

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

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

1. Enseignement lié à la chaire

Le cours de l'année 2008-2009 a eu lieu pour deux tiers au Collège et pour un tiers à l'Institute for Advanced Studies à Jérusalem. La partie donnée au Collège s'est déroulée en huit heures de cours proprement dit et en quatre heures de séminaires donnés par deux professeurs invités. La partie donnée en Israël a consisté en trois heures de cours et trois séminaires donnés par moi-même.

1.1. « Gravitation et cosmologie : le modèle standard » (cours au Collège)

Dans les cours des années 2004-2005, 2005-2006 et 2007-2008, nous avons traité le modèle standard des particules élémentaires décrivant les interactions dites fortes et électrofaibles. Dans le cours 2008-2009 nous avons traité la quatrième et dernière interaction connue à ce jour, la gravitation. Après une introduction à la théorie actuelle des interactions gravitationnelles, la relativité générale d'Einstein, nous avons discuté, pendant la deuxième partie du cours, des applications cosmologiques de cette théorie.

Chaque cours et séminaire, présenté avec l'aide d'un fichier « Keynote », a été imprimé et distribué avant chaque cours, et ensuite inséré sur les sites internet de la chaire en français et en anglais.

Au **premier cours**, « *Introduction, programme, rappel* », nous avons donné un résumé du programme du cours de cette année ainsi qu'un rappel de la gravitation newtonienne et de la relativité restreinte dont la relativité générale représente la synthèse.

Au **deuxième cours**, « *Du principe d'équivalence à la covariance générale* », nous avons introduit l'idée de base de la relativité générale d'Einstein, le principe d'équivalence. Nous avons ensuite démontré comment ce principe s'exprime, en

termes mathématiques, comme un principe de covariance des équations par rapport à des transformations générales des coordonnées.

Pour ce faire, nous avons introduit, au **troisième cours**, « *Les outils mathématiques de base en relativité générale* », le formalisme mathématique (calcul tensoriel) nécessaire pour formuler des équations général covariantes. Nous avons introduit aussi les concepts très importants de dérivée covariante et de tenseur de courbure, tout en soulignant l'analogie avec ces mêmes concepts dans les théories de jauge.

Au **quatrième cours**, « *Équations d'Einstein : premières conséquences* », nous avons d'abord dérivé les équations d'Einstein en partant du principe d'action et en imposant que l'action elle-même soit invariante par rapport aux transformations générales des coordonnées et qu'elle contienne au maximum deux dérivées (en analogie avec le cas des théories de jauge du modèle standard). On obtient ainsi directement les équations d'Einstein avec, en général, un terme supplémentaire, la fameuse constante cosmologique. Nous avons ensuite appliqué cette théorie pour déterminer la géométrie induite par un corps de masse M (la métrique de Schwarzschild) et pour étudier le mouvement d'un corps d'épreuve dans cette géométrie. Nous avons ainsi obtenu la formule d'Einstein pour la déflexion de la lumière et celle de la précession du périhélie de mercure dans le champ gravitationnel du soleil, c.-à-d. les premières vérifications historiques de la relativité générale.

Une discussion approfondie des tests modernes de cette théorie a été présentée dans les séminaires du Professeur T. Damour (voir dessous).

Les quatre cours suivantes ont porté sur les applications cosmologiques de la relativité générale.

Au **cinquième cours**, « *Les équations cosmologiques d'Einstein* », après avoir discuté le principe cosmologique d'un univers homogène et isotrope, nous avons introduit le concept d'univers plat, ouvert et fermé, la notion de « facteur d'échelle » et sa relation avec le décalage vers le rouge. Ensuite, nous avons étudié le tenseur énergie impulsion, son « équation d'état » et nous avons écrit les équations d'Einstein dans le cas cosmologique. Pour conclure, nous avons rappelé la « bourde d'Einstein » c'est-à-dire son introduction, en 1917, de la constante cosmologique afin de trouver une solution décrivant un univers statique... avant que Hubble ne découvre l'expansion.

Au **sixième cours**, « *Dynamique de l'expansion* » nous avons entamé l'étude détaillée des solutions des équations cosmologiques pour différents types de matière et de courbure spatiale. On a trouvé la relation entre le facteur de décalage $(1+z)$ et la luminosité apparente d'une source de lumière et, ainsi, on a pu discuter l'évidence actuelle pour une expansion accélérée de l'univers, ce qui semblerait ressusciter l'idée d'Einstein d'une constante cosmologique positive.

Au **septième cours**, « *Succès et énigmes de la cosmologie conventionnelle* » nous avons d'abord passé en revue les succès de la cosmologie standard du big bang

chaud, telles que la prédiction du fond cosmique de radiation, et de la synthèse des éléments légers dans l'univers primordial. Ensuite nous avons illustré les énigmes liés à cette cosmologie : la nécessité d'introduire de nouvelles formes de matière et d'énergie (matière et énergie noires), le mystère de l'asymétrie entre matière et antimatière et, finalement, l'existence d'une « singularité » initiale.

Au **huitième cours**, « *Le paradigme inflationnaire* » nous avons continué d'abord la liste des « puzzles » de la cosmologie traditionnelle, notamment le problème de l'homogénéité et de la « platitude » et nous avons montré comment une période d'expansion accélérée très tôt dans l'histoire de l'univers et capable à la fois de résoudre ces problèmes et, en même temps, de fournir un mécanisme tout à fait remarquable pour générer ses structures à grandes échelles (galaxies, amas). Ce paradigme inflationnaire a été illustré dans le modèle le plus simple, celui basé sur un champ scalaire qui descend lentement la pente d'un potentiel (« slow-roll inflation »).

1.2. Les séminaires liés au cours au Collège

Les cours de la chaire ont été complétés par deux séminaires spécialisés donnés par le professeur **Thibault Damour** de l'Institut des hautes études scientifiques (IHES) de Bures-sur-Yvette et deux autres par le professeur **Jean-Philippe Uzan** de l'Institut d'astrophysique (IAP) de Paris.

Les séminaires de T. Damour ont porté sur les tests expérimentaux de la relativité générale. On a distingué les tests sur les couplages gravitationnels de la matière et ceux sur la dynamique du champ gravitationnel lui-même. Dans la première catégorie les tests les plus précis sont liés à l'universalité de la chute libre où des précisions de 10^{-13} sont déjà atteignables et pourraient être améliorés prochainement jusqu'à 10^{-15} , voir 10^{-18} (expériences MICROSCOPE, STEP).

Par contre, les tests de l'auto couplage du champ gravitationnel sont beaucoup moins précis. Pour des champs faibles et quasi statiques la précision typique est de 10^{-5} , tandis que pour des champs forts avec émission d'ondes gravitationnelles (par exemple dans les systèmes binaires compacts) elle n'est que de 10^{-3} . Le professeur Damour a montré comment, avec tous ces tests de précision, on peut mettre des bornes assez strictes sur les paramètres qui caractérisent les possibles déviations de la théorie d'Einstein.

Les deux séminaires de J.-P. Uzan, donnés à la fin du cours, ont porté sur les perturbations en cosmologie (plus précisément en cosmologie inflationnaire) et sur la formation des structures à grande échelle dans l'univers. En effet, comme on avait mentionné dans le huitième cours, l'un des phénomènes les plus intéressants de cette cosmologie est la possibilité de générer les structures à grande échelle à partir de fluctuations quantiques. Celles-ci existent aux échelles microscopiques dans l'univers primordial et sont amplifiées et étirées à des échelles macroscopiques (et même astrophysiques) d'abord par l'inflation et, ensuite, par l'expansion

ordinaire (décélérée) de l'univers. J.-P. Uzan a illustré la façon de traduire ces concepts en véritables équations et, ensuite, de trouver les approximations nécessaires pour les résoudre. Il a aussi donné une comparaison entre théorie et résultats expérimentaux sur les anisotropies dans la radiation de fond et dans les structures à grandes échelles.

1.3. Les cours de la chaire en dehors du Collège

Un tiers de mes cours a eu lieu en Israël, principalement à l'Institute for Advanced Studies (IAS) à Jérusalem. Le sujet principal a été l'étude des collisions entre cordes au delà de l'échelle de Planck. Il s'agissait de résumer vingt ans de travaux sur cette « expérience de la pensée » dont le but est de voir de quelle façon la théorie des cordes réconcilie la relativité d'Einstein avec la mécanique quantique.

Trois heures de cours, avec une heure supplémentaire de séminaire/discussion, ont eu lieu à l'IAS avec la participation des physiciens de l'Université de Tel Aviv, de l'Institute Weizmann (Rehovot) et de l'Université de Beer-Shev'a.

Un cinquième séminaire a eu lieu à Névé Shalom, un village israélo-arabe où les théoriciens des différentes universités israéliennes se retrouvent chaque semaine. Le séminaire a porté sur les bornes qu'on peut établir sur la constante de Newton à partir de la physique des trous noirs quantiques.

Un sixième séminaire, donné à l'Université de Tel Aviv, a passé en revue l'« équivalence planaire » de différentes théories de jauge, l'un des sujets de ma recherche depuis quelques années.

2. Enseignement non lié à la chaire

En septembre 2009 j'ai donné un cours de quatre heures à l'école de doctorat de Parme, en Italie. Trois cours portaient sur le même sujet que celui de mon cours à Jérusalem, les collisions entre cordes aux énergies « transplanckiennes ». Le sujet du quatrième cours concernait mes idées personnelles à l'aube du démarrage du nouvel accélérateur du CERN, le LHC. Malheureusement, le LHC devait tomber en panne la semaine suivante...

3. Activité de recherche

Comme les années précédentes ma recherche a porté sur les trois sujets de l'intitulé de la chaire. Voici un aperçu de cette activité, par secteur de recherche, suivi d'une liste des publications scientifiques.

3.1. Particules élémentaires

Le programme, déjà amorcé avec le professeur Jacek Wosiek (université de Cracovie, Pologne), de généraliser les modèles de mécanique quantique matricielle au cas d'une théorie de champs supersymétrique à deux dimensions spatio-

temporelles, est devenu plus prometteur que jamais. En effet, nous avons de fortes indications, analytiques ainsi que numériques, que dans la limite de grands N (les dimensions des matrices) on puisse relier cette théorie à deux dimensions à la théorie actuelle des interactions fortes (la QCD) en quatre dimensions spatio-temporelles en utilisant une vieille idée de Eguchi et Kawai. Avec l'aide d'un jeune et brillant doctorant de Pise, Daniele Dorigoni, nous avons fait des progrès importants dans cette voie et nous avons planifié la poursuite de cette activité en 2009-2010.

3.2. *Gravitation*

L'étude théorique des collisions entre particules légères à énergies transplanckiennes, suivant l'approche proposée en 2007 par Daniele Amati (université de Trieste), Marcello Ciafaloni (université de Florence) et moi-même, a été poursuivie.

Une des questions les plus intéressantes est l'évaluation de la fraction d'énergie émise sous la forme d'ondes gravitationnelles dans ces collisions. Nous avons appris, avec surprise, que la réponse à cette question n'est pas connue, même au niveau classique. Ce projet devrait bientôt arriver à son but.

Profitant de la présence du professeur Demetrios Christodoulou (invité sur chaire d'État) au Collège de France, nous avons essayé de mieux comprendre ensemble le problème classique de la collision de deux ondes de choc sans masse (et donc ultra relativistes), en particulier celui de la formation des trous noirs et de l'existence d'une singularité à l'intérieur de ces objets. Nous avons déjà obtenu quelques résultats solides.

En collaboration avec les professeurs Gia Dvali (CERN et Munich) et Ram Brustein (université Ben Gurion, Israël) nous avons publié un argument général en faveur d'une borne quantique sur la constante de Newton qui confirme les résultats déjà obtenus, il y a quelques années, par Dvali et, indépendamment, par moi-même, dans le contexte de certains modèles très simples.

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 s'est soudainement transformée en expansion sans qu'aucune quantité physique ne dépasse les bornes dictées par les dimensions finies des cordes (« cosmologie à rebondissement »).

Avec le professeur Maurizio Gasperini (université de Bari) et un jeune chercheur, le docteur Giovanni Marozzi (université de Bologne et actuellement à l'IAP, Paris), nous avons essayé de vérifier si la contre-réaction à la production cosmologique des particules pourrait induire le rebondissement désiré. Avant d'arriver à des résultats munis d'une interprétation physique non ambiguë nous avons dû affronter

le problème de l'invariance de jauge de cette méthode. Nous avons publié un article où nous proposons une solution spécifique pour ce problème. Plusieurs autres résultats feront l'objet de publications ultérieures.

4. Publications

« *Gauge-invariant averages for the cosmological back-reaction* » (avec M. Gasperini et G. Marozzi), JCAP, 0903:011, 2009.

« *A bound on the effective gravitational coupling from semiclassical black holes* », (avec R. Brustein et G. Dvali), JHEP, 2009.

« *D'où venons-vous ? Une très bonne question pour la cosmologie moderne* », dans « *D'où venons-vous ? Retours sur l'Origine* », Presses universitaire de Rennes, 2009, p. 65.

5. Conférences

5.1. Conférences sur invitation

« *Towards an S-Matrix description of gravitational collapse* », Édimbourg, juillet 2008.

« *40 years of high-energy string collisions* », conférence d'ouverture à « *Strings 2008* », CERN, Genève, août 2008.

« *Transplanckian string collisions : a général introduction* », Atelier sur les Trous noirs, CERN, Genève, septembre 2008.

« *Space, Time and Matter* », Conférence « Heinrich Hertz », DESY, Hambourg, septembre 2008.

« *String theory at the dawn of the LHC era* », Conférence à la mémoire de Philippe Meyer, Paris, octobre 2008.

« *La Teoria delle Stringhe : una fisica rivoluzionaria nata prematuramente?* », « *Leçon Enriques* » Milan, octobre 2008.

« *D'où venons-vous ? Une très bonne question pour la cosmologie moderne* », Forum Le Monde-Le Mans, novembre 2008.

« *Transplanckian string collisions and gravitational collapse* », Trinity College Dublin, avril 2009.

« *Did time have a beginning?* », Conférence à l'occasion du « James-Joyce Award », Université Catholique de Dublin, avril 2009.

« *Ultra-high-energy string collisions : from tidal excitation to gravitational lensing and collapse* », Université Claude Bernard, Lyon, mai 2009.

« *Réunir l'infiniment grand et l'infiniment petit* », Planétarium de Vaulx-en-Velin, mai 2009.

« *Il Tempo : Cos'è, Quanto ne rimane ? Cosa ne faremo ?* », Conférence Grand Public, Fiera del Libro, Turin, mai 2009.

« *Does string theory allow for a smooth Sakharov limit?* », Conférence à l'occasion du « Tomassoni Award » de la « Schola Physica Romana », Rome, juin 2009.

« *Big Bang e String a confronto : il Tempo ha davvero avuto un inizio ?* », Planetario di Roma (pendant la Conférence Strings 2009), juin 2009.

5.2. Organisation de conférences et d'ateliers

J'ai contribué à l'organisation de la grande conférence Marcel Grossmann 12 (MG12), dédiée à la gravitation et à la cosmologie, qui s'est tenue à Paris en juillet 2009.

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.

6. 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 2008, le comité s'est réuni pour sélectionner les propositions d'atelier pour l'année 2010. Trois propositions ont été sélectionnées.
- Depuis janvier 2007 l'Institut de physique nucléaire italien (INFN) m'a chargé de suivre les activités du GGI, pendant son démarrage, avec une présence assez importante pendant chaque atelier. J'ai donc passé au GGI plusieurs semaines en automne 2008 et au printemps 2009. Cette charge a pris fin en juillet 2009 avec un bilan fort satisfaisant.
- Chaire du « *Wolfgang Pauli Committee* », CERN, Genève. J'ai eu ma dernière réunion comme chaire du comité en septembre 2008.
- Membre du comité d'organisation de la conférence « *Marcel Grossmann* », Paris, juillet 2009.
- Membre du comité de l'AERS pour l'évaluation de la politique d'établissement de l'ENS de la rue d'Ulm (Paris). Le comité a terminé ses travaux en juin 2009.

7. Groupes de travail

Le groupe de travail de l'Académie des sciences « *Unités de base et constantes fondamentales* », dont je faisais partie, a présenté ses recommandations finales au Bureau international des poids et mesures en octobre 2006. Depuis fin 2006, je fais partie d'un nouveau comité de l'Académie des sciences, intitulé « Science et métrologie », qui est censé faire des propositions sur des possibles nouveaux étalons en métrologie.

8. Prix, distinctions

Juillet 2008 : James Joyce Award, Literary and Historical Society, University College Dublin, Irlande (consigné officiellement en mai 2009).

Juin 2009 : « Prix Tomassoni » et médaille de la « Schola Physica Romana » de la part de la Fondazione della Sapienza, Rome.