

La cosmologie: un laboratoire pour la théorie des cordes

Pierre VANHOVE



Institut des Hautes Études Scientifiques
35, route de Chartres
91440 – Bures-sur-Yvette (France)

Novembre 2009

IHES/P/09/50

La cosmologie : un laboratoire pour la théorie des cordes¹

Pierre Vanhove

IHES, Le Bois-Marie, 35, route de Chartres, F-91440 Bures-sur-Yvette, France
Institut de Physique Théorique, CEA/Saclay, F-91191 Gif-sur-Yvette, France

Introduction

2009 est l'année internationale de l'astronomie, célébrant le 400^{ème} anniversaire des observations astronomiques par Galileo Galilei au moyen d'un télescope optique.

L'astronomie est l'une des plus anciennes sciences fondamentales. L'observation du Ciel permet de déduire des informations importantes sur le monde *visible* dans lequel nous vivons. Nous donnerons une définition précise de ce que nous entendons par monde visible ultérieurement dans ce texte. Aristote, entre 384 et 382 avant Jésus-Christ, sachant que les éclipses lunaires sont dues au passage de la Lune dans l'ombre portée de la Terre et remarquant que celles-ci ont toujours la forme d'arcs de cercle, en déduisit que la Terre est ronde. Constatant que certains astres sont visibles en Égypte ou à Chypre mais ne le sont pas dans les régions septentrionales, Aristote conclut que la Terre est une sphère de modeste dimension. Ératosthène (276-194 avant Jésus-Christ) savait qu'à midi le jour du solstice d'été, le 21 juin, le Soleil se trouve exactement à la verticale d'un puits de Syène (Assouan de nos jours) en Égypte, à cause de la proximité de Syène avec le tropique du Cancer. En observant la réflexion du Soleil dans un puits à Alexandrie, il mesure que la position du Soleil fait avec la verticale un angle de 7 degrés. Sachant que Syène est distante de 740 kilomètres (5 000 stades) d'Alexandrie il en déduisit que le rayon de la Terre est de 6 800 kilomètres (40 000 stades). Ce qui est correct à 8 % près. Aristarque de Samos (310-230 avant Jésus-Christ) ayant compris que le Soleil est beaucoup plus gros que la Terre conclut logiquement que la Terre tourne autour du Soleil. Ce fait ne sera accepté que 1 700 ans plus tard avec les travaux de Copernic. C'est en analysant les mesures très précises et détaillées de la position de Mars et des autres planètes par Tycho Brahé (1545-1601) que Johannes Kepler (1571-1630) put énoncer les trois règles du mouvement des planètes qui ont amené Isaac Newton (1643-1727) à formuler sa loi d'attraction universelle. De nos jours, même si les méthodes se sont sophistiquées grâce à l'élaboration d'appareils d'observations astronomiques depuis la Terre et l'espace explorant les signaux du domaine des ondes radio aux rayons gamma, la démarche suivie pour comprendre notre univers visible est la même que celle initiée par les Grecs.

Au 20^{ème} siècle, une profonde révolution scientifique a eu lieu avec l'élaboration de la théorie de la relativité générale d'Einstein qui a modifiée notre vision de l'espace et du temps ainsi que notre conception de l'histoire de notre univers. Dès la formulation de cette théorie, Einstein a lui-même proposé des tests expérimentaux. Le 18 novembre 1915 dans un manuscrit adressé à l'académie de Prusse, il montre que sa théorie permet de résoudre le problème de l'avancée du périhélie de Mercure, et il explique que sa théorie prédit la courbure de la trajectoire des rayons lumineux. À la sortie de la première guerre mondiale en 1919 Sir Arthur Eddington (1882-1944) et Sir Frank Dyson (1868-1939) ont entrepris d'obtenir une mesure de la déviation des rayons lumineux en observant les éclipses solaires totales depuis les îles de Sao Tomé-et-Principe au large du Gabon et Sobral, Ceara au large du Brésil. Les résultats obtenus confirment assez bien la prédiction de la relativité générale. En fait si la précision et la netteté des photographies n'étaient pas de qualité suffisante pour conclure de façon

¹ IPHT-T-09-159, IHES-P-09-50. Compte-rendu d'un exposé donné au colloque « Forme et origine de l'Univers » qui s'est tenu à l'université de Lyon-3 du 12 au 14 octobre 2009.

certaine à la mise en évidence de l'effet de courbure des rayons lumineux, ce test a été d'une importance capitale dans l'acceptation de la théorie. Par exemple, de nos jours, il est capital de tenir compte des effets de relativité restreinte et générale pour le bon fonctionnement des GPS.²

Les années 2000-2001 marquent le début d'une ère de cosmologie de précision grâce à l'accumulation de mesures de grandes précisions des caractéristiques physiques de notre Univers. Ce qui a amené à l'élaboration d'un modèle cosmologique standard³ dont les points principaux sont les suivants :

- Vitesse d'expansion de l'univers déterminée par la constante de Hubble $H \sim 74.2$ km/s/Mpc
- Matière ordinaire (proton, neutron, électrons ...) : 5 %
- Matière noire froide non relativiste invisible (baignant les galaxies et les groupements de galaxies, aidant à la formation des structures) : 25 %
- Énergie noire : 70 %
- Univers spatialement plat et très homogène
- Perturbations initiales gaussiennes, adiabatiques et presque invariantes d'échelle

Le 3 juillet 2009, le satellite Planck⁴ a atteint son orbite autour du point de Lagrange L2 et a livré le 29 août 2009 ses premières images du fond diffus cosmologique relique à 2.7 degrés Kelvin qui fournissent une photographie de notre univers au moment où la matière et la lumière se sont séparées. Ce satellite, par une mesure très précise des anisotropies du fond cosmologique relique, permettra de déterminer avec une précision accrue les valeurs des paramètres du modèle standard cosmologique ainsi que les écarts au spectre gaussien.

Toutes ces caractéristiques sont celles de la partie *visible* accessible aux mesures et aux observations de notre univers. Avec l'amélioration des méthodes d'observation nous avons pu pousser plus loin l'exploration du cosmos, mais quelles que soient les évolutions technologiques il est impossible d'accéder à des informations en dehors du volume fini de notre univers observable déterminé par le rayon de Hubble $R_H \sim 10^{25}$ m. Ce volume résulte de l'évolution de notre univers depuis le Big Bang survenu il y a environ 13.7 milliards d'années⁵.

Comme la découverte que la Terre orbite autour du Soleil et l'analyse des trajectoires des planètes du système solaire ont amené Newton à formuler la loi universelle de l'attraction des corps, il est naturel de se demander ce que la cosmologie actuelle indique sur l'existence d'un modèle unificateur de la physique fondamentale.

Un problème important de la physique fondamentale moderne est la compréhension de la compatibilité entre les deux piliers de la physique du 20^{ème} siècle que sont la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale.

Dans ce texte nous donnerons des raisons pourquoi il faut considérer un cadre théorique unique réunissant ces deux concepts amenant à la quantification de la gravitation. Nous présenterons les caractéristiques fondamentales que doivent satisfaire toutes théories de gravité quantique et nous

² T. Damour *Si Einstein m'était conté* Le Cherche Midi (2005)

³ Pour des détails relatifs à ce modèle nous référons à la page Wikipedia http://fr.wikipedia.org/wiki/Modèle_standard_de_la_cosmologie

⁴ Le site internet de la collaboration Planck est accessible ici <http://public.planck.fr/>

⁵ Voir le texte de Julien Lesgourgues dans ce volume

argumenterons que la théorie des cordes⁶ satisfaisant à ces critères fournit un cadre naturel et cohérent. Nous détaillerons les effets physiques attendus, ce que nous illustrerons en présentant un modèle pour l'accélération de l'expansion de l'univers. Nous expliquerons qu'un tel modèle ne peut pas être compris dans le cadre d'une théorie des champs effective de la gravitation mais nécessite une théorie fondamentale comme la théorie des cordes pour être correctement défini.

Pourquoi quantifier la gravitation ?

Les aspects classiques de la théorie de la relativité générale sont vérifiés avec grande précision de nos jours. Nous en avons mentionné quelques manifestations dans l'introduction de ce texte.

La première raison pour quantification la gravitation est un argument de naturalité. Les équations d'Einstein indiquent que toute distribution de matière ou d'énergie, caractérisée par un tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$ déforme la géométrie de l'espace-temps caractérisée par le tenseur d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R$$

selon l'équation

$$G_{\mu\nu} = 8\pi \frac{G_{\text{Newton}}}{c^4} T_{\mu\nu} \quad 0 \leq \mu, \nu \leq 4$$

Cette équation s'applique aux phénomènes physiques à toutes les échelles du microscopique au macroscopique. Comme le tenseur énergie-impulsion est fonction des interactions fondamentales qui sont quantifiées selon les règles de la mécanique quantique et la théorie quantique des champs, il est naturel de supposer que le membre de gauche de l'équation d'Einstein est aussi régi par les lois de la mécanique quantique et qu'il faut ainsi quantifier la gravitation.

Un autre argument est la correspondance AdS/CFT entre théories quantiques des champs et gravité quantique découverte⁷ par Juan Maldacena et formulée par Igor Klebanov, Steven Gubser et Alexander Polyakov en 1997. Cette correspondance se formule en termes d'un principe holographique qui indique que les degrés de liberté fondamentaux d'une théorie de gravité quantique dans un volume d'espace fini sont distribués sur une surface bordant ce volume. Ces degrés de liberté sur la surface s'organisent en une théorie des champs sans gravité, comme la Chromodynamique Quantique (QCD) ou son cousin avec le nombre maximal de supersymétries dont les particules élémentaires portent un grand nombre de nombres quantiques. En 1974, G. 't Hooft a montré que ces théories sur le bord se décrivent par des graphes ressemblant fortement à ceux d'une théorie des cordes, mais la relation précise avec la théorie des cordes restait à comprendre. Ce fut Alexander Polyakov qui remarqua que cette théorie des cordes évolue dans un espace courbe de type anti-de-Sitter sur le bord duquel sont définies les théories de jauge.⁸ Selon cette correspondance la physique des trous noirs classiques dans un espace courbe et la limite classique des théories de jauge sur le bord de cet espace fournissent deux limites classiques différentes de la même théorie quantique. La taille de cet espace est déterminée par la quantité de nombres quantiques portés par les particules élémentaires. Pour que cet espace ait la taille de notre univers visible, il faudrait que les particules élémentaires soient caractérisées par 10^{60}

⁶ Dans le texte lorsque nous faisons référence à la théorie des cordes, il faut en fait entendre la théorie des supercordes définie dans un espace décadimensionnel qui est la seule version quantique cohérente de cette théorie. Les fondements de cette théorie sont présentés dans le livre de M.B. Green, J.H. Schwarz et E. Witten *Superstring Theory* (Cambridge Monographs on Mathematical Physics, 1988)

⁷ Juan Maldacena *La gravité est-elle illusion ?* Pour la Science N°339 – Janvier 2006

⁸ A.M. Polyakov *The Wall of the Cave* Int.J.Mod.Phys.**A14**:645-658,1999. [hep-th/9809057]

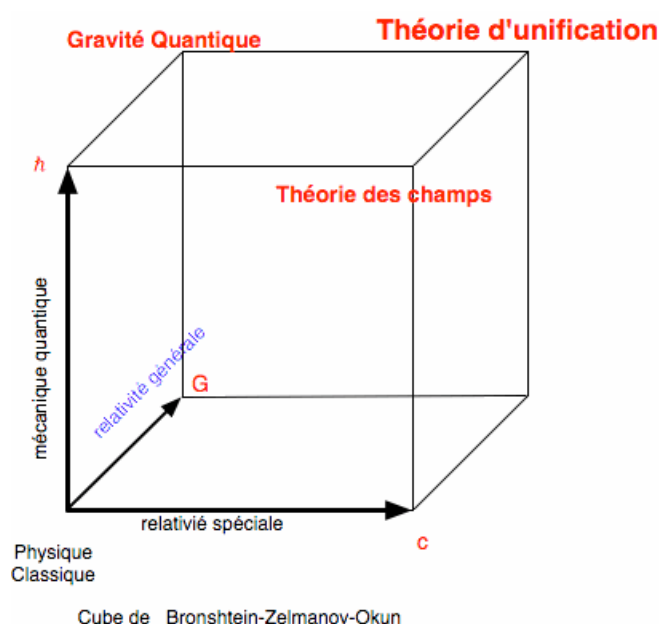
nombre quantiques. Selon cette correspondance il serait équivalent de décrire la dynamique et les interactions des particules fondamentales par une théorie de jauge ou par la gravité quantique donnée par une théorie des cordes dans l'espace de type anti-de-Sitter. Cette correspondance initialement formulée dans le cadre théorique idéalisé d'une physique sur le bord décrite par une théorie de jauge conforme (CFT) maximale supersymétrique. On ne connaît pas le cadre théorique décrivant notre univers actuel régi par les quatre forces fondamentales. Il semble néanmoins possible de construire des configurations gravitationnelles duales à des systèmes physiques plus réalistes comme les plasmas de quarks et de gluons créés au *Relativistic Heavy Ion Collider* à Brookhaven aux USA ou des systèmes de fermions fortement couplés modélisant des phases supraconductrices de la matière. La pertinence théorique et expérimentale d'une description gravitationnelle duale à la physique en couplage fort reste encore à démontrer.

Nous avons ici une manifestation des nombreuses dualités présentes dans la description des effets de physique fondamentale, à commencer par la dualité onde corpuscule des états quantiques, et les multiples dualités assurant l'unité de la théorie des cordes.

À quelles échelles espérons-nous devoir faire appel aux effets de gravité quantique ?

Pour répondre à cette question, il est utile de faire référence au cube des théories⁹ de Bronshtein, Zelmanov et Okun qui représente les différents régimes de la physique. Sur les dimensions de ce cube sont données par la vitesse de la lumière c qui régit les effets de relativité restreinte, la constante de Newton G_{Newton} qui régit les effets gravitationnels de la relativité générale, et la constante de Planck $\hbar$ qui régit les effets de la mécanique quantique.

La physique quantique se situe sur l'axe vertical, la physique relativiste sur l'axe horizontal et les effets gravitationnels de courbure de l'espace sur l'axe oblique de profondeur du cube représenté dans la figure ci-dessus.



Une théorie fondamentale d'unification doit décrire tous les phénomènes physiques dans tous les régimes situés importe où à l'intérieur de ce cube.

À cause des valeurs numériques mesurées¹⁰ de la vitesse de la lumière $c = 299\,792\,458\,\text{m s}^{-1}$, de la constante de Planck $\hbar \sim 1.054\,571\,8 \cdot 10^{-34}\,\text{kg m}^2\text{s}^{-1}$ et de la constante de Newton $G_{\text{Newton}} \sim 6.674\,30 \cdot 10^{-11}\,\text{m}^2\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ quotidiennement nous ne faisons l'expérience que du coin inférieur gauche de ce cube.

En 1900,¹¹ Max Planck a montré que l'on attend des effets de gravité quantique importants à des distances de l'ordre de la longueur de Planck

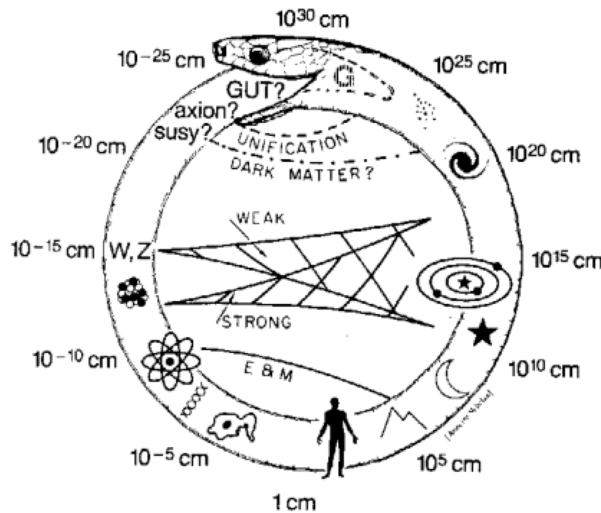
$$\ell_4 = \sqrt{\frac{\hbar G_{\text{Newton}}}{c}} \sim 1.6 \cdot 10^{-33}\,\text{cm}$$

Ce qui correspond à une énergie caractéristique de l'ordre de

$$E_{\text{Planck}} = \frac{\hbar c^3}{G_{\text{Newton}}} \sim 1.22 \cdot 10^{19}\,\text{GeV}$$

Avec une distance caractéristique si faible, ou une énergie caractéristique aussi élevée, les effets de gravité quantique semblent désespérément inaccessibles à l'expérience.

En fait, cet argument, souvent invoqué, n'est pas correct à cause de l'universalité de la gravitation qui implique qu'elle couple à *toutes les formes de la matière, à toutes les densités d'énergie, à toutes les échelles*. Ainsi, on ne doit pas penser les grandes échelles cosmologiques et les courtes échelles microscopiques comme deux extrémités infiniment éloignées de la physique, mais comme deux points d'un cercle connectés par la gravitation. Ce rôle particulier joué par la gravitation est parfaitement représenté par l'*Ouroboros de la physique fondamentale* conçu par Sheldon Glashow donné dans la figure suivante. Nous allons expliquer que la cosmologie est un domaine où des effets de gravité quantiques doivent jouer un rôle important.



⁹ L.B. Okun, *The fundamental constants of physics*, Sov. Phys. Usp. **34** (1991) 818

¹⁰ Voir le site internet du Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/>

¹¹ Max Planck *Über irreversible Strahlungsvorgänge* Annalen der Physik **1** (1900) p.p. 69-122

Quels problèmes peuvent être résolus par la gravité quantique ?

Le cadre formel d'une théorie cohérente et fondamentale de la gravitation quantique permet d'analyser les cinq questions suivantes. Il y a bien sûr d'autres questions que l'on peut analyser en relation avec la physique des particules, mais nous ne discutons dans ce texte que les modèles cosmologiques.

L'observation dans le fond cosmologique relique d'une extrême homogénéité des fluctuations de température entre des zones causalement indépendantes, la platitude de l'univers visible, et le problème de l'horizon sont naturellement expliqués par un mécanisme d'inflation¹² qui suppose qu'une petite région causalement connectée de l'univers primordial a gonflé exponentiellement pour engendrer tout l'univers observable. Les théories d'inflation sont naturellement définies dans le cadre des théories d'unification dont l'échelle d'énergie caractéristique est de l'ordre de 10^{16} GeV qui n'est qu'un millièème de l'énergie de Planck où les effets de gravité quantique sont importants. Ainsi les écarts à l'homogénéité du spectre du fond diffus relique cosmologique générés quelques instants après le Big Bang contiennent des informations sur la physique à l'échelle de Planck. Ces inhomogénéités ont engendré les structures macroscopiques de notre univers.

La théorie des cordes ne permet pas de déterminer uniquement les caractéristiques de notre univers et il est estimé¹³ que la théorie a un très grand nombre de solutions possibles. L'existence d'un grand nombre de solutions, qui est dû au couplage à la gravité, n'est pas un problème en soi, mais la difficulté actuelle d'exhiber une solution réaliste s'approchant des caractéristiques de notre univers microscopique et macroscopique est plus dérangeante. En fait, le recours aux arguments anthropiques, par certains membres de la communauté scientifique, est plus un aveu d'échec qu'un cadre scientifique bien défini.

Non seulement notre univers est en expansion, mais en 1998 les équipes du *Supernova Cosmology Project* et du *High-Z supernovae search* ont mis en évidence que l'expansion de notre Univers est en phase d'accélération. Cette accélération de l'expansion trouve son origine dans la densité d'énergie noire (ou une constante cosmologique) qui baigne notre univers qui agit comme une sorte de « force d'antigravité » qui pousse l'univers à s'étendre. Nous donnerons plus bas un modèle tiré de la théorie des cordes qui explique ce phénomène par un effet de dilution de la force gravitationnelle dans des dimensions supplémentaires infinies.

Une description semi-classique des trous noirs prédit que ceux-ci émettent un rayonnement quantique amenant à une perte d'information et une violation de l'unitarité de la théorie.¹⁴ Seule une théorie quantique fondamentale de la gravité quantique permet d'analyser cette question et de statuer sur l'évolution des trous noirs.

Quelle est la réalité des dimensions supplémentaires prédites par la théorie des cordes et la description holographique, puisque nous faisons quotidiennement l'expérience de trois dimensions d'espace ? Le principe holographique présenté plus haut indique que ces dimensions supplémentaires sont en correspondance avec les échelles d'énergie auxquelles nous examinons les phénomènes physiques. Elles fournissent une représentation géométrique des degrés de liberté fondamentaux de la physique

¹² Voir les textes de Philippe Brax et Julien Lesgourgues dans ce volume

¹³ M.R. Douglas, *The statistics of string/M theory vacua*, JHEP 0305, 046 (2003) [arXiv:hep-th/0303194].

¹⁴ S.W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, Commun. Math. Phys. **43**, 199 (1975) [Erratum-ibid. **46**, 206 (1976)].

dans un régime de couplage fort. Nous commenterons l'aspect ontologique de ces dimensions supplémentaires dans la conclusion de ce texte.

Quelle théorie de la gravité quantique ?

Afin de bâtir une théorie quantique de la gravitation quantique, nous recherchons une théorie satisfaisant trois critères fondamentaux et incontournables. Pour que cette théorie quantique soit prédictive il est nécessaire qu'elle soit *renormalisable* (en fait sans divergences à courtes distances pour une théorie fondamentale) ainsi elle ne contiendra qu'un nombre fini de paramètres corrigés par des corrections quantiques. Elle doit aussi être *unitaire* afin qu'aucune information ne soit perdue lors de la transformation des états quantiques. Et finalement, elle doit respecter *l'invariance de Lorentz*.

Si l'on impose que deux de ces trois conditions, il est possible de construire de nombreuses « théories » de la gravité quantique qui ne sont pas toutes cohérentes. Par exemple, certaines approches sacrifient l'invariance de Lorentz sous le prétexte de la quantification de la géométrie en cubes élémentaires de la taille de la longueur de Planck ℓ_4 . Mais même une perte d'invariance de Lorentz aux très courtes échelles a des effets macroscopiques désastreux avec la propagation de différentes particules fondamentales à des vitesses différentes de la vitesse de la lumière. La collaboration FERMI a récemment publié dans *Nature* les résultats de ses observations confirmant l'absence de violation d'invariance de Lorentz jusqu'à des énergies de l'ordre de la masse de Planck.¹⁵

En théorie quantique des champs, tout objet classique est habillé par un nuage de fluctuations du vide quantique. La somme de ces effets amène souvent des infinités mathématiques qu'il faut soustraire selon le procédé de renormalisation. Ainsi les grandeurs physiques, comme la charge ou la masse des particules, dépendent de l'échelle d'observation. Le principe de renormalisation implique une description effective des phénomènes de la physique valable dans un régime donné d'énergie, avec la séparation entre les effets physiques infrarouges à très grande distance et les effets ultraviolets à très courte distance. Les caractéristiques d'un même système physique examiné à différentes échelles évoluent selon les équations du groupe de renormalisation.

La théorie des cordes satisfait tous ces critères fondamentaux. De façon différente aux théories ponctuelles des champs, il n'est pas possible en théorie des cordes d'accéder à des dimensions spatiales arbitrairement faibles. Si l'on essaie de comprimer une corde dans un petit volume d'espace-temps au-delà d'une taille minimale fixée par l'extension de la corde, cette dernière augmentera les dimensions spatiales de la géométrie ambiante afin d'y relâcher l'énergie accumulée. Ce processus appelé dualité,¹⁶ relie des géométries de petite taille caractéristique avec des géométries de grandes tailles, mais aussi ouvre des dimensions spatiales supplémentaires. Une première conséquence est un lissage de la géométrie à très courte distance ce qui assure que la théorie est finie sans divergences. Une deuxième conséquence est que la géométrie de l'espace-temps ambiant n'est qu'une notion effective approximative, et la distinction entre grandes et courtes échelles est essentiellement perdue dans la géométrie quantique vue par la théorie des cordes. Également, les vibrations des cordes sont autant d'excitations que l'on peut associer aux particules fondamentales. Lorsque les extrémités des cordes ouvertes sont contraintes à évoluer sur un hyperplan quadridimensionnel elles donnent naissance aux interactions entre la matière selon la description holographique de notre univers présentée précédemment.

¹⁵ A.A Abdo et al. *A limit on the variation of the speed of light arising from quantum gravity effects*, *Nature* October 2009

¹⁶ J.H. Schwarz, *Lectures on superstring and M theory dualities*, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **55B**, 1 (1997) [arXiv:hep-th/9607201].

Il est intéressant de remarquer que la théorie des cordes est formulée au moyen d'une théorie de gravité quantique en deux dimensions pour définir la gravité quantique dans l'espace ambiant en dix dimensions.¹⁷

Est-il possible de concevoir une formulation fondamentale de la gravité quantique basée sur un formalisme de théorie des champs sans faire appel à la théorie des cordes ? On peut se demander si la théorie de supergravité maximale construite¹⁸ en 1978 peut fournir une théorie fondamentale ponctuelle des champs de la gravité quantique. Sous l'hypothèse (peu probable¹⁹) que cette théorie est finie en perturbation, elle satisferait aux trois critères énoncés ci-dessus. Mais comme théorie de la gravitation, elle doit décrire les régimes à très hautes énergies où sont produits des trous noirs. Malheureusement, cette théorie ponctuelle des champs ne peut pas décrire ces trous noirs, car ils impliquent des états quantiques qui nécessitent la théorie des cordes.²⁰

Application : l'accélération de l'expansion de l'univers

Dans cette partie nous présentons un modèle réalisé en théorie des cordes pour l'accélération de l'expansion de l'univers. Cette accélération de l'expansion de l'univers peut s'expliquer si la force de gravitation devient plus faible aux échelles de l'ordre de la taille de Hubble $R_H \sim 10^{25}$ m de notre univers visible.

En 2000 Dvali, Gabadadze, et Porrati (DGP) ont proposé²¹ un mécanisme qui modifie la gravitation aux grandes distances en la diluant dans une dimension supplémentaire d'extension infinie. Puisque la gravitation peut se propager aussi bien dans les dimensions supplémentaires que celle de notre espace, les équations d'Einstein, données au début de ce texte, sont modifiées car elles font cette fois intervenir le tenseur d'Einstein $G_{\mu\nu}$ de la gravitation ordinaire à quatre dimensions et celui $G_{\mu\nu}^{(D)}$ dans l'espace multidimensionnel ambiant selon l'équation modifiée

$$\delta(y) G_{\mu\nu} + R_c^{D-4} G_{\mu\nu}^{(D)} = 8\pi \frac{G_{\text{Newton}}}{c^4} T_{\mu\nu} \delta(y)$$

La fonction $\delta(y)$ indique la localisation sur l'espace quadridimensionnel. Pour des distances faibles devant la valeur du rayon critique R_c nous avons la loi de la gravitation ordinaire en quatre dimensions. Aux distances de l'ordre de ce rayon critique et au-delà c'est la loi de la gravitation dans l'espace multidimensionnel qui domine. Il est mesuré que pour les échelles entre le millimètre et la taille de notre univers visible et la loi usuelle de la gravitation d'Einstein s'applique.²² Mais cette loi peut être modifiée aux très courtes distances et aux échelles de l'ordre de la taille de notre univers observable.

¹⁷ M.B. Green, *World Sheets for world*, Nucl. Phys. B 293, 593 (1987).

¹⁸ E. Cremmer, B. Julia and J. Scherk, *Supergravity theory in 11 dimensions*, Phys. Lett. B 76, 409 (1978).

¹⁹ M.B. Green, J.G. Russo and P. Vanhove, *Ultraviolet properties of maximal supergravity*, Phys. Rev. Lett. 98, 131602 (2007) [arXiv:hep-th/0611273].

²⁰ M.B. Green, H. Ooguri et J.H. Schwarz, *Decoupling Supergravity from the Superstring*, Phys. Rev. Lett. 99, 041601 (2007) [arXiv:0704.0777 [hep-th]].

²¹ G.R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati, *4D gravity on a brane in 5D Minkowski space*, Phys. Lett. B 485, 208 (2000) [arXiv:hep-th/0005016].

C. Deffayet, *Cosmology on a brane in Minkowski bulk*, Phys. Lett. B 502, 199 (2001) [arXiv:hep-th/0010186].

C. Deffayet, G.R. Dvali and G. Gabadadze, *Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions*, Phys. Rev. D 65, 044023 (2002) [arXiv:astro-ph/0105068].

²² T. Damour *Experimental tests of gravitational theory in the Review of particle physics* edited by Particle Data Group, <http://pdg.lbl.gov>

Le mécanisme DGP considère que la gravitation agissant sur la géométrie de notre espace-temps quadridimensionnel n'est pas une théorie fondamentale, mais qu'elle est induite par les fluctuations quantiques des champs élémentaires couplant à la géométrie classique selon une idée émise par Sakharov en 1967.²³ Nous sommes encore dans une description holographique avec cette fois des dimensions supplémentaires transverses d'extension infinie. Dans ce modèle, les effets à très grandes distances dépendent crucialement du comportement ultraviolet à très courte distance des interactions en quatre dimensions. Mais il est très difficile de définir une théorie des champs où il n'y a pas de séparation entre les grandes et les courtes échelles. Différentes approches pour traiter ce problème donnent lieu à des incohérences et des instabilités dues au fait que dans ce modèle le graviton acquiert une masse effective et le nombre de degrés de liberté physique est différent aux échelles du système solaire et aux très grandes échelles cosmologiques. Comme nous l'avons vu précédemment avec le problème de l'invariance de Lorentz, il est difficile de modifier la gravitation à grande distance sans changer l'effet de la gravité aux distances terrestres par exemple, et vice-versa.

En 2002 nous avons donné une construction en théorie des cordes²⁴ d'un modèle de la classe DGP. Cette construction réalise une généralisation de ce modèle avec plusieurs dimensions supplémentaires d'extension infinies, ce qui diffère de la construction initialement proposée qui n'a qu'une seule dimension supplémentaire d'extension infinie. Notre construction permet de mettre à jour les problèmes fondamentaux posés par ce genre de mécanisme de modification de la gravitation.

Pour cela, imaginons que nous vivons sur un plan quadridimensionnel $\mathcal{M}_{1,3}$ plongé dans un univers décadimensionnel $\mathcal{M}_{1,9}$ où est définie la théorie des cordes supersymétrique. Dans ce modèle il y a six dimensions transverses d'extension infinies.

Les fluctuations quantiques des cordes autour de l'hyperplan $\mathcal{M}_{1,3}$ génèrent une gravité induite. On montre que cette gravité induite résulte de la *première correction quantique* de la théorie des cordes. Il est remarquable que cette première correction quantique, donnée par la contraction de quatre puissances du tenseur de Riemann, a exactement les caractéristiques mathématiques nécessaires pour induire une théorie effective de la gravitation préférentiellement dans un espace quadridimensionnel. La théorie des cordes supersymétrique favorise par ce mécanisme, un espace-temps à quatre dimensions! La dépendance fonctionnelle de la constante de Newton induite en les paramètres de la théorie des cordes permet d'ajuster la valeur du rayon critique R_c afin d'obtenir une modification de la gravité de l'ordre la taille de Hubble R_H de notre univers visible, au prix de l'introduction d'un grand nombre de particules auxiliaires supplémentaires. La hiérarchie des échelles des effets mis en jeu nécessite un grand nombre de particules supplémentaires ce qui peut impliquer une violation du principe d'équivalence. La construction en théorie des cordes suggère, en fait, une description duale incorporant les effets de contre réaction gravitationnelle où l'interprétation géométrique initiale disparaît.

Conclusion

Nous venons de présenter divers arguments motivant la recherche d'une théorie de la gravitation quantique. La construction de cette théorie est la dernière frontière pour achever le programme d'unification des théories fondamentales entrepris au 20^{ème} siècle et avoir une description unique de tous les régimes de la physique à l'intérieur du cube des théories de Bronshtein, Zelmanov et Okun.

²³ A.D. Sakharov, *Vacuum quantum fluctuations in curved space and the theory of gravitation*, Sov. Phys. Dokl. **12**, 1040 (1968) [Dokl. Akad. Nauk Ser. Fiz. **177**, 70 (1967)].

²⁴ I. Antoniadis, R. Minasian et P. Vanhove, *Non-compact Calabi-Yau manifolds and localized gravity*, Nucl. Phys. B **648**, 69 (2003) [arXiv:hep-th/0209030].

Nous avons présenté divers arguments indiquant qu'en vertu du principe holographique la gravitation quantique n'est qu'une autre face des interactions entre particules chargées composant la matière, et est donc fondamentale. Nous avons aussi expliqué que les effets de gravité quantique se manifestent aux échelles microscopiques et macroscopiques. On peut être surpris de la faiblesse de l'intensité de la force gravitationnelle comparée à celles des autres interactions mises en jeu dans la matière. C'est grâce au caractère universel de cette force, couplant à toutes formes de matière ou d'énergie à toutes les échelles, que la gravitation peut compenser la faiblesse de l'intensité de son interaction. C'est aussi cette même universalité qui permet d'expliquer cette extrême faiblesse. Dans le cadre d'un modèle avec des dimensions supplémentaires, si les forces entre la matière chargée sont localisées sur un espace-temps quadridimensionnel, la force gravitationnelle explorant tout l'espace multidimensionnel se trouve diluée dans les dimensions supplémentaires réduisant ainsi l'effet des interactions gravitationnelles induites.

Les problèmes posés par la gravité quantique nécessitent un point de vue nouveau et un cadre théorique nouveau. La théorie des cordes fournit un tel cadre qui permet d'aborder des problèmes insolubles dans le cadre d'une théorie des champs ponctuelle de la gravitation.²⁵ Elle permet de résoudre des problèmes que les théories des champs ponctuelles ne peuvent pas traiter n'ayant pas les degrés de libertés fondamentaux requis. Nous avons donné l'exemple d'un mécanisme de modification de la gravité à grande distance pouvant expliquer l'accélération mesurée de l'expansion de l'univers. Finalement, seule la théorie des cordes permet d'aborder correctement la question de la nature et de l'évolution des trous noirs, même si de nombreux aspects n'ont pas encore complètement clarifié comme la description de l'état final d'évaporation du trou noir et le sens de leur entropie.

Les dimensions supplémentaires de la géométrie courbe de la correspondance AdS/CFT et celles d'extension infinie du modèle cosmologique pour l'accélération de l'expansion de l'univers modélisent géométriquement les propriétés des phénomènes physiques à différentes échelles. Il en est de même des dimensions supplémentaires enroulées de très petite taille qui se manifestent par un spectre de particules massives qui pourrait être observé dans les accélérateurs de particules si la taille de ces dimensions supplémentaires est suffisamment large. Il est très tentant de réifier ces dimensions supplémentaires, mais il faut conserver à l'esprit que ces constructions géométriques ne sont que des descriptions effectives, modélisant l'organisation des degrés de liberté des interactions fondamentales à différentes échelles d'énergie. Ces dimensions supplémentaires peuvent ne pas correspondre à des dimensions tangibles de l'Univers.

Nous concluons avec une citation du texte « La Métaphore » de Jorge Luis Borges :

Goethe a déclaré que ce qui nous abuse, ce ne sont pas nos sens mais notre entendement, sentence que nous pouvons comparer à ce vers de Marcedonio Fernández: La réalité travaille en un mystère à découvert.

²⁵ C. Bachas et F. Daninos, *Quatre succès des cordes* La Recherche N°411 Septembre 2007