

02

THÉORIES PHYSIQUES : MÉTHODES, MODÈLES ET APPLICATIONS

Président de la section

Pierre BINETRUY

Membres de la section

Alain BARRAT

Geneviève BÉLANGER

Karim BENAKLI

Denis BERNARD

Adel BILAL

Eugène BOGOMOLNY

Bastien FERNANDEZ

Emmanuelle FOISSAC

Patrick GARIGLIO

Christophe GROJEAN

Jesper JACOBSEN

Werner KRAUTH

Marie-Christine LÉVY-NOËL

Jean-Marc LUCK

Jean-François MATHIOT

Olivier PENE

Jean-François PINTON

David POLARSKI

Alain PUMIR

Carlo ROVELLI

1 – LA PHYSIQUE THÉORIQUE : UNITÉ DANS LA DIVERSITÉ ET RÉACTIVITÉ

La physique théorique joue un rôle important dans l'effort de la science pour comprendre la nature : elle élabore le cadre conceptuel et mathématique qui vise à décrire de façon unifiée la vaste diversité des phénomènes. Cet objectif se concrétise dans la recherche des lois fondamentales du monde physique, ainsi que dans l'élaboration de méthodes générales pour analyser les phénomènes dans leur complexité.

La section 02 Théories physiques, méthodes, modèles et applications – souvent appelée Physique théorique – regroupe des théoriciens des domaines les plus divers de la physique, les nouvelles méthodes issues de chaque branche de la physique étant utilisées pour faire progresser d'autres thématiques.

Si la physique des particules élémentaires constitue son noyau historique, ses champs de recherche se sont beaucoup diversifiés : ont été investis tous les aspects de la recherche fondamentale en physique mais aussi un certain nombre d'interfaces avec d'autres disciplines (en particulier astrophysique, biologie, mathématiques, informatique). Cette tendance est

générale dans le monde mais s'est particulièrement bien développée en France, peut-être à cause de la relative liberté qu'offrent les carrières au CNRS. Elle dénote une grande réactivité de la communauté française de physique théorique.

La section 02 ne représente pas l'ensemble de la communauté de physique théorique : les théoriciens sont aussi présents en section 03, 04, 05 et 06. Ces théoriciens sont généralement dans des laboratoires avec une forte composante expérimentale. Inversement, des expérimentateurs en physique non linéaire, proches de la modélisation, font partie intégrante de la section 02. Il s'ensuit un dialogue constant entre expérience et théorie qui est aussi une des richesses de la communauté française. Par ailleurs, la physique théorique a traditionnellement de fortes interactions avec les mathématiques.

Les outils de la physique théorique forment une base commune qui s'est diversifiée au cours du temps. En ce qui concerne la section 02, de par ses origines, la théorie quantique des champs reste un langage de base commun à une grande partie de la communauté. Mais il y a eu une large diversification, tant du côté des outils de la physique statistique que de celui des méthodes numériques. Sur ce dernier point, le retard pris par la France en ce qui concerne les grandes infrastructures a été un facteur qui a entravé le développement de certaines activités.

Enfin, il a déjà été noté la richesse de la notion de modélisation en section 02 puisqu'elle inclut certains aspects expérimentaux de physique non linéaire.

2 – LES GRANDS DOMAINES COUVERTS PAR LA 02

On peut regrouper les thématiques couvertes par la section 02 en trois grands domaines :

- physique des interactions fondamentales : physique des particules, théorie des cordes, théories de la gravitation, cosmologie et astroparticules, physique nucléaire ;

- physique mathématique : théories conformes et systèmes intégrables, aspects mathématiques des théories de cordes, systèmes dynamiques classiques et quantiques, mécanique statistique rigoureuse et applications ;

- physique statistique : systèmes quantiques de basse dimension, systèmes désordonnés, phénomènes hors d'équilibre, physique non linéaire, systèmes biologiques, algorithmes et complexité, information quantique.

2.1 PHYSIQUE DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Cadres théoriques pour les expériences auprès des grands accélérateurs

Le LHC, qui prendra des données dès 2008, est une machine-transfert destinée à révéler les lois de la physique à l'échelle du TeV et en particulier à étudier la dynamique de la symétrie électrofaible.

Un premier volet de l'activité théorique autour du LHC tourne autour des tests de précision du modèle standard et de la recherche de nouvelle physique. Les calculs de précision de ces processus standards tout comme ceux de la nouvelle physique nécessitent le développement d'outils analytiques et numériques adaptés à l'environnement d'un collisionneur hadronique dans le domaine d'énergie du TeV. Les théoriciens en France mènent une activité intense dans cette direction. En effet, l'interprétation des données du LHC, que ce soit pour la comparaison entre les prédictions théoriques et les mesures ou le raffinement des prédictions dans le cadre du modèle standard et au-delà demande une étroite collaboration entre théoriciens et expérimentateurs. Dans cet esprit, les théoriciens français organisent depuis 1999 un Atelier aux Houches, rencontre de théoriciens et d'expérimentateurs dont le

but premier est la préparation à l'exploitation du potentiel de physique des grands collisionneurs. Ces rencontres, préparées de concert avec les leaders scientifiques des grandes expériences du Tevatron au Fermilab (USA) et du LHC, jouent un rôle important pour créer une réelle synergie entre les deux communautés au niveau international.

Un deuxième volet concerne la brisure de la symétrie électrofaible. De nouvelles particules, telles que le boson de Higgs, où de nouvelles interactions sont nécessaires pour assurer l'unitarité du modèle standard à hautes énergies. Un point crucial que les expériences du LHC permettront de trancher est de savoir si la brisure de la symétrie électrofaible résulte d'une dynamique de couplage faible ou de couplage fort. Les données de LEP1 étaient plutôt en faveur de la première hypothèse, excluant en particulier les modèles les plus simples de type technicouleur, véritables prototypes d'un secteur électrofaible en interaction forte. La situation a sensiblement évolué depuis les résultats de LEP2. L'absence de découverte d'un Higgs léger ou de toute autre nouvelle particule a sensiblement réduit l'espace des paramètres des théories supersymétriques minimales. Dans le même temps, des progrès théoriques significatifs, principalement influencés par les relations de dualités de théories des cordes entre des théories de jauge en couplage fort et la gravité dans des espaces fortement courbés, ont conduit à la construction de nouveaux modèles de brisure de la symétrie électrofaible, en particulier des modèles dans lesquels le boson de Higgs est une particule composite (modèles de Little Higgs, modèles d'unification jauge-Higgs) voire des modèles qui s'affranchissent complètement de ce boson de Higgs (modèles Higgsless). La communauté française a activement contribué à la construction de ces modèles et à leur analyse phénoménologique.

Ces études en relation directe avec les données attendues au LHC, ont par ailleurs été très influencées par les développements récents en cosmologie et en théorie des cordes.

D'une part les théories au-delà du modèle standard prédisent l'existence de nouvelles particules qui peuvent constituer la matière noire comme les neutralinos ou des excitations de Kaluza-Klein.

D'autre part, l'évidence de plus en plus forte pour l'existence d'une énergie noire a conduit à revoir la notion de « naturalité » en physique des particules. Ceci a trouvé un cadre d'investigation avec les développements récents en théorie des cordes, à savoir la considération d'une nouvelle classe de compactifications dites « avec flux ». En effet, ces dernières semblent représenter aujourd'hui la voie la plus prometteuse pour donner des masses au grand nombre de champs, autrement de masse nulle, qui pullulent dans les modèles de cordes et qui constituent un obstacle pour la construction de modèles plus réalistes. Ceci donne alors un « paysage » de solutions classiques de théorie des cordes sur lequel des approches statistiques (anthropiques) sont considérées comme alternatives pour répondre au problème de hiérarchie de jauge. Cela a conduit à reconsidérer les modèles de brisure de supersymétrie avec une forte hiérarchie dans le spectre des nouvelles particules. La communauté française a aussi contribué à toutes ces études.

Cosmologie, gravitation et astroparticules

Physique de la gravité

La physique théorique gravitationnelle est en pleine effervescence. L'avancée spectaculaire des observations en cosmologie, la découverte de l'accélération de l'univers, le mystère de la matière noire, et le lien entre ces questions et la physique des hautes énergies, ouvrent des défis théoriques majeurs et de grandes opportunités d'avancer notre compréhension profonde de la structure de l'univers ainsi que de ses interactions fondamentales. Les grands projets de détections des ondes gravitationnelles arrivent à leur phase finale, et annoncent l'ouverture possible d'une nouvelle fenêtre sur l'univers. Le problème majeur de

comprendre les propriétés quantiques de la gravité, et donc les propriétés quantiques de l'espace-temps, reste un problème ouvert central. La recherche dans ce domaine avance rapidement et préconise un revirement en profondeur de notre compréhension de l'espace et du temps.

Cosmologie

Avec la mesure détaillée des fluctuations de température du Fond Diffus Cosmologique (CMB), la cosmologie observationnelle a ouvert une fenêtre sur le début de l'Univers. Les résultats des expériences satellites en cours (MAP) ou à venir (Planck) devraient permettre de comprendre de plus en plus directement les propriétés de l'univers primordial. Ces dernières années ont vu une intense activité théorique allant de pair avec les grandes expériences. La France est fortement impliquée dans ces deux activités. L'activité théorique est concentrée sur les modèles inflationnaires et les fluctuations primordiales, le problème de l'Énergie Noire et l'expansion accélérée de l'univers, l'astronomie gamma et l'origine des différents phénomènes cosmiques aux très hautes énergies.

Les modèles inflationnaires, se situant dans l'univers primordial à des échelles d'énergie très hautes, offrent une fenêtre naturelle sur la physique des hautes énergies. D'un côté, la recherche explore le lien entre la théorie des cordes, les modèles d'univers branaires et la théorie de l'inflation ; de l'autre, elle cherche à contraindre des modèles inflationnaires à l'aide des données observationnelles.

Une intense activité théorique a été générée par la récente et surprenante observation de l'expansion accélérée de l'univers. Le problème est de comprendre la nature de la composante qui détermine cette accélération, ses propriétés physiques et son équation d'état, ou bien si elle est l'effet d'un terme cosmologique dans les équations d'Einstein. Il est aussi possible que les observations favoriseront une modification des lois de la gravitation. Dans cette éventualité, les équipes françaises étu-

dient les modèles branaires, les théories scalaire-tenseur, les modèles de Chaplygin, ceux de supergravité ainsi que d'autres, en quatre dimensions comme dans des schémas avec dimensions supplémentaires. Ceci fait apparaître un autre point de contact avec la physique des hautes énergies.

Un mystère majeur ouvert par les observations astronomiques est l'identité de la « matière noire », abondant dans l'univers et pour le moment sans explication. De nombreuses expériences essaient de cerner la nature non-baryonique de cette matière, soit quand elle se désintègre et produit un rayonnement détectable par des télescopes gamma, soit par des effets de lentille gravitationnelle. Du côté théorique, plusieurs modèles ont été proposés, faisant appel à des extensions supersymétriques du Modèle Standard des particules, ainsi qu'à des théories en dimensions supplémentaires de type Kaluza-Klein (encore un point de contact avec la physique des hautes énergies). Dans tous ces efforts, les avancées théoriques sont liées aux progrès expérimentaux et la communauté française est fortement engagée sur les deux tableaux. Le prix européen Descartes obtenu récemment par la collaboration HESS en astronomie gamma confirme la qualité de cet engagement.

Ondes gravitationnelles

Dans le domaine de la gravité, la situation expérimentale est prometteuse. Les interféromètres terrestres (en particulier le projet franco-italien VIRGO) sont maintenant prêts pour détecter des ondes gravitationnelles. Cette détection attendue serait une confirmation importante de la relativité générale. Elle devrait ouvrir une nouvelle fenêtre d'observations sur l'univers et nous donner des informations précieuses sur l'univers primordial, sur des systèmes astrophysiques comme les binaires spirallants, les trous noirs en formation, ou les supernovae. Un effort théorique important est en cours. C'est un domaine où la communauté française est fortement impliquée aussi bien sur le plan théorique qu'observationnel.

Une intense activité théorique consiste dans le développement de prédictions sur la signature en ondes gravitationnelles de sources susceptibles d'être détectées par les interféromètres terrestres qui démarrent actuellement (VIRGO, LIGO) ou spatiaux futurs (LISA). Ces calculs, très précis, dans le cadre de la relativité générale servent aussi de test de la relativité générale.

Gravité quantique

Le problème de la quantification de la gravité, et de la fusion des deux grandes révolutions du xx^e siècle – la mécanique quantique et la relativité générale – reste un des défis théoriques ouverts les plus importants au cœur de la physique des interactions fondamentales. Les évidences expérimentales liées à la matière noire et à l'énergie noire, apparues dans les expériences astrophysiques de la décennie passée, aussi bien que les questions qui restent ouvertes dans la théorie des cordes, et l'absence persistante de vérification expérimentale, invitent modestement à ne privilégier a priori aucune approche théorique à la quantification de la gravitation.

La dernière décennie a été caractérisée en France par l'implantation et le vif développement de l'approche de la gravité quantique à boucles (*loop quantum gravity*), dans ses deux versions, canonique (« réseaux de spin ») et covariante (« mousses de spin »). Cette direction de recherche représente aujourd'hui l'alternative la plus développée à l'approche de la quantification de la gravité poursuivie par la théorie des cordes. Elle a obtenu en France de nombreux résultats théoriques importants, particulièrement dans le contexte de l'éclaircissement de la relation entre les deux versions de la théorie, et dans l'exploration de la limite de basse énergie. Ce développement et ces résultats ont fortement contribué à renforcer la visibilité internationale de la physique gravitationnelle théorique française.

Les théories qui affrontent le problème de la gravité quantique sont difficiles à tester expérimentalement, et doivent leur intérêt

principalement à leur capacité à résoudre les problèmes d'autoconsistance des théories physiques actuelles, et à la possibilité de les comprendre dans le cadre d'un socle conceptuel cohérent ; mais l'attention à la possibilité d'une vérification expérimentale reste néanmoins vive, et la cosmologie est le domaine le plus prometteur dans cette direction. En particulier, les effets résidus de gravitations quantiques dans le fond de radiation cosmologique, ou bien dans le fond cosmique des ondes gravitationnelle, sont à l'étude. Cela représente un fort point de contact avec le reste de la recherche gravitationnelle.

Matière hadronique

La description théorique de la matière hadronique cherche d'abord à comprendre comment les hadrons – au premier rang desquels les protons et les neutrons – sont formés à partir des quarks et des gluons qui les constituent. Ces hadrons forment eux-mêmes les noyaux atomiques et il s'agit donc aussi de comprendre comment la structure complexe des noyaux émerge des propriétés élémentaires de ses constituants. À ce titre, les noyaux sont un laboratoire unique pour tester la façon dont la matière s'organise au niveau microscopique, quantique.

Dans tous ces domaines, l'expertise française est reconnue mondialement. Les techniques développées sont variées et peuvent, à leur tour, être utilisées dans d'autres domaines de la physique.

La compréhension de l'interaction forte et la structure des hadrons

La chromodynamique quantique (QCD) est la théorie de l'interaction forte qui permet de décrire la structure des hadrons. Bien que les principes de cette théorie soient connus, elle recèle de nombreux mystères au premier rang desquels l'explication du confinement des quarks et des gluons au sein des hadrons, ou encore celle de l'origine de la masse de la

matière hadronique et nucléaire, qui constitue l'immense majorité de la matière visible de l'univers.

Il convient d'aborder ce sujet de plusieurs manières complémentaires, pour espérer percer son mystère. Les travaux théoriques dans ce domaine sont toujours des travaux de phénoménologie qui prédisent des résultats expérimentaux et/ou s'en inspirent.

La symétrie chirale de la QCD – liée à la masse presque nulle des quarks – et sa brisure spontanée, permet de décrire de façon systématique les propriétés des hadrons à basse énergie dans le cadre de la théorie des perturbations chirales. Le rôle spécifique du quark étrange, révélé ces dernières années, a renouvelé ce domaine.

Les calculs de QCD sur réseau ont progressé de façon significative grâce à de nouveaux moyens de calcul qui permettent de prendre en considération toutes les contributions liées aux boucles de quarks (quarks dits dynamiques).

À plus haute énergie, les calculs en QCD sont maintenant menés aux ordres sous-dominants en théorie des perturbations, avec des approches radicalement nouvelles pour le calcul des diagrammes en boucle. La richesse de la dualité cordes/théories de jauge dans les processus à très haute énergie a été exploitée et des vérifications inédites et précieuses en ont été faites. D'un point de vue phénoménologique, les expériences de diffusion d'électrons menées actuellement à Jefferson Lab (USA) permettent d'accéder dans un large domaine d'impulsion à la structure même des nucléons, et des corrélations entre quarks.

Les études sur la structure des hadrons ont aussi des applications directes sur la compréhension du modèle standard de physique des particules, et notamment sur la violation de CP et l'asymétrie matière-antimatière. La dualité entre quarks et hadrons appliquée aux quarks lourds a permis d'établir des résultats exacts concernant la désintégration des mésons B en mésons D essentielle pour mesurer certains angles de la matrice CKM qui gouvernent la violation de CP. Les expériences

récentes sur les neutrinos ont révélé une physique qui va au-delà du modèle standard et qui est pleine d'enseignements pour la physique des quarks. Cela ouvre des perspectives pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'univers.

Un nouvel état de la matière

Comprendre la structure de la matière hadronique, c'est aussi comprendre quel est son état à très haute densité et/ou température. Depuis les premières expériences au CERN à des énergies de 20 GeV/nucléon qui ont mis en évidence la possible création d'un plasma où quarks et gluons sont déconfinés (QGP), les expériences à Brookhaven à 200 GeV/nucléon permettent de mieux cerner cet état. L'énergie accessible au LHC (5,5 TeV) – 30 fois supérieure à celle de Brookhaven – va ouvrir un domaine cinématique complètement nouveau. La compréhension théorique de ces nouveaux états de la matière va de pair avec ces programmes expérimentaux.

Les premières descriptions naïves d'un plasma de quarks et de gluons libres ont fait place à une vision plus réaliste où quarks et gluons sont certes déconfinés mais restent en interaction forte. De nouvelles observables ont été mises en évidence pour caractériser cet état, au-delà de la production de J/Ψ : perte d'énergie des jets, signaux électromagnétiques, production des saveurs lourdes, variables de ot , corrélations. Dans les faisceaux de nucléon à très haute énergie, l'état de la matière est aussi très particulier. Il apparaît comme un état cohérent de gluons : c'est le condensat de verre de couleur.

Les sujets d'étude sont encore nombreux : thermalisation de la distribution initiale de matière pour former le plasma, rôle des instabilités, caractérisation du plasma et de ses propriétés thermodynamiques, nature de la transition de phase de déconfinement et de restauration de la symétrie chirale, diagramme de phase. Pour étudier un problème d'une telle complexité, les méthodes mises en jeu sont multiples et font appel à différents domaines

de la physique et à des approches analytiques aussi bien que numériques : théorie des champs à température et densité finie, théorie des cordes et correspondance AdS/CFT (pour étudier le régime de couplage fort), calculs sur réseau « ab initio », théorie cinétique, hydrodynamique « visqueuse ». Dans tous ces domaines les théoriciens français sont à la pointe de la recherche.

Structure nucléaire loin de la stabilité

Les noyaux sont un lien unique entre le proton, décrit par la QCD, et le monde atomique et microscopique. Beaucoup de questions fondamentales sont abordées par le problème à N corps nucléaire : quelle est la nature de la liaison nucléaire ? Quelles sont les limites de la stabilité nucléaire ? Comment les interactions entre nucléons génèrent la très grande variété des structures que l'on observe ? Pour répondre à ces défis, l'intérêt de la physique nucléaire moderne se porte sur les noyaux loin de la vallée de stabilité.

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 hautement excités, très déformés ou en rotation rapide, états isomériques, sous-structures en alphas, nouvelles formes polyhédrales. Les nombreuses expériences réalisées dans ce domaine, et celles à venir dans le cadre de SPIRAL II, ont fait apparaître des phénomènes inattendus : déplacement ou disparition des nombres magiques, inversion de parité, halos et peaux de neutrons, brisures spontanées de nouvelles symétries, nouveaux types de radioactivité.

Les approches utilisées par les groupes théoriques français sont essentiellement les techniques microscopiques. 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, champ moyen autoconsistant à partir de Lagrangiens effectifs relativistes,

brisure de nouvelles symétries, approches RPA auto-cohérentes, nouveaux types de mélanges de configurations.

Astrophysique nucléaire des objets denses

La modélisation des étoiles à neutrons et des supernovae nécessite des développements théoriques non seulement en relativité générale et en magnéto-hydrodynamique, mais aussi en physique nucléaire. Parmi les propriétés qui ont un impact observationnel, notons en premier lieu les propriétés superfluides de l'écorce de ces objets compacts dont le rôle est important en ce qui concerne le refroidissement ou bien les brusques anomalies dans leur période de rotation.

Les processus électrofaibles jouent aussi un rôle crucial pendant le collapse gravitationnel d'étoiles massives : la capture électronique accélère l'effondrement et nécessite des calculs extensifs de transitions de type Gamow-Teller dans des noyaux riches en neutron ; la propagation des neutrinos piégés aux premiers instants requière la connaissance de la fonction de réponse corrélée du milieu nucléaire ; ou encore l'interaction des neutrinos avec les noyaux dans le gaz en expansion censés raviver l'onde de choc, impliquent des calculs similaires.

Enfin, la modélisation des transitions de phase dans la matière dense joue un rôle capital pour obtenir les propriétés macroscopiques des étoiles à neutrons comme leur masse et leur rayon. Citons en particulier la modélisation de la frustration Coulombienne qui apparaît lors de la fusion des noyaux dans l'écorce interne de l'astre, de l'apparition de l'étrangeré dans le cœur de l'étoile à neutrons, ou de toute forme d'organisation nouvelle de la matière dense comme la condensation de pions, de kaons ou bien de quarks déconfinés.

2.2 PHYSIQUE MATHÉMATIQUE

Interactions avec les mathématiques

On ne peut pas sous-estimer l'importance des mathématiques dans la physique théorique moderne. La mathématique est un outil de travail par excellence pour la physique et la physique est une source grandissante d'inspiration en mathématique. Les domaines des mathématiques les plus purs et abstraits trouvent finalement leur place en physique et, réciproquement, ils s'enrichissent par les idées venues de la physique. Dans certains cas, notamment pour la plupart des domaines décrites dans cette section (théorie des cordes, théories conformes, systèmes hors équilibre et phénomènes non linéaires), la frontière même entre les mathématiques et physique est floue.

Cette section regroupe les résultats majeurs obtenus par des méthodes mathématiques par les chercheurs de la section 02. Pour certains domaines, ces résultats viennent compléter d'autres travaux numériques ou expérimentaux et présentés plus loin dans ce rapport. C'est typiquement le cas de la (thermo)dynamique des systèmes étendus hors équilibre, un thème qui fédère les efforts de la communauté française pour comprendre les phénomènes naturels d'évolution temporelle dans leur complexité.

Théorie des cordes

Beaucoup de développements ont eu lieu ces quatre dernières années dans le domaine des théories des champs supersymétriques et des supercordes, pour lesquels les chercheurs de la section 02 ont joué un rôle important. Ces théories occupent une place importante dans la formulation d'une théorie quantique de toutes les interactions, y compris la gravité, et se situe régulièrement à l'interface avec les développements les plus récents en mathématiques.

La conjecture de Maldacena relie la théorie des supercordes dans une certaine géométrie dite d'AdS à la théorie de jauge super-

symétrique $N = 4$ qui est conforme. On parle aussi de dualité AdS/CFT. Dans un certain régime cette correspondance a pu être testée avec une très grande précision en comparant des dimensions anormales de la théorie de jauge avec le spectre des cordes. L'apparition d'une structure intégrable a été la clef de ce succès et la contribution des chercheurs en France a été importante, entre autres, dans la solution du système intégrable. Il s'agit ici de la première théorie quadri-dimensionnelle en interaction forte dont on connaît ainsi tout le spectre des dimensions anormales. D'un autre côté, des progrès importants dans la compréhension des cordes topologiques ont permis d'obtenir, dans les théories de jauge avec une supersymétrie minimale ($N = 1$), des superpotentiels effectifs au niveau non-perturbatif. Ces résultats permettent une compréhension qualitative de propriétés communes avec la QCD comme le confinement. L'étude des cordes topologiques a également permis de mieux comprendre le calcul microscopique de l'entropie des trous noirs en théorie des supercordes.

La recherche de la structure des vides dans les théories des supercordes passe par la classification des géométries de compactification et des flux des différents champs présents. Ces compactifications doivent préserver une supersymétrie jusqu'à une échelle d'énergie très basse en comparaison avec la masse de Planck. Ces critères ont permis à une collaboration en France de caractériser ces configurations par le concept de « géométrie complexe généralisée » ; d'autres collaborations ont étudié plus en détail le rôle des différents flux dans la détermination du spectre à basse énergie. Les supercordes dans des géométries du type cosmologique et dépendantes du temps ont aussi été fortement étudiées permettant souvent de faire un lien avec les modèles utilisés pour décrire l'inflation.

Théorie des champs et mécanique statistique

Les théories des champs invariantes conformes et celles des systèmes intégrables

sont des outils incontournables de la physique théorique moderne avec des applications allant de la matière condensée ou la physique statistique à la théorie des cordes ou la physique des hautes énergies. Elles connaissent un nouvel et prometteur essor en symbiose avec les mathématiques, en particulier sous ses aspects probabilistes, comme l'illustrent les médailles Fields de cette année de W. Werner et O. Okunkov. Parmi les thèmes porteurs en théories des champs invariantes conformes on peut noter les efforts faits :

- i) pour construire les versions non-rationnelles et/ou non-compactes de ces théories – qui s'appliquent aussi bien à l'étude des systèmes désordonnés bidimensionnels qu'en théories des cordes – ou ;

- ii) pour développer les outils nécessaires à la description de structures géométriques fluctuantes, telles que les interfaces critiques par exemple.

Dans la théorie des systèmes intégrables, on peut noter les progrès récents faits dans l'évaluation des fonctions de corrélations d'observables physiques ainsi que ceux faits en théorie de matrices aléatoires dont les applications se renouvellent toujours, bien qu'elle constitue un thème déjà ancien. Ces dernières années ont vu l'émergence d'applications inattendues des théories conformes et des systèmes intégrables à des problèmes combinatoires, apportant ainsi une dynamique nouvelle à un domaine traditionnel des mathématiques. Les chercheurs français jouent un rôle important dans le développement de ces outils.

La possibilité de résoudre exactement les théories de jauge supersymétriques $N = 4$ en dimension quatre a été mise en évidence récemment. Résoudre ces théories, ce qui constituerait ainsi le premier exemple de solution exacte de théories des champs quantiques non-triviales en dimension quatre, est évidemment un sujet important en plein essor et bien représenté en France.

La mécanique statistique rigoureuse est également un point fort traditionnel de l'interface Physique-Mathématique en France. Sur la

scène internationale, celle-ci connaît un nouvel essor, poussée par la question de décrire la thermodynamique des systèmes hors équilibre pour lesquels les lois de Boltzmann ne s'appliquent pas. La communauté française joue un rôle moteur dans ce domaine avec notamment un ensemble de résultats sur la dérivation de la loi de Fourier qui s'applique aux phénomènes de transport pour des systèmes en contact avec des réservoirs différents.

Un autre point d'excellence de la recherche française en mécanique statistique rigoureuse, reconnu internationalement, est celui des structures aléatoires des systèmes désordonnés. En particulier, des travaux sur la transition de localisation dans un modèle d'accrochage d'un polymère ont permis de régler une controverse existant dans la littérature quant à l'ordre de cette transition. D'autre part, les outils et les méthodes de la théorie du potentiel – développée en mathématique – ont fourni une nouvelle approche aux phénomènes de métastabilité dans ces systèmes désordonnés.

Systèmes dynamiques et chaos

Des progrès importants ont été accomplis dans l'étude de la dynamique classique de systèmes étendus non linéaires. Les idées de la théorie de systèmes dynamiques adaptés à certains systèmes à grand nombre de degrés de liberté permettent d'expliquer des comportements spatio-temporels de plus en plus élaborés. Ceci concerne notamment les systèmes sur réseaux à architecture variée (régulière, complexe ou aléatoire), dans un cadre déterministe ou stochastique (systèmes autonomes ou couplés à des réservoirs).

Par exemple, pour des systèmes d'applications couplées aux proches voisins, la transition vers la synchronisation qui s'opère quand l'intensité du couplage augmente est maintenant bien décrite, au moins dans des cas simples. Dans le cas déterministe, cette description repose sur des estimations de complexité (dynamique symbolique, entropie). Dans le cas stochastique, elle repose sur les caractéris-

tiques des phénomènes de métastabilité résultants de la compétition entre la relaxation locale de la dynamique déterministe et les perturbations induites par le bruit.

Un autre exemple marquant de l'interdisciplinarité entre Physique et Mathématique est la théorie du chaos. En complément de la théorie des modèles intégrables et de la physique statistique, celle-ci a été développée à l'origine pour décrire les systèmes déterministes classiques et quantiques à petit nombre de degrés de liberté, sans solutions exactes, mais avec un comportement riche et complexe. Plusieurs mathématiciens (Poincaré, Ruelle, Arnold) et physiciens (Gutzwiller, Bohigas, Voros) ont participé à cette construction. La formule de trace de Gutzwiller pour les systèmes chaotiques et la formule de trace de Selberg pour le mouvement sur les surfaces négatives constantes sont des exemples notables de l'interaction entre physique et mathématique dans ce domaine. Plus récemment, la théorie des matrices aléatoires proposée par Bohigas, Giannoni, Schmit pour décrire la distribution statistique des niveaux d'énergie des systèmes chaotiques a été appliquée avec succès à la fonction zeta de Riemann (ainsi qu'à d'autres fonctions zeta de la théorie des nombres).

Dans un cadre plus général, la théorie des systèmes dynamiques a connu de nouveaux développements ces quatre dernières années, souvent motivés par des applications à la modélisation de systèmes réels.

On relève en particulier l'approche par inégalités de concentration de mesures qui permet de caractériser les fluctuations d'observables plus générales que des sommes ergodiques.

D'autre part, les méthodes de contrôle de systèmes hamiltoniens, visant à réduire ou à localiser le chaos et basées sur l'addition à l'hamiltonien original de termes perturbatifs bien choisis, ont des applications potentielles intéressantes, notamment dans les plasmas de fusion.

2.3 PHYSIQUE STATISTIQUE

Systemes de basse dimension, matière condensée

L'étude des systèmes de particules quantiques en interaction est un leitmotif en théorie de la matière condensée. Cette thématique a connu de nombreux développements depuis une dizaine d'années en raison des questions soulevées par la découverte et l'étude expérimentale de matériaux comme les oxydes de cuivre supraconducteurs, les composés de fermions lourds, les conducteurs organiques, l'essor des nano-matériaux, etc. Sa forte croissance est portée par l'élaboration de nouvelles méthodes théoriques et expérimentales, par la découverte de nouveaux matériaux, et par les enjeux technologiques. Les interfaces entre la physique des solides (théorique et expérimentale) et la physique statistique théorique sont donc considérables.

Dans de nombreux matériaux, la dimensionnalité réduite renforce les interactions. Elle amplifie aussi le rôle des fluctuations et l'influence du désordre. Le domaine a connu des succès théoriques spectaculaires : compréhension des systèmes unidimensionnels (liquides de Luttinger) par des méthodes de théorie des champs, théorie de l'effet Hall quantique fractionnaire, application des théories conformes aux problèmes d'impuretés quantiques, mise en évidence de points critiques quantiques, théorie des chaînes de spin couplées, qui permettent de varier la dimension spatiale effective. Cependant, de grands progrès restent à faire : à ce jour, il n'existe ainsi pas de théorie des cuprates supraconducteurs qui fasse l'objet d'un consensus. La description quantitative de la structure électronique des matériaux, dans le cadre des méthodes de fonctionnelle de densité, s'ouvrent progressivement à des approches issues de la théorie des fermions fortement corrélés.

De même, les problèmes posés par le désordre sont redoutables. Celui-ci change souvent le comportement qualitatif des systèmes physiques et se manifeste aussi bien au

sein de la physique classique (verres de spin, réseaux élastiques) que dans des systèmes quantiques (chaînes de spin, physique mésoscopique).

Enfin, de nouveaux champs d'application de ce domaine de la physique théorique s'ouvrent avec le développement spectaculaire d'une « physique de la matière condensée » au sein de la physique des condensats de Bose et des atomes froids.

Systèmes hors équilibre

La physique statistique hors d'équilibre constitue un vaste champ ouvert d'investigations, particulièrement dans le cadre des systèmes complexes. Des avancées importantes vers l'obtention d'un cadre unificateur sont en voie d'être réalisées dans différentes directions. D'importants progrès ont été obtenus d'une part grâce à l'étude des systèmes dits « désordonnés », c'est-à-dire dont de nombreux degrés de liberté sont gelés aléatoirement : le problème des verres de spin, issu de la physique du solide, en est devenu le paradigme, avec des applications nombreuses.

Un autre axe porteur est lié à la manière dont on peut envisager une réduction du nombre de degrés de liberté décrivant effectivement les états et/ou la dynamique des grands systèmes. Dans le cas des systèmes loin de l'équilibre, on peut citer les recherches d'états stationnaires admissibles avec des approches de maximisation d'une entropie à la suite des travaux de Roberts et Sommeria, ou encore l'extension du théorème de fluctuation-dissipation à la « Gallavotti-Cohen-Evans-Morris ». La description de systèmes globalement corrélés, comme ceux où les interactions sont à longue portée (nature des interactions/présence d'un champ), est un autre défi d'actualité.

Physique non linéaire

L'étude des instabilités dans les systèmes étendus/complexes progresse dans les domai-

nes liés au rôle des défauts, aux possibilités de contrôle et aux applications qui en découlent, comme en médecine (ondes spirales et fibrillation cardiaque).

Un axe rapidement émergent est celui des bifurcations dans les systèmes dont la dynamique sous-jacente est déjà très complexe/désordonnée. Le cadre théorique est celui des bifurcations en présence de bruit (additif et multiplicatif). Expérimentalement, la dynamo turbulente rentre dans ce cadre. L'autoentretien d'un champ magnétique nécessite que l'induction excède la dissipation Joule, ce qui n'a lieu que si le mouvement du guide est suffisamment vigoureux, turbulent en fait. La compréhension de la dynamique du champ engendré est un enjeu fort, notamment pour les applications géo et astrophysique. Les méthodes numériques associées font appel à des interactions avec les mathématiques et l'informatique, particulièrement en ce qui concerne le traitement des conditions aux limites.

Un autre axe porteur concerne les problèmes de régulation des processus cellulaires, qui peuvent maintenant être décrits avec un certain degré de réalisme. Ces processus donnent typiquement lieu à une interaction entre dynamique complexe (complexité des réseaux d'interaction), non linéarité (due aux boucles de rétroaction), et fluctuations (dues au faible nombre de certaines molécules dans les cellules). Leur étude devrait constituer une source de problèmes théoriques dans les années futures.

Turbulence

Ce sujet, qui étudie la limite d'un système étendu, fortement dissipatif, et globalement couplé, connaît depuis 10 ans un fort renouveau avec l'avènement de techniques particulières (Lagrangiennes) dans les approches théoriques et expérimentales. Des verrous importants ont été levés, comme la résolution du modèle de Kraichnan pour les champs scalaires. Les mesures ont conduit à un profond réexamen des modèles stochastiques, avec des

applications liées au mélange et à l'environnement. Les directions actuelles évoluent vers l'étude de particules inertielles (c'est-à-dire une taille finie et une densité non nécessairement identique à celle du fluide), ou encore la dynamique d'amas (phénomènes de dispersion). Les enjeux théoriques sont forts, liés à la compréhension de la dynamique à N points, avec des applications aux phénomènes de pollution, formation de nuages, mélange, etc.

La turbulence d'ondes (dit aussi turbulence faible car elle forme un cadre plus simple pour un système à grand nombre de modes en interaction) est très étudiée analytiquement depuis une vingtaine d'années. Le sujet connaît un regain d'activité car les études numériques et expérimentales arrivent à un niveau où les prédictions peuvent être confrontées.

Milieux granulaires

Les milieux granulaires représentent un point de rencontre entre expériences, méthodes analytiques et numériques. Ils fournissent donc un terrain de choix pour les avancées théoriques en physique statistique hors d'équilibre. Cela a été le cas par exemple pour les granulaires denses, où les méthodes issues des milieux désordonnés ont permis de tester des hypothèses concernant l'existence d'une mesure «d'Edwards» sous-jacente à la dynamique lente (comme la mesure de Gibbs est sous-jacente à la dynamique d'équilibre). D'autre part, les gaz granulaires constituent un système modèle fortement hors d'équilibre qui peut être maintenu dans un état stationnaire.

Diversification interdisciplinaire de la physique statistique

La physique statistique étend de plus en plus ses champs d'application à des domaines aux interfaces entre la physique et d'autres disciplines. Les applications à des problèmes de biologie ou d'informatique théorique sont tou-

jours en développement, alors que d'autres domaines d'application sont apparus plus récemment, comme la sociophysique ou l'éconophysique. Il est devenu courant de parler des applications interdisciplinaires de la physique statistique comme d'un domaine de recherche à part entière. Plusieurs journaux de physique comportent une section consacrée à ces applications.

La physique statistique trouve déjà depuis un certain temps de nombreuses applications dans des problèmes de biologie. Les macromolécules biologiques comme l'ADN ou l'ARN peuvent être vues comme des hétéropolymères, et étudiées par des techniques venant de la physique statistique des systèmes désordonnés. Certaines propriétés des membranes biologiques peuvent être décrites au moyen de modèles de géométrie aléatoire étudiés en physique statistique, en parallèle avec des structures discrètes inspirées par la théorie des cordes et la gravité quantique. La dynamique du repliement des protéines peut s'étudier en termes d'évolution d'un système dans un paysage complexe d'énergie libre.

D'autres problèmes de dynamique de grandes molécules, comme l'ouverture des chaînes d'ADN, font appel à des concepts allant de la théorie de l'élasticité aux probabilités.

Plus récemment, des avancées importantes dans la compréhension des problèmes d'optimisation combinatoire (problème du voyageur de commerce, satisfaisabilité de contraintes) ont été réalisées grâce à l'utilisation de techniques issues de la physique statistique des systèmes désordonnés, et en particulier des verres de spins, comme la méthode des répliques ou celle de la cavité. Cette analogie profonde permet d'analyser les changements dans les performances des algorithmes en termes de transitions de phase, et de mieux comprendre la structure de l'espace des solutions. Les algorithmes locaux utilisés couramment pour résoudre les problèmes d'optimisation peuvent être analysés au moyen de concepts de la physique statistique hors d'équilibre, ce qui permet de mieux comprendre à la fois leurs performances et les limites de leurs

domaines d'applications. D'autre part, cette démarche a conduit des physiciens à proposer de nouveaux types d'algorithmes, comme par exemple les algorithmes dits de passage de message.

La thématique des réseaux complexes s'est également imposée récemment comme sujet d'étude en physique statistique. Il existe une grande variété de réseaux complexes, qu'ils soient naturels (rivières), biologiques (interactions gènes-protéines, immunité), technologiques (Internet, transport aérien, transport d'électricité), ou sociaux. La physique statistique joue un rôle unificateur dans ce domaine multiforme. Elle permet de mettre en évidence les caractéristiques géométriques ou topologiques universelles de ces réseaux (existence de « hubs », effet petit monde), et de comprendre le lien entre ces caractéristiques et le fonctionnement dynamique des réseaux. Les applications actuelles vont de la compréhension d'Internet à l'épidémiologie. La sociophysique, où des modèles de physique statistique sont utilisés pour étudier l'émergence de phénomènes collectifs, a également connu un renouveau grâce à une meilleure compréhension de la structure des réseaux sociaux.

Le rôle premier de la physique statistique est de traiter les systèmes à grand nombre de degrés de liberté, et de comprendre les mécanismes d'émergence de propriétés macroscopiques (globales) à partir de lois d'interaction microscopiques (locales). Les exemples ci-dessus montrent que la physique statistique est particulièrement efficace pour exporter ses concepts et ses méthodes vers l'étude de systèmes complexes dans d'autres domaines. Elle a ainsi potentiellement un impact positif dans de nombreux champs interdisciplinaires. Dans la plupart des cas, la spécificité de l'apport de la physique statistique réside dans la combinaison de notions probabilistes (rôle des fluctuations, des événements extrêmes) et de notions physiques (lois d'échelle, universalité).

3 – MOYENS D'ACTION

Au niveau des recrutements, un équilibre doit être recherché entre champs disciplinaires traditionnels et opérations d'ouverture souvent plus ciblées. La physique théorique française, en particulier celle représentée en section 02, a su montrer son caractère résolument interdisciplinaire (développement de la physique des hautes énergies vers les sciences de l'univers, interaction avec les mathématiques, diversification de la physique statistique vers la biologie et l'informatique). Cette interdisciplinarité devrait être soutenue par l'ensemble des départements du CNRS concernés par ces interfaces.

L'activité des physiciens théoriciens est souvent plus individuelle qu'une activité expérimentale. Il s'ensuit une plus grande facilité à la mobilité. Les chercheurs de la section 02 forment effectivement une communauté assez mobile, tant à l'intérieur de la France qu'à l'étranger. Ceci a des conséquences tant positives que négatives. Ainsi, la communauté française a su attirer sur des postes CR1 et surtout DR2 des candidats étrangers de premier plan au niveau international. À l'inverse, les difficultés associées aux promotions font que chaque année la section doit envisager le départ de brillants chercheurs CR1 et DR2 attirés par les conditions qui leur sont faites à l'étranger. La liberté dont dispose le chercheur CNRS n'est plus suffisante au regard des conditions de travail et de promotion qui leur sont faites ailleurs. Un effort significatif doit donc être fait sur les promotions CR1! DR2 et DR2! DR1 pour offrir des perspectives de carrière plus attractives.

Les postes d'accueil représentent un des principaux moyens d'action des théoriciens : inviter un chercheur pour un ou plusieurs mois permet de développer une collaboration qui se traduit souvent par des publications communes. C'est pourquoi la communauté s'est toujours montrée très soucieuse de préserver ce moyen d'action, acquis il y a quelques années, faut-il le rappeler, en y consacrant des postes frais. Ceci reste une priorité pour les laboratoires de physique théorique et il est à

regretter qu'un combat incessant doive être livré pour que le nombre de postes d'accueil en physique théorique ne diminue pas régulièrement.

En ce qui concerne les postdocs proprement dit, la création de l'ANR a fortement amélioré la situation. Il importe toutefois que les efforts du CNRS soient poursuivis dans ce domaine, en particulier en supprimant les règles internes qui prohibent d'être attractif. On peut à ce titre se féliciter de la récente réévaluation des salaires de postdocs. Rappelons aussi qu'il existe au sein de la communauté internationale un calendrier pour les candidatures postdoctorales en physique théorique : dépôt des candidatures à l'automne, décision en janvier pour un postdoc de 2 à 3 ans démarrant en septembre ou octobre. S'écarter de ce calendrier diminue nécessairement nos chances d'attirer les meilleurs candidats et se traduit par un gâchis partiel des moyens mis en œuvre.

Les structures de réseaux mises en place par le CNRS (GDR, FR) ont été plébiscitées par les théoriciens. Elles sont en effet bien adaptées à la structuration de la communauté. On peut d'ailleurs dire que, dans l'ensemble des GDR de physique, les théoriciens jouent un rôle particulièrement actif. Ceci se retrouve au niveau des réseaux européens où là aussi les théoriciens sont bien présents. Même si ces structures ne sont pas aussi lourdes que des laboratoires, elles demandent un soutien administratif réel (reconnu maintenant au niveau européen par la possibilité d'embaucher des administratifs). Il est important que ceci soit reconnu au niveau du CNRS et que des moyens spécifiques soient accordés aux laboratoires de physique théorique qui assument de telles charges d'organisation.

L'un des outils de la physique théorique, les simulations numériques, demande la mise en place de moyens adaptés. Il est important de noter qu'il s'agit là en fait de toute une gamme de moyens, depuis les moyens attribués à l'échelle du laboratoire jusqu'aux moyens nationaux (ou même dans certains cas internationaux) en passant par des centres à l'échelle d'un campus ou d'un ensemble de laboratoires. Une politique volontariste, et sans à coup, est nécessaire dans ce domaine.

Il est important que la réflexion engagée de façon globale au CNRS sur le rôle de la physique théorique soit relayée au niveau des Universités lors de la discussion des contrats quadriennaux. Ceci est important pour définir une politique de recrutement universitaire ainsi que pour permettre d'utiliser au mieux les possibilités de délégation.

Les personnels ITA qui travaillent dans les laboratoires ou les équipes de la section 02 ont vu leurs tâches et leurs responsabilités évoluer très rapidement au cours de la dernière décennie. D'un rôle essentiellement de secrétariat scientifique, on est passé avec la complexification du paysage de financement de la recherche à des tâches complexes de mise sur pied de dossiers de candidature, d'élaboration et de gestion de contrats, d'accueils de chercheurs étrangers, etc.

La mise en place des contrats européens, puis plus récemment le démarrage de l'ANR et de ses divers programmes (programme blanc, RTRA, etc.) en ont été des étapes importantes. Il est regrettable que l'évolution des carrières des ITA concernés ne tienne pas suffisamment compte de cette évolution des tâches et des responsabilités.