

La gravitation quantique

Nathan Nadeau

Le 13 avril 2016

Résumé

Le modèle standard arrive à prédire les résultats d'un grand nombre de situations plus ou moins simples, de la fusion des protons à la transmission de programmes télévisés, en passant par la combustion de l'octane. Par contre, ce modèle fait complètement abstraction de la gravitation, pour laquelle la meilleure théorie à date (la relativité générale) n'est pas capable d'expliquer des situations microscopiques. Si cette force est suffisamment identique aux trois autres, une théorie se réduisant à la relativité générale à une limite semi-classique et demeurant consistante et précise à l'échelle quantique devrait exister. Nous allons donc explorer deux de ces théories, les preuves expérimentales envisageables ainsi que les perspectives s'offrant à nous pour le futur rapproché.

Introduction

En ce moment, l'Univers est représenté comme ayant quatre (et potentiellement plus) interactions fondamentales. Ces interactions sont l'interaction électromagnétique, l'interaction faible, l'interaction forte et l'interaction gravitationnelle.

L'interaction électromagnétique, bien qu'étant techniquement observée depuis le début de l'Histoire, ne fut caractérisée par l'occident de l'époque que vers la fin du seizième siècle par des personnes telles que William Gilbert et subséquemment Robert Boyle. Cette caractérisation ne concernait que l'électricité, qui était pensée comme étant différente du magnétisme. L'union mathématique entre magnétisme et électricité ne fut faite en détail (et reconnue) que plusieurs siècles plus tard par James Clerk Maxwell, qui démontra par la suite que la lumière pouvait être vue comme une onde électromagnétique. Les travaux d'Einstein (notamment son explication de l'effet photoélectrique) et d'autres tels que Lorentz et Poincaré amenèrent le principe de relativité sous la forme de la relativité restreinte. Quelques années plus tard, la quantification (c'est-à-dire l'avènement de la mécanique quantique) fut appliquée à l'électromagnétisme. Relativement peu de temps après, l'électrodynamique quantique fut à son tour formulée et adoptée.

L'interaction faible fut proposée dans les années 1930 par Enrico Fermi. Il la suggéra comme solution expliquant les désintégrations bêta (β), impliquant l'interaction de quatre fermions. Cette théorie fut par la suite raffinée comme étant deux fois une interaction à 3 particules, dont une virtuelle la majorité du temps. Quelques 35 ans après la proposition originale de Fermi, Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg proposèrent une version raffinée à la fois de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible en unifiant les deux, créant ainsi le concept d'interaction électrofaible. Les deux interactions sont considérées comme une seule au-delà du seuil d'unification (qui est d'environ 256 GeV).

L'interaction forte fut, comme l'interaction faible, proposée plutôt que directement observée. Elle fut proposée dans les années 70 comme étant la force responsable pour la cohésion des nucléons. Lorsque la communauté scientifique découvrit par la suite que les protons et les neutrons ne sont pas des particules élémentaires mais plutôt des constructions faites de particules plus petites (les quarks), l'interaction forte fut changée pour modeler ce développement inattendu, la force assurant la cohésion des nucléons n'étant plus qu'un résidu de celle qui tient

les quarks ensemble. La théorie sous-jacente fut appelée la chromodynamique quantique.

Tout comme l'interaction électromagnétique, l'interaction gravitationnelle a été observée depuis le début de l'Histoire. Les premiers progrès de définition de cette interaction au sens moderne furent effectués par Galileo Galilei au dix-septième siècle, qui trouva entre autre que deux objets de poids différents, si la friction avec l'air est négligeable, prennent le même temps à tomber d'une hauteur déterminée. Isaac Newton, dans son ouvrage *Principia*, construit une théorie de la gravitation qu'il démontra comme produisant des orbites képlériennes, qui avait auparavant été observées. Il fallut attendre plus de deux cent ans avant qu'une théorie capable de supplanter la théorie de la gravitation universelle apparaisse. Cette théorie est la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui stipule que la gravité n'est pas une force ou une interaction, mais une manifestation de la courbure et des propriétés de l'espace-temps.

Les trois premières interactions furent intégrées à un modèle commun les englobant toutes, le modèle standard. Bien que ce modèle soit capable d'expliquer et de prédire un grand nombre d'interactions plus ou moins simples (certaines incompatibilités existe, telle l'existence de l'énergie et de la matière sombre). Ce modèle est néanmoins incomplet car il néglige presque complètement la gravitation, ne faisant mention que d'un graviton. Une théorie capable d'expliquer toute chose devrait nécessairement être en mesure de décrire la gravitation à tous les niveaux d'énergie.

Nous allons donc explorer diverses possibilités quant aux propriétés plausibles de théories décrivant la gravitation à un niveau quantique et les comparer à ce qui est faisable avec la théorie quantique des champs. Nous allons également nous attarder aux différentes méthodes qui pourraient être employées afin de confirmer ou infirmer ces théories. Les modèles explorés seront la théorie M, qui est un regroupement de toutes les théories des cordes supersymétriques, ainsi que la théorie de la gravitation quantique à boucles.

Propriétés de différents modèles de gravitation quantique

Il existe quelques théories se basant sur les procédés et mécanismes de la théorie quantique des champs et, par extension, le modèle standard. Une de ces théories, relativement simpliste et naïve, suppose que l'existence des gravitons est vraie et effectue une approche à la propagation et l'interaction de ces derniers d'une façon similaire aux diagrammes de Feynman. Bien que cette approche marche bien pour un diagramme de Feynman classique ainsi que pour un diagramme de Feynman avec correction perturbative d'ordre un, toutes corrections perturbatives d'ordre deux ou supérieur mènent à des divergences non-renormalisables. Cette méthode, bien qu'étant une extension directe du modèle standard, n'est donc que d'une utilité limitée; elle n'est compatible avec la relativité générale qu'à de faibles énergies.

D'autres méthodes dérivées du modèle standard et de la théorie quantique des champs existent, notamment la théorie des champs quantique dans un espace-temps courbe. Cette théorie étend le modèle de la théorie des champs quantique de l'espace de Minkowski à un espace-temps courbe. Bien que cette prédiction se comporte plutôt bien à plusieurs égards, tels la prédiction que les trous noirs sont des sources de radiation de corps noir et la relativité de la définition du "vide",

cette théorie est aussi non-renormalisable. Elle peut néanmoins être considérée comme une première approximation d'une éventuelle théorie de la gravité quantique.

D'autres modèles se fondent sur des principes étrangers à la théorie quantique des champs. L'une de ces théories est relativement populaire et se nomme théorie M. Cette théorie est en fait un regroupement de toutes les théories des cordes supersymétriques mathématiquement consistantes connues, qui sont en fait une seule théorie exprimée de différentes manières ou avec des paramètres différents. Ces théories sous-jacentes sont: Type I, SO(32) hétérotique, $E_8 \times E_8$ hétérotique, Type IIA et Type IIB. Elles sont séparées par des chaînes successives de relations de dualité T et de dualité S.

La théorie M exhibe plusieurs particularités qui ne sont pas présentes dans le modèle standard. Certaines de ces particularités sont un nombre de dimensions supérieur à 4 (comme l'espace-temps de la relativité générale), le principe de supersymétrie et le concept de brane. Les théories des cordes nécessitent notamment un certain nombre de dimensions supplémentaires, pour un nombre total de 11 dimensions spatio-temporelles. Ces dimensions sont assumées comme étant repliées sur elles-mêmes ou enroulées sur des espaces de Calabi-Yau ou des orbifolds, à un point tel que les interactions dans des accélérateurs de particules comme aujourd'hui ne semblent pas mettre en jeu de dimensions supérieures. Ceci serait dû au fait que les effets dus aux dimensions "compactifiées" sont extrêmement faibles. Cette compactification est basée sur une généralisation de la théorie de Kaluza-Klein.

Une autre idée importante en théorie M est la supersymétrie. Dans les théories supersymétriques, chaque particule d'un groupe a un superpartenaire associé avec un spin plus grand d'une demie. En imposant cette supersymétrie sur une symétrie locale, il en découle naturellement une théorie mécanique quantique incluant la gravité, une théorie de supergravité. À de basses énergies, une théorie de supergravité approxime la théorie M à onze dimensions. Une supersymétrie d'une forme ou d'une autre est, à un certain point, nécessaire à la consistance mathématique des théories des cordes.

Une dernière particularité des théories des cordes est les branes. Les branes sont des objets physiques généralisant l'idée de particules ponctuelles à de plus grands nombres de dimensions. Ainsi une particule point est une brane à zéro dimensions, une corde est une brane à 1 dimension et, en général, un objet en p dimension est une brane à p dimensions. Une brane est dynamique, c'est-à-dire qu'elle peut se propager dans l'espace-temps et avoir différentes valeurs associées à son état d'excitation comme une masse, une charge, un nombre baryonique et une myriade d'autres nombres quantiques. Dans la théorie M, des 1-branes donnent naissance aux particules fondamentales observées dans le modèle standard. Les cordes peuvent être "ouvertes" ou "fermées". Les cordes ouvertes ont deux bouts distincts reposant sur des D-branes alors que les cordes fermées sont effectivement des boucles.

Dans la théorie M, la gravité est modélisée par la propagation et l'interaction avec différentes branes de gravitons. Ces gravitons sont posés comme étant un des états d'excitation possibles d'une corde fermée. Une des propriétés des gravitons dans la théorie des cordes est la capacité de se déplacer de D-brane en D-brane, passant "au travers" des séparations entre dimensions. Ceci pourrait expliquer la faiblesse de la gravité, qui aurait son origine dans les dimensions

"profondes" et serait donc plus faible rendu aux dimensions "de surface", c'est-à-dire l'espace-temps quadridimensionnel observable à basse énergie.

La dernière théorie supportant une forme de gravité quantique que nous allons voir est la théorie de la gravitation quantique à boucles. Cette théorie, contrairement à la théorie M qui voit la gravité comme étant un résultat d'interactions entre cordes, pose la gravité comme étant un effet de la géométrie de l'espace-temps, un peu comme Einstein lui-même avait fait avec la relativité générale.

Une des principales conséquences de cette théorie est une quantification de l'espace-temps, qui prend un aspect granulaire de la même nature que les photons en QED et les niveaux d'énergie d'orbitales atomiques. L'espace étant discret, un mouvement a donc une distance minimale. L'espace peut également être vu comme un tissu d'anneaux entrecroisés tissés très finement, formant un réseau de spin, dont l'évolution temporelle se nomme écume de spin. Ces structures sont supposées être de l'ordre de 10^{-35} mètres: les distances plus petites que l'échelle de Planck deviennent donc vides de sens.

La relativité générale est connue comme étant "indépendante de l'arrière-plan", c'est-à-dire que sa formulation ne se base pas sur une géométrie préexistante. Ceci permet de localiser la matière par rapport au champ gravitationnel et vice-versa. Les entités sont donc localisées les unes par rapport aux autres et non par rapport à l'espace-temps lui-même. En gravitation quantique à boucles, cet aspect est considéré comme intrinsèque et nécessaire à la théorie; la symétrie gravité-matière est donc conservée. Il en résulte que le modèle de la gravitation quantique à boucles est formellement indépendant de l'arrière-plan.

Les réseaux de spin, quant à eux, représentent des "états quantiques" du champ gravitationnel sur une hypersurface tridimensionnelle. L'ensemble de tous les réseaux de spin possibles est comptable et constitue la base de l'espace de Hilbert en gravitation quantique à boucles. Les écumes de spin, quant à elles, sont des structures topologiques formées de faces bidimensionnelles représentant l'une des configurations devant être sommées pour obtenir une description de la gravitation quantique d'une intégrale de chemin de Feynman. Un réseau de spin très étendu, observé macroscopiquement, semblerait être un espace continu tridimensionnel.

Une des nécessités des théories quantiques est qu'elles doivent être en mesure de reproduire les observations et mécanismes dits classiques à une limite où les nombres quantiques impliqués deviennent suffisamment grands pour pouvoir être interprétés classiquement. Cela signifie qu'une théorie de la gravitation quantique doit être capable de reproduire la théorie de la relativité générale d'Einstein comme limite classique. Bien que relativement facile pour une particule en mécanique quantique, la chose peut être significativement plus compliquée. Les théories des champs quantiques ont plusieurs secteurs, certains d'entre eux ne résultant pas en une théorie classique valide à la limite classique. La gravitation quantique à boucles pourrait appartenir à un de ces secteurs non-physiques, ce qui rendrait impossible la correspondance entre la gravité quantique et la relativité générale à la limite classique.

Les anomalies quantiques doivent également être évitées car leur présence ajouterait des restrictions à l'espace de Hilbert inexistantes dans la théorie classique, insinuant que la théorie

classique a plus de degrés de liberté que la théorie quantique, ce qui ne fait pas vraiment de sens. Par contre, il se trouve que la représentation à boucle est unique à la gravitation quantique et qu'il n'y a pas d'autres espaces de Hilbert semblables, signifiant que si la gravitation quantique à boucle se révèle être une représentation non-physique, la représentation à boucle de la gravitation quantique deviendrait inutile d'un point de vue physique.

Bien que la gravitation quantique à boucles soit indépendante de l'arrière-plan, il n'en va pas de même de la théorie M, qui suppose une géométrie préexistante. Cette même théorie M prédit l'existence de gravitons, des états d'excitations de cordes fermées qui sont des changements de géométrie de l'espace-temps existant sur un arrière-plan. La théorie de la gravitation quantique à boucles, quant à elle, génère un arrière-plan à partir de rien et ne prédit pas explicitement de telles particules; au mieux, on peut espérer retrouver à une certaine limite semi-classique ou une limite de champ faible quelque chose s'apparentant à des gravitons.

Une autre différence significative des deux théories est que la théorie de la gravitation quantique à boucles ne nécessite pas de supersymétrie ou de dimensions supplémentaires Kaluza-Klein et est formulée en trois ou quatre dimensions, contrairement à la théorie M. Par contre, la théorie M reproduit de façon démontrable les théories établies de la relativité générale et de la théorie quantique des champs dans les limites appropriées, ce que la gravitation quantique à boucles n'a toujours pas été en mesure de faire.

Vu que la théorie de la gravitation quantique à boucles a été formulée en quatre dimensions avec et sans supersymétrie et que la théorie M ne peut être formulée qu'en onze dimensions avec supersymétrie, une comparaison directe entre les deux n'a pas encore été possible. Toutefois, il est possible d'étendre le formalisme principal de la gravitation quantique à boucles à une relativité générale avec supergravité, supersymétrie et dimensions additionnelles Kaluza-Klein. Il serait donc désirable d'établir une théorie de supergravité quantique à boucles afin de comparer les similarités possibles entre les deux.

Également important à noter est que la théorie de la gravitation quantique à boucles ne cherche à représenter que les aspects quantiques de la gravitation, alors que la théorie M tente d'unifier les quatre interactions à très haute énergie en plus de décrire la gravité à des échelles quantiques. Il faut donc aussi considérer la manière avec laquelle la gravitation quantique à boucle interagit avec la théorie quantique des champs et si cette interaction reproduit correctement le modèle standard. Néanmoins, toutes les théories de gravitation quantique doivent reproduire la relativité générale à toutes les échelles classiques ainsi que les résultats des diverses observations macroscopiques effectuées jusqu'à maintenant.

Preuves expérimentales possibles et effets macroscopiques

Étant donné les différences marquées de la théorie M et de la théorie de la gravitation quantique à boucles, il est impossible que les deux modèles soient simultanément valides; il en résulte donc qu'un seul des deux est correct alors que l'autre est incorrect. Prouver la validité ou alternativement, l'invalidité d'un modèle mathématiquement consistant (mis à part les régions inexplorées et inexplorables, telle la limite classique de la gravitation quantique à boucles) nécessite l'observation de phénomènes en accord ou en contradiction avec les théories.

Une première série d'observations possibles consiste de phénomènes reliés à l'existence potentielle de cordes cosmiques. Ces cordes cosmiques sont des défauts topologiques unidimensionnels hypothétiques qui auraient pu être présents dans l'enfance de l'Univers, se formant durant l'inflation. De tels défauts topologiques auraient pu ensuite subir l'expansion de l'espace-temps et grandir jusqu'à des tailles cosmiques, dépassant grandement les tailles de la plupart des galaxies actuelles. De tels défauts sont prédits comme ayant des diamètres du même ordre de grandeur qu'un proton ou plus petit. Une corde cosmique se manifesterait aussi, dans la plupart des cas, par une déviation de l'espace géométrique euclidien caractérisé par un déficit d'angle; un cercle entourant la corde couvrirait moins de 360 degrés. Ce déficit d'angle produirait, selon la théorie de la relativité générale, des effets similaires à une importante distribution de masse longitudinale ayant des densités de plus d'une masse terrestre par kilomètre de longueur.

D'une autre part, la relativité générale prédit que le potentiel gravitationnel d'une ligne droite disparaît, effaçant du même coup les forces gravitationnelles statiques ressenties par de la matière à proximité. Le seul effet restant serait purement topologique et consisterait en la déviation de matière ou de lumière passant à proximité de la corde. Une telle déviation (ici, de lumière) produirait des images par lentilles gravitationnelles qui seraient identiques de part et d'autre de la corde et ne seraient pas étirées, comme c'est le cas pour les lentilles gravitationnelles conventionnelles (ex. un amas de galaxies). L'observation répétée et consistante de telles images pourrait servir d'appui à la théorie des cordes. Ces déviations des rayons lumineux pourraient aussi causer des anomalies dans le fond de rayonnement cosmologique, d'une amplitude trop petite pour avoir été détectées jusqu'à maintenant.

Un autre effet des cordes cosmiques serait l'émission d'ondes gravitationnelles. Les cordes cosmiques, tout comme les supercordes ordinaires, oscillent. Toutefois, de telles oscillations à des échelles d'années-lumières et plus seraient extrêmement violentes car des segments de la corde voyageraient à des vitesses approchant la vitesse de la lumière. Ces vibrations causeraient la formation de points de rebroussement et d'entortillements qui feraient se détacher en boucles isolées certaines parties de la corde cosmique. Ces boucles auraient des durées de vie finies et se désagrègeraient principalement par l'émission de radiation gravitationnelle. Cette radiation serait le signal le plus puissant émanant de cordes cosmiques et pourrait être détectable dans des observatoires d'ondes gravitationnelles qui pourraient être assez sensibles pour détecter ces ondes.

Quant à la gravitation quantique à boucles, ses principaux effets ne deviendraient apparents qu'à des régimes très élevés tels le régime de Planck, où les effets de la géométrie quantique supplanteraient l'attraction gravitationnelle classique. Cet aspect, associé à une branche de la cosmologie dérivée de la gravitation quantique à boucle appelée cosmologie quantique à boucles, aurait comme conséquence d'éviter les singularités et de remplacer le Big Bang (c'est-à-dire le commencement spontané de l'Univers) par un Big Bounce, résultant de l'écrasement à une échelle extrêmement petite mais finie d'un Univers précédent; il est considéré que si la densité d'énergie est plus grande que ce que l'espace-temps quantifié peut contenir, il va rebondir. La cosmologie quantique à boucles introduit également un mécanisme expliquant potentiellement

l'inflation primordiale.

Alternativement, au lieu de tenter de déterminer l'exactitude (ou l'inexactitude) des théories précédemment citées en observant des phénomènes macroscopiques tels des ondes gravitationnelles ou le fond de rayonnement cosmologique, on peut tenter d'observer les effets microscopiques de ces théories, notamment les superpartenaires émanant de la théorie M et la quantification de l'espace-temps de la théorie de la gravitation quantique.

Observer de tels phénomènes microscopiques n'est pas sans difficulté. Il est supposé que la gravitation commence à avoir une influence significative sur le déroulement des interactions microscopiques à l'approche de l'échelle de Planck, c'est-à-dire des distances de l'ordre de 10^{-35} mètres ou, en d'autres termes, des énergies de l'ordre de 10^{19} gigaélectronvolts. Considérant la partie "énergie" et le fait que l'accélérateur le plus puissant actuellement en opération, le grand collisionneur de hadrons, a une énergie maximale au centre de masse de 13 téraélectronvolts avec une luminosité de 10^{34} par centimètre carré par seconde. En première approximation, un accélérateur fonctionnant sur un principe similaire pouvant atteindre l'échelle de Planck devrait donc être capable d'injecter approximativement 1 gigajoule dans une particule et la faire entrer en collision face-à-face avec une particule (ou état lié de particules, pour un nucléon) d'énergie similaire.

Étant donné la longueur d'onde incroyablement petite qu'une telle particule aurait, il faudrait non seulement avoir des collimateurs incroyablement performants afin de contrecarrer cette longueur d'onde réduite. Sachant que l'énergie dans le centre de masse dans le cas de deux particules de masses égales allant en sens inverse l'une de l'autre est donnée par

$$E = 2\gamma m_0,$$

où m_0 est la masse au repos de la particule et γ est le facteur de Lorentz, donné par

$$\gamma = 1/\sqrt{(1-(v^2/c^2))},$$

on peut déterminer que

$$v = \sqrt{(1-(1/\gamma^2))} \cdot c$$

et ainsi calculer qu'il faudrait également être capable d'accélérer des milliards de particules à des vitesses de $(1-(1.34 \cdot 10^{-38})) \cdot c$ mètres par secondes pour des protons, $(1-(5.043 \cdot 10^{-34})) \cdot c$ mètres par seconde pour des nucléons de plomb 208 et $(1-(3.509 \cdot 10^{-35})) \cdot c$ mètres par seconde pour des électrons pour espérer voir des collisions à un rythme raisonnable, ou en d'autres mots, pour avoir une luminosité capable de produire une quantité de données suffisante pour permettre une analyse statistique rigoureuse après moins de 50 ans d'opération. Également à prendre en compte est le fait qu'il faudrait rendre la radiation synchrotron négligeable, ce qui nécessiterait probablement un accélérateur linéaire incroyablement long, des différences de potentiel ridiculement grandes ou un rayon de courbure significativement plus grand que le rayon de la Terre.

Si on considère un taux d'injection similaire à celui du LHC (cent milliards de protons à chaque

vingt-cinq nanosecondes), la puissance nécessaire pour alimenter le collisionneur à pleine puissance (considérant une efficacité d'accélération de 100%) serait de plus de 3909 yottawatts, soit environ dix fois la luminosité solaire. Bien que le défi technique ne soit pas physiquement impossible, il est relativement peu probable que l'humanité puisse produire plus d'énergie que le Soleil de façon contrôlée d'ici 100 ans, reléguant l'expérimentation à l'échelle de Planck dite "classique" à un rêve et ce, pour plusieurs centaines d'années.

Néanmoins, il peut être utile de tenter de déterminer les particularités qui pourraient être observées. Une première serait l'observation, par diffusion inélastique profonde, d'objets possiblement sous-jacents aux quarks, bosons et autres particules ayant des dimensions de l'ordre de 10^{-35} m. De telles observations seraient un excellent appui à la théorie M, la très grande majorité des supercordes ouvertes possédant des caractéristiques possiblement similaires (masses, charges, taille, etc.).

Un autre fait empirique qui pourrait supporter la théorie M serait l'observation, probablement indirecte, de dimensions supplémentaires. L'existence de telles dimensions pourrait affecter, entre autres, les proportions des modes de désintégration du boson de Higgs (si une telle particule existe réellement) ainsi que provoquer des résonances supplémentaires avec des couplages de masse, par exemple avec le quark top.

Une dernière observation possible capable d'apporter une validation expérimentale au modèle de la théorie des cordes serait la détection d'événements indiquant la formation probable de superpartenaires. Bien que de tels superpartenaires sont supposés avoir des masses relativement élevée, il est théoriquement possible de pouvoir voir de telles particules à des niveaux d'énergie de moins de cinquante téraélectronvolts, rendant la confirmation (ou infirmation) de l'existence de ces particules atteignable dans les prochaines décennies. Bien sûr, vu que les masses sont plus grandes, les probabilités que de telles particules soient observées diminuent, rendant la tâche encore plus ardue.

La gravitation quantique à boucles, quant à elle, aurait des effets différents. Le principal effet qui serait observé serait la quantification de l'espace-temps. Une telle quantification aurait comme effet de diminuer le nombre d'angles où une interaction est permise; il en résulterait que les directions prises par des particules produites lors des collisions n'auraient pas une distribution continue, mais discrète. L'observation, sur plusieurs milliers de collisions, d'une telle distribution serait un appui incroyable à la validité probable de la gravitation quantique à boucles.

Perspectives futures

Bien sûr, il n'est pas dit que les théories présentées ci-dessus ne sont pas sujettes à des changements. Théoriciens, mathématiciens et physiciens (pas nécessairement spécialisés en théorie) travaillent continuellement ensemble afin de raffiner les concepts de dizaines de modèles et sous-modèles. Ils développent de nouvelles méthodes de calcul et d'expression mathématiques afin de contourner des difficultés se présentant à eux (l'introduction des variables d'Ashtekar sont un exemple marquant, étant aujourd'hui beaucoup utilisées en théorie des cordes comme en gravitation quantique à boucles et bien plus de domaines). Des outils importés d'autres

disciplines sont continuellement utilisés ou mis à l'épreuve.

Bien que certains problèmes intrinsèquement mathématiques subsistent, il est fort probable que ces problèmes seront soit résolus, soit prouvés insolubles d'ici quelques années, voir quelques centaines d'années. Ou peut-être de nouvelles théories, alliant des principes provenant de théories disparates, verront le jour et révolutionneront le domaine de la gravitation, comme la relativité générale d'Einstein l'a fait auparavant.

De nouveaux appareils, capables de sonder l'infiniment grand et l'infiniment petit, vont quant à eux certainement voir le jour. Bien que le grand collisionneur de hadrons soit le plus puissant collisionneur existant aujourd'hui, plusieurs accélérateurs différents ou plus puissants sont déjà à l'état de projet ou concept. Le collisionneur linéaire international ou son alternative trois fois plus puissante, le collisionneur linéaire international compact, pourrait entamer sa construction d'ici 2020. Un tel accélérateur aurait pour principal but de collisionner un faisceau de protons avec un faisceau d'électrons à des énergies (pour le collisionneur linéaire international compact) allant jusqu'à trois téraélectronvolts, ce qui permettrait de sonder la matière à un niveau jamais encore atteint. Le concept linéaire a pour but de minimiser les pertes d'énergie des électrons par radiation synchrotron.

Le collisionneur circulaire futur, pour le moment encore à l'étape d'étude, est le successeur désigné du grand collisionneur de hadrons, ayant comme principal but d'effectuer des collisions à un niveau d'énergie significativement plus élevé que ce dernier. La plupart des expériences seraient axées sur des collisions proton-proton et des collisions électron-positron. La structure du complexe étudié est principalement un tunnel circulaire de 100 kilomètres de long, capable de produire jusqu'à cent téraélectronvolts au centre de masse et permettant ainsi d'explorer une nouvelle frontière de la physique.

Malgré ces perspectives relativement excitantes, il ne faut pas oublier que le grand collisionneur de hadrons va rester le principal moyen de faire des expériences à très hautes énergies pour quelques temps. Une amélioration prévue de sa luminosité, par un facteur de dix, va étendre son rôle jusqu'en 2035.

Côté infiniment grand, les futurs télescopes et observatoires gravitationnels vont permettre de voir plus loin et plus clairement qu'auparavant. Parmi ces observatoires sont LISA, le James Webb Space Telescope et le European Extremely Large Telescope.

LISA consistera en trois satellites communiquant entre eux via laser et radio, formant un interféromètre à trois bras de un million de kilomètres disposés en un triangle équilatéral. Les satellites suivront trois orbites héliocentriques à la même distance que la Terre, suivant cette dernière sur son orbite en traînant de quelques 50 millions de kilomètres en moyenne. Ces orbites seront alignées de manière à maintenir le triangle à un angle de soixante degrés de l'écliptique et présentant toujours la même "face" au Soleil. Un tel mécanisme pourrait être en mesure de détecter la radiation gravitationnelle provenant des cordes cosmiques, si elles existent. Un tel signal serait considérablement différent des signaux auxquels on s'attend d'objets binaires massifs locaux, d'objets binaires supermassifs et des ondes gravitationnelles primordiales, échos du Big Bang. La détection de signaux pouvant être identifiés avec un bon degré de certitude

comme provenant de cordes cosmiques serait un appui expérimental monumental à la théorie des cordes et discréditerait la théorie de la gravitation quantique à boucles.

Le James Webb Telescope, dont le lancement est prévu pour 2018, permettra d'observer des galaxies et quasars à une distance jamais encore complètement réalisée. Consistant d'un écran solaire thermiquement isolant d'environ vingt mètres par sept mètres, d'un cryostat fait pour durer un minimum de cinq ans pouvant maintenir la température sous cinquante kelvins et d'un miroir primaire de béryllium plaqué d'or à dix-huit segments pour un diamètre de 6.5 mètres et une superficie de vingt-cinq mètres carrés, il observera le très distant dans l'infrarouge, performant mieux que tout autre télescope terrestre le pourrait dû à l'opacité de l'atmosphère aux rayons infrarouges. Une observation aussi distante pourrait peut-être identifier avec plus de précision une image double telle celles qu'une corde cosmique est censée être en mesure de produire.

Enfin, le dernier avancement dont il sera question est le télescope géant européen. Ce mastodonte, en construction au Chili, aura un miroir primaire d'un diamètre de 39.3 mètres composé de 798 segments de 1.45 mètres de large. Ce télescope percevra treize fois plus de lumière que les télescopes terrestres les plus puissants en opération aujourd'hui, avec une superficie primaire de 978 mètres carrés. Il est prévu que ce télescope sera capable de produire des images environ seize fois plus nettes que le télescope Hubble. Son entrée en fonction est prévue pour 2024. Une aussi bonne définition sera extrêmement utile pour distinguer les doublets non-déformés et s'assurer que ce sont effectivement des doubles d'une seule et même source et non deux sources similaires contiguës.

Conclusions

Il existe plusieurs modèles supposant une forme ou une autre de gravitation quantique. Nous avons exploré les mécanismes sous-jacents de deux des plus importants, soit la théorie des cordes (alias théorie M) et la théorie de la gravitation quantique.

La théorie M a quatre principales pierres angulaires. La première est le concept de supercordes. Les supercordes peuvent être ouvertes ou fermées. Si elles sont fermées, elles ne sont pas fixées à des branes, la deuxième pierre angulaire, et peuvent se déplacer librement entre les différentes dimensions supplémentaires Kaluza-Klein, le troisième concept central. Les déplacements libres de ce type sont suggérés, dans le cadre de la théorie des cordes, comme étant la cause de la faiblesse relative de la gravité, qui aurait sa source dans ces dimensions supplémentaires et se propagerait via l'interaction de supercordes fermées distinctives pouvant être identifiées comme des gravitons. D'autres supercordes répliquent les comportements observés des particules élémentaires du modèle standard. Enfin, la dernière pierre angulaire de ce modèle est la supersymétrie, dont la principale manifestation consisterait en l'existence de superpartenaires à chaque particule dite normale, chacune de ces particules ayant peut-être de multiples superpartenaires. Ces superpartenaires, s'ils existaient, pourraient être indirectement détectés dans des expériences de collision comme au grand collisionneur de hadrons. Un autre effet potentiellement observable de cette théorie est l'existence de défauts topologiques à l'échelle intergalactique appelés cordes cosmiques. De telles cordes cosmiques s'enrouleraient et se

plieraient parfois sur elles-mêmes, provoquant le détachement de segments qui se désintégreraient en émettant de la radiation gravitationnelle, qu'on sait aujourd'hui détectable. Ces cordes cosmiques provoqueraient également une déviation unique de la lumière en produisant des images doubles qui ne seraient pas déformées, ce qu'une lentille gravitationnelle normale n'est pas en mesure de faire. De multiples expériences tentant de sonder les effets particuliers et plusieurs étant peut-être capable de détecter des conséquences des effets topologiques existent déjà, et d'autres sont prévus ou en construction. La théorie M est également un exemple de théorie unifiée, tentant de combiner les quatre interactions fondamentales en une seule et même interaction à très haute énergie.

L'autre théorie explorée, la gravitation quantique à boucles, est extrêmement dissimilaire. Le principal mode d'opération de ce modèle est de quantifier l'espace, lui donnant un aspect granulaire. Par contre, cette théorie n'a pas encore pu être exprimée à des limites semiclassiques ou classiques, rendant la validation et l'invalidation de la théorie impossible jusqu'à présent. Bon nombre de mathématiciens, physiciens et théoriciens continuent de travailler sur de nouvelles manières de calculer et exprimer ce modèle afin de pouvoir un jour tester sa validité de façon théorique en comparant avec la relativité générale d'Einstein. Quant aux effets observables, la principale conséquence de la quantification de l'espace donnerait lieu, à de très hautes énergies, à une discrétisation des angles auxquels des particules pourraient se propager. Tout comme les tests de la supersymétrie, des accélérateurs relativement puissants sont déjà en cours d'opération, tandis que d'autres sont à l'état de plans très avancés.

Malheureusement, il semble que sonder la matière et ses interactions à l'échelle de Planck devra attendre quelques temps, les constructions et l'énergie nécessaires à cette entreprises dépassant largement la capacité humaine actuelle et, pour l'énergie, la capacité solaire courante.

Il n'est toutefois certainement pas exclu qu'une de ces théories, ou même d'autres théories dont on n'a pas parlé ici, soient validées ou invalidées expérimentalement d'ici quelques dizaines d'années, contraignant la nature de la gravitation quantique et, par extension, la nature de l'Univers même ainsi que notre place dans ce dernier.