

INTRODUCTION AUX SUPERCORDES

Fiche de lecture de "L'Univers Élégant" de Brian Greene.

Cette petite introduction a pour seule prétention d'essayer de faire passer quelques unes des idées développées dans le livre de B. Greene. Il s'agit donc de la retranscription de concepts vulgarisés. Merci de me rapporter les éventuelles erreurs; j'espère juste qu'elles ne seront pas trop nombreuses ;-). Les imprécisions, quand elles sont volontaires, ont ici un but pédagogique.

1/ Introduction: Réductionnisme et théorie du tout

La physique a pour but de modéliser (i.e. mettre en équation) les phénomènes réels afin de pouvoir ensuite faire des prédictions.

Quelques points marquant de l'histoire de la physique:

On à l'habitude de dire que la physique moderne commence avec Galilée, mais l'astronomie et l'études des astres sont bien antérieurs. Mais, à la différence de l'astronomie, Galilée étudie des phénomènes terrestres et non plus extra-terrestres (en particulier, la chute des corps). A la même époque, Kepler établie les 3 lois qui portent son nom. Celles-ci concernent le mouvement des planètes. Quelques années plus tard, Newton avec sa loi de la gravitation universelle réconcilie les 2 approches. En effet, avec sa loi il retrouve à la fois les résultats de Galilée et les résultats de Kepler. Il unifie physique sub et supra lunaire qu'il était d'usage jusque là de distinguer. C'est le premier exemple d'unification de 2 théories physiques.

Au XVIIIe siècle, Maxwell et sa théorie de l'électromagnétisme unifie les théories de l'électricité, du magnétisme et de l'optique. Cette deuxième unification majeure sépare pour la première fois la physique en deux blocs bien distincts - l'électromagnétisme et la gravitation - et cette séparation existe toujours de nos jours.

La relativité restreinte et générale ainsi que la physique quantique apporteront plusieurs raffinement aux deux théories. On découvre entre autres deux autres forces, les interactions nucléaires faible et l'interaction nucléaire forte; mais on réussit assez rapidement à unifier la force électromagnétique avec la force nucléaire faible dans le cadre de la théorie électrofaible et à décrire la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique (théorie de la force nucléaire forte) avec des formalismes mathématiques similaires.

En parallèle de ce processus d'unification, un principe d'une importance aussi fondamentale va guider l'ensemble de la physique : le réductionnisme.

Beaucoup de physiciens croient (il s'agit bien d'une croyance) que l'ensemble des sciences expérimentales peut-être "dédit", tout du moins en principe, des lois de la physique des particules élémentaires. En gros, on pourrait retrouver toutes les lois de la biologie grâce à celles de la chimie et celles de la chimie grâce à celles de la physique élémentaire. Ce sont les lois de la physique qui agissent, mais à une autre échelle, avec un plus grand nombre de particules, et dans des configurations particulières; aucun principe nouveau ne serait nécessaire pour rendre compte des lois de la biologie ou de la chimie.

On peut comprendre alors si on considère les concepts d'unification et du réductionnisme non plus séparément mais en même temps, que certains physiciens qui espèrent unifier gravitation et physique quantique en une seule et même théorie, un seul et même formalisme, soient tentés de vouloir appeler cette future théorie la " Théorie du Tout". La "Théorie du Tout", c'est un peu le Grâal des physiciens, et la théorie des super-cordes n'est ni plus ni moins qu'une candidate à ce titre. On comprend mieux dès lors l'intérêt qu'elle peut

représenter alors même qu'elle reste encore une théorie essentiellement spéculative et que les indices expérimentaux sont rares et peu convaincants.

2/ Le principe de base de la théorie des supercordes

Deux des principes de bases de la théorie sont contenus dans le nom de la théorie: super et cordes.

Cordes, c'est parce que dans la TdSC, les particules ne sont pas ponctuelles; ce sont des cordes i.e. des figures géométriques à une dimension, ouvertes ou fermées. L'avantage de la corde par rapport au point, c'est qu'une corde peut vibrer. Elle peut vibrer d'une infinité de façon: amplitude, rapidité (fréquence temporelle), nombre de noeuds (fréquence spatiale), etc. La théorie des supercordes prétend rendre compte de toutes les propriétés usuelles des particules (masse, énergie, charges, spin,...) grâce aux vibrations de la corde. Les interactions entre particules seraient assez similaires aux diagrammes de Feynman que l'on utilise en théorie des champs: interaction signifieraient fusion de deux cordes en une ou séparation d'une corde en deux.

Super, c'est pour supersymétrie, c'est un concept qui affirme que il n'y a pas de différence fondamentales entre les particules matérielles (appelées fermions) comme l'électron et les particules "vecteur de force" (appelées bosons) comme le photon (qui transmet la force électromagnétique). Une des conséquences du principe de supersymétrie, est que chaque boson possède un fermion associé et chaque fermion possède boson associé. Par exemple, le partenaire supersymétrique de l'électron s'appelle le sélectron et le partenaire supersymétrique du photon s'appelle le photino. Pourquoi ne les a-t-on pas encore découvertes me direz-vous ? Eh bien, il faut supposer nous disent les physiciens que ces particules sont beaucoup plus massives que les particules usuelles, et comme vous les savez qui dit masse, dit énergie et l'énergie créée par les accélérateurs de particules actuels ne serait pas suffisante pour faire apparaître ces particules supersymétriques.

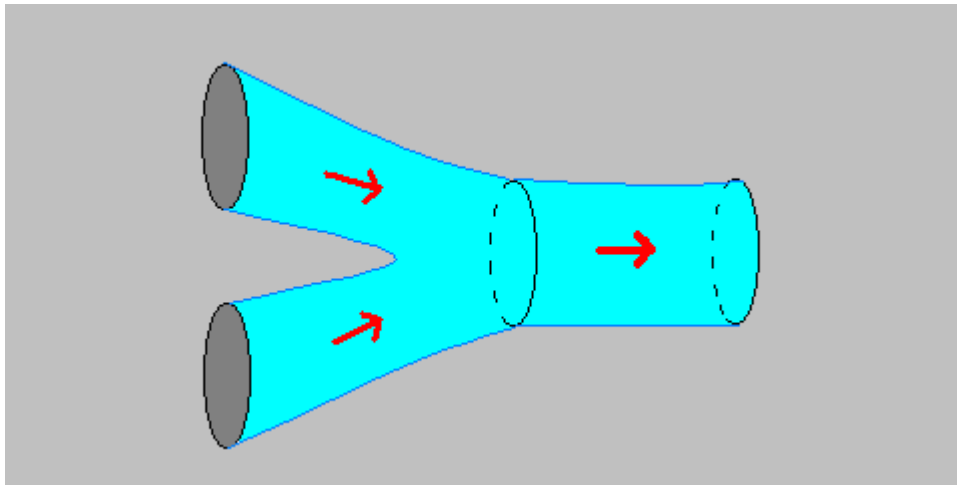
3/ Pourquoi les physiciens mettent tant d'espoir dans la TdSC ?

La TdSC, bien que très lacunaire, possède certaines propriétés intéressantes qui ont encouragé certains à y voir la providentielle TOE.

Tout d'abord, une des principales raisons ayant motivé la recherche d'une autre théorie de la physique corpusculaire est l'unification de la RG et de la PQ. or il se trouve que dans le cadre mathématique de la TdSC, il apparaît toutes sortes de particules parmi lesquelles une particule de spin 2, qui est la signature de l'hypothétique particule vecteur de l'interaction gravitationnelle: le graviton. Cette particule apparaît naturellement et nul n'est besoin de l'introduire artificiellement afin de rendre compte de la force de gravitation, on pourrait dire que la gravitation est une manifestation de la structure de l'espace-temps (mais, bon, selon Etienne Klein, l'espace-temps tel qu'il est défini dans la relativité ne serait aussi qu'une "propriété émergente").

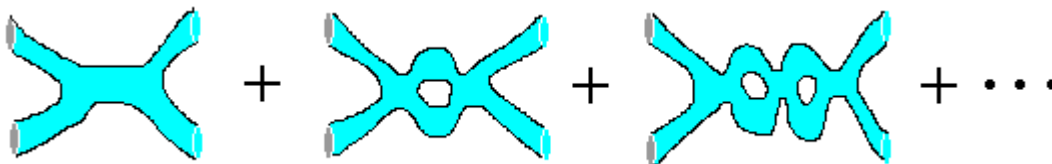
Deuxième bonne raison d'y croire, l'émergence d'une seule théorie des supercordes. En effet, il existe non pas une, mais plusieurs théories des supercordes, assez différentes les unes des autres. Il est difficile d'imaginer qu'une théorie aussi fondamentale que la théorie des supercordes prétend être puisse exister sous 5 formes distinctes (type I, type IIA, type IIB, hétérotique 0(32), hétérotique E8xE8), et que chacune d'entre elles soit LA théorie fondamentale. En 1995, Edward Witten proposa une nouvelle approche du problème en proposant que chacune des 5 (en fait 6, avec la "supergravité à 11D) théories ne soit que plusieurs facettes d'une seule et unique théorie.

Comme je l'ai indiqué plus haut, les cordes peuvent fusionner ou se couper en deux, c'est comme cela qu'elles interagissent. On représente ces phénomènes sur des schémas rappelant les diagrammes de Feynman de la théorie quantique des champs.



Le temps va de la gauche vers la droite. Au départ on a deux cordes distinctes (à gauche), elles se rapprochent l'une de l'autre jusqu'à fusionner et donner une seule corde (à droite). Pour imaginer la séparation d'une corde en deux, il suffit de lire le diagramme dans l'autre sens :-)

L'intensité de l'interaction entre les cordes est réglé par un paramètre: la constante de couplage. C'est elle qui fixe la probabilité pour que les deux cordes issues de la séparation d'une corde de départ se recombinent aussitôt pour donner de nouveau une corde unique. Dans ce cas, le diagramme prend la forme d'une boucle (figure du milieu). Il peut y même y avoir deux (figure de droite), trois, ou plus de boucles avant que les deux cordes ne se séparent "définitivement".



Plus la constante de couplage est grande, plus la probabilité d'avoir des boucles augmente. Quand la constante de couplage est faible (inférieure à 1, en gros), il y a en moyenne moins de boucles et les physiciens utilisent la théorie des perturbations (ce n'est pas sans rapport avec des développements limités, pour ceux qui connaissent) qui permet de faire des calculs avec des formes approchées des équations.

En couplage fort, les approximations ne sont plus valables et les théoriciens sont obligés d'utiliser d'autres outils indépendants de la valeur de ma constante de couplage, tels que les états BPS, pour pouvoir raisonner. Evidemment, ces outils sont beaucoup moins puissants que la théorie des perturbations.

A l'origine de "la deuxième révolution" des supercordes est la découverte par Edward Witten (il s'appuya aussi sur des travaux antérieurs) d'une relation étonnante entre les différentes versions de la théorie. Il découvre en effet que les caractéristiques (masses et charges) de la théorie de type I avec une constante de couplage ρ forte coïncide avec celles de la théorie de type hétérotique O avec une constante de couplage faible (plus précisément, une constante de couplage égale à $1/\rho$). C'est ce qu'on appelle la dualité couplage fort/couplage faible. De même, il découvrit que la théorie IIB est auto-duale (même caractéristiques en couplage fort et en couplage faible). Dans le même esprit, les théories IIA et IIB sont duales pour la dualité grand rayon/petit rayon i.e. les caractéristiques de la théorie IIA sont les mêmes que celles de la théorie IIB dans des univers circulaires de rayons inverses l'un de l'autre. Il en est de même pour les théories hétérotique O et hétérotique E.

D'autre part, les modèles d'univers dans les théories des supercordes suggèrent qu'il y aurait plus de dimensions spatiales que les 3 usuelles. Dans les théories citées plus haut, il existerait

6 dimensions supplémentaires.

Comment se fait-il qu'on ne puisse pas "voir" ses dimensions (à telle point qu'on ne sait pas trop combien il y en a plus !) ?

Ces dimensions seraient des dimensions "enroulées" (alors que les dimensions usuelles seraient étendues). C'est un peu comme tuyau d'arrosage, de loin on a l'impression que c'est un fil à une dimension, mais quand tu te rapproche, tu constates que c'est une surface à deux dimensions, dont une dimension enroulée! Imaginons maintenant une fourmi sur un tuyau d'arrosage; elle peut aller partout sur le fil, mais quand elle va dans la direction non principale, elle se retrouve rapidement à l'endroit d'où elle était partie. Ce serait un peu la même chose dans la "réalité", mais le rayon de courbure des dimensions enroulées serait tellement petit, qu'on arriverait même pas à voir qu'il y a des dimensions enroulées. On peut donc voir ces dimensions un peu comme des degrés de liberté supplémentaires, mais dont on a rapidement fait le tour.

Tout ça pour dire que Witten proposa une 6e théorie pour compléter le tableau: la théorie dite "supergravité à 11 D", qui comme son nom l'indique travaille dans un univers à 11 dimensions (comparé aux 10 dimensions des autres théories). Il établit même un lien entre sa nouvelle théorie et les théories hétérotique E et de type IIA.

Grâce à cette dernière théorie, on voit finalement que toutes les théories sont reliées entre elles. Witten propose alors que les théories ne soient en fait que des facettes différentes d'une seule et unique théorie qu'il baptise la "théorie M". Une des métaphores employées pour imaginer ce paradoxe est celui de la glace, de l'eau liquide et de la vapeur d'eau. Ce sont tous les trois des aspects différents d'une même molécule, l'eau, et pourtant quelqu'un qui n'aurait pas pu assister à la transformation d'un état à l'autre (ou "transition de phase") pourrait croire à l'existence de 3 éléments distincts et indépendants.

Les 6 théories seraient toutes des approximations de la théorie M pour des constantes de couplages faibles.

Une propriété intéressante de la théorie M est que pour les fortes constantes de couplage, on verrait apparaître des particules de dimension supérieure à 1, ce qui intellectuellement est très satisfaisant, puisque après avoir remplacé le modèle de particule ponctuelle classique (dimension 0) par des cordes (dimension 1), il serait dommage de s'arrêter en si bon chemin. On découvre donc des sphères, des hypersphères, etc. Il n'est pourtant pas nécessaire de réécrire toute la théorie car ces particules de dimension supérieure à 1 (membranes, trois-branes, jusqu'aux neuf-branes ...) ont une masse inversement proportionnelle à la constante de couplage ; elles n'ont donc que peu d'influence sur la physique des cordes ordinaire (sic!), quand la constante de couplage est faible, puisque qui dit masse dit énergie (cf. $E=mc^2$), donc difficulté à "produire" de telles particules.

Particule = Trou noir ???

Un résultat intéressant de la théorie des cordes est de permettre de calculer l'entropie d'un trou noir. Bien qu'il n'y ait à mon humble avis encore de preuve formelle de l'existence de tels objets, on peut faire plein de calculs et discuter de leurs propriétés. Stefen Hawking avait déjà calculé l'entropie d'un trou noir grâce à une version légèrement quantifiée de la relativité générale. En gros, l'entropie d'un trou noir serait proportionnel à son aire. La théorie des cordes permet de retrouver ce résultat et a rempli d'espoir la communauté des physiciens des cordes.

D'autres sont même allés plus loin que le simple calcul d'entropie et ont obtenu le truc le plus délirant/marrant que j'ai lu ces derniers mois: une analogie entre trous noir et particules. Si vous avez lu "Une brève histoire du temps" (de Stéphen Hawking, justement), peut-être vous rappelez-vous qu'un trou noir n'est décrit que par un nombre très petit de paramètres. En effet, puisqu'on ne peut pas "voir" à "l'intérieur" d'un trou noir, on ne peut pas connaître sa

structure interne, si jamais il en avait une. On définit donc un trou noir par sa masse, ses charges (électrique, en particulier), son moment cinétique, etc. On voit que ces propriétés sont exactement celles d'une particules (masse, charges, spin) !!! Certains ont donc proposé que trou noir et particules ne soient que deux facettes d'un même objet, que les trous noir ne seraient que de "grosses" particules, et qu'on pourrait même passer continuellement d'une particule à un trou noir, en passant par l'intermédiaire d'un objet de masse "nulle" ! Terrrrrrible.

4/ Conclusion

Bon, c'est bien beau tout ça, mais qu'elle avenir pour la théorie des cordes ? Personne ne peu savoir. Mais, on peu donner quelques pistes.

Le modèle standard de la physique particules semble arriver à ses limites. Si la découverte du boson de Higgs par le CERN durant l'été 2000 est confirmé, on aura découvert la dernière particule manquante du puzzle. Evidemment, tous les problèmes ne sont pas résolus (par exemple, la durée de vie du proton), mais il n'y aurait plus grand chose à chercher de ce côté là.

Mais, la théorie des supercordes prévoit l'existence de particules supersymétriques. C'est vrai que ça arrangerait pas mal de monde, à commencer par les cosmologistes à la recherche de la masse manquante; et puis aussi les physiciens car le principe de symétrie leur tient à coeur de part son aspect esthétique mais aussi parce qu'il a déjà fait preuve de son efficacité et fertilité par le passé.

Le problème avec une théorie telle que la théorie des cordes, c'est que pour l'instant toutes les avancées ont été des avancées théoriques, et que les expériences qui pourraient confirmer ou infirmer certains aspects de la théorie et guider les physiciens sont hors de portée des instruments actuels. C'est pourquoi, avec l'arrêt de la construction du SCC américain, tous les espoirs reposent quasiment sur le futur LHC européen sont la livraison est prévue pour 2005.

Peut-être que les physiciens devront-ils se détourner de notre planète (décidément trop petite pour leurs ambitions) et plonger leur regard dans l'immensité celeste ? En effet, l'astrophysique et la cosmologie pourrait bien apporter les faits expérimentaux qui les aideront à avancer dans la jungle des théories des cordes.

En attendant, les physiciens rongent leur frein et rêvent à des particules supermassiques dans des espaces à 11 dimensions...

NOTES:

Quelques livres à lire avant de vous endormir:

- "L'univers élégant", Brian Greene, Ed. Robert Laffont
- "Une brève histoire du temps", Stephen Hawking
- Un livre sur la relativité d'échelle et l'espace-temps fractal (une théorie "concurrente"):
"La relativité dans tous ses états", Laurent Nottale

Quelques sites si vous avez encore du temps à perdre:

- http://www.cs.brown.edu/people/seh/main_page.html
- <http://www.physics.ucsb.edu/~jpierre/strings/>
- Le site de John Schwartz: <http://www.theory.caltech.edu/people/jhs/strings/>
- Le site de référence: <http://superstringtheory.com/>