

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 2007-2008 : « Le modèle standard et ses extensions »

Après la parenthèse 2006-2007 (cours donné entièrement à l'étranger), le cours de l'année 2007-2008 a repris le chemin initié en 2004-2005 et 2005-2006 afin de compléter la présentation du modèle standard des particules élémentaires. Les deux cours précédents ayant porté sur les interactions fortes (dans leurs aspects perturbatives et non perturbatives respectivement), ce dernier cours se concentra sur le secteur dit électrofaible du Modèle Standard (MS).

Le cours s'est déroulé en 18 heures, dont 11 de cours proprement dit et 7 heures de séminaires, donné en partie par le professeur Riccardo Barbieri de l'École Normale (Scuola Normale) de Pise et en partie par le professeur Ferruccio Feruglio de l'Université de Padoue.

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

Le **premier cours**, « *Théories de jauge : un rappel* », fut un résumé des principales notions (déjà discutée en 2004-2005) qui sont à la base des théories de jauge. Nous sommes revenu, en particulier, sur l'importante distinction entre le cas de fermions dans une représentation réelle du groupe de jauge (les cas de la QED et QCD) et celui d'une représentation complexe (fermions « chiraux »), le cas d'intérêt pour les interactions faibles.

Le **deuxième cours**, « *QED et QCD : un rappel* », fut, à son tour, un résumé des concepts de base de la QED (comme théorie des interactions électromagnétiques) et de la QCD (comme théorie des interactions fortes) qui avaient été couverts dans les cours 2004-2005 et 2005-2006.

Le **troisième cours**, « *Interactions faibles : du modèle de Fermi à une théorie de jauge* », a retracé, dans ses grandes lignes, le développement de la théorie des interactions faibles, à partir de sa première formulation par Enrico Fermi en 1934. On a rappelé comment, à travers les différentes découvertes expérimentales, l'idée est née qu'une théorie de jauge puisse décrire, d'une façon unifiée, les interactions électromagnétiques et faibles en utilisant le groupe de jauge $SU(2) \times U(1)$. Ensuite, nous avons discuté des représentations auxquelles les fermions doivent appartenir et, en même temps, nous avons souligné la nécessité d'un mécanisme de brisure de la symétrie de jauge sans quoi tous les fermions resteraient sans masse.

Dans le **quatrième cours**, « *Brisure spontanée de symétries* », après avoir souligné l'importante distinction entre la brisure de symétries globales et locales, nous avons discuté des principales caractéristiques et conséquences de chacune et, en particulier pour cette dernière, le fameux mécanisme de Higgs dans le cas le plus simple du groupe $U(1)$. Nous avons aussi souligné que ce mécanisme, au moins dans sa forme la plus simple, nécessite l'introduction d'un champ scalaire à côté des champs de jauge et des champs de fermions.

Dans le **cinquième cours**, « *Boson de Higgs et Lagrangien pour une seule famille* », nous avons utilisé les éléments déjà introduits pour définir le modèle standard des interactions électrofaibles dans les cas d'une seule famille (ou génération) de quarks et de leptons. Nous avons aussi observé que le neutrino reste sans masse, malgré la brisure de la symétrie, au moins d'introduire un nouveau type de neutrino qui est neutre par rapport à toutes les interactions de jauge.

Le **sixième cours**, « *Prédictions au niveau arbre pour une famille* », nous avons tiré les conséquences expérimentales du modèle présenté au cours précédent dans l'approximation dite à « arbre », c'est-à-dire sans tenir compte des corrections radiatives. L'accord est qualitativement bon, mais quantitativement pas encore parfait.

Dans le **septième cours**, « *Plusieurs familles : mécanisme de GIM et matrice CKM* », nous avons discuté de la généralisation du modèle précédant au cas, apparemment choisi par la Nature, où il y a trois familles de quarks et de leptons. Même si conceptuellement la généralisation est simple, ses conséquences phénoménologiques sont très importantes. Pourtant, le MS avec trois générations évite d'une façon très naturelle l'apparition de courants neutres avec changement de saveur (FCNC) et, en même temps, est capable d'introduire les mélanges observés dans les courants chargés aussi qu'une phase qui détermine la violation de la symétrie CP.

Le **huitième cours**, « *Autres conséquences du Modèle Standard* », a porté sur d'autres conséquences du modèle standard en particulier dans la physique des mésons K neutres et (en préparation des séminaires spécialisés du professeur Feruglio, voir ci-dessous) en ce qui concerne les masses et les oscillations des neutrinos. Nous avons terminée avec un exemple de calculs des corrections radiatives, celui qui concerne le soi-disant paramètre ρ .

Après une première série de séminaires par les professeurs Riccardo Barbieri et Ferruccio Feruglio (voir ci-dessous), le **neuvième cours**, « *Secteur de Higgs : questions de réglage fin* » a entamé une critique bien connue du MS comme ayant besoin d'une quantité importante de « réglage fin » afin de maintenir la masse du boson de Higgs suffisamment basse. C'était, en même temps, une introduction à certains modèles qui vont au-delà du MS, le sujet des deux derniers cours et séminaires.

Ainsi, le **dixième cours**, « *Supersymétrie et le MSSM* », a introduit le concept de supersymétrie, d'abord comme construction théorique et après comme une possible résolution du problème de réglage fin discuté dans le neuvième cours. Néanmoins, la supersymétrie n'élimine pas complètement ce problème. En même temps elle permet à priori certains processus qui ne sont pas observés. Donc la supériorité du modèle supersymétrique par rapport au modèle standard n'est pas de tout évidente. Le nouvel accélérateur de particules du CERN, le LHC, nous dira sans doute si la supersymétrie existe bien aux énergies qui seront atteignables.

Dans le **onzième cours**, « *Théories de Grand Unification* », nous avons présenté des modèles, dits de Grand Unification (GUT), où les trois interactions non gravitationnelles découleraient d'une théorie de jauge basée sur un groupe de jauge techniquement dit « simple » et donc avec des relations entre les différents constants de couplage et les différentes masses des particules. Les exemples des groupes SU(5) et O(10), avec leurs avantages relatifs, ont été discutés.

1.2. Les séminaires liés au cours

Après les premières 8 heures de cours, le professeur Riccardo Barbieri (Scuola Normale Superiore, Pise, Italie) a donné deux séminaires intitulés « La physique de la saveur dans le MS » et « Violation de la symétrie CP dans le MS ». Le premier été centré sur la phénoménologie de la matrice CKM, les tests d'unitarité, les mélanges et oscillations des mésons K neutres, aussi que sur les bornes relatives aux processus de FCNC (tels que $\mu \rightarrow e \gamma$). Dans le deuxième séminaire, le professeur Barbieri a illustré les phénomènes de violation de la symétrie CP (toujours dans le système des K neutres) et leur calcul dans le modèle standard.

Ces séminaires ont été suivis par deux autres donnés par le professeur Ferruccio Feruglio (Université de Padoue, Italie), qui a développé la physique des neutrinos dans le MS sous les titres « *Masses, mélanges et oscillations des neutrinos : les données expérimentales* » et « *Masses, mélanges et oscillations des neutrinos : la théorie* ». Il a donné ainsi un cadre très complet de la situation actuelle à la fois expérimentale et théorique dans ce nouveau domaine très excitant de la physique des particules.

Ensuite, le professeur Barbieri est encore intervenue à trois reprises.

Premièrement, dans « *Le tests de précision du MS* », il a fait le point sur les tests de précision du MS à travers des expériences de physique atomique et surtout avec les données de l'accélérateur LEP du CERN. Il a souligné qu'un accord entre la

théorie et les données expérimentales a besoin de corrections radiatives et que cet accord est tout à fait remarquable si le boson de Higgs est assez léger pour être produit aux énergies du LHC.

Ensuite le séminaire « *Modèles sans le boson de Higgs* », porta sur des modèles où le mécanisme de Higgs est induit par autre chose qu'un champ scalaire. Dans ce cas de figure, il n'y aurait pas une véritable particule de Higgs. Un exemple de ce genre c'est la théorie dite du « techni-couleur ». Même si cette classe de théorie est esthétiquement attrayante, son accord avec les tests de précision est loin d'être évident.

Dans son dernier séminaire, « *Où la nouvelle physique peut-elle se cacher ?* », le professeur Barbieri a donné un panorama très complet des expériences qui pourraient dénicher de la physique qui va au-delà de celle du MS soit en utilisant de très hautes énergies (comme au LHC) soit par des mesures à basse énergie mais d'une très grande précision.

2. Enseignement en dehors du Collège

Mai 2008 : « 40 anni di teoria delle stringhe : passato, presente e futuro ». Conférence sur la théorie des cordes pour les étudiants des lycées à Florence: son but était d'expliquer en quoi consiste la théorie des cordes, comment elle s'est développée depuis sa découverte, et pourquoi les théoriciens de particules y sont tellement intéressés aujourd'hui. Une conférence portant le même titre, mais réadaptée, a été donnée, peu après, au « Collegio di Milano » (un Collège qui réunit un nombre sélectionné d'étudiants universitaires de la métropole milanaise de toutes disciplines), suivie d'un débat.

3. Activité de recherche

Elle a porté sur les trois sujets de l'intitulé de la chaire en particulier sur les questions liées à la gravitation classique et quantique dans le cadre de la théorie des cordes. Depuis 2005, la chaire fait aussi partie de la Fédération « Interactions Fondamentales » avec le LPT-ENS, les LPNHE et LPTHE de Paris 6, et le 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

Avec le professeur Jacek Wosiek (Université de Cracovie, Pologne) nous avons essayé de généraliser les modèles de mécanique quantique matricielle déjà étudiés au cas d'une théorie de champs supersymétrique en deux dimensions spatio-temporelles. En dépit d'un progrès indiscutable, nous sommes toujours confrontés à des problèmes de divergences infrarouges qui nous empêchent, pour l'instant, d'arriver à des conclusions fermes.

3.2. Gravitation

L'étude théorique des collisions entre particules légères à énergies trans-planckiennes, a été poursuivie dans le but de mieux comprendre le problème de l'information en physique quantique des trous noirs.

Cette dernière année, avec les professeurs Daniele Amati (Université de Trieste) et Marcello Ciafaloni (Université de Florence), un progrès considérable sur ce problème a été accompli. Utilisant des méthodes à la fois analytiques et numériques, nous avons résolu les équations de mouvement qui découlent d'une action efficace en deux dimensions de l'espace que nous avons proposé il y a une quinzaine d'années. Cette ligne de recherche a été poursuivie en collaboration avec le professeur Jacek Wosiek. Les résultats, obtenus dans un contexte complètement quantique, s'accordent très bien avec les estimations classiques et pourraient indiquer la façon avec laquelle l'information est récupérée dans un processus quantique de collision de particules ou de cordes.

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 remplacé 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 »).

Récemment, avec le professeur Maurizio Gasperini (Université de Bari) et un jeune chercheur, le docteur Giovanni Marozzi (Université de Bologne), nous avons essayé de vérifier si la contre-réaction à la production cosmologique de particules pourrait induire le rebondissement désiré. Nous avons fait des progrès considérables, mais, pour l'instant, rien est sorti en forme de publication sur ce sujet.

4. Publications

1. « *Towards and S-Matrix description of gravitational collapse* » (avec D. Amati et M. Ciafaloni), JHEP02 (2008) 049.
2. « *Exploring an S-Matrix for gravitational collapse* » (avec J. Wosiek), JHEP09 (2008) 023.
3. « *Exploring an S-Matrix for gravitational collapse II : a momentum space analysis* » (avec J. Wosiek), JHEP09 (2008) 024.
4. « *Non-local field theory suggested by Dual Models* » dans « *String theory and fundamental interactions* » (éditeurs : M. Gasperini et J. Maharana), Springer (2008), p. 29. Il s'agit de la publication d'un manuscrit, écrit en 1973, que je n'avais jamais terminé. Il est maintenant publié dans sa forme originale dans un livre avec les contributions d'un nombre de mes collaborateurs en l'occasion de mes 65 ans.

5. Conférences

5.1. Conférences sur invitation

1. « *Planar equivalence : an update* », atelier sur « *Non-perturbative gauge theories* » Édimbourg, août 2007.
2. « *La théorie des cordes est-elle morte ?* », Émission de Radio France (France Culture), Paris, septembre 2007.
3. « *Farewell talk : A sample of yet unfinished projects* », CERN, Genève, septembre 2007.
4. « *Did Time have a beginning ?* », symposium « *The two cultures : shared problems* », Venise, octobre 2007.
5. « *Transplanckian Superstring Collisions I* », UCLA, novembre 2007.
6. « *Transplanckian Superstring Collisions II* », UCLA, décembre 2007.
7. « *String Theory : Is Einstein's dream being realized ?* », Université des Hawaïi, décembre 2007.
8. « *Transplanckian scattering, black holes, and the information paradox* », Université de Californie à Irvine, décembre 2007.
9. « *Towards an S-matrix for gravitational collapse* », UCSB/KITP, Santa Barbara, décembre 2007.
10. « *Diverse prospettive di sviluppo della teoria quantistica della gravitazione* », Conférence « *Spazio, tempo e materia : l'ultima parola è ancora quella di Einstein ?* », Université de Padoue, janvier 2008.
11. « *Towards an S-matrix for gravitational collapse* », séminaire joint des théoriciens, IHP, Paris, avril 2008.
12. « *Le Modèle standard de l'Univers : Succès et énigmes* », Colloque Université Pierre et Marie Curie, avril 2008.
13. « *L'unité de la physique et la cosmologie* », Conférence grand public, série « *Cultures d'Europe* », Bruxelles, avril 2008.
14. « *Towards an S-matrix description of gravitational collapse* », Universidad Autonoma Madrid, avril 2008.
15. « *Towards an S-matrix description of gravitational collapse* », Università di Roma, La Sapienza, mai 2008.
16. « *40 anni di teoria delle stringhe : passato presente e futuro* », conférence pour étudiants des Lycées, Sesto Fiorentino, mai 2008.
17. « *Il modello standard dell'Universo : successi ed enigmi* », Colloque à l'Université de Bologne, mai 2008.
18. « *40 anni di teoria delle stringhe : passato presente e futuro* », conférence pour les étudiants du « *Collegio di Milano* », mai 2008.
19. « *Planar equivalence : an update* », conférence « *Non perturbative gauge theories* » GGI, Florence, juin 2008.
20. « *Le grand Collisionneur d'hadrons (LHC) du CERN et ses enjeux* », mardi de l'Administrateur, Collège de France, juin 2008.
21. « *Towards an S-matrix description of gravitational collapse* », (à l'occasion de la chaire Blaise Pascal du Professeur Michail Shifman), Orsay, juin 2008.
22. « *Recent progress in transplanckian scattering* », conférence pour le 50^e anniversaire de l'IHES, Bures-sur-Yvette, juin 2008.

5.2. 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 :

- « *Black holes, black rings and modular forms* », ENS, Paris, août 2007.
- « *Gravitational scattering, black holes, and the information paradox* », IHP, Paris, 26-28 mai 2008.

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 2007, le comité s'est réuni pour sélectionner les propositions d'atelier pour l'année 2009. Trois 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 automne 2007 et au printemps 2008 et je planifie d'y retourner pendant l'automne 2008.
- Chaire du « *Wolfgang Pauli Committee* », CERN, Genève.
- Membre du Comité d'organisation de la Conférence « *Marcel Grossmann* », Paris, juillet 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, je fais partie d'un nouveau comité de l'Académie des sciences, nommé « *Science et métrologie* », qui, poursuivant le même but, a commencé ses travaux à l'automne 2007.

8. Prix, distinctions

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