

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

M. Gabriele VENEZIANO, membre de l'Institut
(Académie des Sciences), professeur

1. Enseignement au Collège

L'enseignement de cette année a eu lieu, dans sa totalité, à Pise (Université et Scuola Normale Superiore) dans le cadre de l'école de doctorat *Galileo Galilei*. En raison du caractère international de cette école, le cours a été donné entièrement en anglais ; à la place des séminaires, un colloque a été organisé, toujours à Pise, avec la participation de nombreux théoriciens parisiens (notamment de plusieurs membres de la FRIF), ainsi que des physiciens de Pise et d'autres universités italiennes.

1.1. Le cours à Pise

Il s'est déroulé entre le 20 février et le 16 mars 2007, avec six cours de 90 minutes chacun sur le thème :

« La théorie des cordes : concepts de base et applications »

Les cours ont été donnés, soit à partir d'un fichier *Power Point*, soit avec l'aide de transparences. Dans les deux cas, des fichiers électroniques ont été téléchargés sur le site de la chaire.

Le but du **premier cours**, *The Birth of String Theory : a Personal Recollection*, était de retracer les origines de la théorie des cordes à la fin des années soixante. On a repris cette invraisemblable histoire à partir d'un séminaire donné par Sergio Fubini à Pise en 1966, auquel j'avais assisté comme tout jeune chercheur basé à Florence. Ensuite, on a illustré les travaux des années 1967-68 qui ont précédé le véritable début de cette théorie en 1968. On a retracé aussi les espoirs — ainsi que les déceptions — qui ont caractérisé la théorie des cordes jusqu'au milieu des années soixante-dix, lorsqu'on s'est rendu compte qu'elle n'était pas la théorie correcte des interactions fortes. À sa place, les théoriciens ont préféré

adopter la chromo-dynamique quantique (QCD), le sujet des cours de cette chaire en 2005 et 2006.

Enfin, on a rappelé la nouvelle interprétation de la théorie des cordes, depuis les années quatre-vingt, comme étant la seule capable de réconcilier les lois de la mécanique quantique et celles de la gravitation d'Einstein (la relativité générale), et d'unifier ainsi la description des différentes particules élémentaires et les quatre forces fondamentales.

Le **deuxième cours**, *The String Effective Action : Symmetries and Perturbative Expansions*, était consacré à la théorie des champs efficace qui découle de la théorie des cordes. En particulier, les symétries de cette dernière doivent se retrouver dans la théorie efficace même si elles sont, à l'heure actuelle, en grande partie inconnues. Après avoir montré comment les symétries habituelles des théories de jauge (qui sont à la base du modèle standard des particules élémentaires), ainsi que celles de la relativité générale, découlent automatiquement d'une théorie quantique des cordes, nous avons illustré les symétries de dualité comme l'exemple le mieux connu de symétries proprement « *cordiques* ». Nous avons aussi présenté des hypothèses sur la nature d'autres possibles symétries du même genre.

Dans la deuxième partie du cours, nous avons abordé les propriétés de cette théorie efficace dans deux limites intéressantes. D'abord celle d'une constante de couplage faible, où l'on retrouve le même développement que l'on connaît de la théorie de champs ; et, ensuite, celle de champs lentement variables dans l'espace-temps, où l'on trouve un nouveau type de développement lié, cette fois, à la taille finie des cordes.

Le **troisième cours**, *Strings and Black Holes*, a abordé, comme première application possible de la théorie des cordes, les problèmes conceptuels de la théorie quantique des trous noirs qui avait été soulevés, il y a plus de trente ans, par le célèbre physicien Stephen Hawking. Ces travaux avaient suscité de fortes suspicions en faveur d'une brisure des lois de la mécanique quantique par effet de l'existence des trous noirs. Or, la théorie des cordes doit donner forcément une réponse à cette question, sans doute dans le sens qu'il n'y ait pas, en effet, aucune brisure de la cohérence quantique enduite par les trous noirs.

Un premier pas vers la compréhension de ce problème consiste en essayant d'obtenir, dans le contexte de la théorie des cordes, une description microscopique des possibles états quantiques associés à un trou noir d'une certaine masse, moment cinétique et charge, tandis que, dans l'approche de S. Hawking, tous ces états sont, dans un sens, indistinguables (dont la perte de l'information quantique).

Dans ce domaine, la théorie des cordes a obtenu, depuis les années quatre-vingt-dix, des résultats remarquables en arrivant à obtenir, dans plusieurs cas limites, une description microscopique complète de ces états.

Dans le cas de trous noirs plus conventionnels, une telle description n'est pas encore possible, mais des arguments quantitatifs conduisent à la même conclusion.

Le **quatrième cours**, « *Transplanckian String Collisions* », aborde le même sujet que le cours précédent, mais d'un autre point de vue. Il s'agit ici d'étudier, toujours dans le contexte d'une théorie de cordes, la collision quantique de deux particules sans masse à des énergies si élevées qu'au niveau classique au moins, la formation d'un trou noir paraît inévitable (dans le contexte de la théorie des cordes des processus pareils pourraient même avoir lieu dans les expériences prévues au CERN dans les prochaines années). La question est de savoir si, aussi au niveau quantique, il y a la formation d'un trou noir et, dans ce cas, s'il y a une perte d'information ou si cette information est récupérée et codée dans l'état final et comment.

Depuis la fin des années quatre-vingt plusieurs chercheurs (y compris moi-même) ont étudié cette question d'un point de vue théorique ce qui a donné lieu à un certain nombre de résultats intéressants. Mais le problème, dans toute sa généralité, reste encore irrésolu, même si de nouveaux outils (comme, par exemple, la correspondance AdS/CFT dont le professeur invité Adam Schwimmer a parlé l'année passé sous le titre « *Anomalies and Holography* ») sont désormais disponibles. En effet, il existe, en ce moment, un regain d'activité dans ce domaine.

Le **cinquième cours** : « *String Cosmology I : General Considerations* »

Les deux dernières séances ont été consacrées aux applications de la théorie des cordes en cosmologie et, plus particulièrement à la cosmologie de l'Univers primordial et au big-bang lui-même. Dans le premier cours, nous avons illustré un modèle cosmologique largement inspiré par la théorie des cordes selon lequel le big-bang, loin d'être le commencement de tout, est lui-même, le résultat d'une longue évolution que l'a précédée.

La nature de cette phase, dite du pré-big-bang, aurait été dictée par les symétries de dualité mentionnées dans le deuxième cours et aurait été caractérisée par une croissance de la courbure de l'espace-temps et de la densité. La taille finie des cordes empêcherait cette densité et cette courbure de dépasser une valeur maximale. Au contraire, la densité et la courbure, après une phase très difficile à décrire dans le détail, recommencent à décroître comme dans la cosmologie conventionnelle du big-bang. Donc l'instant $t = 0$ de la cosmologie classique du big-bang où toute distance est réduite à zéro, est remplacé par cette phase très quantique et « cordique » et par une longue phase classique un peu à l'image spéculaire de la nôtre. On pourrait parler aussi de cosmologies à rebondissement.

La discussion a porté sur les arguments théoriques en faveur de ce scénario ainsi que sur les problèmes non encore résolus, en particulier ceux qui concernent la description de la phase de haute densité et courbure.

Le sixième cours : « *String Cosmology II : Phenomenology* »

Dans cette deuxième partie, on a discuté des conséquences observables, et donc des possibles vérifications, du modèle cosmologique présenté au cours précédent. Ces conséquences phénoménologiques sont surtout liés à la structure des disomogénéités qui découlent de la phase « pré-bangienne ». Comme dans la cosmologie inflationnaire conventionnelle, ces disomogénéités sont dues à l'amplification des fluctuations quantiques des champs entraînés par l'expansion accélérée de l'univers pendant ces époques primordiales. Or, pour comparer les prédictions du modèle inflationnaire conventionnel à celles de la cosmologie de cordes, il faudra recalculer le spectre des fluctuations pour les différents champs présents dans chaque modèle cosmologique.

Dans le cas d'un modèle inspiré par les cordes il existe une multitude de champs et, pour chacun d'entre eux, un spectre caractéristique. En particulier, il y a (seulement dans la cosmologie des cordes) la possibilité de produire des fluctuations du champ électromagnétique qui pourrait être à l'origine des champs magnétiques observés à grande échelle (galactique ou intergalactique). Quant aux fluctuations de la courbure de l'espace lui-même (révélés expérimentalement par les fluctuations de la température du fond diffus), elles sont très bien expliquées par l'inflation conventionnelle tandis que la cosmologie de cordes nécessite un mécanisme dit du « curvaton » qui est capable de le générer à partir de certaines fluctuations d'entropie.

Pour conclure, il sera possible de distinguer les deux scénarios cosmologiques à partir des données expérimentales qu'on est censé obtenir dans les dix années à venir.

1.2. Colloque organisé à Pise en lien avec le cours

Un colloque sur le thème « *Supersymétrie, Supergravité, Supercordes* » a eu lieu du 19 au 21 mars 2007 (donc tout de suite après la fin du cours principal). Il couvrait un domaine de recherche très populaire aujourd'hui en physique théorique fondamentale, le dénominateur commun étant, bien sûr, l'idée de la supersymétrie, une symétrie entre particules obéissantes des statistiques opposées (de Bose-Einstein d'un côté et de Fermi-Dirac de l'autre). Il s'agit d'une conjecture qui n'est que théorique pour le moment mais qui sera vérifiée bientôt dans des expériences de hautes énergies prévues aux accélérateurs.

L'atelier comportait une vingtaine d'exposés donnés d'une part par des professeurs et, de l'autre, par des étudiants de l'école de doctorat ou de jeunes chercheurs. Dans le premier groupe, il y avait six professeurs qui travaillent dans la région parisienne :

Costas Bachas (LPT-ENS), Laurent Beaulieu (LPTHE), Atish Dabholkar (LPTHE). Vladimir Kazakov (LPT-ENS), Kostas Kounnas (LPT-ENS), et Elias

Kiritsis (École Polytechnique). Le programme de ce colloque est attaché à la fin de ce rapport.

1.3. Le colloque « Galileo Galilei » à la fin du cours

Pour clore le programme d'enseignement à Pise j'ai donné, le 22 mars 2007, l'annuel « *Colloquio Galileiano* » sur le thème : « *String Theory: is Einstein's Dream Being Realized ?* ».

Le colloque s'adressait aux étudiants, chercheurs et professeurs scientifiques, mais pas seulement dans le domaine de la physique.

Miniworkshop : « Supersymmetry, Supergravity, Superstrings », 19-21 mars 2007

- R. Barbieri, « Which supersymmetry, if any, at the Large Hadron Collider ? »
- S. Gudnason, « Abelian vortices and junctions in the large magnetic flux limit »
- C. Iazeolla, « Singletons, Doubletons and Higher-Spin Master Fields »
- C. Imbimbo, « Tachyon condensation in bosonic open string theory »
- E. Kiritsis, « Non-perturbative and flux superpotentials on the Z_3 orientifold »
- C. Bachas, « Dynamics of String Vacua »
- L. Griguolo, « Phase transitions of large N gauge theories with sixteen supercharges in three dimensions »
- C. Kounnas, « Inflationary De Sitter Solutions in String Effective Theories »
- W. Vinci, « On the moduli space of semilocal vortices and lumps »
- M. Halat, « Renormalizable acausal theories of classical gravity coupled with quantum fields »
- A. Zaffaroni, « Counting BPS states in conformal gauge theories »
- R. Volpato, « Compactified strings and quantum mechanics on the Jacobian torus »
- E. Latini, « Higher spin from a worldline perspective »
- L. Baulieu, « Shadow fields and enforcement of supersymmetry in super Yang-Mills theory »
- S. Rychkov, « Thermal production of gravitinos »
- M. Trappetti, « Orbifolds vs. smooth manifolds : merging two different approaches to string model building »
- V. Kazakov, « Integrability in AdS/CFT »
- P. Sundell, « Higher Spins, Singletons and Non-Compact WZW Models »

K. Konishi, « Duality and Confinement : Magnetic Monopoles Seventy-Five Years Later »

C. Corda, « Scalar gravitational waves from scalar tensor gravity : production and response of interferometers »

E. Tonni, « The near flat space limit in AdS/CFT »

A. Dabholkar, « Exact Spectrum of Dyons in $N = 4$ Compactifications »

A. Patella, « Orientifold planar equivalence on the lattice »

J. Kluson, « Current algebra for principal chiral model coupled to two dimensional gravity »

D. Anselmi, « Supersymmetric and non-supersymmetric finite non-renormalizable theories »

A. Sagnotti, « Some lessons from Higher Spins »

2. Enseignement en dehors du Collège

En août 2006, sur invitation de l'École d'été de Physique, je suis intervenu à Nantes sur le thème :

« *La Théorie des cordes et le Rêve d'Unification d'Einstein* »

L'exposé s'adressait en particulier à des professeurs du lycée et a attiré un public nombreux et intéressé.

3. Activité de recherche

Depuis janvier 2005, la chaire fait partie, avec le LPTENS, les LPNHE et LPTHE de Paris 6, et l'APC (après son départ du Collège), d'une « Fédération de Recherche Interactions Fondamentales » (FRIF).

Voici un aperçu de cette activité de recherche, suivi de la liste des publications scientifiques correspondantes.

3.1 Particules élémentaires

D'une part, la proposition (faite en 2003 par Adi Armoni, Michail Shifman et moi-même) d'une « équivalence planaire » entre une certaine limite de la QCD et une théorie supersymétrique a été remise en question par un groupe de chercheurs basé aux États-Unis. Leurs affirmations ont suscité une certaine réaction dans la communauté scientifique. Finalement, un consensus en faveur de notre proposition initiale, basé à la fois sur des arguments théoriques et sur des calculs numériques, l'a emporté. En plus, une proposition d'« indépendance du volume » pour une classe de théories a été avancée par un autre groupe de chercheurs. Une fois combinée avec l'« équivalence planaire », cette proposition devrait ouvrir

la voie à de nouvelles méthodes pour résoudre la QCD dans la limite des « grands N ». Un atelier consacré à la discussion de tous ces développements — auquel ont participé plusieurs experts en la matière — a eu lieu à Edinbourgh en août 2007. L'interaction avec de théoriciens de Pise sur ce sujet s'est révélé également très profitable.

D'autre part, avec le Professeur Jacek Wosiek (Université de Cracovie, Pologne) nous avons poursuivi l'étude de certains modèles de mécanique quantique matricielle supersymétrique. Nous avons ainsi trouvé une relation inattendue entre l'un de ces modèles et un système de mécanique statistique (modèles du type chaîne XXZ d'Heisenberg). Dans ces deux derniers développements, des discussions avec mes collègues mathématiciens, en particulier avec le professeur Don Zagier, ont été d'une grande utilité.

Désormais, nous avons entamé l'étude d'une théorie de jauge supersymétrique à deux dimensions (SYM_2) sur laquelle peu de choses sont connues en dépit du travail de nombreux chercheurs. La solution de ce problème ouvrirait la porte, sans doute, à la solution de QCD si la proposition d'invariance de la théorie par rapport au volume s'avérait correcte.

3.2. Gravitation

L'étude théorique de collisions entre particules légères à énergies trans-Planckiennes, a été poursuivie toujours dans le but de mieux comprendre le problème de l'information en physique des trous noirs. Avec les Professeurs Daniele Amati (SISSA, Trieste) et Marcello Ciafaloni (Florence) nous avons réexaminé la formulation d'un problème qui remonte à 1993 et nous sommes actuellement en train de résoudre ses équations.

3.3. Cosmologie

La théorie des cordes suggère de nouveaux scénarios cosmologiques où la « singularité » du big-bang (c'est-à-dire l'instant où plusieurs quantités physiques seraient devenues infinies) est remplacée par un « big bounce », une phase de contraction qui, soudainement, s'est transformée en expansion sans qu'aucune quantité physique ne dépasse les bornes dictées par la taille finie des cordes (« cosmologie à rebondissement »). Avec le Professeur Maurizio Gasperini, j'ai écrit un papier de revue du sujet pour un livre qui va être publié chez Springer (éditeur : Ruediger Vaas).

4. Publications

1. « *A note on C-parity conservation and the validity of orientifold planar equivalence* » (avec A. Armoni and M. Shifman), Phys. Lett. B647 (2007).

2. « *A supersymmetric matrix model : III. Hidden SUSY in statistical systems* » (avec J. Wosiek), JHEP 0611 (2006) 030.

3. *String theory and pre-big bang cosmology* (avec M. Gasperini), à paraître dans « *Beyond the Big Bang* » (Springer, R. Vaas éditeur).

5. Conférences sur invitation

1. « *La théorie des cordes et le rêve d'unification d'Einstein* », École d'été de physique, CERN & Collège de France, Nantes, août 2006.

2. « *Alternative Theories of Gravity and Cosmology* », GGI, Florence, septembre 2006.

3. « *String Cosmology : an introduction* », deux conférences données dans le cadre d'un atelier au GGI, Florence, octobre 2006.

4. « *Dalla meccanica quantistica alla teoria delle stringhe : viaggio su un cubo metateorico* », Conférence Enriques, Livourne, octobre 2006.

5. « *La teoria delle stringhe : finalmente esaudito il sogno di Einstein ?* », conférence pour « Pianeta Galileo », Florence, octobre 2006.

6. « *Il big-bang come inizio del tempo : scienza o mito ?* », Locarno, novembre 2006.

7. « *La théorie des cordes : le big-bang au banc des accusés ?* », Palais de Tokyo, Paris, décembre 2006.

8. « *Baryon Number Transport at LHC* », conférence au group expérimental ALICE, CERN, janvier 2007.

9. « *String Theory : a unified description of elementary particles & interactions ?* », conférence « Beppo Occhialini », Milan, février 2007.

10. « *Storie : a proposito di stringhe e del big-bang* », conférence grand public, Prato, mars 2007.

11. « *Old and New Fun with Large-N* », conférence pour les soixante ans de Eliezer Rabinovici et Shimon Yankielovicz, Jerusalem & Tel Aviv, avril 2007.

12. « *Rise and Fall of the Hadronic String* », Journée sur « *The Birth of String Theory* », GGI, Florence, mai 2007.

13. « *Large N & SUSY : some new ideas and results* », GGI, Florence, mai 2007.

14. « *Planar Equivalence : an update* », 9th workshop on non-perturbative QCD, Paris, juin 2007.

15. « *String Theory, Gravity, and Cosmology* », conférence « Oskar Klein », Stockholm, juin 2007.

Organisation de conférences et d'ateliers

Comme membre de la FRIF (Fédération de Recherche Interactions Fondamentales) la chaire a contribué à l'organisation d'un nombre d'ateliers à Paris, notamment :

- « *30 Years of Supergravity* », octobre 2006.
- « *High Energy Physics in the LHC Era* », novembre 2006.

6. Participation à des Comités

- Comité d'évaluation de la « Scuola Normale Superiore », Pise, Italie.
- Président du Comité d'évaluation du département de physique de l'Université de Padoue, Italie.
- Chaire de l'« Advisory Committee » de l'Institut Galileo Galilei (GGI) à Arcetri (Florence). En octobre 2006, le comité s'est réuni pour sélectionner les propositions d'atelier pour l'année 2008. Deux propositions ont été sélectionnées.
- Depuis janvier 2007 l'Institut de Physique Nucléaire Italien (INFN) m'a chargé de suivre les activités du GGI avec une présence de plusieurs semaines pendant chaque atelier. J'ai donc passé au GGI quelques semaines en janvier et tout le mois de mai de cette année et je pense y retourner pendant le mois d'octobre 2007.

7. Groupes de travail

Le groupe de travail de l'Académie des sciences « *Unités de base et constantes fondamentales* », après avoir recommandé une nouvelle définition du kilogramme qui revient à donner une valeur nominale à la constante de Planck, a poursuivi ses discussions sur l'adoption d'un nouveau système d'unité électrique et magnétique afin d'utiliser la haute précision atteignable sur l'effet Hall quantique et l'effet Josephson. Le groupe a présenté ses recommandations au Bureau international des Poids et Mesures en octobre 2006. Depuis, ce groupe est dissous. À sa place, un nouveau comité de l'Académie des sciences, nommé « Science et métrologie », dont je ferai partie, commencera ses travaux cet automne.

8. Prix, distinctions

- Décembre 2006 : Médaille de « *Commendatore dell'Ordine al Merito* » de la République Italienne.
- Juin 2007 : Médaille « *Oskar Klein* » de la Société du même nom basée à Stockholm, Suède.

