

Particules élémentaires, gravitation et cosmologie

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

ENSEIGNEMENT LIÉ À LA CHAIRE

Le cours de l'année 2009-2010 a eu lieu dans sa totalité au Collège. Il s'est déroulé en quatorze heures de cours proprement dits et en quatre heures de séminaires donnés par le Pr Paolo Di Vecchia (Niels Bohr Institute, Copenhague et Nordita, Stockholm).

Étant donné que les séminaires de cette année contenaient des compléments essentiels au matériel présenté dans les cours, ils sont résumés ci-dessous avec les cours eux-mêmes et dans l'ordre chronologique et logique par rapport à eux.

Cours et séminaires : Théorie des cordes : une introduction

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 discuté la quatrième interaction connue à ce jour, la gravitation, ainsi que ses applications cosmologiques.

Dans le cours de cette année, nous avons entamé la présentation d'une théorie relativement plus récente, et beaucoup plus ambitieuse, la théorie des cordes. Elle est, aujourd'hui, la meilleure candidate pour une description unifiée et quantique de toutes ces quatre interactions ainsi que des particules élémentaires dont toute la matière (visible et noire) serait constituée.

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

Les interactions fortes dans les années soixante

Dans les deux premiers cours, « Les interactions fortes dans les années soixante », après un bref aperçu du cours de l'année, nous avons donné un résumé des

problématiques présentées par les interactions fortes au milieu des années soixante. Nous avons rappelé pourquoi une théorie du même type que l'électrodynamique quantique (QED) apparaît comme totalement inadéquate pour décrire le monde des hadrons avec ses manifestations en termes d'un grand nombre de particules instables. Par contre, une approche du type matrice-S apparaît prometteuse grâce, en particulier, à la théorie du moment cinétique complexe de T. Regge et à son utilisation pour les collisions à haute énergie proposée par G. Chew et S. Mandelstam. Les éléments de base de cette théorie ont été présentés dans un certain détail.

Dualité de DHS

Dans le troisième cours « Dualité de DHS », nous avons parcouru les étapes qui ont amené à la construction de la première amplitude, dite duale, pour les collisions hadroniques. Nous avons rappelé les règles de somme de superconvergence et celles dites à énergie finie (FESR), aussi que la question de leur saturation en termes de résonances et/ou des échanges des pôles de Regge. La question d'ajouter ou non ces deux contributions fut résolue en 1967 dans un célèbre papier de R. Dolen, D. Horn et C. Schmid (DHS) qui montrèrent, à partir des données expérimentales, qu'il existe bien une dualité entre ces deux contributions et que la saturation des règles de somme doit donc se faire en utilisant *soit* les résonances, *soit* les pôles de Regge, mais pas les deux en même temps, à l'encontre de l'intuition fournie par la théorie des champs ordinaires.

La fonction bêta

Quatrième cours : « La fonction bêta ». L'observation de DHS donna lieu, en 1967-68, à un programme de « *bootstrap* » beaucoup plus facile que celui de Chew et qui fut à la base de certains travaux d'un groupe dont faisaient partie M. Ademollo, H. Rubinstein, M. Virasoro et moi-même. Au lieu d'utiliser la dualité dans un processus réalisable expérimentalement, on considère une réaction théoriquement plus simple, le processus $\pi \pi \rightarrow \pi \omega$, qui possède des remarquables propriétés de symétrie. L'étude des FESR pour cette réaction amène à une solution très bonne – mais pas exacte – de celles-ci. Néanmoins, à partir de cette solution approximative, il fut possible de trouver une amplitude de collision en termes de pures résonances qui donna la solution exacte de toutes les contraintes (FESR, symétrie de « *crossing* », comportement à la Regge avec trajectoires linéaires) sous la forme d'une fonction bêta d'Euler. Ce fut le début des modèles à résonances duales (DRM). Cette solution présente d'autres propriétés remarquables comme, par exemple, la décroissance exponentielle de l'amplitude de diffusion à grande énergie et angle de déflexion fixe.

Les modèles à résonances duales

Dans le cinquième cours, « Les modèles à résonances duales », nous avons d'abord discuté la nécessité de généraliser l'amplitude bêta à d'autres processus avec un nombre arbitraire de particules dans les états initiaux et finaux. Seule une telle

généralisation peut permettre de compter les différentes résonances impliquées dans les différents processus et de connaître le véritable spectre de la théorie. Un doute subsiste que, parmi ces états, il pourrait y avoir des « fantômes » c'est-à-dire des particules produites avec une probabilité négative (ce qui aurait rendu le modèle sans intérêt pour la physique).

La généralisation de la fonction bêta ne tarda pas à arriver. Elle peut s'écrire dans des formes différentes comme une intégrale sur plusieurs variables. Chaque forme présente des avantages vis-à-vis des différentes propriétés du modèle. Une d'entre elles, due à Koba et Nielsen, est la plus utile pour résoudre les problèmes de la dégénérescence (le nombre d'états cachés derrière chaque pôle de l'amplitude de diffusion). La formule de Koba-Nielsen peut s'écrire en termes d'un nombre infini d'oscillateurs harmoniques, ce qui permet un comptage assez facile des états. Avec surprise, on trouve que la dégénérescence du niveau $N^{\text{ième}}$ croît comme l'exponentiel de la racine carrée de N et, malheureusement, qu'il y a entre tous ces états des « fantômes ». Avant de jeter le modèle à la poubelle, il reste un espoir : est-il possible qu'une partie de ces états ne soit pas vraiment accessible si l'on part avec un états initial sans fantômes et que l'ensemble des états accessibles ne contienne pas de fantômes ?

Absence des fantômes et dimensions critiques

La réponse à cette question fut le sujet du *premier séminaire* du Pr Paolo Di Vecchia « Absence des fantômes et dimensions critiques ». Partant de la factorisation des amplitudes de diffusion à n particules, on peut montrer (M. Virasoro, 1969) que, pour une valeur particulière du paramètre α_0 de la trajectoire de Regge ($\alpha_0 = 1$), il existe un nombre infini de conditions sur les états physiques au point que l'élimination de tous les fantômes devient tout à fait possible. La construction des états physiques, faite à partir des états dits de DDF (Di Vecchia, Del Giudice, Fubini), amène, avec un « tour de force », à la démonstration de l'absence de fantômes si le nombre de dimensions D de l'espace-temps est au maximum de 26. Précisément pour $D = 26$, les états de DDF couvrent tout l'espace des états physiques. En même temps un calcul de la correction à une boucle (C. Lovelace, 1969) force précisément le choix de $D = 26$.

Naissance de la théorie des cordes

Dans le sixième cours, « Naissance de la théorie des cordes », nous avons d'abord rappelé les différentes indications (trajectoires de Regge rectilignes, diagrammes de dualité, oscillateurs harmoniques, etc.), malheureusement ratées, en faveur d'une interprétation de la dualité et des modèles duaux comme incarnation d'une théorie des cordes. Finalement, en 1970-71, Y. Nambu et T. Goto proposent une action classique pour la corde relativiste en analogie parfaite avec l'action d'un point matériel relativiste. Nous avons discuté en détail les équations, les contraintes et les conditions possibles au bord de ce système dynamique, ainsi que quelques solutions simples de celui-ci, en particulier la solution d'une baguette rigide en

rotation, solution que maximise le rapport entre moment cinétique J et masse au carré M^2 comme l'inverse de la tension classique T de la corde.

Nous sommes passés ensuite à la théorie quantique en soulignant les différences essentielles avec une corde classique et, en particulier, l'existence, dans la première, d'une échelle fondamentale de longueur, l_s , dite longueur de la corde.

Nous avons ensuite procédé à la quantification explicite de la corde dans la jauge du cône de lumière montrant comment on récupère ainsi les valeurs magiques $\alpha_0 = 1$ et $D = 26$ qu'on a déjà vu apparaître de modèles duaux.

Quantification covariante d'une corde relativiste

Le *deuxième séminaire*, « Quantification covariante d'une corde relativiste », a présenté une méthode de quantification plus moderne, sans brisure explicite de l'invariance de Lorentz, basée sur l'action de Polyakov et la méthode de BRST. À la fin d'un long calcul, en imposant que la charge de BRST soit nilpotente, on retrouve, encore une fois, les mêmes contraintes $\alpha_0 = 1$ et $D = 26$.

Généralisations de Neveu-Schwarz et Ramond

Dans le septième cours, « Généralisations de Neveu-Schwarz et Ramond », nous avons d'abord repris, à partir de la fin du cours précédent, le problème du comptage des états physiques de la corde qui nous amène encore (même après avoir écarté les fantômes) à une dégénérescence exponentielle (dans la masse de la corde) et donc au concept d'une température maximale (dite aussi température de Hagedorn). Nous avons aussi repris la discussion des différences essentielles entre cordes classiques et cordes quantiques, et en particulier le fait que ces dernières peuvent être sans masse et, en même temps, avoir une taille et un moment cinétique finis.

Après avoir discuté les défauts de la corde bosonique (en particulier la présence dans le spectre d'un « tachyon », particule de masse imaginaire), nous avons abordé la question très importante de comment inclure dans la théorie des degrés de liberté fermioniques. Pour ce faire, nous avons utilisé dans le cours le formalisme original de Neveu-Schwarz-Ramond, qui a une supersymétrie manifeste sur la surface d'univers de la corde, mais pas dans l'espace-temps cible.

Nous avons ensuite présenté les nouvelles contraintes ainsi que les conditions au bord pour les fermions. Ces dernières introduisent deux types de champs fermioniques : le champ de Neveu-Schwarz (NS) et le champ de Ramond (R). Nous avons ensuite procédé à la quantification de la corde fermionique dans la jauge du cône de lumière en montrant que les bonnes dimensions de l'espace-temps sont réduites de 26 à 10 sans pourtant arriver aux 4 dimensions souhaitées. À ce niveau, la corde fermionique possède encore un tachyon et son spectre n'est pas supersymétrique.

Projection de GSO et supersymétrie dans l'espace cible

Le troisième séminaire, « Projection de GSO et supersymétrie dans l'espace cible », a justement porté sur les problèmes susmentionnés de la corde fermionique dans sa forme la plus simple. En imposant une restriction sur les états physiques (dite projection de GSO, pour Gliozzi-Scherk-Olive), on arrive à construire une théorie sans tachyon, sans fantômes, et avec un spectre exactement supersymétrique. Cette théorie, dite de la supercorde, nécessite encore quand même d'un espace-temps à 10 dimensions. Une reformulation de la théorie, dite de Green et Schwarz, permet d'exhiber d'une façon explicite la supersymétrie dans l'espace cible. On trouve ainsi trois types de théories complètement cohérentes pour $D = 10$: deux théories de cordes fermées (dites de type IIA et IIB), et une théorie avec cordes ouvertes (mais, par cohérence au niveau des boucles, aussi avec des cordes fermées), qu'on appelle de type I. Le spectre des états les plus légers dans ces trois théories a été présenté.

La fin d'un rêve, le début d'un autre

Dans le huitième cours, « La fin d'un rêve, le début d'un autre », nous avons expliqué les raisons pour lesquelles l'ancienne théorie des cordes fut abandonnée au début des années 70 en faveur d'une théorie des champs plus conventionnelle, la chromodynamique quantique (QCD). Mis à part certains problèmes pour lesquels on pouvait imaginer une solution possible, le vrai « tueur » fut la suppression exponentielle d'interactions « dures » (c'est-à-dire avec un grand transfert d'impulsions entre deux cordes), tandis que les plus récents résultats expérimentaux montraient l'existence de structures très concentrées à l'intérieur des hadrons : la QCD, avec ses quarks et gluons comme constituants élémentaires des hadrons, pouvait expliquer facilement ces phénomènes grâce à sa propriété dite « de liberté asymptotique » (voir mes cours 2004-2005 et 2005-2006). Et, enfin, le développement en $1/N$ de la QCD donnait sans difficulté l'organisation topologique des diagrammes d'auaux avec et sans boucles ainsi que la dualité de DHS.

Entre temps, J. Sherk avait montré que, dans la limite de tension T infinie, la théorie des cordes reproduit exactement certaines théories de champs avec particules à masse nulle comme l'électrodynamique quantique ou la gravitation d'Einstein. Cette observation amène J. Sherk et J. Schwarz à proposer, en 1974, que la théorie de cordes, qui avait échoué comme théorie des interactions fortes, devait plutôt être vue comme une extension de (et non pas comme une alternative à) la théorie quantique des champs, y compris une version quantique de la relativité générale. Cette proposition révolutionnaire attira peu l'attention dans la communauté scientifique de l'époque. Il aura fallu attendre une décennie et un résultat inattendu de M. Green et J. Schwarz avant que les théoriciens recommencent à travailler sur les cordes.

Annulation des anomalies à la Green et Schwarz

Le quatrième séminaire « Annulation des anomalies à la Green et Schwarz » porta précisément sur ce travail fondamental de M. Green et J. Schwarz (1984)

démontrant que, grâce à des annulations miraculeuses, la supercorde de type I (donc avec cordes ouvertes et fermées) n'avait pas d'anomalies au niveau des boucles si (et seulement si) le groupe de jauge associé était $SO(32)$. Ce groupe était assez grand pour pouvoir donner une théorie unifiée des interactions de jauge du modèle standard et, également des fermions chiraux en 4 dimensions après compactification des six dimensions supplémentaires. Ce fut le début de la première révolution des cordes.

Résumé des cours et séminaires précédents

Étant donné la quantité d'informations contenues dans les cours et les séminaires précédents, le neuvième cours a été dédié à un résumé du matériel présenté jusque-là.

Boucles en QFT et QST

Dans le dixième cours, « Boucles en QFT et QST », après un rappel de la nécessité, en théorie des champs, d'inclure des diagrammes avec boucles (par ex. dans le formalisme de l'intégrale fonctionnelle de Feynman), nous avons discuté de la façon d'introduire les boucles dans la théorie de cordes. Paradoxalement, l'intégrale fonctionnelle est plus simple pour les cordes que pour les champs car elle devient une intégrale sur des champs en deux dimensions définis sur des surface de Riemann dont le nombre d'Euler (le « genre » de la surface) correspond au nombre de boucles en théorie des champs.

Une condition très importante sur les boucles en théorie de cordes est l'invariance modulaire. Imposer l'invariance modulaire est une autre façon, sans doute plus simple, d'imposer l'annulation des anomalies avec le mécanisme de Green et Schwarz (voir séminaire 4).

Cordes dans un fond non banal et action efficace

Le onzième cours, « Cordes dans un fond non banal et action efficace », avait pour thème la généralisation de la quantification de la corde de l'espace plat à un espace courbe ou, plus généralement, en présence d'autres champs classiques dits « champs de fond ». Un des ces champs, le dilaton, devient la constante de couplage efficace de la théorie (qui détermine l'importance des boucles). Du point de vue classique, la généralisation avec champs de fond non banals est simple, mais la quantification de la corde devient beaucoup plus compliquée. L'absence d'anomalies dans la surface d'univers donne en effet des conditions sur les champs de fond qui ressemblent aux équations d'une théorie des champs dans l'espace-temps.

On arrive ainsi au concept très important d'une action efficace en $D = 10$ qui, d'une part détermine, par ses équations de mouvement, le fonds possibles et, d'autre part, la matrice- S de la corde. Cette action efficace est seulement connue en termes d'un double développement, le premier dans l'énergie (ou plutôt dans

le nombre de dérivées des champs de fond), le deuxième dans la constante de couplage. Ce dernier correspond à la théorie des perturbations en théorie des champs tandis que le premier n'a pas d'équivalent.

Symétries conventionnelles ou non dans l'espace cible

Dans le douzième cours, « Symétries conventionnelles ou non dans l'espace cible », nous avons abordé la question des symétries en théorie des cordes. Certaines d'entre elles sont les mêmes qu'en théorie des champs, d'autres n'ont pas d'équivalent. Sans doute beaucoup d'entre elles sont encore à découvrir.

Pour introduire un exemple de symétries « cordiques » nous avons considéré une compactification toroïdale de la corde fermée en montrant comment une nouvelle version du mécanisme de Kaluza-Klein (KK) surgit avec un doublement des champs de jauge qui sortent de la compactification. En outre, pour une valeur particulière du rayon de compactification, des nouveaux champs de jauge à masse nulle émergent, donnant lieu à des symétries de jauge non abéliennes.

Nous avons ensuite introduit la T -dualité (T pour « *target* » ou « cible »), une propriété de la théorie quantique pour laquelle les cordes fermées ne distinguent pas un rayon R d'un rayon l_s^2/R . Le point fixe de cette transformation de dualité ($R = l_s$) est précisément la valeur spéciale où le groupe de jauge est élargi. Nous avons conclu avec la généralisation au cas où il y a plusieurs dimensions spatiales compactes.

D-cordes, D-branes

Dans le treizième cours, « D-cordes, D-branes » nous avons donné une première introduction aux cordes de type Dirichlet partant de la T -dualité. En effet, à première vue la T -dualité existe seulement pour des cordes fermées. Néanmoins, pour des cordes ouvertes, cette même transformation change une corde avec des conditions aux bords de Neumann avec une qui satisfait les conditions de Dirichlet dans les directions compactes. Les extrémités des D -cordes sont donc fixes dans certaines directions et libres dans d'autres. Les extrémités « vivent » donc dans un sous-espace à $(p + 1)$ dimensions spatio-temporelles, ce qu'on appelle une p -brane.

L'introduction (principalement par J. Polchinski) du concept de D -branes en 1994 est ce qu'on appelle la deuxième révolution de la théorie des cordes (après celle de Green et Schwarz).

M-Théorie et unification

Dans le quatorzième et dernier cours, « M-Théorie et unification », nous avons d'abord introduit les deux autres théories des cordes complètement cohérentes, les deux versions de la soi-disant supercorde hétérotique avec groupe de jauge $SO(32)$ ou $E_8 \times E_8$. Elles sont aussi bien définies seulement en $D = 10$. Ensuite, nous avons fait un petit détour dans la supergravité (donc une théorie des champs conventionnelle) en $D = 11$ et nous avons noté que, après compactification en

$D = 10$, les degrés de liberté de cette théorie sont les mêmes que ceux de la corde du type *IIA*.

Pour conclure, nous avons mentionné un réseau de dualité reliant entre elles les 5 théories des cordes en dix dimensions (Type I, II_A , II_B , HE_O , HE_E) et, à basse énergie, la supergravité en $D = 11$. Ces six théories apparaissent comme limites d'une théorie unique, qu'on a nommée *M*-théorie, qui pourtant n'a pas encore été formulée d'une façon précise.

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.

Particules élémentaires

Le programme, déjà amorcé avec le professeur Jacek Wosiek (université de Cracovie, Pologne) et le doctorant de Pise, Daniele Dorigoni, pour généraliser les modèles de mécanique quantique matricielle au cas d'une théorie des 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 quantification du cône de lumière. Le modèle ainsi construit se prête très 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 de corde reliant les quanta élémentaires.

Nous sommes en train d'écrire un premier article sur ces résultats.

Gravitation

En collaboration avec les professeurs G. D'Apollonio (université de Cagliari en Italie et visiteur de longue durée à l'ENS cette année), 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 particules ou cordes légères à énergies transplanckiennes aux collisions entre cordes à masse nulle et une collection des « p-branes ». Ce dernier problème s'est avéré être moins complexe et nous a permis de trouver nombre de résultats tels que la génération d'un espace-temps non banale avec les phénomènes associés de déviation géodésique et d'excitation de marées. Un premier article sur ces résultats sera envoyé pour publication dans un bref délai.

En collaboration avec le mathématicien Ph. Le Floch (Paris 6) nous avons entamé une étude systématique des collisions entre deux ondes de choc ultra-relativistes à symétrie planaire 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 aux cas des collisions avec front d'onde fini. Nous avons déjà entamé l'écriture d'un premier article sur le sujet.

Cosmologie

Avec le professeur M. Gasperini (université de Bari) et le docteur G. Marozzi (actuellement à l'IAP, Paris, et mon futur ATER au Collège à partir de septembre 2010), 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 espace (voir liste des publications).

Nous envisageons de généraliser cette méthode à des hypersurfaces du type lumière pour l'appliquer au problème de l'accélération cosmologique.

PUBLICATIONS

Veneziano G. avec M. Gasperini et G. Marozzi, « A covariant and gauge-invariant formulation of the cosmological back-reaction », *JCAP*, 1002, 009, 2010.

Veneziano G., « Transplanckian string collisions : an update », *Comptes rendus de la 12^e conférence internationale Marcel-Grossmann*, Paris, juillet 2010.

Veneziano G., « Hasard et cordes, accord parfait ? », dans *Le plus grand des hasards : surprises quantiques*, Éditions Belin, 2010.

CONFÉRENCES

Conférences sur invitation

« *Transplanckian string collisions: an update* », conférence plénière à la 12^e conférence Marcel Grossmann, Paris, juillet 2009.

« *Transplanckian scattering and the information paradox* », contribution à une session parallèle à la 12^e conférence Marcel Grossmann, Paris, juillet 2009.

« *Transplanckian string collisions and black holes* », Université du Michigan, Ann Arbor, septembre 2009.

« *Space, time, matter: 90 years after* », Bell Lecture, Université McGill, Montréal, septembre 2009.

« *Transplanckian string collisions and black holes* », Université McGill, Montréal, septembre 2009.

« *Big Bang or Big bounce?* », colloque ENS, Paris, octobre 2009.

« *Space, time, matter: 90 years after* », colloque Saclay, octobre 2009.

« *Black holes from transplanckian energy collisions of ultrarelativistic sources* », conférence on « *mathematical methods in general relativity and quantum field theory* », Paris (Chevaleret), novembre 2009.

« *Tempo spazio materia: 90 anni dopo* », colloque, Université de Naples, novembre 2009.

« *Transplanckian string collisions : récent progress and open problems* », séminaire, Université de Naples, novembre 2009.

« *Transplanckian string collisions: a review of past and récent progress* », Université de Crète, Héraklion, novembre 2009.

« *Big Bang or Big Bounce?* », colloque de physique, Université de Rome Tor Vergata, décembre 2009.

« *Astri e cordicelle* », conférence Grand Public, Rome, décembre 2009.

« *The transplanckian S-Matrix: recent progress and open problems* », séminaire IHES, Bures-sur-Yvette, décembre 2009.

« *A covariant formulation of the cosmological backreaction* », Université hébraïque de Jérusalem et Université de Tel Aviv, décembre 2009.

« *The transplanckian S-Matrix: recent progress and open problems* », séminaire Kings College, Londres, janvier 2010.

« *Transplanckian string collisions: a review of past and recent progress* », séminaire IAP, Paris, janvier 2010.

« *Space, time, matter: 90 years after* », rencontres de La Thuile, Italie, mars 2010.

« *Transplanckian scattering of particles, strings, and branes* », J. Racah Conférence, Jérusalem, juin 2010.

Organisation de conférences et d'ateliers

J'ai contribué à l'organisation de la conférence « *String Phenomenology* » qui s'est tenue au Collège de France en juillet 2010.

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 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 2009, le comité s'est réuni pour sélectionner les propositions d'atelier pour l'année 2011. 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. Cette charge a pris fin en juillet 2009 avec un bilan fort satisfaisant.

Membre du comité d'organisation de la conférence « *Marcel Grossmann* », Paris, juillet 2009.

Membre du comité d'organisation de la conférence « *String Phenomenology* » qui s'est tenue au Collège de France en juillet 2010.

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.