Physique Théorique

Physique Théorique

Physiciens CNRS : P. Sorba (directeur), D. Arnaudon, P. Aurenche, G. Bélanger, G. Clément, F. Boudjema, G. Girardi, J.-Ph. Guillet, S. Peigné, E. Pilon, E. Ragoucy, R. Stora

Enseignants-Chercheurs : P. Chardonnet, L. Frappat, J.C. Le Guillou, P. Salati, E. Sokatchev, R. Taillet, F. Thuillier

Visiteurs Français (longue durée) : L. Lellouch (CNRS), C. Roger (Université)

Post-Docs : T. Binoth, B. Eden, M. Rossi, C. Schubert

Doctants : C. Briot, F. Gélis, N. Marchal, D. Maurin, H. Zaraket

Secrétariat : B. Lunel, D. Turc-Poëncier

Stagiaires : A. Arbey, S. Do Hoang, S. Domange, F. Granger, A. Popier, B. Rapp

Abstract

The Laboratory of Theoretical Physics in Annecy-le-Vieux LAPTH, UMR 5108 of CNRS, is situated inside the LAPP and is an association CNRS-Université de Savoie.

The studies which are developed and the obtained results in LAPTH concern the phenomenology of high energy physics and more formal problems related to field theory. The two main sections are the phenomenology of elementary particles and cosmology on one hand, field theory and conformal field theory on the other hand. In the first part one can distinguish : quantum chromodynamics, field theory at finite temperature and density, standard model and beyond, cosmology and astrophysics, while the second part deals with : strings and superstrings, supersymmetry and supergravity, infinite dimensional algebras in conformal theories, gauge theories, integrable systems, statistical mechanics and statistical physics.

Le Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique théorique LAPTH, UMR 5108 du CNRS, est situé dans le LAPP et est une association CNRS-Université de Savoie. De par sa présence dans un laboratoire engagé dans les grands projets expérimentaux actuels de physique des hautes énergies, à une époque de développements théoriques très importants, les théoriciens du LAPTH sont naturellement amenés à considérer avec autant d'intérêt la phénoménologie des particules élémentaires et les études plus formelles autour de la théorie des champs. Ces deux tendances semblent coexister parfaitement, plusieurs d'entre eux travaillant simultanément dans ces deux domaines complémentaires.

Deux grands axes apparaissent donc dans les activités scientifiques du laboratoire : la phénoménologie des particules élémentaires et l'astrophysique d'une part ; la théorie des champs sous différents aspects (théories conformes, lagrangiennes) et les symétries, les systèmes intégrables et la physique statistique d'autre part.

Physique des particules

Le cadre conceptuel de la physique des particules est le modèle standard qui permet de décrire les interactions fortes par la chromodynamique quantique (QCD) et les interactions électro-faibles (c'est-à-dire les interactions faibles et l'électrodynamique quantique (QED)) par le modèle de Weinberg-Salam. La chromodynamique repose sur le groupe de jauge local $SU(3)$ tandis que le modèle de Weinberg-Salam repose sur le groupe $SU(2) \times U(1)$ à symétrie spontanément brisée.

Les orientations actuelles de la physique des particules concernent d'une part les tests précis du modèle standard et d'autre part la recherche des particules manquantes du modèle (telle que le boson de Higgs) ainsi que des particules

caractéristiques de ses extensions supersymétriques ou technicolorées.

En particulier, la recherche du Higgs est importante car cette particule est la signature du mécanisme de brisure de symétrie qui engendre la masse des bosons de jauge lourds ainsi que celle des fermions. Sa découverte serait un pas vers la compréhension de l'origine des masses. Ces deux aspects sont interdépendants car les processus du secteur connu du modèle forment le bruit de fond dominant aux signaux que sont les nouvelles particules. Il est donc nécessaire de pouvoir calculer ce bruit de fond avec précision.

La chromodynamique fournit aussi le cadre pour la description de la matière hadronique «déconfinée» c'est-à-dire le plasma de quarks et de gluons à température et densité non nulles. Cet état de la matière a existé au début de l'univers et existe peut-être au coeur des étoiles denses. On espère aussi créer cet état, en laboratoire, dans les collisions ultra-relativistes d'ions lourds. Les plasmas QED jouent, d'autre part, un grand rôle en astrophysique. La théorie quantique des champs à température et densité finies qui permet l'étude de tels systèmes est aussi un des axes de recherche du groupe tant dans ses aspects théoriques que dans ses applications à la physique des particules et à l'astrophysique.

La cosmologie et l'astrophysique sont aussi un excellent laboratoire pour l'étude du modèle standard et de ses extensions. Les contraintes cosmologiques sur la masse des neutrinos en sont un exemple bien connu. Il en existe d'autres, liées notamment à l'existence de la matière noire ou à certains phénomènes concernant les étoiles denses.

Nous résumerons les problèmes abordés par le groupe de physique des particules et d'astrophysique en séparant de façon conventionnelle les thèmes d'interactions électro-faibles, d'interactions fortes et d'astrophysique, une courte section

présentant également les travaux du laboratoire sur la théorie des champs à température et densité finies. Cette séparation est dans une grande mesure artificielle étant donnée l'étroite imbrication entre ces thèmes, tant du point de vue théorique que du point de vue phénoménologique.

a) Interactions électro-faibles

Après la découverte du quark top à Fermilab avec une masse qui concorde avec celle extraite indirectement à partir des mesures du LEP, le contenu en particules du Modèle Standard est quasiment établi, mis à part un élément de taille : le boson de Higgs. Cette particule a un rôle crucial quant à notre compréhension du mécanisme de brisure de symétrie (ou le mystère de l'origine des masses) et le problème concomitant de la violation CP. Il est donc tout naturel que les travaux du laboratoire LEP dans le domaine de l'interaction électrofaible aient comme thème central et unificateur l'élucidation de la brisure de la symétrie et l'origine des masses avec des applications directes à la phénoménologie du LEP1, du LEP2, des expériences à basse énergie, ainsi qu'une activité très soutenue dans la physique aux collisionneurs $e^+ + e^-$ du futur. A cet égard, les membres du groupe ont été maintes fois sollicités pour diriger des groupes de travail et faire des analyses de synthèse. Simultanément le groupe a commencé à réadapter ses idées, déjà appliquées à $e^+ + e^-$, au collisionneur pp, LHC. Une nouvelle direction, motivée par l'éventualité d'un nouveau type de collisionneur photon-photon, est aussi poursuivie.

Une grande partie de la recherche, après l'effort consacré à la physique du LEP1, puis du LEP2 porte sur la physique des bosons vecteurs et l'impact du Higgs ainsi que la phénoménologie de la supersymétrie. L'approche du groupe est non seulement de proposer et d'analyser des modèles au delà du modèle standard mais aussi de faire une étude détaillée des bruits de fond qui accompagnent certains signaux de la nouvelle physique. Le groupe a donc contribué à l'évaluation de processus complexes dans le contexte du Modèle Standard. Les nouvelles méthodes de calcul introduites au laboratoire, basées sur un choix de fixation de jauge judicieux introduit initialement pour améliorer l'efficacité de nos programmes Monte-Carlo, se sont révélées avoir un lien avec les méthodes récentes inspirées de la théorie des super-cordes. L'approche reste cependant ancrée dans la théorie des champs et son originalité réside dans l'application à la théorie électro-faible, bien que pour le moment seuls certains processus puissent être traités de la sorte. Par ailleurs, durant les quatre dernières années une collaboration soutenue avec des collègues du KEK et à l'Université de Tokyo (Japon) a permis la mise en oeuvre de ces choix de jauge dans un programme de calcul automatique des amplitudes de Feynman et ceci au niveau d'une boucle dans le modèle standard ainsi qu'au niveau de l'arbre en supersymétrie. Ceci a permis non seulement le calcul de processus complexes à plusieurs particules dans l'état final mais aussi de fournir une interface aisée vers des programmes de simulations pour les expérimentateurs.

Le travail en cours s'attaque maintenant à la mise en oeuvre des corrections radiatives SUSY dans ce logiciel, cependant pour mener à bien ce programme l'équipe aura besoin de moyens informatiques plus puissants et plus modernes à

l'instar des groupes expérimentaux (qui sont les utilisateurs de ce logiciel) ainsi que des groupes japonais.

b) Interactions fortes

Les études du groupe concernent principalement les collisions hadron-hadron, photon-hadron et photon-photon à très haute énergie et grands transferts d'impulsions de telle sorte que l'approche perturbative de QCD s'applique. En fait, les corrections radiatives à un certain nombre de ces réactions ont été calculées de façon systématique dans l'approximation dite «au delà des logarithmes dominants» (ALD). En effet, seuls les calculs ALD ont un sens et un pouvoir prédictif puisque les calculs dans l'approximation des «logarithmes dominants» dépendent fortement du choix de paramètres arbitraires tels que l'échelle de renormalisation, qui permet de définir le couplage paramètre du développement perturbatif, et tels aussi que les échelles de factorisation qui permettent de définir les densités de partons dans les hadrons ou le photon. La définition «d'observables» accessibles à la fois au calcul théorique et à l'observation expérimentale a conduit à une étroite collaboration avec les physiciens impliqués dans les expériences de collisions à très haute énergie réalisées au CERN, à DESY, à FERMILAB ainsi qu'au KEK (Tsukuba).

Ces dernières années, les efforts se sont portés sur le calcul du bruit de fond du Higgs en deux photons. Des études antérieures ont montré que le bruit de fond de QCD était très sérieux et qu'il était donc nécessaire d'effectuer le calcul le plus précis possible.

Dans une première étape, un calcul inclusif à l'ordre ALD a été fait pour les contributions «directes» (les deux photons sont émis directement dans le sous-processus partonique), «simple bremsstrahlung» (un photon est émis directement, l'autre via la fragmentation d'un parton en photon) «double bremsstrahlung» (les deux photons sont émis via des fonctions de fragmentation). Un programme fortran, résultant de ces calculs, est disponible. Il permet de calculer n'importe quelles observables formées à partir des variables cinématiques des deux photons.

Le travail se poursuit dans deux directions :

- l'étude théorique des effets dus à l'inclusion de critère d'isolement ,
- les effets de la resommation de gluons mous sur les divers observables.

c) Théorie des champs à température et densité finie

En physique des particules, la théorie des champs à température et densité finies a pour objet l'étude de systèmes statistiques de particules à l'équilibre ou au voisinage de l'équilibre. En particulier, elle fournit un cadre qui permet de décrire la matière déconfinée, c'est-à-dire le plasma de quarks et de gluons à haute température tel qu'il peut être produit dans les collisions d'ions lourds à haute énergie (RHIC, LHC). Le formalisme des théories thermiques n'est pas aussi bien établi que celui de la théorie des champs usuelle. En effet, il existe plusieurs approches: l'une dite «formalisme à temps imaginaire» (FTI) où la température joue le rôle d'un temps imaginaire, l'autre dite «formalisme à temps réel» (FTR) où le temps et la

température sont deux variables indépendantes. De plus, une approche strictement perturbative au calcul des corrections thermiques dans le cadre de la théorie des champs à température finie n'est pas toujours applicable et on doit faire appel à une théorie effective.

L'activité autour de la théorie des champs à température et densité finies concerne aussi bien ces problèmes «formels» que les applications phénoménologiques telles que les signaux de formation d'un plasma de quarks et de gluons. En particulier, on étudie en détail, les mécanismes de production d'une paire de leptons par un plasma chaud de quarks et gluons et on a mis en évidence l'insuffisance de la théorie effective pour calculer cette observable, insuffisance à laquelle on essaye de remédier.

d) Astrophysique des particules

Une grande partie de la masse de l'univers est invisible. Cette masse dite cachée est une des énigmes que l'astrophysique essaie de résoudre depuis un demi-siècle. Bien que mise en évidence par ses effets gravitationnels -courbes particulièrement plates de rotation galactique, vitesse de dispersion des galaxies au sein des amas galactiques - la nature de cette matière invisible est encore inconnue. Le halo de notre galaxie contient 160 amas globulaires, concentrations très denses d'étoiles qui se sont formées en même temps. Il est donc naturel de chercher dans ces amas globulaires la présence de la matière sombre qui entoure notre galaxie. La dynamique interne des amas globulaires a été étudiée. La thermalisation entre les diverses populations stellaires, engendrée par la relaxation à deux corps, conduit l'amas à rejeter les petites étoiles à l'extérieur alors que le coeur est dominé par les objets massifs et brillants. L'émission infrarouge de la composante légère a été calculée. La recherche d'amplifications lumineuses d'étoiles lointaines par des objets de l'amas s'interposant sur la ligne de visée et produisant un mirage gravitationnel est également prometteuse. Signalons également que la présence éventuelle dans le halo de notre galaxie de nuages très froids d'hydrogène et d'hélium a été fortement contrainte. Elle devrait en effet induire un fond supplémentaire diffus gamma relativement brillant qui n'a pas été observé.

Une étude récente du gaz chaud réparti au sein des amas de galaxies montre que l'essentiel de leur masse pourrait être formée de particules non-baryoniques et non de matière ordinaire. L'un des candidats favoris à cette dernière est le neutralino, particule électriquement neutre prédite par la supersymétrie. Une attention particulière est donc apportée au comportement cosmologique des théories supersymétriques. Les modèles contenant un singlet de jauge supplémentaire différent de la théorie standard quand le singlet de jauge est très léger et constitue le LSP. Comme ce dernier est d'autant plus léger qu'il se couple faiblement aux autres champs, de fortes contraintes cosmologiques sont à attendre. Leur étude fait l'objet d'une partie de la thèse de Cilly Briot qui vient d'arriver dans le groupe de théorie.

Les neutralinos du halo galactique continuent à s'annihiler lentement. Bien que sans effet sur la densité de ces particules, cette annihilation produit des rayons gamma ainsi que des positrons et des antiprotons. Ces produits constituent une signature indirecte de la présence de particules

supersymétriques dans notre galaxie. La collaboration Anti Matter Spectrometer in Space (AMS) à laquelle participe activement un groupe expérimental du LAPP travaille à la mesure de l'abondance d'antimatière dans le rayonnement cosmique galactique. La production d'antiprotons par la spallation de rayons cosmiques sur la matière interstellaire a été calculée en détail et de substantielles améliorations ont été apportées aux précédentes évaluations. L'un des buts d'AMS étant l'observation d'anti-noyaux susceptibles de provenir de régions ne contenant que de l'antimatière, la production conventionnelle d'anti-deutérium et d'anti-tritium dans notre propre galaxie a été pour la première fois calculée. La collaboration AMS sera capable d'observer quelques-uns de ces anti-deutons pendant la phase station orbitale de l'expérience.

Symétries et théorie des champs

L'activité du Laboratoire en théorie des champs et mécanique statistique est fédérée autour du concept de symétrie. En effet, celui-ci fournit un outil puissant dans la compréhension et l'analyse des systèmes à nombre très grand ou infini de degrés de liberté que sont les théories quantiques et/ou statistiques des champs et les modèles de mécanique statistique.

Dans certains cas, l'existence de symétries permet de résoudre complètement le modèle considéré, c'est-à-dire de calculer la totalité des quantités physiques comme les fonctions de partition, les exposants critiques et enfin, les fonctions de corrélations. C'est le cas des modèles exactement solubles. Les modèles intégrables comme le modèle de Sine-Gordon et le modèle d'Ising en dimension deux entrent dans cette catégorie. De même, les théories conformes bidimensionnelles ainsi que certaines théories topologiques sont exactement solubles.

Toutefois, dans certains cas, même si la symétrie ne permet pas de «résoudre» complètement le modèle étudié, elle permet de comprendre certains de ses aspects. C'est le cas par exemple, pour les théories de jauge non-abéliennes où la symétrie de jauge est un ingrédient essentiel de la renormalisabilité. Il en est de même pour les théories supersymétriques comme les modèles de supergravité qui sont censés décrire la limite de basse énergie de la théorie des cordes: la supersymétrie, même locale, ne permet pas de résoudre les différents modèles mais permet de comprendre la forme possible de leurs Lagrangiens. C'est autour de ces idées que sont organisés les travaux du Laboratoire.

a) Modèles intégrables, groupes quantiques et applications

Au cours des dix dernières années, des progrès considérables ont été accomplis dans la compréhension de la notion d'intégrabilité en théorie des champs et en mécanique statistique à deux dimensions ($d=1+1$ ou $d=2$), c'est-à-dire pour des modèles possédant un nombre très grand ou infini de degrés de liberté. Le moteur principal dans ces progrès a été l'émergence de concepts de symétrie nouveaux, liés à l'équation de Yang-Baxter quantique, tels les algèbres de symétries dynamiques de dimension infinie et les groupes quantiques.

D'un point de vue méthodologique, ces travaux s'apparentent à la stratégie de résolution de l'atome d'hydrogène, initiée par Pauli en 1926, utilisant l'algèbre de symétrie dynamique

(de dimension finie dans ce cas) engendrée par le moment cinétique et le vecteur de Runge-Lens. La théorie des représentations d'une telle algèbre permet alors de déterminer les niveaux d'énergie du Hamiltonien.

C'est aux analogues de cette situation, mais en théorie quantique des champs et en mécanique statistique, que sont consacrés les travaux de ce domaine de recherche. Les concepts et méthodes mis en jeu, élaborés dans un premier temps dans le cadre des modèles intégrables, trouvent à présent des applications remarquables dans d'autres domaines de la physique et des mathématiques tout en ouvrant des directions de recherche nouvelles (théories conformes, théories des cordes, groupes quantiques, topologie des variétés de basse dimension, en particulier, théorie des noeuds).

Dans ce cadre on peut distinguer plusieurs axes de recherches qui ont été entrepris dans notre Laboratoire, parmi lesquels, la théorie des représentations des groupes quantiques et son application aux chaînes de spins quantiques – modèles t-J et de Hubbard –, le développement d'une approche géométrique de la notion d'intégrabilité valide en toute dimension.

b) Symétries des théories conformes

Une activité particulière s'est développée dans le domaine des symétries liées aux algèbres W .

Parmi les algèbres de dimension infinie qui apparaissent dans les théories des champs à deux dimensions, une classe importante est constituée par les extensions de l'algèbre conforme. Historiquement, les premières algèbres de ce type sont apparues dans les théories de cordes et sont appelées algèbres superconformes. Elles sont présentes dans les théories possédant à la fois l'invariance conforme et l'invariance par supersymétrie. Elles contiennent, en plus des générateurs de l'algèbre conforme, des générateurs anticommuteurs caractérisés par un «spin conforme» égal à $3/2$. Plus tard, A. Zamolodchikov a introduit en 1985 un type d'extension nouveau, caractérisé par la présence de générateurs de spin conforme supérieur ou égal à 2, appelées algèbres W . Dans ces algèbres, le commutateur de deux générateurs n'est plus une fonction linéaire, mais polynomiale des générateurs.

Depuis leur introduction, des méthodes ont été élaborées qui permettent d'engendrer à volonté de telles algèbres. Cependant il n'existe encore aujourd'hui ni une définition abstraite (géométrique), ni a fortiori une classification systématique. En revanche, elles jouent un rôle important non seulement dans les théories conformes où elles sont nées, mais aussi dans l'étude de certains modèles intégrables, des théories de cordes, et de la gravité quantique. Enfin, certaines d'entre elles ont été utilisées afin de classer les excitations d'un fluide de Hall quantique, d'autres dans le cadre des statistiques intermédiaires (anyons). L'étude de cette dernière classe d'algèbres W , dites algèbres W finies, a reçu une attention particulière ces derniers temps dans notre laboratoire.

A noter enfin des résultats récents concernant les algèbres de Virasoro et W q -déformées construites à partir de la notion d'algèbre elliptique, une algèbre elliptique apparaissant comme la généralisation naturelle d'une algèbre quantique ou q -déformée.

c) Théories de champs lagrangiennes

La théorie des perturbations, malgré toutes ses limitations, a le mérite d'offrir une procédure de quantification stricte qui permet de contrôler certaines des procédures de quantification sur des espaces de modules, apparues avec les modèles conformes. Bien entendu, elle s'applique dans des cas simples où les séries perturbatives se limitent à un ou deux termes. Dans d'autres cas, l'étude de relations correctes au sens des séries formelles (par exemple des identités de Ward) peut être suggestive. La variété des théories de jauge apparues depuis une vingtaine d'années, ainsi que des algèbres de courants correspondantes permet de tester quelques idées. On signalera en particulier dans ce domaine les travaux concernant la définition des observables dans les théories topologiques de Witten (YM_4 , gravité topologique) en terme de cohomologies équivariantes et fournissant un exemple de symétrie de type BRS pas encore rencontrée jusque là. La relation entre la symétrie BRS topologique et la symétrie BRS conventionnelle a été précisée.

La bosonisation en Théorie Quantique des Champs cherche à établir une correspondance entre des théories de bosons et des théories de fermions. Une nouvelle méthode de bosonisation a été développée dans l'approche des intégrales fonctionnelles. Elle a permis non seulement de compléter la bosonisation abélienne à 3 dimensions par le point de vue de l'algèbre des courants, mais aussi de développer une bosonisation non-abélienne à 3 dimensions par une construction systématique de l'action bosonique qui, avec l'obtention d'une règle de bosonisation pour les courants fermioniques, décrit entièrement le système fermionique initial en termes de bosons vectoriels. Une approche analogue a d'autre part permis de montrer une dualité entre des modèles topologiques massifs et self-duaux.

La charge électrique de monopoles non-abéliens à température finie a été calculée dans des théories de jauge spontanément brisées et avec violation de CP, avec un résultat identique à celui de Witten à température nulle.

d) Supersymétrie, Supergravité, Théorie des (super) cordes

Le Laboratoire a toujours eu une activité soutenue dans les domaines de supersymétrie et supergravité. A noter la parution prochaine par Academic Press d'un ouvrage ayant pour titre " Dictionary on Lie algebras and superalgebras " et signé par deux membres du LAPTH ainsi que par un théoricien de l'Université de Naples.

Un second ouvrage consacré à une approche générale de la supersymétrie étendue $N=2$ dite méthode du super-espace harmonique, est en cours d'achèvement par les inventeurs mêmes de ces techniques, dont un membre du laboratoire. Ces mêmes méthodes sont actuellement utilisées à Annecy dans le cadre des théories des cordes pour vérifier la conjecture dite de Maldacena reliant les théories de jauge Yang-Mills en supersymétrie étendue ($N=4$) et des théories de supergravité sur certaines espèces à dix dimensions ($AdS_3 \times S^5$).

Enfin un Physics Reports traitant de la formulation géométrique en supergravité sera bientôt disponible.

Résultat d'un ensemble de travaux effectués à Annecy, les auteurs utilisent les méthodes du superespace de Kähler pour la description des couplages de la matière et de champs de jauge Yang-Mills à la supergravité de Poincaré. Cette approche est généralisée pour inclure les couplages de champs tensoriels et de formes de Chern-Simons pertinents dans le contexte des théories de cordes faiblement et fortement couplées.

d) Symétrie du code génétique et interface physique-biologie

Une étude du code génétique à l'aide des symétries et plus précisément des groupes quantiques dans la limite $q=0$ du paramètre de déformation, est poursuivie au laboratoire ces deux dernières années. Le modèle proposé permet des calculs d'énergie de liaison entre nucléotides, et reproduit de façon intéressante des rapports de probabilités de présence de nucléotides sur des séquences codées. La poursuite de cette interface biologie/physique théorique devrait se poursuivre et même se développer au LAPTH dans un transfert de technologie depuis la physique des particules élémentaires vers les sciences de la vie.

e) Physique statistique

C'est d'une part l'élan provoqué par les théories des champs conformes à deux dimensions, d'autre part par la présence aujourd'hui dans le laboratoire de compétences en physique statistique, qu'a démarré une activité dans ce domaine. Elle concerne principalement l'étude des systèmes de spins quantiques (cf. supraconducteurs à haute température critique) et les systèmes de fermions fortement corrélés. Les méthodes de bosonisation mentionnées au §3 ci-dessus présentent un grand intérêt dans ce domaine. A noter aussi l'application de la théorie des représentations des groupes quantiques à l'étude des chaînes de spin.

Enfin il a été montré que les valeurs des exposants critiques du modèle d'Ising en champ aléatoire à 3 dimensions sont compatibles avec celles des exposants critiques du modèle d'Ising pur à 1.5 dimensions, obtenant ainsi une évidence pour l'hypothèse d'une réduction dimensionnelle généralisée.