

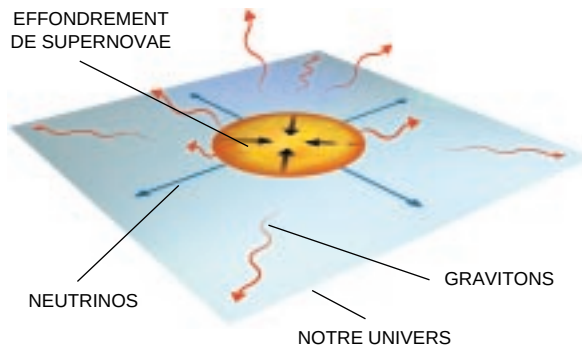
montré que les modifications éventuelles de la loi de Newton, aux distances submillimétriques, ne réduisent pas la cohésion des étoiles. En effet, même si la gravité est renforcée à petite distance, son intensité n'égale celle des autres forces qu'aux distances inférieures à 10^{-19} mètre ; aux grandes distances, elle demeure très faible.

L'étude des gravitons semble être un meilleur test de la théorie. D'après la théorie des dimensions cachées, ces particules interagiraient plus avec les autres particules qu'on ne le suppose aujourd'hui (cela revient à dire que l'interaction gravitationnelle est plus intense à petite distance), de sorte que les gravitons devraient être produits en nombre supérieur lors des collisions de particules. En outre, la très grande majorité d'entre eux s'échapperait dans les dimensions cachées...

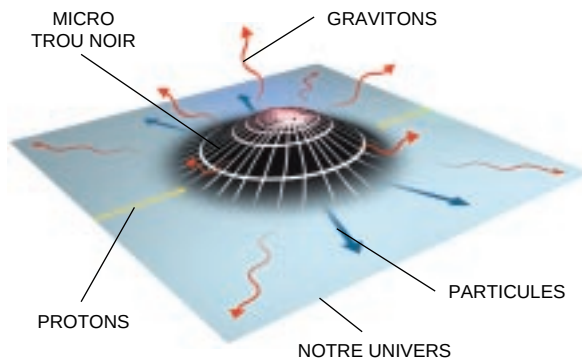
Les supernovae sont des phénomènes qui devraient libérer beaucoup de gravitons, qui quitteraient la membrane où nous sommes confinés. Les supernovae s'observent quand toute la matière des étoiles a fusionné, par des réactions nucléaires : l'énergie ne vainc alors plus la pression gravitationnelle, et les étoiles s'effondrent, à la manière d'un soufflé que l'on ne chauffe plus. L'effondrement est suivi d'un rebond, qui éjecte une partie de la matière stellaire dans l'espace. Au cours de ces supernovae, des températures considérables sont atteintes, et des gravitons devraient s'évaporer vers les dimensions supplémentaires (voir la figure 6). Cependant, depuis l'analyse d'une supernova importante, en 1987 (la supernova SN1987A), nous savons que l'essentiel de l'énergie est libéré sous forme de neutrinos ; les «fuites» d'énergie par gravitons sont mineures. En outre, nous connaissons une limite supérieure à l'interaction graviton-matière : les physiciens craignaient une réfutation de la théorie par l'analyse des supernovae, mais les calculs n'ont pas entamé la théorie. Le cas le plus défavorable est celui de l'Univers à deux dimensions supplémentaires, où les gravitons

refroidiraient trop les supernovae si l'échelle de Planck est inférieure à 50 téraélectronvolts. Avec trois dimensions supplémentaires ou plus, cette échelle peut ne valoir que quelques téraélectronvolts sans que pour autant les supernovae ne fassent long feu.

Les théoriciens ont examiné de nombreuses autres objections possibles : ils ont cherché les conséquences des nouvelles dimensions sur le comportement de systèmes variés, de l'univers primordial à l'atmosphère heurtée par des rayons cosmiques d'ultra haute énergie. La théorie passe tous les tests, et plus on postule de dimensions supplémentaires, mieux elle passe les tests. Le cas d'un univers à quatre dimensions d'espace est exclu : les effets de la dimension supplémentaire s'exerceraient à l'échelle du Système solaire.



6. UNE SUPERNOVA a lieu quand l'énergie due à la fusion nucléaire, dans les étoiles, n'équilibre plus les forces de gravitation dans l'étoile. Cette dernière s'effondre sur elle-même, mais la matière ainsi comprimée rebondit sur le cœur comprimé et est éjectée dans l'espace. La majeure partie de l'énergie est émise sous forme de neutrinos (en bleu). S'il existe des dimensions supplémentaires, les gravitons rayonnés (en rouge) emporteraient plus d'énergie que s'il n'y avait que trois dimensions. Les théoriciens étudient les éventuelles dimensions supplémentaires de l'espace en excluant les cas où les fuites d'énergie par gravitons interposés seraient si importantes qu'elles empêcheraient la formation des supernovae.



7. DES MICRO-TRous NOIRS pourraient être créés lors de collisions de protons de haute énergie (en jaune) dans des accélérateurs de particules tels que le Grand Collisionneur de hadrons (le LHC), en construction à Genève. Les trous noirs s'évaporeraient rapidement par émission d'un «rayonnement Hawking» (émission de particules du Modèle standard, en bleu) et de gravitons (en rouge).

Les micro-trous noirs de Genève

Nous l'avons vu, la théorie des dimensions cachées résout le problème hiérarchique en renforçant la gravitation aux limites du domaine expérimental actuel, c'est-à-dire vers 1 000 gigaélectronvolts. À partir de 2005, le Grand Collisionneur de hadrons du CERN, le LHC devrait donner de telles énergies aux particules qu'il accélérera : des couplages gravitons-matière devraient être alors observables, et les théoriciens auront des informations inédites pour comprendre quelle théorie quantique décrit la gravitation. Si c'est la théorie des cordes, les particules seraient alors comparables à de minuscules boucles de corde, tendues comme des cordes de violon, mais sans vibrer. Alors que

les particules fondamentales correspondraient aux cordes au repos, leurs modes vibratoires (les «notes») correspondraient à des particules exotiques. Dans la théorie classique des cordes, celles-ci sont supposées avoir l'échelle de Planck (10^{-35} mètre). Leurs masses sont donc de l'ordre de l'énergie de Planck, ce qui implique qu'elles vibrent à des fréquences bien trop élevées pour que nous les «entendions» en utilisant un accélérateur. En revanche, dans une théorie des cordes enrichie de dimensions d'espace supplémentaires, les cordes sont beaucoup grandes (10^{-19} mètre), ce qui place leurs masses aux environs des 1 000 gigaélectronvolts qu'elles doivent avoir pour être observables au LHC.

Des micro-trous noirs devraient alors, également, apparaître lors des expériences. Les calculs prédisent que le LHC devrait avoir une énergie suffisante pour en produire lors des collisions de hadrons (voir la figure 7). D'un diamètre égal à 10^{-19} mètre environ, de tels trous noirs seraient trop petits pour être dangereux, car ils s'évaporeraient en moins de 10^{-27} seconde, en perdant leur énergie par un «rayonnement de Hawking». S'ils ont la chance d'observer de tels micro-trous noirs au LHC, les physiciens pourront alors sonder les mystères de la physique quantique

Des dimensions nouvelles de grande taille ont déjà été proposées

Dès 1990, des spécialistes de la théorie des cordes ont proposé l'existence de dimensions supplémentaires cycliques avec un rayon jusqu'à 10^{16} fois supérieur à la distance de Planck. Cette proposition résultait de l'étude de la supersymétrie, la principale symétrie de la théorie des cordes. Comme la Nature ne semble la respecter que de façon imparfaite, les théoriciens étudient des mécanismes pour lesquels la supersymétrie est «brisée». C'est en étudiant un tel mécanisme, que je suis arrivé à proposer, en 1990, des dimensions supplémentaires d'une taille d'environ 10^{-18} mètre. Les dimensions cachées introduites à cette époque contrastent avec les grandes dimensions cachées (jusqu'à un millimètre), qui sont évoquées par Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos et Georgi Dvali. La gravitation n'est, en effet, pas la seule des interactions qui peut se produire dans ces premières dimensions cachées. Ce fait, les rend *a priori* beaucoup plus observables. Ainsi, si elles existent, elles seront peut-être observées au sein du Grand Collisionneur de hadrons, qui se construit aujourd'hui au CERN. Dans cette éventualité, le signal qui les caractériserait, serait de nouvelles particules massives: les particules de Kaluza-Klein. Elles joueraient un rôle identique à celui du photon, le médiateur des interactions électromagnétiques, et à ceux que jouent les particules médiatrices des interactions faibles et fortes.

En 1990, le point de vue dominant empêchait la majorité des physiciens de prendre l'hypothèse des dimen-

sions cachées au sérieux. Cependant, des progrès techniques récents ont rendu les théories des cordes plus maniables. En collaboration avec Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos et Georgi Dvali, j'ai montré que ces théories peuvent incorporer de façon naturelle l'idée des dimensions cachées, telles que mes collègues les conçoivent. Les théories des cordes en question sont à neuf dimensions spatiales. Les particules y sont confinées à une membrane étendue, en général, dans plus de trois dimensions mais dans moins que neuf. La gravitation est la seule des quatre interactions de la Nature qui se propage dans toutes les dimensions. On distingue ainsi deux types de dimensions supplémentaires dotées d'une taille finie : celles qui font partie de la membrane et celles qui lui sont transverses. Afin de rendre l'intensité de la gravité comparable à celle des autres interactions, les dimensions transverses doivent avoir une taille d'autant plus grande qu'elles sont peu nombreuses (1 millimètre pour seulement deux dimensions transverses et 10^{-14} mètre pour six dimensions). En revanche, les dimensions qui font partie de la membrane, doivent avoir une taille de l'ordre de celle de la corde, c'est-à-dire d'environ 10^{-18} mètre. Elles accueillent toutes les interactions, et correspondent aux dimensions de grande taille proposées en 1990.

Ignatios ANTONIADIS

Membre du département de physique de l'École polytechnique et de la Division théorique du CERN

des trous noirs et, par là, de l'interaction qui les produit : la gravitation.

Même si le LHC n'atteint pas une énergie suffisante pour confirmer la théorie des cordes ou l'existence de micro-trous noirs, il engendrera des gravitons en abondance. Ces gravitons, spécifiés par la nouvelle théorie, n'apparaîtraient que par d'éventuels déficits d'énergie. Comme la théorie livre aussi la forme exacte de ces fuites par gravitons en fonction de l'énergie mise en jeu et du nombre de dimensions, ce dernier pourrait ainsi être mis en évidence. L'absence de cette signature serait, au contraire, une raison de commencer à rejeter la théorie.

Des expériences de laboratoire pourraient aussi tester la théorie, car deux dimensions supplémentaires résoudraient le problème hiérarchique si leur rayon était de l'ordre du millimètre. Dans une telle hypothèse, une mesure précise de la gravité dans le domaine submillimétrique révélerait le passage d'une loi de Newton en inverse du carré à une loi en inverse du bicarré, voire en inverse d'une puissance supérieure. Avec cette nouvelle

théorie, bien des écarts à la loi de Newton sont envisageables. Le plus intéressant serait sans aucun doute l'apparition de forces *répulsives* des millions de fois plus fortes que la gravité entre des masses éloignées de moins de un millimètre!

John Price, Aharon Kapitulnik et Eric Adelberger, respectivement des universités du Colorado, de Stanford et de Washington, cherchent de tels effets : ils ont construit de délicats détecteurs capables de tester la loi de Newton à des échelles comprises entre un centimètre et quelques dizaines de micromètres (*voir la figure 8*). Dans leur montage, les parties sensibles du détecteur mesurent moins de un millimètre, de sorte qu'elles ont une très faible masse. De nombreux phénomènes parasites doivent être éliminés, telles les forces électrostatiques résiduelles, lesquelles pourraient masquer ou perturber la minuscule attraction gravitationnelle. Très difficile à réaliser, le détecteur correspondant est aussi très difficile à utiliser, mais quel enjeu pour les expérimentateurs! Rien de moins que l'exploration d'un domaine vierge :

la gravité submillimétrique. Les premiers résultats devraient être connus avant la fin de l'année 2000.

Des univers parallèles

Si ces expériences ne réfutent pas la théorie des dimensions cachées, alors notre notion de l'Univers changera. Ce dernier ne serait donc qu'une mince membrane d'un espace aux multiples dimensions ; dans des coupes passant par les dimensions supplémentaires, notre Univers n'apparaîtrait que comme un point unique et infinitésimal sur chaque tranche, entouré de vide. Une telle révolution de nos conceptions n'en serait qu'une de plus dans la vieille tradition copernicienne : l'astronome polonais du XVI^e siècle montra que la Terre n'est pas le centre du Système solaire ; puis les astronomes ont montré que le Système solaire n'est pas celui de la Galaxie, et que notre Galaxie n'est pas le centre de l'Univers. Aujourd'hui, nous découvrons que nos trois dimensions ne sont pas le centre (ou l'essentiel) de l'Univers. Des membranes d'autres univers