

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 d'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

tridimensionnels pourraient être parallèles à la nôtre et placées à moins de un millimètre de la nôtre (voir la figure 5). En outre, bien que toutes les particules du Modèle standard soient nécessairement collées à la membrane qui constitue notre univers, on peut supposer que des particules autres que le graviton ne font pas partie du Modèle standard et se propagent dans les dimensions supplémentaires. Loin d'être vides, les dimensions cachées contiendraient une multitude de structures intéressantes, voire d'autres univers...

L'hypothèse de particules se mouvant dans d'autres dimensions expliquerait deux des plus épais mystères de la physique des particules et de la cosmologie. Les physiciens des particules ignorent en effet si les neutrinos (des particules intervenant dans l'interaction électrofaible) ont une masse ou non. La question est importante pour plusieurs raisons, notamment parce que les neutrinos sont si nombreux dans l'Univers qu'ils déterminent probablement son évolution. Des résultats expérimentaux récents, au Japon, indiquent que les neutrinos auraient une masse non nulle. Or la théorie des dimensions cachées permet de construire un mécanisme pour conférer une masse aux neutrinos et expliquer pourquoi ces masses sont si faibles : elle prévoit que les neutrinos interagissent avec une particule qui habiterait les dimensions cachées. Cette interaction apparaîtrait faible dans nos trois dimensions d'espace, car elle aurait surtout lieu dans les autres dimensions. C'est pourquoi les neutrinos n'auraient qu'une masse faible.

Le problème de la masse cachée de l'Univers est un autre mystère, qui se résoudrait grâce aux dimensions cachées. Invisible, comme son nom l'indique, la «matière noire» semble représenter plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers, mais les cosmologistes ne la trouvent pas. Serait-elle dans un ou plusieurs univers parallèles, à partir desquels, elle affecterait notre Univers par l'unique intermédiaire de la gravité? Le caractère invisible de cette matière s'expliquerait alors facilement. Les photons étant confinés à notre membrane, la matière contenue dans les dimensions parallèles n'envierait aucune lumière vers nos yeux.

Tous les types d'univers parallèles sont envisageables. Il n'y a en effet aucune raison pour que de tels univers aient beaucoup en commun avec le

nôtre, sinon la gravitation. *A priori*, un univers parallèle serait constitué de particules différentes, soumises à des forces différentes, peut-être même confinées dans des membranes au nombre de dimensions différentes. L'une des plus fascinantes possibilités est cependant celle où l'univers parallèle est... le nôtre. Imaginons que la membrane sur laquelle nous vivons soit «pliée» plusieurs fois dans les dimensions supplémentaires (voir la figure 5). Les objets placés de part et d'autre d'un pli pourraient être à la fois à des millions d'années-lumière les uns des autres, à l'intérieur des trois dimensions, et à un millimètre les uns des autres dans les dimensions supplémentaires. Comme la lumière qu'ils émettent doit se propager jusqu'au pli avant de nous revenir, les photons correspondants pourraient être en route depuis la formation de l'Univers! Cependant, nous percevrions l'effet gravitationnel des objets situés au-delà du pli par les gravitons, qui nous atteindraient rapidement. Qu'il s'agisse de particules microscopiques, d'étoiles ou de galaxies ordinaires, ces masses cachées sous les plis de l'Univers seraient à l'origine de nombre d'effets observables intéressants, tels que des ondes gravitationnelles émises par des supernovae invisibles ou d'autres processus astrophysiques violents. À l'aide des détecteurs d'ondes gravitationnelles qui sont en construction, on traquera notamment de tels phénomènes : on cherchera des sources importantes de rayonnement gravitationnel qui ne sont associées à aucune source matérielle visible... de ce côté-ci du pli.

D'autres théories sont possibles

L'approche théorique que nous avons proposée n'est pas la première qui considère de grandes dimensions cachées. Dès 1990, à l'École polytechnique, Ignatios Antoniadis a montré comment certaines dimensions de la théorie des cordes pouvaient atteindre 10^{-19} mètre. Toutefois, il avait conservé l'échelle de Planck aux alentours de 10^{-35} mètre. En 1996, à Princeton, Petr Horava et Edward Witten remarquaient qu'une unique dimension supplémentaire de 10^{-30} mètre suffirait à unifier la gravitation et les autres forces dans un cadre supersymétrique, aux environs de 10^{-32} mètre. Reprenant cette