

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

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

1. Enseignement au Collège

1.1. La leçon inaugurale (17 février 2005)

Elle a porté sur l'un des plus grands défis de la physique théorique d'aujourd'hui, celui d'unifier notre compréhension de l'infiniment grand (l'Univers entier) et de l'infiniment petit (la physique des particules élémentaires).

La théorie de la relativité générale d'Einstein est notre outil privilégié pour décrire la gravitation ainsi que l'évolution de l'Univers, tandis que le « Modèle Standard » donne une description très détaillée des particules élémentaires et de leurs interactions selon les lois de la mécanique quantique et de la relativité restreinte.

Malheureusement, les principes de la relativité générale et ceux de la mécanique quantique ne sont pas compatibles, ce qui nous empêche d'affronter plusieurs énigmes de nature cosmologique, en particulier celles qui concernent l'Univers primordial.

Or, depuis les années 60, on connaît un bon candidat pour unifier ces deux piliers de la physique du siècle dernier : la théorie des cordes. Ses propriétés, souvent surprenantes, donnent beaucoup d'espoir pour qu'on puisse résoudre, à moyen terme, les problèmes fondamentaux qui existent en physique des particules, en gravitation quantique et, surtout, en cosmologie.

1.2. Le cours de l'année 2004-2005 : Interactions fortes et chromodynamique quantique I : aspects perturbatifs

Les cours des années 2004-2005 et 2005-2006 vont couvrir ensemble la théorie actuelle des interactions fortes (nucléaires), la chromodynamique quantique. Une des propriétés les plus caractéristiques de cette théorie est la soi-disant « Liberté

Asymptotique » (« Asymptotic Freedom ») selon laquelle la force « forte » devient en effet faible lorsque l'énergie du processus que l'on considère excède l'échelle du GeV (un milliard d'électrons-Volt, énergie correspondante, *grosso modo*, à la masse d'un proton). L'importance de cette propriété de la chromodynamique quantique a été soulignée par le Prix Nobel de physique 2004 (attribué à D. Gross, D. Politzer et F. Wilczek).

La « liberté asymptotique » permet 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 cette année, qui repousse à l'année prochaine les problèmes pour lesquels la théorie des perturbations n'est pas suffisante (le confinement des quarks, par exemple).

Le cours, en huit leçons, a été conçu à un niveau assez élémentaire du point de vue technique, mais relativement sophistiqué du point de vue conceptuel. Il a été suivi du même nombre de séminaires (normalement donnés juste après le cours) qui allaient soit plus en profondeur dans le sujet du cours, soit vers l'application 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 le cours, sur le site de la chaire du Collège (avec celui du séminaire correspondant).

Dans le **premier cours**, *Interactions fondamentales et théories de jauge : une introduction*, on a d'abord résumé certains concepts de base en relativité restreinte et en mécanique quantique, les deux ingrédients essentiels de notre description actuelle des particules élémentaires et de leurs interactions. Ensuite, on a traité les représentations du groupe de Poincaré à la fois en termes d'état d'une seule particule (vecteurs d'état de la mécanique quantique) et en termes de champs.

Une attention particulière a été donnée à la distinction entre particules (champs) avec et sans masse et aux fermions à deux composants, dits fermions de « Weyl ». On a ensuite souligné la nécessité de l'« invariance de jauge » pour donner une description covariante-de-Lorentz des particules sans masse et moment cinétique $J = 1$. Finalement, les exemples de l'électrodynamique quantique (QED) et de la chromodynamique quantique (QCD) ont été introduits et comparés au niveau de leurs Lagrangiens classiques.

Dans le **deuxième cours**, *Groupe de renormalisation, triviale infrarouge, liberté asymptotique*, les similarités classiques entre la QED et la QCD ont été contrastées avec leur très différents comportements au niveau quantique, c'est-à-dire après inclusion des corrections radiatives. D'abord ces effets quantiques ont été décrits d'une façon simplifiée mais pourtant suffisante pour comprendre le comportement de la constante de couplage efficace dans les deux théories en fonction de l'énergie du processus. Ensuite, un argument plus rigoureux a été présenté en utilisant les techniques du groupe de renormalisation.

Dans le **troisième cours**, *Classification des processus « durs » en PQCD (chromodynamique quantique perturbative)*, on a abordé la question cruciale des limitations au pouvoir prédictif de la QCD dans le domaine des très hautes énergies, où sa constante de couplage est aussi petite qu'on veut. On a montré que les limitations découlent de la présence, d'une façon générale, de « divergences infrarouges et collinéaires ». Cette constatation permet de classifier les processus durs selon trois cas : avec des singularités infrarouges *et* collinéaires, seulement avec des singularités collinéaires, ou sans aucune de ces singularités. Les trois cas correspondent à différents degrés d'applicabilité de la théorie des perturbations.

Le cours a continué avec une discussion détaillée de la réaction prototypique de la première de ces catégories, l'annihilation électron-positron en hadrons, ou certaines quantités suffisamment « inclusives » sont complètement libres de singularités. Une discussion assez subtile et approfondie a porté ensuite sur le paradoxe suivant : pourquoi le fait que le processus $e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons}$ soit calculable avec précision en termes de $e^+ e^- \rightarrow \text{quarks}$ n'implique-il pas que des quarks soient réellement produits dans ces réactions ?

Dans le **quatrième cours**, *Théorèmes de factorisation et modèle à partons en PQCD*, on a considéré, toujours à l'intérieur de la physique des collisions électron-positron, des quantités moins inclusives, comme la distribution d'une seule particule, en montrant que, dans ce cas, la QCD perturbative est incapable de donner des prédictions absolues. Par contre, elle permet de calculer l'évolution de ces quantités en fonction de l'énergie de la réaction, en resommant les divergences collinéaires qui les caractérisent. On obtient ainsi une équation d'évolution pour le spectre d'une seule particule du type DGLAP (Dokshitzer, Gribov, Lipatov, Altarelli, Parisi). En appliquant la même procédure au processus dit DIS (diffusion lepton-hadron profondément inélastique), on établit le lien avec les travaux originaux pour lesquels le prix Nobel 2004 a été attribué, ainsi qu'avec l'équation DGLAP originale.

Dans le **cinquième cours**, *OPE et la « diffusion profondément inélastique » en PQCD*, on a comparé la méthode des divergences collinéaires du cours précédent à celle plus classique basée sur l'OPE (développement de produit d'opérateurs à petites distances, « Operator Product Expansion » en anglais) et sur les équations du groupe de renormalisation. L'équivalence des deux formulations a été montrée ainsi que les avantages relatifs de l'une et de l'autre. En particulier, l'OPE fournit une ré-interprétation des certains résultats comme étant liés à la valeur moyenne de certains opérateurs dans l'état d'un nucléon.

Cette observation générale a été illustrée dans le cas particulièrement intéressant et controversé du DIS polarisé auquel on a récemment associé, avec un abus de langage, la fameuse « crise du spin du proton ».

Le **sixième et septième cours**, *Petit-x dans l'état initial et Petit-x dans l'état final*, se sont concentrés sur un des sujets de recherches les plus actuels dans la

QCD perturbative, celui de petit x , c'est-à-dire de la description des processus qui impliquent des quarks et des gluons « mous » (x étant justement la fraction de l'énergie totale associée à ces quanta). Cette catégorie de problèmes offre des difficultés théoriques considérables car elle entraîne à la fois les divergences collinéaires et infrarouges.

On a pu montrer, néanmoins, que la situation est bien maîtrisée dans le cas de petit x de partons (quarks ou gluons) dans l'état final (le cas, par exemple, de la multiplicité de l'état final produit dans un « jet »). En revanche, le problème est encore loin d'être résolu dans le cas du DIS à petit x . La connexion avec la théorie de Regge pour les réactions à grande énergie et petit transfert d'impulsion, aussi bien que l'approche BFKL, ont été traitées dans un certain détail.

Dans le **huitième cours**, *Symétries et Anomalies*, on a essayé d'établir un pont avec le sujet du cours 2005-2006. Le concept très général des symétries dans les théories quantiques relativistes a été abordé, bien que la question de leur brisure explicite ou « spontanée », classique ou quantique (c'est-à-dire la possibilité d'avoir des « anomalies »). On a touché au théorème de Goldstone, aux problèmes $U(1)$ et CP , sujets qu'on reprendra et approfondira l'année prochaine.

1.3. Les séminaires liés au cours

Le séminaire « *Precision tests of QED and determination of fundamental constants* », donné par le **Prof. Andrzej Czarnecki** (University of Alberta, Edmonton, Canada), a porté sur l'électrodynamique quantique (QED). Son but était de présenter un cas particulièrement frappant d'un accord spectaculaire entre des calculs théoriques très poussés et des données expérimentales d'une énorme précision. Cet accord est à la base de notre confiance actuelle dans l'utilisation de la théorie quantique des champs dans l'étude des particules élémentaires et de leurs interactions. Malheureusement, un tel standard de précision est actuellement hors de question dans le cadre des interactions fortes et de la QCD.

Les deux séminaires du **Prof. Yuri Dokshitzer** (CNRS, LPTHE Paris 6) : « *Hard processes, singularities and probabilistic partonic behaviour* » et « *Hadronic jets in e^+e^- collisions and QCD radiophysics* », ont très bien complété le contenu du deuxième et du troisième cours. Ils sont allés plus en détail dans l'origine de la liberté asymptotique et dans la nature des singularités collinéaires en montrant que, même si les effets d'interférence quantique ne sont pas négligeables, leur conséquence est simplement celle de réduire la région disponible dans l'espace de phases sans pourtant invalider l'interprétation probabiliste.

Les deux séminaires du **Dr. Gavin Salam** (CNRS, LPTHE Paris 6), « *Parton distribution functions* » et « *Small- x physics* » ont abordé plusieurs détails qui n'étaient pas couverts dans le quatrième, le cinquième et le sixième cours sur la diffusion fortement inélastique (DIS). Ils ont aussi présenté une comparaison détaillée des prédictions théoriques avec les données expérimentales ainsi qu'une

discussion physique du phénomène de « saturation » aux petits x lorsqu'une densité critique des partons est atteinte.

Le premier séminaire du **Dr. Matteo Cacciari** (LPTHE, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6), « *Heavy quarks* », a traité un sujet laissé complètement en dehors du cours, la physique des quarks lourds (c'est-à-dire du « charm », « bottom » et « top »), pourtant très importante en connexion avec les interactions électrofaibles. Dans son deuxième séminaire « *Numerical methods in PQCD* », le Dr. Cacciari a présenté un résumé des différentes méthodes numériques utilisées en QCD, à la fois sur un réseau (lattice QCD) et dans le continu. Ces dernières sont particulièrement importantes dans les problèmes de l'évolution et « hadronisation » des jets qui avait été discutés dans les troisième et septième cours.

Le dernier séminaire « *Twistors and gauge theory* » du **Prof. David Kosower** (SPhT-CEA, Saclay) a porté sur un sujet d'intérêt tout récent, l'utilisation des techniques des « twistors » pour arriver à des algorithmes très efficaces dans les théories de jauge. Il s'agit d'un domaine de recherche théorique en forte croissance, car il pourrait permettre d'effectuer certains calculs qui sont hors de la portée d'une approche traditionnelle basée sur la technique des diagrammes de Feynman.

2. Enseignement en dehors du Collège

Août 2004 : « *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.

Août 2004 : « *A new large- N expansion in QCD* ». Conférence à l'école d'été de Benasque (Espagne) : le but ici était d'expliquer aux étudiants d'une école d'été les idées générales d'une série de travaux (écrits en collaboration avec A. Armoni and M. Shifman) sur une nouvelle limite de la chromodynamique quantique dans lequel elle acquiert certaines propriétés propres aux théories supersymétriques (voir le chapitre 3.1. pour plus de détails).

Septembre 2004 : « *The hidden SUSY face of QCD* ». Il s'agit de deux cours données à l'école de physique subnucléaire d'Erice (Sicile) sur le même sujet que celui traité à l'école de Benasque mais d'une façon plus élémentaire et détaillée.

Juin 2005 : « *String theory : is Einstein's dream finally being realized ?* » Conférence organisée par les étudiants de l'EPFL (Lausanne, Suisse) pour connaître les directions actuellement les plus intéressantes de la recherche dans les différents secteurs de la science moderne.

3. Activité de recherche

Elle a porté sur l'ensemble des trois sujets de l'intitulé de la chaire et s'est déroulée pour sa plus grande partie au CERN avec l'aide de plusieurs collaborateurs. Depuis début 2005, la chaire fait aussi partie de la nouvelle 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

En collaboration avec le Prof. G.C. Rossi (Université de Rome II) nous avons traité la question d'un possible mélange de spin isotopique dans des états de multiquarks (un sujet que nous avons déjà considéré ensemble il y a presque 30 ans). Cette même idée a été réexaminée dans le contexte de certains nouveaux résultats expérimentaux en faveur de l'existence d'états à 5 quarks. La conclusion était que ces effets devraient être typiquement assez importants pour donner des signatures expérimentales très caractéristiques et nouvelles.

L'étude de la chromodynamique quantique dans une nouvelle variante de la limite d'un grand nombre N des « couleurs » a été poursuivie en collaboration avec le Dr. Adi Armoni et le Prof. Michail Shifman. En particulier, la preuve de l'équivalence asymptotique entre une extrapolation à grand N de la QCD et une théorie supersymétrique a été considérablement affinée. Cette équivalence est importante car la théorie supersymétrique se prête bien mieux à des méthodes analytiques.

Ces nouveaux résultats ont été rassemblés (avec d'autres obtenus précédemment) dans un long article qui fait partie d'un volume particulier dédié à la mémoire du physicien Ian Kogan prématurément disparu (voir liste des publications ci-dessous).

3.2. Gravitation

Certains résultats, concernant l'étude théorique de collisions entre particules légères à énergies transplanckiennes, ont été re-analysés dans le contexte de l'intérêt nouveau de la communauté dans le problème de l'information en physique de trous noirs.

On a réussi à exprimer ces anciens résultats dans une forme qui démontre explicitement la propriété dite d'unitarité et donc la préservation de l'information. En même temps, l'étude du spectre des particules dans l'état final montre des caractéristiques qui ressemblent à celles qu'on attend de la formation et désintégration (à la Hawking) de trous noirs même avant que l'énergie de la collision soit suffisante pour les produire.

Mis à part leur intérêt théorique, ces résultats pourront avoir aussi un intérêt pour les futures expériences à l'accélérateur LHC au CERN dans le contexte de certains modèles où la vraie échelle de Planck serait accessible aux énergies de ce nouvel accélérateur.

3.3. Cosmologie

La théorie des cordes suggère des nouveaux scénarios cosmologiques où la « singularité » du big-bang (c'est-à-dire l'instant où plusieurs quantités physiques deviendraient 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 »).

Plusieurs scénarios de ce type ont été proposés comme alternatives à la cosmologie dite de l'inflation, elle-même une modification de la cosmologie standard du big-bang caractérisée par une époque d'expansion exponentielle qui prend place très tôt après le big-bang.

Afin de comparer ces deux scénarios, on doit calculer le spectre des inhomogénéités qui en découle et le comparer avec les données expérimentales sur la structure à grande échelle de l'univers actuel. Ces calculs sont bien établis pour le scénario inflationniste standard, mais ils sont beaucoup plus controversés pour les cosmologies alternatives de type « pré big-bang ».

Dans deux papiers écrits avec un jeune collaborateur nous avons essayé de résoudre ces controverses dans une large classe de cosmologies à rebondissement.

4. Publications

1. *Isospin mixing of narrow pentaquark states* (avec G.C. Rossi), Phys. Lett. B597 (2004) 338.

2. *From Super-Yang-Mills theory to QCD : planar equivalence and its implications*, (avec A. Armoni and M. Shifman), Ian Kogan Memorial Collection « *From fields to strings : circumnavigating theoretical physics* », World Scientific Publishing Company, 2004.

3. *String-theoretic unitary S-matrix at the threshold of black-hole production*, JHEP 0411 (2004) 001.

4. *Les nouveaux défis de la cosmologie moderne*, Revue de Métaphysique et de Morale, 3 (septembre 2004).

5. *Refining the proof of planar equivalence* (avec A. Armoni and M. Shifman), Phys. Rev. D71 (2005) 045015.

6. *Scalar perturbations in regular two-component bouncing cosmologies* (avec V. Bozza), Phys. Lett. B625 (2005) 177.

7. *Regular two-component bouncing cosmologies and perturbations therein* (avec V. Bozza), JCAP 009 (2005) 006.

8. *Gravitation, relativité, mécanique quantique : la grande synthèse est-elle proche ?* Leçon inaugurale, éditions Collège de France, Fayard, 2005.

5. Conférences

5.1. Conférences sur invitation

1. *La théorie des cordes : une imprévisible histoire*, Journée « Grand Public » de la Conférence internationale « Strings 2004 », Paris, juillet 2004.

2. *Past and Future at CERN/TH*, Conférence à l'occasion du 50^e anniversaire du CERN, Genève, septembre 2004.

3. Participation à la Table Ronde « *The future of physics* », 25^e anniversaire de l'Institut KITP, Santa Barbara, California, octobre 2004.

4. *Le grand cercle : des particules au cosmos*, Université de Genève (dans le cadre du 50^e anniversaire du CERN), octobre 2004.

5. *Fifty years of theoretical physics at CERN*, Conférence Grand Public, Barcelona, novembre 2004.

6. *Le CERN : un exemple que même les États-Unis nous envient*, intervention à la Conférence « *Science et Conscience Européennes* », Collège de France, novembre 2004.

7. *Einstein e l'energia oscura dell'Universo : errore o profezia ?*, Cycle de Conférences Grand Public « Come alla Corte di Federico Secondo », Naples, décembre 2004.

8. *La Teoria delle Stringhe : sta per avverarsi il sogno di Einstein ?* Accademia Nazionale delle Scienze, Rome, mai 2005.

9. *From dual models to string theory : a wonderful adventure with Sergio*, contribution à une journée à la mémoire de Sergio Fubini, CERN, Genève, mai 2005.

10. *String theory as a possible realization of Einstein's dream*, Yuval Ne'eman's fest, Tel Aviv, mai 2005.

11. *Stringhe, buchi neri, e coerenza quantistica*, réunion annuelle des théoriciens italiens, Cortona, mai 2005.

12. *Fifty years of particle theory : a CERN-based retrospective*, 10^e Conférence Claude Itzykson, CEA, Saclay, juin 2005.

5.2. Organisation de conférences et d'ateliers

1. *Cosmologie de Cordes* (en collaboration avec P. Binétruy, APC), Paris, juin 2004.

2. *QCD at cosmic energies*, Erice (Italie), août-septembre 2004.
3. *Sergio Fubini's Memorial day*, CERN, mai 2005.
4. *Galileo Galilei Institute Inaugural Conference*, Arcetri, Florence, septembre 2005.
5. *Cosmic and fundamental strings*, Paris, septembre 2005 (dans le cadre de la Fédération de Recherche « Interactions Fondamentales »).
6. *Atelier EDEN* (European Dark-Energy Network), Paris, décembre 2005 (dans le cadre de la Fédération de Recherche « Interactions Fondamentales »).

6. Participation dans des Comités

1. Comité d'évaluation du département de physique de l'ENS.
2. Comité d'évaluation du groupe LPTH de l'ENS.
3. Comité d'évaluation interne de l'INFN (Institut National de la Physique Nucléaire).
4. Comité d'évaluation de la « Scuola Normale Superiore », Pise.
5. Chaire des « Launching et Advisory Committees » de l'Institut Galileo Galilei (GGI) à Arcetri (Florence). Vers la fin 2004 l'Institut Galileo Galilei a été établi à Arcetri (près de Florence). J'ai été nommé pour diriger d'abord un Comité de Lancement et, une fois le projet approuvé, son Comité Scientifique de Suivi. Ce dernier a organisé la Conférence Inaugurale du 19 au 21 septembre 2005 et a sélectionné les deux programmes qui se dérouleront pendant le printemps et l'automne 2006.

7. Groupes de travail

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

À la suite de plusieurs sessions, le groupe de travail a présenté un rapport de son activité où, notamment, il recommande une nouvelle définition du kilogramme, basée sur la mécanique quantique. Cette nouvelle définition équivaut à donner une valeur nominale à la constante de Planck, comme fut déjà le cas pour la vitesse de la lumière dans le vide après l'adoption d'une nouvelle définition du mètre.

8. Prix, distinctions

Mai 2004 : Prix « **Dannie Heinemann** » de la Société Américaine de Physique.
Septembre 2005 : Prix « **Enrico Fermi** » de la Société Italienne de Physique.