

Création d'une chaire *Champs, cordes et gravité* au Collège de France

Marc HENNEAUX, nommé professeur titulaire de la chaire,
prononcera sa leçon inaugurale

Symétrie et gravitation

– le jeudi 5 mars 2020, à 18 heures –

Une nouvelle chaire intitulée *Champs, cordes et gravité* est confiée au professeur **Marc HENNEAUX**.

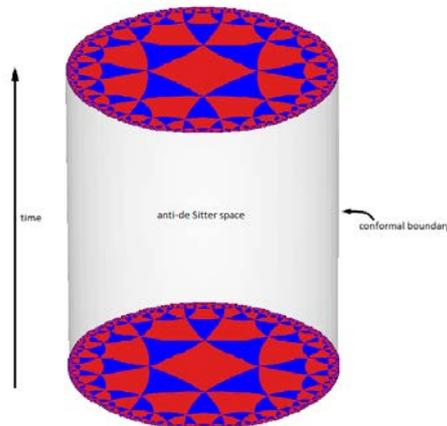
Marc HENNEAUX est un physicien belge qui a effectué une partie de sa carrière aux Etats-Unis, notamment auprès de Claudio Bunster (Teitelboim Weitzman) à l'Université de Princeton (1978-1979), puis d'Austin (1981-1984), dans le groupe de John Wheeler. Il devient ensuite chercheur au Fonds national de la recherche scientifique (Belgique) avant de rejoindre en 1993 l'Université Libre de Bruxelles où il est nommé professeur. Il y crée, en 1996, le groupe de Physique théorique et mathématique, dont il a assuré la direction jusqu'en 2012. Il exerce depuis 2004 les fonctions de directeur des Instituts Internationaux Solvay de Physique et de Chimie qui organisent depuis 1911 les fameux Conseils de Physique et de Chimie Solvay.

Marc HENNEAUX travaille sur les forces fondamentales, leurs symétries et en particulier la gravité. Ses domaines de recherche sont les théories de jauge, la théorie d'Einstein, la théorie des cordes et sa généralisation, la théorie-M. Il s'est intéressé aux solutions des équations d'Einstein dans un espace anti- de Sitter (soit avec une constante cosmologique Λ négative). Il est un des spécialistes les plus reconnus du domaine, et a contribué à des découvertes majeures, à fort impact dans la communauté de la physique et au-delà, qui ont donné lieu à de nombreux développements dans la littérature.

Une partie importante de ses travaux a exploité les espace-temps en dimension 3 (2 espace+1 temps), qui sont des laboratoires exceptionnels pour tester des concepts de la gravité, tout en étant plus simples que les espaces de dimensions plus élevées, et pourtant assez riches pour d'une part posséder des trous noirs, avec toute leur thermodynamique, d'autre part pouvoir inclure les champs de spin élevé, domaine en plein développement aujourd'hui, et enfin permettre l'étude de la correspondance AdS/CFT (anti- de Sitter / *Conformal Field Theory*) holographique.

Dès les années 1980, **Marc HENNEAUX** a eu l'intuition de cette richesse, et avec J. David Brown, alors en thèse à l'Université du Texas, il a été à l'origine d'une avancée importante : la découverte que la gravité dans l'espace-temps à 3 dimensions avec constante cosmologique négative possédait des symétries asymptotiques formant une algèbre infini-dimensionnelle et

isomorphe à l'algèbre conforme de l'espace plat à 2 dimensions avec charge centrale non nulle. Ils ont donné la valeur de cette charge centrale, appelée depuis « charge centrale de Brown-Henneaux ». Ce travail est considéré comme l'un des précurseurs de la célèbre correspondance AdS/CFT, ou holographique, découverte par Juan Maldacena en 1997.

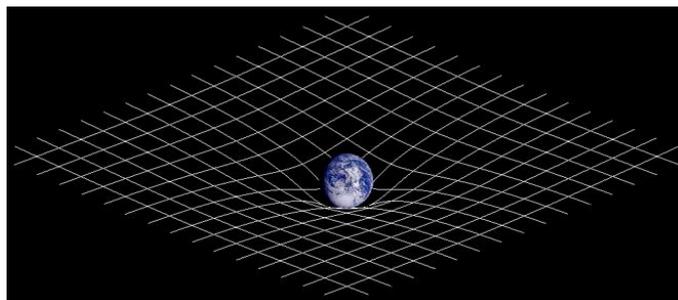


Un espace anti de Sitter tridimensionnel. Crédits : CC BY-SA 3.0

Il a également apporté des contributions majeures à la théorie des champs de jauge de spins élevés.

« L'espace-temps tel que nous le percevons ne serait pas un concept de base de la théorie fondamentale de la gravitation encore à construire, mais apparaîtrait - émergerait - uniquement à certaines limites, dans une phase où les symétries des champs de spin élevé seraient brisées et ceux-ci acquerraient une masse de l'ordre de la masse de Planck. En dessous de cette échelle, la notion d'espace-temps aurait un sens. Dans l'histoire de l'univers, cette émergence se produirait sans doute au moment du "big bang", qui prend ainsi une nouvelle perspective. »

Marc HENNEAUX



Influence d'une masse (ici, la Terre) sur l'espace-temps. Crédits : CC BY-SA 3.0

L'enseignement du Pr **Marc HENNEAUX** au Collège de France débutera le 22 avril (thème en 2019-2020 : ***Symétries cachées de la gravitation***). La **leçon inaugurale** sera prononcée le 5 mars à 18 heures (thème : ***Symétrie et gravitation***).

Cours, séminaires et leçon inaugurale sont ouverts à tous et gratuits, sans condition d'inscription préalable (sous réserve des places disponibles). Sauf exception, ils sont diffusés sur le site de l'établissement (www.college-de-france.fr). La leçon inaugurale y sera retransmise en direct.

Lien vers les pages du Pr **Marc HENNEAUX** sur le site du Collège de France : <https://www.college-de-france.fr/site/marc-henneaux>.

Au-delà de la théorie d'Einstein

Par Marc HENNEAUX

Une révolution inachevée

De toutes les forces de la nature (gravité, électromagnétisme, force nucléaire faible, force nucléaire forte), la force de gravité reste la plus mystérieuse.

La compréhension moderne de la gravitation repose sur la théorie de la relativité générale développée par Einstein au début du siècle dernier (1915). La théorie d'Einstein constitue une véritable révolution intellectuelle car elle est basée sur une géométrisation sans précédent de la physique, dans laquelle l'interaction gravitationnelle se manifeste à travers la courbure de l'espace-temps. En présence de masses, l'espace est déformée et le temps est ralenti. La théorie d'Einstein est non seulement élégante du point de vue mathématique, mais elle a aussi été remarquablement testée expérimentalement sur de nombreuses échelles.

Un des plus grands défis de la physique moderne : faire la synthèse de la gravitation et de la mécanique quantique

En dépit de tous ces succès impressionnants, la théorie d'Einstein ne peut cependant être la théorie ultime de la force de gravité. En effet, à l'échelle microscopique, la théorie d'Einstein est en contradiction avec la mécanique quantique – cet autre pilier de la physique moderne qui régit l'infiniment petit et dont les succès sont également prodigieux – : les règles du monde quantique appliquées à la théorie d'Einstein conduisent à des résultats absurdes et incontrôlables. Cette situation est en contraste frappant avec celle qui prévaut pour les autres forces, où la théorie quantique des champs a conduit à des résultats d'une précision remarquable pleinement validés par l'expérience.

Le conflit entre gravitation et mécanique quantique n'a pas de conséquence pratique directe car les situations physiques ordinaires auxquelles nous sommes confrontés se situent dans un régime de paramètres qui ne fait pas appel à la "gravité quantique". Mais c'est un conflit intellectuellement inconfortable, puisque deux théories ne peuvent être à la fois simultanément correctes et en contradiction. En outre, une théorie quantique cohérente de la gravitation est indispensable pour comprendre des situations physiques extrêmes qui fascinent les physiciens : les tout premiers instants de l'univers ("big bang") ainsi que la nature des trous noirs.

Trouver une formulation cohérente de la force gravitationnelle à l'échelle microscopique est ainsi un défi majeur de la physique de ce siècle. Tout indique que la réconciliation des deux piliers de la physique moderne que sont la mécanique quantique et la relativité générale conduira à une nouvelle révolution conceptuelle, qui nous mènera bien au-delà de la théorie d'Einstein. La théorie d'Einstein est une révolution inachevée.

La théorie des cordes : un cadre riche et puissant mais encore incomplet

Il existe plusieurs idées poursuivies activement pour résoudre le problème de la quantification de la gravitation. Une approche particulièrement séduisante et prometteuse est donnée par la théorie des cordes, un domaine extrêmement fertile qui fait appel à une foule de concepts physiques et mathématiques très profonds.

La théorie des cordes reproduit la théorie d'Einstein aux échelles où celle-ci a été vérifiée. Les différences avec la théorie d'Einstein n'apparaissent qu'à très hautes énergies, un domaine actuellement inaccessible expérimentalement. Cependant, cette différence aux très hautes énergies est essentielle, puisqu'elle rend la gravitation perturbativement compatible avec la mécanique quantique. Une autre propriété attractive de la théorie des cordes est qu'elle réalise le rêve d'une unification complète de toutes les forces fondamentales puisque celles-ci peuvent se décrire en terme d'interactions de cordes.

Malgré toutes ces belles réussites, la théorie des cordes souffre d'une limitation majeure. Elle ne constitue pas encore véritablement une théorie. Les physiciens disposent d'un cadre puissant, riche en idées très attrayantes combinant des concepts profonds de physique, de géométrie et d'algèbre et ouvrant des portes inattendues vers d'autres branches de la physique (physique nucléaire, physique de la matière condensée). Les outils disponibles permettent de faire des calculs approchés valables dans certaines limites et extrêmement fructueux et convaincants. Cependant, les équations fondamentales de la théorie – analogues aux équations de Maxwell pour l'électromagnétisme ou aux équations d'Einstein pour la gravitation non quantique – ne sont pas encore connues. Pour cette raison, de nombreuses questions physiques faisant appel à la gravitation quantique et sortant des limites indiquées ne peuvent encore être abordées.

Symétries : la clef ?

Une meilleure compréhension de la théorie des cordes passe sans doute par une meilleure compréhension de ses symétries sous-jacentes.

C'est devenu un lieu commun d'affirmer que les symétries jouent un rôle essentiel en physique. C'est particulièrement vrai pour la physique des forces fondamentales de la nature, qui font toutes appel à des principes de symétrie dans leur description. Les symétries fournissent des contraintes extrêmement fortes qui dictent, en fait, la dynamique de ces forces.

De nombreuses recherches en gravitation (réduction dimensionnelle, étude des dualités, comportement du champ de gravitation au voisinage de singularités cosmologiques) ont fait émerger des symétries infini-dimensionnelles particulièrement intéressantes. L'apparition de ces symétries est très mal comprise et semble être dans de nombreux cas un accident un peu miraculeux. Mais il n'y a pas de miracle en physique et ce résultat est sans doute la pointe de l'iceberg indiquant l'existence d'une symétrie énorme sous-jacente, dont l'identification permettra de faire progresser notre compréhension de la gravitation au niveau fondamental. L'étude et la compréhension de ces symétries font jouer d'emblée un rôle essentiel à la gravitation.

Ces thématiques constitueront l'axe central du cours, où les groupes de symétrie infini-dimensionnels liés à la gravitation (groupes de dualités généralisées mentionnés ci-dessus, mais également symétries des champs de jauge de spin élevé et symétries asymptotiques) auront une place primordiale. C'est une approche qui doit relever de nombreux défis car les outils mathématiques nécessaires pour progresser sont eux aussi encore mal compris. Que ces domaines soient en pleine friche constitue une motivation supplémentaire pour s'y intéresser.

M.H.

Biographie



Crédit : Collège de France / Patrick Imbert

Né en 1955, **Marc HENNEAUX** a étudié la physique à l'Université Libre de Bruxelles (ULB) où il soutenu sa thèse de doctorat en 1980 après avoir été « Visiting Fellow » à l'université de Princeton pendant l'année académique 1978-1979. Il a ensuite été chercheur postdoctoral ainsi que chargé d'enseignement à l'université du Texas à Austin jusqu'en février 1985, avant de revenir en Belgique, d'abord comme chercheur au Fonds national de la recherche scientifique (FNRS - Belgique) jusqu'en 1992, puis comme chargé de cours à l'ULB (1993-1996).

Depuis 1996, **Marc HENNEAUX** est professeur ordinaire à l'ULB. Il a été nommé directeur des Instituts internationaux de physique et de chimie fondés par Ernest Solvay en 2004. Il a été élu Professeur au Collège de France sur la chaire « Champs, cordes et gravité » en 2017.

Marc HENNEAUX a été chercheur ou professeur invité dans de nombreuses institutions, y compris le *Centro de Estudios Científicos* (Chili), le CERN, les universités Paris VI, Paris VII, Paris XI, l'IAS à Princeton, l'université de Craiova (Roumanie), l'École normale supérieure (Paris), l'Institut des hautes études scientifiques (Bures-sur-Yvette), l'université de Montpellier et l'institut Henri Poincaré. Il a également exercé la fonction de directeur scientifique du journal *JHEP (Journal of High Energy Physics)* de 2006 à 2018.

Les recherches de **Marc HENNEAUX** sont consacrées à l'étude des modèles théoriques qui décrivent les interactions physiques fondamentales (électromagnétisme, forces nucléaires faibles et fortes, gravitation), avec un intérêt particulier pour leurs symétries et pour la gravitation. Ces recherches ont bénéficié notamment du soutien de deux « ERC Advanced Grants » (2011-2015) et (2016-2021).

Biographie complète, prix, distinctions, CV et bibliographie :

<https://www.college-de-france.fr/site/marc-henneaux>

Principaux prix et distinctions :

- Prix Francqui (Belgique) – 2000
- Membre de l'Académie royale de Belgique – depuis 2002
- Prix de recherche Humboldt (Allemagne) – 2009
- Docteur honoris causa, université de Craiova (Roumanie) – 2010
- Prix Bogoliubov du JINR (Dubna, Russie) avec V. Rubakov – 2014
- Prix Quinquennal du FNRS (sciences exactes) – période 2011-2015
- Baron (Belgique) – depuis 2015

Livres :

L. Brink et M. Henneaux – « Principles of String Theory » – Plenum Press (New York : 1988) 297 pages (traduit en russe aux éditions MIR, Moscou, 1991).

M. Henneaux – « Classical Foundations of BRST Symmetry » – Bibliopolis (Naples : 1988) 95 pages.

M. Henneaux et C. Teitelboim – « Quantization of Gauge Systems » – Princeton University Press (Princeton : 1992) 520 pages.

V. Belinski et M. Henneaux – « The Cosmological Singularity » – Cambridge University Press (Cambridge : 2017) 263 pages.

Publications représentatives :

M. Henneaux et C. Troessaert, Hamiltonian structure and asymptotic symmetries of the Einstein-Maxwell system at spatial infinity, JHEP 07 (2018) 171

M. Henneaux et S.-J. Rey, W^∞ as Asymptotic Symmetry of Three-Dimensional Higher Spin Anti-de Sitter Gravity, JHEP 12 (2010) 007

M. Henneaux, D. Persson et P. Spindel, Spacelike Singularities and Hidden Symmetries of Gravity, Living Rev. Rel. 11 (2008) 1

T. Damour, M. Henneaux et H. Nicolai, $E(10)$ and a small tension expansion of M-Theory, Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 221601-1/4

G. Barnich, F. Brandt et M. Henneaux, Local BRST Cohomology in the Antifield Formalism: I. General Theorems, Commun. Math. Phys. 174 (1995) 57-92

M. Henneaux et P. van Driel, The Asymptotic Dynamics of Three-Dimensional Einstein Gravity with a Negative Cosmological Constant, O. Coussaert, Class. Quant. Grav. 12 (1995) 2961-2966

Geometry of the 2+1 Black Hole, M. Bañados, M. Henneaux, C. Teitelboim et J. Zanelli, Phys.Rev. D48 (1993) 1506-1525

G. Barnich, M. Henneaux, Consistent Couplings Between Fields with a Gauge Freedom and Deformation of the Master Equation, Phys. Lett. B311 (1993) 123-129

M. Henneaux et C. Teitelboim, The Cosmological Constant and General Covariance, Phys.Lett. 222B (1989) 195-199

J. D. Brown et M. Henneaux, Central Charges in the Canonical Realization of Asymptotic Symmetries: An example from Three-Dimensional Gravity, Commun. Math. Phys. 104 (1986) 207-226

M. Henneaux et C. Teitelboim, Asymptotically Anti-de Sitter Spaces, Commun. Math. Phys. 98 (1985) 391-424

M. Henneaux, Hamiltonian Form of the Path Integral for Theories with a Gauge Freedom, Physics Reports 126 (1985) 1-66



Enseignement du professeur Marc HENNEAUX au Collège de France

L'enseignement du professeur **Marc HENNEAUX** au Collège de France portera sur la théorie quantique des champs, la théorie des cordes et la gravitation.

« *La symétrie est une des mélodies thématiques de la physique du XXe siècle.* » C'est en ces mots devenus célèbres chez les physiciens, que le Prix Nobel de Physique C.N. Yang souligne l'invasion de la physique moderne par les idées de symétrie, qui ont joué un rôle de guide essentiel dans son développement et qui continuent de jouer ce rôle avec la même vigueur.

Les cours de la chaire « Champs, cordes et gravité » seront axés sur l'étude des symétries infini-dimensionnelles qui sous-tendent l'interaction gravitationnelle, dans le but de trouver une formulation plus fondamentale de la gravitation, au-delà de la théorie d'Einstein. Cette formulation plus fondamentale pourrait conduire à une résolution du conflit entre gravité et mécanique quantique, un des plus grands défis de la physique du XXIe siècle.

Le cours de l'année 2019-2020 sera consacré aux symétries infini-dimensionnelles qui émergent dans la description du champ de gravitation au voisinage des singularités cosmologiques (qui est un « régime de champ fort »).

Cours et séminaire 2019-2020 : Symétries cachées de la gravitation

Des structures de symétrie exceptionnelles apparaissent de manière tout à fait inattendue dans l'étude du comportement des solutions des équations du champ gravitationnel (équations d'Einstein ou leurs généralisations supersymétriques) au voisinage d'une singularité de genre espace (singularité de type cosmologique ou « big bang »). Dans cette limite où les champs divergent, la dynamique est contrôlée par des groupes de Coxeter infinis hyperboliques. Le cas le plus spectaculaire est celui de la supergravité maximale où la limite fait apparaître le groupe de Coxeter $E(10)$ qui possède des propriétés remarquables.

Ces groupes de Coxeter sont étroitement liés aux extensions de Kac-Moody des groupes de symétries mis en évidence par la réduction dimensionnelle et aux groupes de dualité de la théorie des cordes. Le fait qu'ils soient infinis est une conséquence directe de la présence de la gravitation parmi les champs dynamiques.

Ces symétries sont inattendues car non visibles dans la formulation Lagrangienne de départ de la théorie. On parle de « symétrie cachée ».

Le cours de cette année sera consacré à l'étude de l'émergence de ces structures de symétrie remarquables, de leurs propriétés et de leurs implications.

Les questions abordées dans le cours et le séminaire seront :

- Équations d'Einstein au voisinage d'une singularité cosmologique – analyse de Belinski-Lifshitz-Khalatnikov
- Billards cosmologiques – premier contact avec les groupes de Coxeter hyperboliques
- Généralisation aux supergravités
- Réduction dimensionnelle et symétries cachées
- Dualité gravitationnelle
- Groupes de Coxeter hyperboliques
- Algèbres de Kac-Moody hyperboliques
- Développements récents

Cours le mercredi à 14 heures, suivi du séminaire à 16 heures.

Accès à l'agenda du cours : <https://www.college-de-france.fr/site/marc-henneaux/course-2019-2020.htm>



À propos du Collège de France

Le Collège de France, grand établissement public, répond depuis 1530 à une double vocation : être à la fois le lieu de la recherche la plus audacieuse et celui de son enseignement. On y enseigne ainsi à tous les publics intéressés, sans aucune condition d'inscription, « le savoir en train de se constituer dans tous les domaines des lettres, des sciences ou des arts ». Le Collège de France a également pour mission de favoriser l'émergence de disciplines nouvelles, l'approche multidisciplinaire de la recherche de haut niveau et de diffuser les connaissances en France et à l'étranger.

La grande majorité des enseignements qui y sont dispensés sont librement disponibles sur son site internet dans des formats variés : films et enregistrements des cours, podcasts, iconographie et références bibliographiques, publications originales des éditions du Collège de France, etc.

Le Collège de France est membre associé de l'Université PSL.

www.college-de-france.fr