

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

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

COURS ET SÉMINAIRE : THÉORIE DES CORDES, QUELQUES APPLICATIONS

Le cours de l'année 2010-2011 a eu lieu dans sa totalité au Collège. Il s'est déroulé en quinze heures de cours proprement dits et en trois heures de séminaires, données par le Pr Costas Bachas (ENS, Paris) et le Pr Cedric Deffayet (APC & IAP, Paris).

Étant donné que les séminaires apportent des compléments essentiels au matériel présenté dans les cours, ils sont décrits ci-dessous en même temps que les cours eux-mêmes et dans l'ordre chronologique (et logique) par rapport à eux.

Dans le cours de 2009-2010, nous avons présenté la théorie des cordes, ses origines, sa formulation, et ses développements formels. Nous avons expliqué pourquoi cette théorie est, jusqu'à aujourd'hui, la candidate la plus crédible à pouvoir fournir une description unifiée et complètement quantique des quatre interactions fondamentales, ainsi que des particules élémentaires dont toute la matière (visible et noire) serait constituée.

Cette année, poursuivant la même ligne, nous avons présenté quelques applications de la théorie des cordes à des problèmes physiques particuliers. Le support de chaque cours et séminaire a été imprimé et distribué avant le cours et proposé au téléchargement sur les sites internet (en français et en anglais) de la chaire. Les cours ont aussi fait l'objet d'un enregistrement vidéo.

Les quatre premiers cours, « Rappels du cours 2009-2010 », fournissent un rappel assez détaillé du cours de l'année précédente avec, comme but, de donner une base sur laquelle construire la suite du programme. Celui-ci tourne autour de trois applications de la théorie des cordes : les trous noirs, les collisions entre cordes à très hautes énergies et, finalement, la cosmologie.

Le cinquième cours, « Trous noirs classiques et semi-classiques », a rappelé d'abord les différents types de trous noirs en relativité générale, en particulier celui de Schwarzschild (trou noir sans charge ou moment cinétique), ceux de Kerr (avec moment cinétique) et de Reissner-Nordstrom (avec charge électrique), et, enfin, celui de Kerr-Newman (avec moment cinétique et charge électrique). Ensuite, nous avons vu comment des considérations quantiques (mais au niveau semi-classique)

amènent à associer au trou noir une entropie (dite de Bekenstein-Hawking), proportionnelle à l'aire de la surface de l'horizon, et une température d'évaporation (dite de Hawking). Malheureusement, ces considérations à caractère purement thermodynamique, ne fournissent pas une interprétation de l'entropie en termes du nombre des possibles états microscopiques d'un trou noir.

Dans son séminaire, « Calcul microscopique de l'entropie d'un trou noir », le Pr. C. Bachas a présenté un résultat tout à fait remarquable de la théorie des cordes (dû à A. Strominger et C. Vafa). Pour une classe très spéciale de trous noirs, la théorie des cordes est en mesure de donner une interprétation microscopique (c'est-à-dire du genre mécanique statistique) de l'entropie thermodynamique de Bekenstein-Hawking. Cette découverte a contribué à convaincre la communauté scientifique de l'absence d'une contradiction entre la physique des trous noirs et la préservation de la cohérence quantique (le soi-disant paradoxe de l'information).

Le sixième cours, « Trous noirs et cordes fondamentales », donne des arguments pour étendre le résultat de Strominger et Vafa à des trous noirs plus conventionnels (ceux décrits dans le cours précédent). Certains états propres de la corde, étant des objets suffisamment compacts et lourds, peuvent être identifiés à des trous noirs. La question se pose de savoir si chaque trou noir peut être associé à un état microscopique de corde (le contraire étant nécessairement faux). La réponse est à première vue négative car les entropies des cordes et des trous noirs sont très différentes si l'on néglige les effets des interactions. Néanmoins, des arguments physiques et mathématiques amènent à penser que les interactions (en particulier la gravité) pourraient rétablir une correspondance complète.

Les quatre cours qui ont suivi, « Collisions entre cordes aux énergies transplankiennes » ont abordé l'étude de la collision des cordes à de très hautes énergies, processus qui, selon des considérations classiques, devrait amener, si la collision est suffisamment centrale, à la formation d'un trou noir suivi par sa désintégration par le phénomène précité d'évaporation. La première heure a porté d'abord sur les critères d'effondrement en relativité générale et, ensuite, sur les trois régimes attendus dans le cas de collisions entre cordes. Ces trois régimes ont été considérés, l'un après l'autre, dans les trois heures restantes.

Le premier est celui de la gravité faible (ou de petits angles de déflexion selon une généralisation de la célèbre formule d'Einstein sur la déviation de la lumière). Dans ce cas, en tenant compte d'un nombre infini de diagrammes, on voit émerger l'angle de déflexion classique ainsi que les effets de marée typiques de l'interaction gravitationnelle entre objets étendus (comme le système terre-lune).

Le deuxième régime est celui dominé par les effets de taille finie de la corde. Il s'agit d'un régime qui est, comme le précédent, relativement sous contrôle. On trouve que, au-dessus d'un certain seuil d'énergie, le nombre de cordes produites par la collision croît plus rapidement que l'énergie totale, de sorte que l'énergie moyenne de chaque corde produite commence à décroître quand on augmente l'énergie de la collision. Ce phénomène peut être interprété comme un précurseur du troisième régime, celui où l'on s'attend à la formation et à l'évaporation de trous noirs (dont la température est inversement proportionnelle à la masse).

La quatrième heure avait précisément pour but l'étude de ce troisième régime qu'on peut appeler « de la gravité forte ». Son analyse étant assez difficile, on est contraint de faire des approximations pas toujours justifiées *a priori*. Dans le cadre de ces approximations, on découvre l'existence de certaines valeurs critiques au-delà desquelles les équations n'ont pas de solutions réelles et régulières. Or ces valeurs

sont en bon accord avec les estimations classiques des seuils de formation d'un trou noir ! Néanmoins, certains problèmes demeurent, concernant l'interprétation des résultats, en particulier vis-à-vis de l'unitarité (conservation de la probabilité).

C'est justement pour essayer de résoudre ces problèmes que, dans le onzième cours « Collisions entre cordes et branes », on a considéré la collision entre une corde et un système de plusieurs branes superposées, où l'on s'attend à des simplifications car la métrique devrait être déterminée uniquement par les branes elles-mêmes. Il s'agit d'un projet plus récent, où nous avons déjà des résultats très encourageants, mais qui est encore loin d'être terminé.

Les deux cours qui ont suivi, « Une cosmologie inspirée par les cordes », ont abordé les applications de la théorie des cordes à la cosmologie. Dans le premier, nous avons d'abord rappelé (à partir du cours de 2008-2009) la cosmologie standard, sans ou avec inflation, ainsi que les succès et les difficultés de cette dernière. Ensuite, nous avons présenté les équations de la cosmologie des cordes (à petite courbure et petite constante de couplage) et ses symétries, notamment la dualité dans le facteur d'échelle qui nous donne d'une façon naturelle des solutions de type inflationnaire.

Dans le deuxième nous avons présenté des solutions générales des équations cosmologiques dans le cas homogène et, ensuite, nous avons montré comment des solutions de ce genre peuvent émerger à partir de données initiales assez génériques, donnant ainsi une réponse à certaines critiques de « réglage fin » qui ont été soulevées au sujet de ce modèle cosmologique. L'exemple prototypique de cette classe de modèles cosmologiques avec un *big bounce* (grand rebondissement) est le scénario dit du « pré-big bang ». Dans la dernière partie, qui valut aussi introduction aux séminaires qui ont suivi, nous avons présenté d'autres scénarios du type *big bounce* motivés cette fois par l'idée d'un univers-brane (voir ci-dessous).

Dans les deux séminaires « Grandes dimensions supplémentaires (univers brane) et cosmologie », le Pr. Deffayet a présenté des modèles cosmologiques basés sur l'existence possible de dimensions supplémentaires de l'espace, une prédiction générique de la théorie des cordes. Or, ces dimensions peuvent être presque macroscopiques, voir infinies, à condition que la matière ordinaire puisse seulement se propager dans notre sous-espace à trois dimensions. On parle d'un univers-brane (voir cours de 2009-2010). L'existence de ces dimensions supplémentaires implique des phénomènes nouveaux, comme des modifications de la gravité à courte distance ou des effets de gravitation quantique qui deviendraient importants, même aux énergies qui peuvent être atteintes au nouvel accélérateur du CERN, le LHC. Finalement, la cosmologie qui découle de ce modèle (considérée pour la première fois par P. Binétruy, C. Deffayet et D. Langlois) a des caractéristiques nouvelles. En particulier, les équations cosmologiques de Friedman sont modifiées par des termes additionnels, l'un proportionnel au carré de la densité d'énergie, l'autre dit de « radiation noire », qui représente un flux d'énergie qui arrive dans notre espace depuis les dimensions supplémentaires.

Le quatorzième cours, « Comparaison avec les prédictions de la cosmologie inflationnaire », revient à la cosmologie du « pré-big bang » pour en tirer de possibles conséquences observables et les comparer avec celles de la cosmologie inflationnaire plus conventionnelle (voir mon cours de 2008-2009). Sans doute les spécificités les plus significatives de cette nouvelle cosmologie sont l'absence de perturbations tensorielles (ondes gravitationnelles) à grande longueur d'onde et la possibilité d'amplifier les perturbations électromagnétiques au point d'expliquer, avec un peu de chance, l'origine des champs magnétiques du cosmos.

Dans le quinzième cours, « Peut-on tester la théorie des cordes ? », nous avons essayé de répondre à une critique souvent soulevée à la théorie des cordes : est-elle vraiment une théorie physique ou de la pure métaphysique ? En d'autres mots, est-elle susceptible d'être vérifiée, voir falsifiée ? D'un coté, les prédictions cosmologiques montrent bien que l'existence des cordes peut laisser des traces dans l'Univers primordial, qui restent imprimées dans la structure de l'Univers à grande échelle que nous observons aujourd'hui. D'autre part, un parallèle avec l'ancienne théorie des cordes montre en effet que des énergies à l'échelle de la corde ne sont pas vraiment nécessaires pour tester la théorie.

ACTIVITÉ DE RECHERCHE

Comme pour les années précédentes, mes recherches ont porté sur les trois sujets de l'intitulé de la chaire. Voici un aperçu de cette activité, par secteur de recherche.

Particules élémentaires

Le programme, déjà amorcé avec le Pr Jacek Wosiek (université de Cracovie, Pologne) et le doctorant M. Daniele Dorigoni (ENS, Pise), dont j'ai la cotutelle, consistant à généraliser les modèles de mécanique quantique matricielle au cas d'une théorie de champs supersymétrique à deux dimensions spatio-temporelles, a commencé à porter ses fruits. Nous avons pu formuler ce modèle dans le contexte de la jauge et la quantification du cône de lumière. Le modèle ainsi construit se prête bien à une discrétisation et donc à une étude à la fois numérique et analytique. Pour l'instant, nous avons étudié le modèle dans une approximation « coulombienne » qui produit des spectres très intéressants avec des fonctions d'onde en accord avec une interprétation en termes d'une corde reliant les quanta élémentaires. Nous avons publié un premier article dans le journal JHEP (voir liste).

Ensuite, M. Dorigoni et moi-même, avec le Pr Adi Armoni (université de Swansea, Pays de Galles), avons poursuivi ce programme de recherche dans une direction un peu différente. En utilisant les idées à la Eguchi-Kawai (réduction dimensionnelle dans la limite des grands N), nous avons calculé la tension de la « k -corde » en trois dimensions en utilisant des techniques typiquement bidimensionnelles. Nous avons ainsi obtenu une dépendance de k de la tension en accord avec des précédentes conjectures. L'article est déjà paru dans la revue JHEP.

Gravitation

En collaboration avec les professeurs G. D'Apollonio (université de Cagliari), Paolo Di Vecchia (Niels Bohr Institute, Copenhague et Nordita, Stockholm) et Rodolfo Russo (Queen Mary College, Londres), nous avons étendu l'étude théorique des collisions entre cordes à énergies transplanckiennes aux collisions entre une corde à masse nulle et une collection de « p -branes ». Ce dernier problème s'est avéré plus simple que le précédent. Nous avons ainsi trouvé un bon nombre de résultats tels que la génération d'un espace-temps non banale avec les phénomènes associés de déviation géodésique et d'excitations de marée. Un premier article sur ces résultats a été publié dans le journal JHEP.

En collaboration avec le mathématicien Ph. Le Floch (Paris VI), nous avons entamé une étude systématique des collisions entre deux ondes de choc ultra-relativistes à symétrie plane en relativité générale. D'un côté, nous espérons comprendre la structure globale de l'espace-temps produit dans la collision et, de l'autre, nous aimerions utiliser des arguments de domaine de dépendance pour étendre les résultats au cas des collisions avec front d'onde fini. Nous avons déjà commencé la rédaction d'un premier article sur le sujet.

Cosmologie

Avec le Pr M. Gasperini (université de Bari), le docteur G. Marozzi (mon ATER au Collège depuis septembre 2010) et mon doctorant Fabien Nugier, nous avons poursuivi la recherche d'une formulation invariante de jauge de la contre-réaction cosmologique, c'est-à-dire de l'influence des inhomogénéités sur les moyennes à grande échelle des différentes quantités physiques.

Partant de la formulation de moyennes invariantes de jauge proposée précédemment, nous avons reformulé de façon invariante de jauge les équations qui décrivent la contre-réaction pour des moyennes définies sur des hypersurfaces de type cônes de lumière (voir liste des publications).

Nous avons ensuite entamé une collaboration à cinq (les quatre susmentionnés et le Dr. Ido ben Dayan, actuellement à Toronto), où nous proposons des applications concrètes de ce formalisme à la relation entre distance de luminosité et décalage vers le rouge en présence des inhomogénéités. Nous espérons terminer bientôt un article sur le sujet.

PUBLICATIONS

Veneziano G., D'Apollonio G., Di Vecchia P. et Russo R., « High energy string-brane collisions: leading eikonal and beyond », *JHEP*, 1011:100, 2010.

Veneziano G., Gasperini M., Marozzi G. et Nugier F., « Light-cone averaging in cosmology: formalism and applications », *JCAP*, 1107:008, 2011.

Veneziano G., « Two unforgettable years with Héctor », compte-rendu du Héctor Rubinstein Memorial Symposium, Stockholm, SISSA Medialab, 2011.

Veneziano G., Dorigoni D. et Wosiek J. « Dimensionally reduced SYM₄ at large-N: an intriguing Coulomb approximation », *JHEP*, 1106: 051, 2011.

Veneziano G., Armoni A. et Dorigoni D., « k-string tension from Eguchi-Kawai reduction », arxiv *JHEP*, 1108:6196, soumis pour publication.

CONFÉRENCES

Conférences sur invitation

– « Two unforgettable years with Héctor », *Héctor Rubinstein memorial Symposium*, Stockholm, août 2010.

– « Strings, quantum mechanics, and the emergence of curved spacetime », Rome, septembre 2010.

- « Strings, quantum mechanics and the emergence of classical and quantum field theories » Utrecht, octobre. 2010.
- « Transplanckian scattering of particles, strings, and branes », UCLA, novembre 2010.
- « Transplanckian scattering of particles, strings, and branes », Stanford University, décembre 2010.
- « Transplanckian scattering of particles, strings, and branes », FRIF retrait, Duran, janvier 2011.
- « A string-inspired alternative to standard inflation », École doctorale, IAP, Paris, mars 2011.
- « Space, time, matter : 90 years after », Université de Santiago de Compostela, avril 2011.
- « La Théorie des Cordes est-elle une vraie Science ? », dans la collection : *Vérité, fiction, connaissance*, Marseille, avril 2011.
- « Large-N expansions and equivalences », GGI workshop, Florence, mai 2011.

Organisation de conférences et d'ateliers

- Membre du comité d'organisation de la conférence *Dark Energy* qui s'est tenue à Stanford (États-Unis) en décembre 2010.
- Membre du comité d'organisation de la conférence *Three generations* qui s'est tenue au IHES (Bures-sur-Yvette) en mai 2011.
- Depuis 2005, la chaire fait partie, avec le LPT-ENS, les LPNHE et LPTHE de Paris 6, et l'APC, de la Fédération « Interactions fondamentales » et contribue à l'organisation et au financement de ses activités.
- Participation au programme *Large-N gauge theories*, GGI, Florence, avril-mai 2011.

AUTRES ACTIVITÉS

Participation à des comités

- Comité d'évaluation de l'école de doctorat Galileo Galilei de l'université de Pise.
- Chaire de l'*Advisory Committee* de l'Institut Galileo Galilei (GGI) à Arcetri (Florence). En novembre 2010, le comité s'est réuni pour sélectionner les propositions d'atelier pour l'année 2012. Trois propositions ont été sélectionnées.
- Membre du conseil scientifique de l'IHES, Bures-sur-Yvette.
- Membre du Conseil Scientifique de « Nordita », Stockholm, Suède.

Groupes de travail

Depuis fin 2006, je fais partie d'un comité de l'Académie des sciences, intitulé « Science et métrologie », qui est censé faire des propositions sur des possibles nouveaux étalons en métrologie.