

Cordes, particules et cosmologie : un avant Big-Bang est-il concevable ?



Entretien avec Gabriele Veneziano¹

par Paul Caro²

Question :

Vous avez été à l'origine en 1968 de la théorie des cordes. Dans quel sens a-t-elle modifié notre vision des particules élémentaires ?

On connaît dans la Nature quatre types de forces : la force gravitationnelle, les forces électromagnétiques (Maxwell au XIX^{ème} siècle a unifié l'électricité et le magnétisme), la force faible (qui contrôle la fusion nucléaire dans les étoiles, ou la radioactivité), et la force forte ou nucléaire (qui tient ensemble protons et neutrons dans les noyaux). Ces quatre

interactions, dans la théorie conventionnelle, sont décrites au niveau microscopique par l'échange entre particules « élémentaires » d'autres particules « élémentaires » appelées particules « vecteurs » qui varient selon le type d'interaction. Toutes ces particules, vecteur ou non, sont pointiformes, c'est à dire qu'elles n'ont pas de dimensions spatiales (mises à part les incertitudes dues à la mécanique quantique).

La théorie des cordes remplace ces objets sans dimensions par des structures unidimensionnelles, filiformes, que l'on appelle « cordes ». Cela semble être un pas innocent mais il entraîne des conséquences très profondes. Par exemple, dans la théorie conventionnelle, on doit donner pour chaque particule connue ses propriétés séparément, on doit faire un sorte de catalogue des particules au fur et à mesure que l'on en découvre. La théorie des cordes est beaucoup plus économique au point de vue conceptuel : on pense que deux types de cordes, cordes ouvertes (avec des extrémités) et cordes fermées (sans extrémités, c'est à dire avec la forme d'une boucle) suffisent. Ces deux types de cordes avec leurs vibrations décrivent

toutes les particules élémentaires, engendrant ainsi une nouvelle classification de celles-ci. Les cordes sans extrémités correspondent aux vecteurs des interactions de type gravitationnel. Les autres interactions sont portées par des cordes avec des extrémités.

Est-ce que dans cette approche la distinction entre fermions et bosons avec des spins demi-entiers ou entiers est conservée ?

Oui, tout à fait. Dans la première version de la théorie des cordes, il n'y avait que des particules à spin entier. Mais peu après on a réussi à formuler une nouvelle théorie, qui s'appelle la théorie des supercordes, dans laquelle il y a les bosons et les fermions qui, comme on le sait, obéissent à des statistiques différentes. Si on essaie de mettre bosons et fermions ensemble dans une théorie des cordes, une symétrie en découle automatiquement entre le monde des fermions et celui des bosons. Par exemple, il y a des cordes ouvertes et des cordes fermées pour les fermions aussi. C'était la première fois qu'une structure symétrique entre bosons et fermions dérivait d'une approche théorique. Ce que l'on

appelle maintenant la supersymétrie n'est pas encore vérifiée expérimentalement mais elle retient l'attention de la communauté des théoriciens comme de celle des expérimentateurs qui la chercheront très activement avec les nouveaux accélérateurs comme le LHC (Large Hadron Collider) au CERN.

Au delà de « l'économie conceptuelle » les cordes par leur taille finie, par rapport au point sans dimension, arrivent à résoudre des problèmes très importants auxquels s'est confrontée la théorie plus conventionnelle comme, par exemple, le problème des infinis. Ce problème a l'air d'un déjà-vu : en 1900 Planck avait introduit sa constante h dans le cas de l'émission de radiations par un corps noir pour obtenir une quantité d'énergie finie. Dans le même esprit l'introduction par la théorie des cordes d'une longueur fondamentale, la taille caractéristique l de la corde qui vaut approximativement 10^{-34} m, permet de trouver une solution au problème des infinis dans la théorie quantique des champs conventionnelle (la divergence dite ultra-violette) et donc de se passer de la nécessité d'éliminer des infinis à travers des procédures mathématiques un peu douteuses.

¹ Associé étranger de l'Académie des sciences, professeur à la Division théorique du CERN.

² Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS.

En outre, si l'on peut par ces moyens « magiques » faire disparaître des infinis pour les interactions électromagnétiques, faibles et nucléaires, on ne peut pas en faire autant pour les interactions gravitationnelles. Personne n'a jamais réussi à éliminer les infinis dans la théorie quantique de la gravitation. Avec les cordes cela devient possible. C'est la raison pour laquelle les théoriciens prennent au sérieux la théorie des cordes. Pour la première fois on peut mettre ensemble, sans créer des incompatibilités, les deux piliers de la physique du siècle dernier, la mécanique quantique d'une part, et la théorie de la gravitation d'Einstein, d'autre part.

Quels problèmes pose la question des dimensions des cordes ?

En effet ce mariage entre la théorie quantique d'un côté et la théorie de la gravitation de l'autre n'est pas automatique. Pour la cohérence interne de la théorie on a besoin de rajouter d'autres dimensions spatiales qui peuvent être si petites que l'on en observe seulement des conséquences indirectes. Aux énergies ordinaires, même celles des accélérateurs, ces dimensions ne donnent pratiquement aucun effet observable, mais elles sont nécessaires au plan théorique. Dans le cas des supercordes, on a besoin de six dimensions supplémentaires très très petites, leur taille étant de l'ordre de grandeur de celle des cordes, l . Ce qui explique que pour beaucoup de phénomènes, pourvu que l'on travaille à des énergies suffisamment basses, on ne peut pas faire la différence entre une corde et un point, ou voir les effets de ces dimensions supplémentaires. Mais pour des énergies élevées, telles que celles qui sont associées aux premiers instants de l'Univers, cette longueur l peut jouer un rôle très important...

Quelles sont les implications de la théorie des cordes pour la cosmologie ?

La cosmologie c'est l'ultime frontière de la physique parce que les quatre forces entrent en jeu simultanément. Il y a de grands mystères dans la cosmologie : l'Univers, que nous étudions aujourd'hui par des mesures de plus en plus précises, est très homogène à grande échelle. Il y a bien sûr des structures dans l'Univers : des planètes, des étoiles, des galaxies, des amas de galaxies, mais elles se ressemblent partout dans l'Univers. En plus, il y a un rayonnement fossile, la radiation à 2,7 K, qui est très homogène : elle est la même dans toutes les directions du ciel à une part pour cent mille près. Or il est très difficile d'expliquer cette homogénéité dans une cosmologie conventionnelle. Deux choses font des difficultés : d'abord c'est qu'il

il y a eu un début au temps. Tout commence avec le *big-bang* à $t = 0$. Il n'y a rien avant : $t < 0$ n'est pas bien défini. Et, deuxième chose, l'Univers est depuis $t = 0$ dans un état d'expansion décélérée, c'est à dire une expansion rapide d'abord puis progressivement plus douce.

Or, l'Univers que l'on observe aujourd'hui, a une taille d'environ 10^{26} m. Dans la cosmologie conventionnelle sa taille initiale, tout de suite après le *big-bang*, était bien sûr petite mais pourtant énorme par rapport à la distance que la lumière, avec sa vitesse grande mais finie, avait pu parcourir depuis $t = 0$. La lumière n'a parcouru qu'une distance de 10^{32} m alors que l'Univers, lui, mesure déjà un centimètre. L'Univers à ce stade consiste donc de $(10^{30})^3 = 10^{90}$ régions (la puissance 3 étant liée au fait que on doit passer des dimensions linéaires au volume) qui n'ont jamais eu le temps de communiquer entre elles ! S'il y avait à ce moment là une quelconque inhomogénéité, il n'y avait aucun moyen de l'éliminer par la suite. Il faut donc en conclure que les conditions initiales étaient très très homogènes. A priori, la probabilité d'un tel état initial est très faible, pratiquement nulle.

Il y a deux possibilités pour résoudre ce problème. On peut, tout en gardant une origine du temps, abandonner l'idée d'une expansion toujours décélérée et dire que, dans l'histoire primordiale de l'Univers, il y a eu une période d'expansion accélérée. Ou alors, deuxième hypothèse, dire que $t = 0$ n'était pas le début du temps : il y a eu quelque chose avant qui a produit le *big-bang* ou quelque chose qui lui ressemble.

Dans le premier cas, on a conçu les modèles inflationnistes standards, où, très peu après $t = 0$, l'Univers était très petit, plus petit que la distance parcourue par la lumière.

Dans le deuxième cas, si on admet que $t = 0$ n'est pas le début des choses, on a plus de « temps » à disposition pour homogénéiser l'Univers bien avant le *big-bang* !

La raison pour laquelle on a postulé un début du temps est bien claire si l'on applique la théorie classique d'Einstein de la gravitation. En remontant en arrière dans le temps on arrive à une singularité, un instant ($t = 0$ par convention) pour lequel plusieurs grandeurs physiques tendent vers l'infini et donc, aller au delà, mathématiquement cela n'a pas de sens. Mais tout près de $t = 0$ les phéno-

mènes quantiques ne peuvent pas être négligés. Il existe un temps critique, d'environ 10^{-43} secondes, que l'on appelle le temps de Planck, qui définit la limite de validité de la théorie classique. Entre $t = 0$ et $t = 10^{-43}$ secondes on ne peut pas faire confiance à la théorie classique, on sait que les effets quantiques sont importants. Avant la théorie des cordes, on n'avait pas les moyens de mettre ensemble la théorie quantique et la gravitation. On s'est donc contenté de la théorie classique et de la nécessité, dans cette théorie, d'un début du temps. C'était une hypothèse pas vraiment justifiée théoriquement, une sorte de dogme..., accepté peut-être un peu trop rapidement.

Avec la théorie des cordes, on peut faire d'autres propositions. La singularité du *big-bang* correspond à un instant où toutes les tailles tendent vers zéro, mais cela n'a pas trop de sens dans une théorie où tout objet a une taille finie. Des expériences de pensée suggèrent que l'on peut avec les cordes éliminer la singularité. Dans ces nouveaux modèles cosmologiques il y a d'abord une évolution d'un état primordial vers le *big-bang* avant de continuer avec la cosmologie classique du *big-bang* vers l'Univers d'aujourd'hui. La chose la plus difficile est de mettre ensemble ces deux phases qui sont séparées par une brève période de grande courbure de l'espace, de grande densité, de grande température. Même si « grand » ne veut pas dire « infini », les problèmes techniques pour décrire cette « transition » restent formidables. Il y aura, pendant cinq mois fin 2003, un « workshop » à Santa Barbara en Californie sur la cosmologie des cordes où ces questions vont sûrement être discutées. En outre, plusieurs groupes proposent différents « scénarios » sur ce qu'aurait pu être l'Univers avant le *big-bang*. Au lieu d'être de la pure métaphysique l'évolution de l'Univers avant le *big-bang*, s'il y a eu un avant *big-bang*, implique des conséquences pour l'Univers d'aujourd'hui et pour les observations actuelles ou à court terme.

Quelles sont les mesures expérimentales qui peuvent prouver cette théorie ?

Je pense que la cosmologie est le meilleur domaine d'où extraire des prévisions pour tester la théorie. Il y a d'autres possibilités mais, comme il est difficile d'aller à des énergies suffisamment grandes avec des accélérateurs, on doit se contenter d'observer des conséquences indirectes, par exemple des fluctuations des constantes de la nature comme la constante de Newton ou de Coulomb ou la constante de structure fine. D'après la théorie des cordes elles pourraient varier dans l'espace et dans le temps. Si on trouvait, par exemple, que

la constante de structure fine varie un peu dans le temps, cela appuierait la théorie des cordes.

Par contre, par son expansion, l'Univers représente lui-même l'accélérateur le plus puissant que l'on puisse imaginer. Les photons observés aujourd'hui étaient si énergétiques dans l'Univers primordial que la théorie des cordes a pu laisser des traces sur leur propriétés. Or, à cause d'un phénomène bien connu de « congélation » de certaines quantités pendant les très longues périodes cosmologiques, ces propriétés sont encore observables aujourd'hui. On pense par exemple que la structure de l'Univers à grande échelle, telle que les galaxies et leurs amas, résulte de l'évolution de certaines inhomogénéités de nature quantique présentes juste après le *big-bang* pendant la phase d'inflation. Par contre, dans un modèle qui inclut un épisode inflationniste avant le *big-bang*, les observations actuelles nous donnent des informations sur cette préhistoire.

Est-ce qu'il y a des expériences qui peuvent mettre la théorie en difficultés ?

Je pense que oui même si ce n'est probablement pas pour tout de suite. Voici quelques exemples :

Dans l'inflation standard la production d'ondes gravitationnelles est trop faible pour être observée. Par contre la théorie pré-*big-bang* prédit un fond stochastique d'ondes gravitationnelles qui serait mesurable dans la deuxième phase de développement des interféromètres gravitationnels du type de VIRGO (collaboration franco-italienne à Pise) ou de LIGO (projet américain), la sensibilité des détecteurs de la première phase n'étant pas encore suffisante. Ensuite, il y a dans la cosmologie pré-*big-bang* un mécanisme pour générer des champs magnétiques à l'échelle des galaxies, ce qui n'est pas le cas dans la cosmologie inflationniste classique. Ces champs magnétiques ont bien été observés, mais leur origine reste mystérieuse. La mesure des inhomogénéités dans la température du rayonnement cosmique est un troisième critère. L'inflation standard a ses prédictions qui sont pour l'instant bien vérifiées. La cosmologie pré-*big-bang* fait des prédictions légèrement différentes notamment au niveau de la polarisation du rayonnement.

Il y a donc toute une batterie de tests potentiels qui peuvent mettre en crise l'un ou l'autre modèle ■