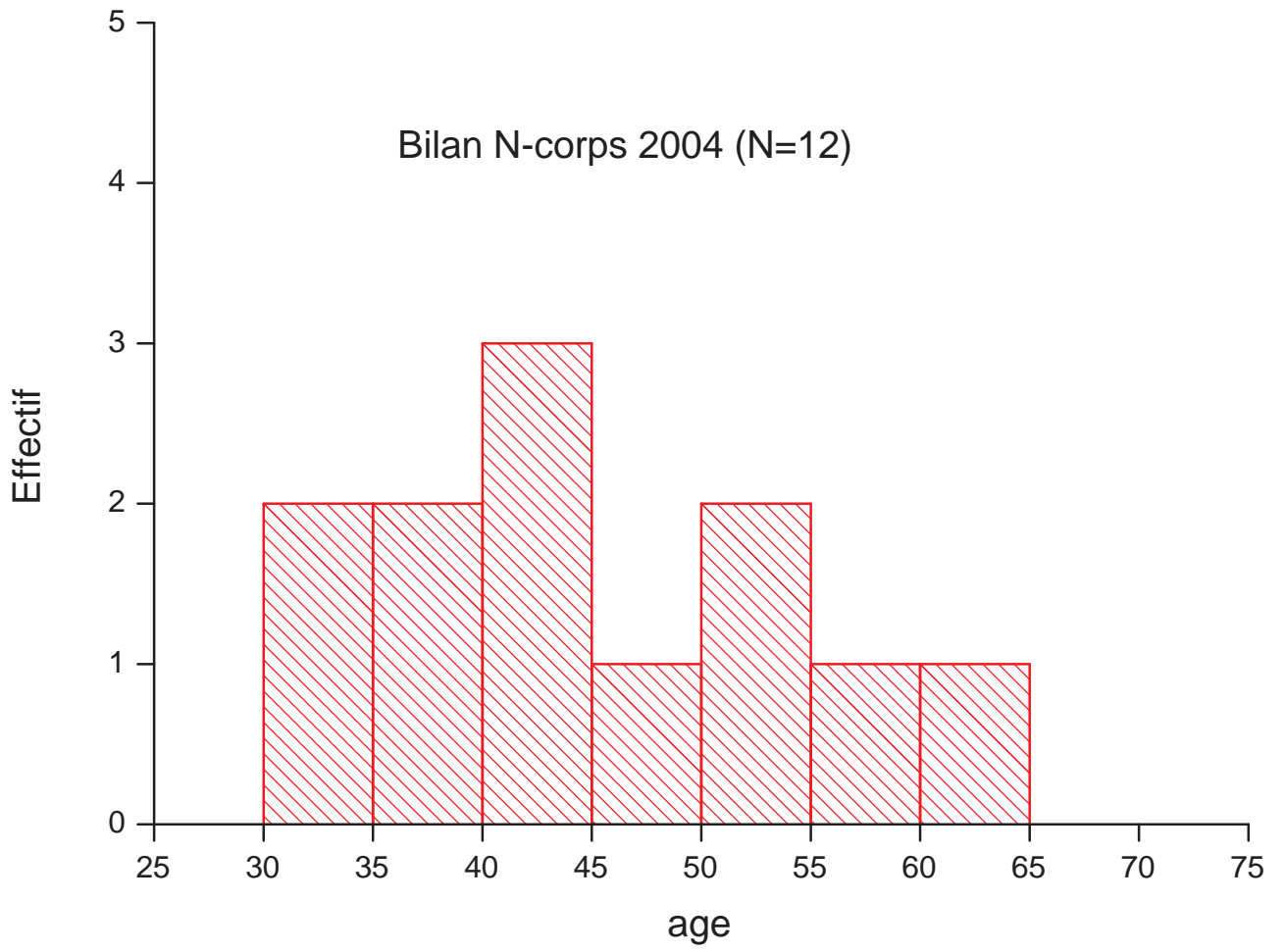
ANNEXE: Pyramides des âges

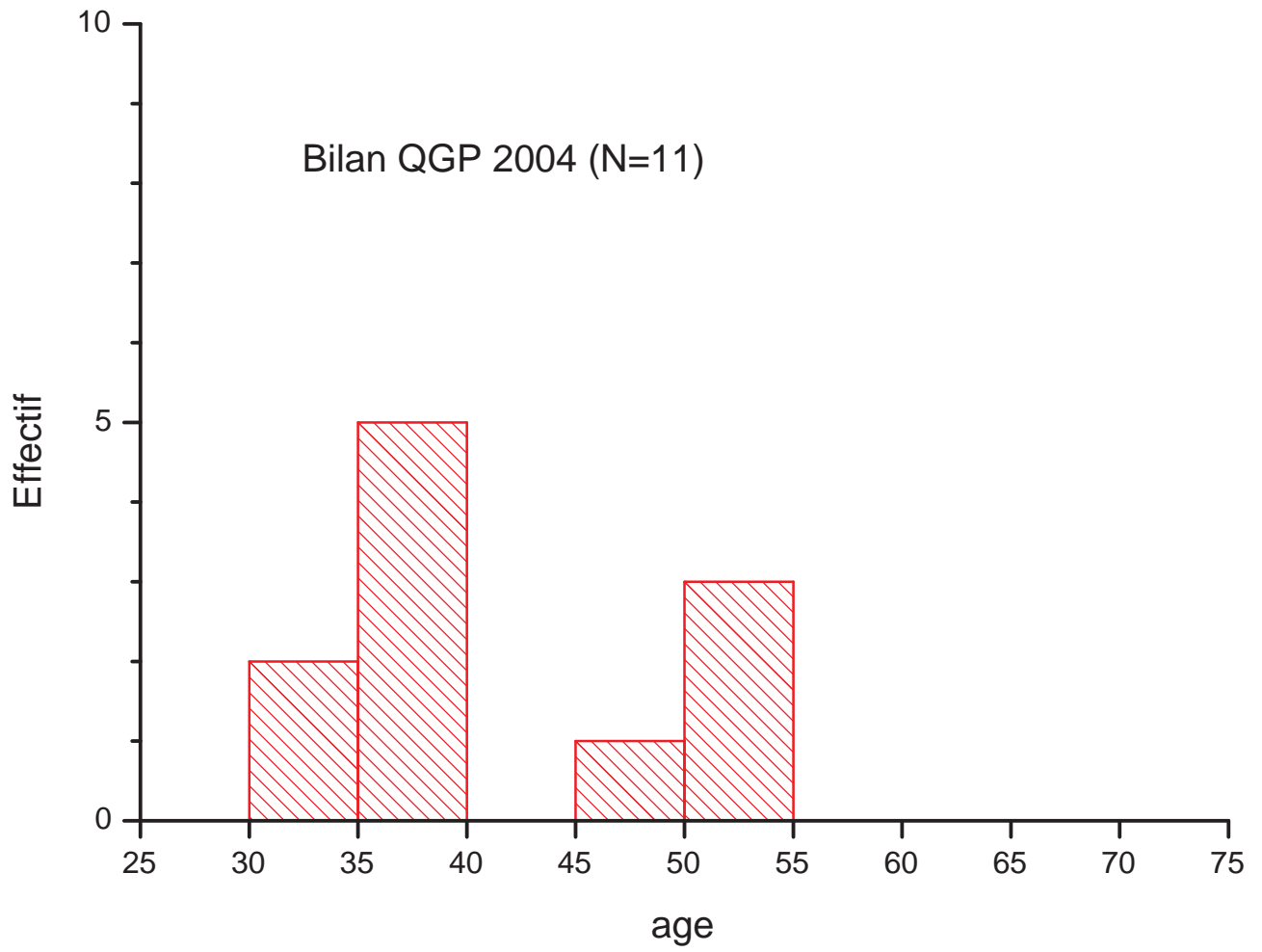












Répartition par laboratoire

