

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

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

1. Enseignement au Collège

1.1. Le cours de l'année 2005-2006 : « Interactions fortes et chromodynamique quantique II : aspects non perturbatifs »

Le cours de l'année 2005-2006 a été la continuation de celui de l'année précédente, le but étant de couvrir, dans l'ensemble, les principaux aspects de la théorie actuelle des interactions fortes (nucléaires), la chromo-dynamique quantique (QCD). La propriété la plus caractéristique de cette théorie est sans doute ce qu'on appelle « liberté asymptotique » (asymptotic freedom), selon laquelle la force « forte » devient en effet faible lorsque l'énergie d'un processus excède l'échelle du GeV (un milliard d'électron-Volts, énergie correspondant, grosso modo, à la masse d'un proton).

La liberté asymptotique permet ainsi l'utilisation de la théorie des perturbations (petites corrections autour de la théorie libre) pour l'évaluation de certains processus dits « durs ». C'était le thème du cours de l'année 2004-2005, tandis que cette année nous avons abordé des problèmes pour lesquels la théorie des perturbations n'est plus suffisante (le confinement des quarks, par exemple).

Le cours (initialement prévu en dix heures et finalement concentré en neuf à cause des manifestations étudiantes) a été conçu à un niveau assez élémentaire du point de vue technique, mais relativement sophistiqué du point de vue conceptuel. Il a été complété par huit séminaires (normalement donnés juste après le cours) qui allaient plus en profondeur dans le sujet du cours, et/ou vers l'application du sujet à des problèmes plus spécifiques.

Chaque cours a été donné avec l'aide d'un fichier « Power Point », imprimé et distribué avant chaque cours, et inséré, peu après, sur le site de la chaire (avec celui du séminaire correspondant).

Les **deux premiers cours** ont eu lieu le même jour (le deuxième comme remplacement d'un séminaire) :

Le cours **1a**, « *QCD perturbative : un rappel* », était un résumé des principales notions discutées l'année précédente, la définition de la théorie, ses propriétés perturbatives, et les méthodes utilisées pour extraire d'elle des prédictions fiables.

Le cours **1b**, *QCD non perturbative : problèmes et outils*, offrait un panorama du programme de cette année, en décrivant à la fois les problèmes non perturbatifs les plus importants et les outils actuellement disponibles pour les résoudre. En particulier, on a annoncé que le reste du cours serait concentré sur trois méthodes d'analyse non perturbative : i) l'utilisation des propriétés de symétrie et leurs différentes réalisations ; ii) l'utilisation de la limite théorique des grandes N ($N = 3$ étant le nombre de « couleurs » dans la vraie QCD) ; iii) la discrétisation de la QCD sur un réseau.

Le **deuxième cours**, « *Symétries et leur brisure* », a porté sur les symétries dites globales dans la limite où l'on néglige la masse des quarks et, ensuite, sur la brisure spontanée de ces symétries et l'apparition de bosons à masse nulle (appelés bosons de Nambu-Goldstone). Enfin, nous avons considéré la brisure explicite de la symétrie, d'abord au niveau classique, par les masses des quarks, et ensuite au niveau quantique, par les anomalies.

Le **troisième cours**, « *Les problèmes $U(1)$, CP et les instantons* », est revenu d'abord sur le théorème de Goldstone et sur comment celui-ci implique, au niveau le plus naïf, l'existence d'un neuvième boson léger, en contradiction flagrante avec l'expérience. C'est le « problème $U(1)$ » de la QCD. D'autre part, toujours au niveau le plus naïf, la QCD satisfait automatiquement la symétrie dite de CP (conjugaison de charge fois parité), symétrie bien vérifiée dans les interactions fortes. Or, des phénomènes non perturbatifs pourraient résoudre le problème $U(1)$, mais seulement au prix d'une possible non-conservation de CP. Nous nous trouvons donc dans une impasse : soit nous avons un problème $U(1)$, soit nous introduisons à nouveau une possible violation de CP dans les interactions fortes. Le verdict de la théorie dépend en effet de ce qu'on appelle la charge topologique de la QCD. Même si elle est zéro en théorie des perturbations, elle pourrait cesser de l'être au niveau non perturbatif, grâce à des configurations topologiquement non banales, appelées les « instantons ».

Pour résoudre la dichotomie présentée ci-dessus, on a introduit dans le **quatrième cours**, « *Jouant avec N_c et N_f* », le concept d'une nouvelle type d'approximation à la QCD qui simplifie considérablement la théorie, tout en gardant la plus grande partie de ses phénomènes non perturbatifs. Cette approximation consiste en une généralisation de la QCD où le groupe de symétrie de jauge, de $SU(3)$ devient $SU(N_c)$, et le nombre de « saveurs » des quarks devient N_f . Ensuite, on étudie la limite où N_c et/ou N_f tend vers l'infini. Comme échauffement, nous avons d'abord étudié cette limite dans des théories plus simples (où les champs sont des vecteurs à N composantes) et ensuite dans les

cas de la QCD, où les champs sont des matrices $N_c \times N_c$ ou $N_c \times N_f$. Finalement, nous avons discuté comment les limites de grands N sélectionnent certaines topologies de diagrammes et déterminent la dépendance en $1/N$ de plusieurs quantités.

Le **cinquième cours**, « *Solution du problème U(1) et action efficace à grande N* », avait pour but de mettre ensemble les résultats des deux cours précédents pour montrer comment la QCD peut résoudre le problème U(1) dans la limite de grands N_c . Dans ce but, on a utilisé les techniques des lagrangiens efficaces, d'abord en général et, ensuite, dans le contexte du développement $1/N$. Nous avons ainsi obtenu le spectre de masse et les paramètres de mélange de bosons pseudoscalaires en QCD en termes d'un seul paramètre inconnu, la susceptibilité topologique de la théorie de Yang-Mills, c'est-à-dire sans quarks. C'est précisément pour le calcul de cette quantité qu'on a besoin des techniques non perturbatives discutées dans la suite du cours.

Le **sixième cours**, « *Théories de jauge sur le réseau : une introduction* » a débuté par l'introduction du concept de discrétisation d'un système continu, en particulier d'une théorie de jauge. Cette discrétisation, absolument nécessaire pour des approches numériques, brise forcément certaines symétries de la théorie dans le continuum. Il est souhaitable de ne pas briser la symétrie de jauge, car elle est essentielle pour la cohérence interne de la théorie. Par contre, les invariances par rapport aux translations, rotations et transformations de Lorentz peuvent être brisées sans trop de mal dans l'espoir de les récupérer approximativement dans la limite d'un petit pas du réseau. Nous avons aussi distingué une approche lagrangienne et une hamiltonienne, en soulignant que, dans cette dernière, le temps reste continu. Nous avons ensuite introduit les variables de « link » et celles de « plaquettes », ainsi que l'action de Wilson, les observables invariants de jauge, et le boucle de Wilson.

Dans le **septième cours**, « *Confinement et spectres quenched* », nous avons discuté les deux limites, des constantes de couplage faible et forte, en soulignant comment dans ce dernier le phénomène du confinement des quarks est presque une banalité. Néanmoins, pour démontrer le confinement des quarks dans la QCD il est nécessaire d'aller vers la limite du continuum et de prouver qu'il n'y a pas une transition de phase de déconfinement. Cette limite a été discutée attentivement, car elle correspond à aller d'une façon très spécifique vers une toute petite constante de couplage, tout en restant dans un régime non perturbatif. Pour conclure, nous avons présenté l'évidence numérique actuelle en faveur du confinement, ainsi que les résultats numériques concernant les masses de bulles de colle (« glueballs ») et de mésons et baryons dans la limite où l'on néglige les boucles des quarks (limite « quenched » de la QCD).

Le **huitième cours**, « *Fermions chiraux et température finie* », a porté sur l'un des problèmes théoriques les plus intéressants en théorie de jauge sur le réseau, celui de fermions chiraux. Nous avons évoqué ainsi le problème de la « multiplication » de ces fermions comme conséquence du théorème de Nielsen et

Ninomiya. Ensuite, nous avons illustré la façon d'esquiver ce théorème, en suivant une vieille idée de Ginsparg et Wilson, qui introduit une symétrie exacte même en dehors de la limite du continuum.

Le dernier sujet que nous avons traité concerne l'extension de la technique du réseau au cas de la QCD à température finie, un sujet de grand intérêt, car on pense que, au-delà d'une certaine température critique, le confinement des quarks (et des gluons) est remplacé par une phase dite de plasma (par analogie avec le plasma électromagnétique) où les charges de couleur sont « libérées ». Cette phase aurait existé quand l'univers était très chaud, et des expériences d'accélérateur sont en train d'essayer de reproduire ces conditions en laboratoire dans des collisions d'ions lourds.

1.2. Les séminaires liés au cours

Les deux séminaires du professeur **Ken Konishi** (Université de Pise, Italie), « *Anomalie de ABJ* » et « *Davantage sur les instantons* », ont très bien complété le contenu des cours 1b et 2. Le premier a approfondi l'origine des anomalies comme résultat d'un clash entre régularisation d'une théorie quantique (pour éliminer ses infinis) et la préservation de ses symétries classiques. Comme on ne peut pas préserver toutes les symétries, on est obligé de choisir le moindre des maux et donc de briser les symétries moins essentielles, ou même gênantes. C'est le cas de la symétrie $U_A(1)$ en QCD. Néanmoins, pour briser d'une façon efficace cette symétrie, il faut beaucoup plus que l'anomalie de $U_A(1)$: il est nécessaire d'invoquer des configurations topologiquement non banales de champs de jauge, par exemple les instantons. Le deuxième séminaire était donc dédié à une discussion approfondie de ces quasi-particules qui sont concentrées non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps (d'où leur nom).

Les deux séminaires du professeur **Paolo Di Vecchia** (Nordita, Copenhague), « *Modèles à grande N en $D = 2$* » et « *Davantage sur l'action efficace de QCD* », ont élaboré le contenu des troisième et quatrième cours. Dans le premier séminaire, les idées liées à la limite de grands N ont été appliqués à des modèles en deux dimensions (un espace et un temps) qui sont beaucoup plus faciles à résoudre que la QCD. Ces modèles, et en particulier le modèle CP^N , ont de fortes analogies avec la QCD en quatre dimensions et montrent explicitement les phénomènes qu'on s'attend à voir réalisés dans cette dernière.

Dans le deuxième séminaire, l'analyse du lagrangien efficace de la QCD à grande N donnée dans le cours a été approfondie, en particulier en ce qui concerne la possible brisure de l'invariance CP dans les interactions fortes. Le résultat montre que, une fois le problème $U(1)$ résolu, le problème CP devient inévitable, dans le sens qu'on doit fixer un paramètre, qui *a priori* est d'ordre 1, à une valeur d'ordre 10^{-9} afin d'éviter une contradiction avec les bornes expérimentales sur le moment dipolaire électrique du neutron. Une solution élégante à ce problème (qui nécessite tout de même une extension de la QCD), celle de

l'axion de Peccei-Quinn, a été illustrée dans le langage d'une simple modification de l'action efficace de la QCD.

Les deux séminaires du professeur **Eliezer Rabinovici** (Université hébraïque de Jérusalem), « *Phases des théories de jauge sur réseau* » et « *Mécanismes de confinement* », ont porté sur les possibles phases d'une théorie de jauge sur le réseau en fonction de la constante de couplage et du pas du réseau. Plusieurs exemples ont illustré ce type de phénomènes dans des cas plus simples que la QCD.

Dans le deuxième séminaire, différents critères et mécanismes de confinement ont été présentés, en particulier, l'analogie entre le phénomène du confinement et celui de la supraconductivité. Cette analogie est valable une fois que les rôles du champ électrique en supraconductivité et du champ (chromo)magnétique en QCD sont échangés : de la même façon que le champ magnétique reste confiné dans un supraconducteur (effet Meissner), les charges (chromo)électriques restent confinés si le vide de QCD se comporte comme un supraconducteur magnétique.

Les deux derniers séminaires, donnés par le Dr. **Leonardo Giusti** (CERN, Genève), « *QCD sur le réseau avec fermion de Ginsparg-Wilson* », ont porté sur l'un des obstacles majeurs sur le réseau : celui d'inclure d'une façon satisfaisante les champs de quarks et leurs effets dynamiques. Dans le premier exposé, il a rappelé le problème de la prolifération des fermions dans le réseau et comment l'introduction d'un terme supplémentaire (terme de Wilson) évite ce problème au prix de l'introduction d'une brisure explicite de la symétrie chirale. Néanmoins, avec un « réglage fin » des paramètres de la théorie, on est capable de récupérer cette symétrie et de déterminer le spectre de masse des hadrons, d'abord dans l'approximation dite « quenched » et, avec des capacités de calcul plus poussées, même avec des quarks dynamiques.

Dans le deuxième séminaire, il a introduit d'abord les fermions de Ginsparg-Wilson, montrant explicitement la façon dont ils arrivent à éluder le théorème de Nielsen-Ninomiya. Ensuite, il a présenté une première utilisation à travers l'évidence numérique pour une susceptibilité topologique proche de celle nécessaire pour la solution du problème U(1). Pour terminer, et comme deuxième application des fermions de Ginsparg-Wilson, on a discuté leur application au très ancien problème de l'explication de la règle empirique $\Delta = 1/2$ dans la désintégration des mésons K.

1.3. Cours de professeurs invités sur chaire d'État

Pendant le mois de mai 2006, deux professeurs invités sur chaire d'État ont donné des cours spécialisés :

Le professeur **Gregory Vilkovisky** (de l'Institut Lebedev à Moscou) a donné quatre cours sur le thème : « *Expectation values and vacuum currents of quantum fields* » dans lesquels il a présenté une approche très générale au problème d'estimation des valeurs moyennes des observables dans les théories quantiques des champs.

En même temps, il a aussi illustré la façon d'écrire l'action efficace d'une théorie de jauge la plus générale possible en termes de certain « facteurs de forme » qui caractérisent chaque théorie.

Le professeur **Adam Schwimmer** (de l'Institut Weizmann à Rehovot, Israël) a tenu quatre cours sur : « *Anomalies and Holography* » dans lesquels il a montré qu'on retrouve les très connues anomalies d'origine *quantique* en théories de jauge (dans les corrélations du tenseur énergie-impulsion) en faisant des calculs *classiques* dans une théorie « duale » gravitationnelle. Le sujet est naturellement lié à la désormais célèbre conjecture de Maldacena sur la correspondance AdS/CFT.

En plus, le professeur **Roberto Pettorino** (de l'Université de Naples, et ancien collaborateur de M. Vilkovisky et de moi-même) a été présent et a participé aux discussions.

En effet, il s'est avéré très utile d'avoir programmé les deux cours en même temps car cela a donné lieu à beaucoup de discussions entre les professeurs susnommés et moi-même sur l'extension de la correspondance AdS/CFT à toute l'action efficace des théories de jauge et non pas seulement pour les termes qui représentent les anomalies.

2. Enseignement en dehors du Collège

Août 2005 : « *Dreams of a finite theory* ». Conférence sur la théorie des cordes pour les étudiants d'été au CERN : son but était d'expliquer en quoi consiste la théorie des cordes et pourquoi les théoriciens des particules sont tellement intéressés à cette théorie.

Octobre 2005 : « *Gravitazione e cosmologia : da Einstein alle superstringhe* ». Conférence pour les Doctorants de l'Université de Milan Bicocca dans le cycle : « Histoire des découvertes scientifiques du XX^e siècle ».

3. Activité de recherche

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

Voici un aperçu de cette activité de recherche, suivi d'une liste des publications scientifiques correspondantes.

3.1. Particules élémentaires

L'étude de la chromodynamique quantique dans une nouvelle variante de la limite d'un grand nombre N de « couleurs » a été poursuivie en collaboration avec le Dr. Adi Armoni et le professeur Graham Shore de l'Université de Swansea

au Royaume-Uni (Pays de Galles). Nous avons ainsi proposé une extension de l'« équivalence planaire » (obtenue précédemment par A. Armoni, M. Shifman et moi-même entre la QCD avec un seul type de quarks et une théorie supersymétrique) au cas réaliste de la QCD avec trois quarks légers. Notre prédiction sur le condensé des quarks dans cette théorie s'est avéré être en bon accord avec des déterminations plus phénoménologiques.

Pour vérifier cette « équivalence planaire » dans un contexte plus simple, le Professeur Jacek Wosiek (Université de Cracovie, Pologne) et moi-même avons considéré des modèles de mécanique quantique matricielle supersymétrique. L'un de ces modèles s'est avéré très riche, d'un côté pour ses propriétés liées à la supersymétrie et, de l'autre, pour ses applications à des problèmes combinatoires (développés en collaboration avec le professeur Enrico Onofri, de l'Université de Parme) et de mécanique statistique. Dans ces deux derniers développements, des discussions avec mes collègues mathématiciens, en particulier avec Don Zagier, ont été d'une grande utilité.

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. Ce projet de recherche, poursuivi en collaboration avec le Professeur Jnanadeva Maharana (Université de Bhubanesvar, Inde) et Naoto Yokoi (Laboratoire Riken au Japon) n'a pas encore abouti, pour l'instant, à des publications.

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, soudain, se transforme en expansion sans qu'aucune quantité physique ne dépasse les bornes dictées par les dimensions finies des cordes (« cosmologie à rebondissement »).

L'un des problèmes théoriques de ces modèles est de décrire la phase de rebondissement. Avec plusieurs collègues, nous avons commencé à étudier un scénario où la production quantique de cordes lourdes pendant la phase de contraction pourrait amener à une description satisfaisante de cette phase. Cette étude est encore en cours.

4. Publications

1. « *Cosmology (including neutrino mass limits)* », Comptes rendus de la Conférence HEP05, Lisbonne, juillet 2005.

2. « *Quark condensate in massless QCD from Planar Equivalence* » (avec A. Armoni et G. M. Shore), Nucl. Phys. B740 (2006) 23.
3. « *Planar quantum mechanics : an intriguing supersymmetric example* » (avec J. Wosiek), JHEP 0601 (2006) 156.
4. « *Large N, supersymmetry ... and QCD* » (avec J. Wosiek), dans « *Sense of beauty in physics : a volume in honour of Adriano Di Giacomo* », éditeurs M. D'Elia, K. Konishi, E. Meggiolaro et P. Rossi (Ed. PLUS, Pisa University Press, 2006), hep-th/0603045.
5. « *Supersymmetry and combinatorics* » (avec E. Onofri and J. Wosiek), math-ph/0603082.
6. « *A supersymmetric matrix model : II. Exploring higher-fermion-number sectors* » (avec J. Wosiek), JHEP 10 (2006) 033.
7. « *An unexpected use of the AGK rules in black-hole physics* », dans le livre « *Gribov Memorial Volume : Quarks, Hadrons, and Strong Interactions* », dédié au 75^e anniversaire de la naissance de V.N. Gribov (World Scientific Publishing Company, Singapour, 2006) p. 496.

5. Conférences

5.1. Conférences sur invitation

1. « *Cosmology (including neutrino masses)* », conférence plénière à la « International Conference on High Energy Physics », Lisbonne, juillet 2005.
2. « *Strings, black holes, and quantum coherence in transplanckian collisions* » conférence donnée à l'occasion de « *100 Years of Relativity* », São Paulo, Brasil, août 2005 (donnée aussi à Rio de Janeiro).
3. « *La teoria delle stringhe : sta per avverarsi il sogno di Einstein ?* », colloque lors de l'inauguration de la salle « Sergio Fubini », Université de Turin, octobre 2005.
4. « *La teoria delle stringhe come possibile realizzazione del sogno di Einstein* », conférence grand public à Gênes (Festival della Scienza), octobre 2005.
5. « *A unitary S-matrix for transplanckian string collisions* », conférence donnée à l'Université de Princeton (Alexandre Polyakov's fest), novembre 2005.
6. « *Does string theory challenge the beginning-of-time myth ?* », colloque donné à Bielefeld, novembre 2005.
7. Participation à la conférence Solvay et à la Table Ronde Grand Public, Brussels, décembre 2005.
8. « *Cosmology : a particle theorist's viewpoint* », colloque donné à Desy, Hamburg, décembre 2005.

9. « *Large N, Supersymmetry ... and QCD* », donné dans le cadre de la conférence « Sense of Beauty in Physics » (Adriano Di Giacomo's fest), Pise, janvier 2006.

10. « *Super-combinatorics ?* », colloque donné à l'Institut Henri Poincaré, mars 2006.

11. « *Supersymmetry and combinatorics : an intriguing connection* », séminaire donné dans le cadre du colloque pour les 60 ans de Michael Green, Cambridge (Royaume-Uni), avril 2006.

12. « *D'où venons-nous ? Où allons-nous ? Les grands défis cosmologiques du XXI^e siècle* », conférence Grand Publique à l'occasion de l'inauguration de l'APC, Paris, mai 2006.

13. « *A hidden SUSY face of QCD ?* », colloque donné à l'École Polytechnique, mai 2006.

14. « *Strings, black holes, and the information paradox* », colloque donné à Trieste et à Padoue, mai 2006 et au Max-Planck Institut, Munich, juin 2006.

15. « *L'Energia oscura dell'Universo : errore di Einstein, grande sfida per le teorie attuali* », conférence interdisciplinaire, Padoue, mai 2006.

16. « *The myth of time zero* », colloque donné à l'Accademia dei Lincei, Rome, sur le thème : « *The origins : how, when and where it all started* », mai 2006.

17. « *Susy matrix models, combinatorics and statistical mechanics : a large-N connection* », colloque de physique théorique, CERN, juin 2006.

18. « *String theory and Einstein's unification dream* », colloque donné à Bern (remise de la médaille Albert Einstein), juin 2006.

19. « *Is string theory fulfilling Einstein's dream ?* », colloque donné à l'Institut Paul Scherrer, Villigen, Suisse, juillet 2006.

5.2. Organisation de conférences et d'ateliers

1. *Galileo Galilei Institute Inaugural Conference*, Florence, septembre 2005.

2. *Cosmic and fundamental strings*, Institut Henri Poincaré, Paris, septembre 2005, dans le cadre de la « Fédération de Recherche Interactions Fondamentales ».

3. *Atelier EDEN* (European Dark-Energy Network), Paris 6, octobre 2005, dans le cadre de la « Fédération de Recherche Interactions Fondamentales ».

4. *Heavy quarks*, Paris 6, février 2006, dans le cadre de la « Fédération de Recherche Interactions Fondamentales ».

6. Participation dans des Comités

1. Comité d'évaluation interne de l'INFN (Institut National de la Physique Nucléaire, Italie).

2. Comité d'évaluation de la « Scuola Normale Superiore », Pise, Italie.

3. Chaire de l'« Advisory Committee » de l'Institut Galileo Galilei (GGI) à Arcetri (Florence). Vers la fin de 2004 l'Institut *Galileo Galilei* a été établi à Arcetri (près de Florence). Je dirige son Comité scientifique de suivi. Ce dernier a organisé la conférence inaugurale du 19 au 21 septembre 2005 et a sélectionné les deux programmes pour 2006. Le premier s'est déroulé au cours du printemps, le deuxième aura lieu pendant l'automne.

7. Groupes de travail

Académie des Sciences : groupe de travail sur « *Unités de base et constantes fondamentales* ».

Ce groupe de travail, après avoir recommandé une nouvelle définition du kilogramme qui équivaut à donner une valeur nominale à la constante de Planck, a poursuivi ses discussions sur l'adoption d'un nouveau système d'unités électriques et magnétiques afin d'utiliser la haute précision atteignable sur l'effet Hall quantique et l'effet Josephson. Une recommandation devrait être présentée au Bureau international des Poids et Mesures vers octobre ou novembre 2006.

8. Prix, distinctions

Septembre 2005 : Prix « **Enrico Fermi** » de la Société italienne de physique.

Juin 2006 : Médaille « **Albert Einstein** » de la « Albert Einstein Gesellschaft » (Berne).