

Petite
Introduction
à la théorie
des cordes

Steven Gubser

Petite
Introduction
à la théorie
des cordes

Traduit de l'anglais (Etats-Unis) par Julien Bambaggi

DUNOD

Ouvrage publié avec l'accord de Princeton University Press, Princeton New Jersey, USA, représenté par L'Autre agence, sous le titre : *The Little Book of String Theory*. Tous droits réservés. Toute reproduction, par quelque moyen que ce soit, numérique ou mécanique, en totalité ou en partie, est soumise à l'accord de l'éditeur.

Copyright © 2010 Steven Gubser

Maquette de couverture : Raphaël Tardif
Illustration de couverture : © Catalin - Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2012, pour la traduction française.
ISBN 978-2-10-057855-9

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À mon père

INTRODUCTION

La théorie des cordes est un mystère. Supposée être une théorie du tout, elle n'a jamais connu de vérification expérimentale. En outre, elle est particulièrement absconse ! Il n'y est question que de dimensions supplémentaires, de fluctuations quantiques et de trous noirs... Et il faudrait y voir une représentation de notre monde ? Pourquoi les choses ne seraient-elles pas plus simples ?

La théorie des cordes est un mystère. Ses adeptes – dont je suis – conviennent qu'ils ne la comprennent pas. Pourtant, calcul après calcul, elle fournit des résultats connexes étonnamment beaux. En l'étudiant, on acquiert un certain sens de l'inéluctable : comment pourrait-il se faire que nous ne tenions pas là une représentation de notre monde ? Et pourquoi ne parvenons-nous pas à relier au réel des vérités aussi profondes ?

La théorie des cordes est un mystère. Elle détourne de nombreux jeunes diplômés bourrés de talent de domaines aussi passionnants que la supraconductivité qui, elle, a déjà des applications industrielles. Contrairement à beaucoup de domaines scientifiques, elle est la coqueluche des médias. Et elle s'attire l'opposition bruyante de détracteurs qui déplorent la progression de son influence et rejettent ses exploits parce que sans liens avec l'expérimentation.

Pour parler succinctement, la théorie des cordes affirme que les objets fondamentaux qui constituent toute la matière

ne sont pas des particules mais des cordes. Ces cordes sont comme de petites pièces de caoutchouc très fines et très solides. Un électron ne serait en fin de compte qu'une corde vibrant et tournant à une échelle de longueurs trop petite pour que nous puissions le prouver, même à l'aide des accélérateurs de particules les plus perfectionnés dont nous disposons. Dans certaines versions de la théorie des cordes, un électron est une corde formant une boucle fermée. Dans d'autres, c'est un segment de corde possédant deux extrémités.

Faisons un tour rapide de l'histoire du développement de cette théorie.

On dit parfois qu'elle a été inventée à reculons, ce qui signifie que plusieurs de ses parties étaient à peu près au point mais sans qu'on en saisisse toute la portée. Il y eut d'abord, en 1968, une belle formule qui montre la façon dont les cordes rebondissent les unes sur les autres. Mais, quand la formule avait été élaborée, personne ne s'était rendu compte du lien avec les cordes. C'est cela qui est drôle avec les maths : il arrive qu'on manipule des formules, qu'on les vérifie, qu'on les généralise sans en avoir vraiment pris toute la mesure. Dans ce cas, toutefois, cette conscience vint rapidement, y compris l'idée que la théorie des cordes englobait la gravitation telle que décrite par la relativité générale.

Dans les années 1970 et au début des années 1980, la théorie des cordes faillit sombrer dans l'oubli : elle ne paraissait pas remplir le rôle qui lui avait été assigné, à savoir décrire les interactions nucléaires. Quand on y adjoignait la mécanique quantique, il semblait probable qu'apparaisse une incohérence subtile – on dit une anomalie. Par exemple, s'il existait des particules semblables aux neutrinos mais électriquement chargées, certains types de champs gravitationnels pourraient spontanément créer une charge électrique – ce qui nous mettrait dans un beau pétrin parce que, pour la mécanique quantique, il faut qu'il y ait dans l'univers un équilibre strict entre charges

négatives, comme celles des électrons, et charges positives, comme celles des protons. Ce fut donc un soulagement quand, en 1984, on montra que la théorie des cordes ne comportait pas d'anomalies. C'est à partir de là qu'on commença à la regarder comme une candidate sérieuse à la description de l'univers.

C'est ce résultat, en apparence technique, qui a enclenché la « première révolution des supercordes » : ce fut une période d'activité frénétique et d'avancées spectaculaires. Pourtant, elle n'atteignit pas les objectifs qu'elle s'était fixés, à savoir produire une théorie du tout. À cette époque, j'étais gosse et j'habitais près du Centre d'Aspen pour la physique, un foyer d'activités important. Un peu partout, des gens marmonnaient, se demandant si la théorie des supercordes pouvait être testée au Super collisionneur supraconducteur et je ne voyais pas ce qu'il pouvait y avoir de si extraordinaire là-dedans.

Pour revenir aux supercordes, ce sont des cordes qui possèdent la propriété de supersymétrie. Mais encore ? J'essaierai de vous éclairer là-dessus dans ce livre mais, pour le moment, contentons-nous de deux affirmations très partielles. D'abord, la supersymétrie met en relation des particules ayant des spins différents. Le spin d'une particule est semblable au mouvement d'une toupie – le verbe anglais *to spin* signifie tourner sur soi-même. À ceci près que, à la différence d'une toupie, une particule ne peut jamais s'arrêter de tourner. Ensuite, les théories des cordes à supersymétrie sont celles que nous comprenons le mieux. Alors que les théories des cordes ne possédant pas la supersymétrie requièrent 26 dimensions, celles qui la possèdent n'en ont besoin que de 10. On peut évidemment observer que cela en fait toujours six de trop dans la mesure où nous ne percevons que trois dimensions pour l'espace et une pour le temps. Faire de la théorie des cordes une théorie du monde réel consiste en partie à s'affranchir de ces dimensions supplémentaires, en tout cas à leur trouver un rôle utile.

Jusqu'à la fin des années 1980, les théoriciens des cordes ont poursuivi avec acharnement la quête d'une théorie du tout. Mais leur compréhension de la théorie était insuffisante et il s'avéra que les cordes n'étaient pas les seuls protagonistes : il fallait aussi supposer l'existence de branes, des objets qui s'étiraient dans plusieurs dimensions. La brane la plus simple est une membrane. Tout comme la peau tendue d'un tambour, une membrane s'étire dans deux dimensions spatiales. C'est une surface qui peut vibrer. Il y a aussi les 3-branes qui s'étirent dans les trois dimensions de l'espace que nous connaissons et vibrent dans les dimensions supplémentaires dont la théorie des cordes a besoin. On trouve aussi des 4-branes, des 5-branes et ainsi de suite jusqu'aux 9-branes. Tout cela peut paraître indigeste mais nous avons de bonnes raisons de croire que la théorie des cordes ne tiendrait pas debout sans ces branes. Certaines de ces raisons sont liées à des questions de « dualité de cordes ». Une dualité est une relation entre deux objets, ou encore deux points de vue, qui semblent différents. Un exemple très simple est fourni par un échiquier. On peut le voir comme fait de carrés noirs sur une surface blanche ou comme fait de carrés blancs sur une surface noire. Les deux façons de voir (avec les précisions nécessaires) fournissent une description convenable de l'apparence d'un échiquier. Ce ne sont pas les mêmes mais elles sont liées par l'échange entre blanc et noir dans la description.

Le milieu des années 1990 a connu une deuxième révolution des supercordes qui s'est appuyée sur le fait qu'on commençait à mieux comprendre les dualités de cordes et le rôle des branes. À nouveau, on s'efforça de tirer profit de cette compréhension nouvelle pour bâtir un cadre théorique qu'on pourrait qualifier de théorie du « tout », c'est-à-dire de tous les aspects de la physique fondamentale compris et vérifiés. La gravitation fait partie de la physique fondamentale, tout comme l'électromagnétisme et les interactions nucléaires. Il en

est de même des particules tels les électrons, les protons et les neutrons dont sont faits tous les atomes. Les constructions de la théorie des cordes sont capables de rendre compte de nos connaissances dans les grandes lignes. Mais on y est toujours à la peine pour parvenir à une théorie parfaitement viable. En même temps, plus nous en savons sur la théorie des cordes plus nous mesurons l'étendue de notre ignorance. Il faudrait une troisième révolution des supercordes ! Mais elle ne s'est pas encore produite. En son absence, les théoriciens des cordes font avec ce qu'ils comprennent et se contentent de formulations partielles sur ce que la théorie des cordes devrait tirer des expériences en cours comme à venir. Les plus grands efforts faits dans ce sens cherchent à lier la théorie des cordes aux expériences de collisions à grande énergie de protons et d'ions lourds. Les connexions que nous en attendons seront probablement en rapport avec la supersymétrie, les dimensions supplémentaires ou l'horizon des trous noirs – peut-être avec tout cela à la fois.

Nous en sommes arrivés à la situation actuelle. Examinons les deux sortes de collisions qui viennent d'être mentionnées.

Les collisions entre protons sont au centre des expériences en physique des hautes énergies grâce aux gros équipements installés près de Genève et qui constituent le Large Hadron Collider, le LHC, ou Grand collisionneur de hadrons. Ce dernier accélère¹ des faisceaux de protons circulant en sens inverse l'un de l'autre avant de les faire entrer en collision frontale à des vitesses proches de celle de la lumière. Les collisions de ce type sont chaotiques, incontrôlées. Ce qu'on

1. Le LHC, après avoir été inauguré en 2008, a subi un arrêt de plus d'un an. La mise en service effective a eu lieu en octobre 2009 avec les premières injections de protons et d'ions lourds. Mais c'est en mars 2010 que fut atteint le niveau d'énergie de 7 000 GeV par faisceau, marquant le démarrage du programme de recherches proprement dit au LHC. (N.d.T.)

y cherche est cet événement rare qu'est l'apparition d'une particule extrêmement massive et instable. L'une d'elle, toujours hypothétique¹, est appelée boson de Higgs : on pense que c'est elle qui confère sa masse à l'électron. La supersymétrie prédit l'existence de beaucoup d'autres particules et, si on les découvre, il sera clair que la théorie des cordes est sur la bonne voie. Il y a aussi la possibilité vague que les collisions entre protons produisent de minuscules trous noirs dont il serait alors possible d'observer la disparition.

Dans les collisions entre ions lourds, on arrache tous leurs électrons à des atomes d'or ou de plomb avant de les injecter dans la même machine que celle qui produit les collisions entre protons. Ces collisions frontales entre ions lourds sont encore plus chaotiques que celles entre protons. On pense que les protons et les neutrons se fondent en leurs constituants, les quarks et les gluons. Ces derniers forment alors un fluide qui se dilate et se refroidit avant de se figer à nouveau en particules alors observées grâce aux détecteurs. Ce fluide est appelé plasma quark-gluon. Le lien avec la théorie des cordes tient à la comparaison du plasma quark-gluon avec un trou noir. Curieusement, le type de trou noir qui pourrait être le dual du plasma quark-gluon ne se situe pas dans les quatre dimensions de notre espace-temps mais requiert un espace courbe à cinq dimensions.

Il est important d'insister sur le fait que les liens de la théorie des cordes avec le monde réel relèvent de la spéculation. Il se peut que la supersymétrie n'existe tout simplement pas. Ou que le plasma quark-gluon produit au LHC ne se comporte finalement pas vraiment comme un trou noir à cinq dimensions. Mais ce qui est extraordinaire est que les théoriciens – des cordes

1. Le CERN a publié un communiqué de presse encourageant, le 4 juillet 2012, dans lequel il confirme la découverte au LHC d'un nouveau boson autour des niveaux d'énergie prévus. (N.d.T)

ou autres – misent tout là-dessus et retiennent leur souffle en attendant des résultats expérimentaux qui peuvent aussi bien combler leurs espoirs que les réduire en miettes.

Cet ouvrage développe quelques-unes des idées centrales de la théorie des cordes d'aujourd'hui, mais évoque aussi les débats ouverts sur ses applications possibles à la physique expérimentale des collisions. La théorie des cordes repose sur deux fondements : la mécanique quantique et la théorie de la relativité. À partir de là, elle s'éparpille dans de multiples directions et il est difficile de donner la préférence ne serait-ce qu'à quelques-unes d'entre elles. Les sujets abordés dans ce livre ne représentent qu'une partie de la théorie des cordes mais la traversent de part en part tout en évitant autant que possible ses aspects plus mathématiques. Leur choix est aussi le reflet de mes préférences et de mes préjugés – probablement aussi de mes limites.

En écrivant ce livre, j'ai aussi fait le choix de parler de physique et non des physiciens. Je ferai donc de mon mieux pour vous expliquer l'objet de la théorie des cordes mais je ne vous parlerai pas de ceux qui l'ont entièrement élaborée – par contre je peux tout de suite vous dire que, pour l'essentiel, je n'en fais pas partie. Il est difficile d'attribuer clairement des idées à des personnes ; pour illustrer cela, commençons par nous demander : qui est à l'origine de la relativité ? Albert Einstein, n'est-ce pas ? Certes... mais se contenter de ce seul nom est pour le moins incomplet ! Hendrik Lorentz ainsi qu'Henri Poincaré ont réalisé d'importantes contributions qui ont précédé les travaux d'Einstein. Hermann Minkowski a élaboré un cadre mathématique déterminant ; indépendamment de lui, David Hilbert a créé une composante fondamentale de la relativité générale. Et il faut aussi mentionner ces autres précurseurs que furent James Clerk Maxwell, George FitzGerald et Joseph Larmor ainsi que des pionniers venus plus tard, tels John Wheeler et Subrahmanyan Chandrasekhar. Le développement

de la mécanique quantique est bien plus compliqué encore dans la mesure où il n'y a pas un personnage comme Einstein dont les contributions dominent celles de tous les autres. On trouve au contraire un groupe hétérogène et impressionnant comprenant Max Planck, Einstein, Ernest Rutherford, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan et John von Neumann qui, tous, apportèrent des contributions essentielles – et, parfois, eurent entre eux des désaccords fameux. Il serait encore plus ambitieux de dire qui a fait quoi dans le vaste champ d'idées qu'est la théorie des cordes. J'ai pensé que toute tentative dans ce sens aurait nui à l'objectif de ce livre : faire connaître les idées elles-mêmes.

Le but des trois premiers chapitres est de présenter les idées qui sont essentielles à la compréhension de la théorie des cordes mais n'en font pas partie à proprement parler. Ces idées – énergie, mécanique quantique, relativité générale – sont plus importantes, jusqu'ici en tout cas, que la théorie des cordes elle-même parce que nous savons que le monde qu'elles décrivent est le monde réel. Le chapitre 4, où sera introduite la théorie des cordes, est donc un pas vers l'inconnu. J'essaierai, aux chapitres 4, 5 et 6, de faire en sorte que la théorie des cordes, les D-branes et les dualités de cordes paraissent aussi raisonnables et justifiées que possible : mais le fait demeure que personne n'a vérifié que tout cela constitue une description du monde réel. Les chapitres 7 et 8 sont consacrés aux tentatives actuelles de relier la théorie des cordes aux expériences mettant en œuvre les collisions de particules de haute énergie. Quand les cordistes s'efforcent de comprendre ce qui se produit et se produira dans les accélérateurs de particules, cela met en jeu supersymétrie, dualités de cordes et trous noirs dans une cinquième dimension.

En plusieurs endroits de ce livre, on trouvera les valeurs numériques de certaines quantités physiques, comme la quantité d'énergie libérée lors d'une fission nucléaire ou la dilatation du temps appliquée à un coureur olympique. Une des raisons en est que la physique est une science quantitative où les valeurs numériques des dimensions des objets ont de l'importance. Cela dit, pour un physicien, ce qui compte en général le plus est une mesure approximative d'une quantité physique – son ordre de grandeur. Par exemple, la dilatation du temps qui s'applique à un champion olympique de course est de l'ordre d'un pour 10^{15} quand bien même une estimation plus précise, réalisée sur la base d'une vitesse de 10 m/s, est d'un pour $1,8 \times 10^{15}$. Les lecteurs qu'intéresseraient des versions plus précises, plus explicites et/ou plus détaillées des calculs figurant dans ce livre peuvent se rendre, sur Internet, à l'adresse suivante : <http://press.princeton.edu/titles/9133.html>.

Où va la théorie des cordes ? Elle promet d'unifier gravitation et mécanique quantique. Elle promet de fournir une théorie unique englobant toutes les forces de la nature, d'apporter une compréhension nouvelle du temps, de l'espace et des dimensions supplémentaires qui restent hypothétiques. Elle promet de jeter un pont entre des idées apparemment aussi éloignées que les trous noirs et le plasma quark-gluon. Il s'agit d'une théorie assurément très « prometteuse » !

Comment les théoriciens des cordes pourront-ils jamais honorer toutes ces promesses ? En fait, beaucoup a déjà été fait. La théorie des cordes fournit effectivement un enchaînement élégant de raisonnements qui mènent de la mécanique quantique à la relativité générale. Nous examinerons le cadre de ces raisonnements au chapitre 4. Pour l'instant, cette théorie fournit vraiment un tableau des représentations possibles de toutes les forces de la nature. Nous en décrirons les grandes lignes au chapitre 7 en même temps que les difficultés que nous rencontrons pour le rendre plus précis. Nous verrons enfin au

chapitre 8 de quelle façon les calculs de la théorie des cordes sont d'ores et déjà comparés aux données relevées dans les collisions d'ions lourds.

Dans ce livre, je ne cherche pas à initier de débat à propos de la théorie des cordes mais j'irai jusqu'à dire que je crois que nombre de désaccords ne tiennent qu'à l'angle sous lequel on regarde les choses. Quand un résultat remarquable est fourni par la théorie des cordes, un de ses partisans s'écriera : « C'est fantastique ! Mais ce serait encore mieux si l'on pouvait obtenir telle ou telle chose ». Tandis qu'un critique de la théorie dira : « C'est pitoyable ! Si, au moins, ils avaient fait telle ou telle chose, là, j'aurais pu être impressionné. » En fin de compte, partisans comme critiques – du moins les plus sérieux et les plus informés de chaque camp – ne sont pas si éloignés que cela sur le fond. Tout le monde reconnaît que subsistent de profonds mystères en physique fondamentale. Presque tout le monde s'accorde à dire que les théoriciens des cordes ont mené des tentatives sérieuses pour les résoudre. Et, indéniablement, tout le monde s'accordera à dire qu'une bonne partie des promesses de la théorie des cordes ont déjà été honorées.