

Les dimensions cachées de l'Univers

NIMA ARKANI-HAMED • SAVAS DIMOPOULOS • GEORGI DVALI

L'univers visible est-il une membrane qui flotte dans un espace de dimension supérieure? Des physiciens explorent expérimentalement les dimensions supplémentaires afin d'unifier les forces de la nature. Ils envisagent l'existence d'univers parallèles.

Certains des physiciens qui explorent aujourd'hui l'Univers utilisent une idée qui était nichée dans un roman publié en 1884 par l'ecclésiastique anglais Edwin Abbott : *Flatland*. Dans cet ouvrage, un personnage nommé A. Square vit dans un monde à deux dimensions peuplé de figures géométriques : des triangles, des carrés, des pentagones, etc. Vers la fin de l'histoire, une créature sphérique de l'espace tridimensionnel traverse le monde plat de A. Square et sort ce dernier de son plan pour lui montrer la véritable nature de l'Univers. A. Square s'interroge alors : l'espace tridimensionnel serait-il également plongé dans un espace plus vaste, à quatre dimensions? L'idée utilisée pour une révision des théories de l'espace-temps en découle. Dans un univers à deux dimensions, l'espace serait comme un tapis de billard infini, et les physiciens des hautes énergies lanceraient des particules planes les unes contre les autres, jusqu'à les détruire. Ils s'étonneraient de voir disparaître une partie notable des énergies mises en jeu dans leurs collisions : cette énergie manquante correspondrait au bruit engendré par les chocs. Ne percevant que les signaux sonores qui se propagent dans les deux dimensions du billard, les physiciens n'entendraient qu'une infime partie du bruit total. Toutefois, à partir de leurs observations partielles, les physiciens les plus hardis pourraient conjecturer l'existence d'une troisième dimension.

Dans cette dimension supplémentaire, l'énergie sonore manquante serait emportée par des particules inconnues : les phonons...

Le scénario que quelques physiciens proposent aujourd'hui est l'extension de cette idée aux dimensions supérieures. Il existe des variantes de ces nouvelles théories de l'espace-temps, mais toutes assimilent notre espace tridimensionnel à un «billard» plongé dans un univers qui comporte une ou plusieurs dimensions supplémentaires. Tout ce que nous voyons dans les trois dimensions qui nous sont familières y serait confiné, à l'exception des gravitons, les particules qui transmettent l'interaction gravitationnelle. Comme les phonons dans l'univers du billard, les gravitons n'ont pour le moment jamais été découverts.

Déjà, certains expérimentateurs tentent de découvrir ces dimensions cachées. Leurs dispositifs expérimentaux testent l'influence éventuelle de ces dimensions sur la gravité à petite distance. Ils espèrent notamment que le Grand Collisionneur de hadrons LHC (de l'anglais *Large Hadron Collider*) révélera également des phénomènes commandés par la nature quantique de la gravitation à petite distance, telle la création d'éphémères micro-trous noirs. Notre théorie des dimensions cachées se fonde sur les avancées les plus récentes de la théorie des cordes : les particules observées dans les accélérateurs sont identifiées aux modes vibratoires de cordes élémentaires. Grâce à ce concept, la théorie des

dimensions cachées résoudra peut-être les énigmes actuelles de la physique des particules et de la cosmologie.

L'inexplicable faiblesse de la gravité

Les théories des dimensions cachées de l'Univers, comme la théorie des cordes, sont nées des études de la gravitation. Plus de trois siècles après Isaac Newton, la physique n'explique toujours pas pourquoi cette interaction est si faible. Malgré la masse énorme de la Terre, la force magnétique exercée par un petit aimant vainc aisément la force d'attraction gravitationnelle qui retient un clou. Les forces gravitationnelles entre deux électrons sont 10^{43} fois inférieures aux forces de répulsion électrique entre ces charges négatives. La gravitation joue un rôle important dans notre existence, parce que les masses macroscopiques sont électriquement neutres : les forces électriques étant nulles, nos pieds restent collés à la Terre, et cette dernière reste en orbite autour du Soleil ; seule la gravitation se fait sentir.

Pour que les forces électriques et gravitationnelles qui s'exercent entre deux électrons soient égales, il faudrait que leurs masses soit 10^{22} fois supérieures. La production d'une particule aussi lourde nécessiterait une énergie considérable, de plus de 10^{19} gigaélectronvolts. Cette «énergie de Planck» marque un «mur du flou absolu», au-delà duquel plus aucune mesure de l'énergie n'a de sens.

1. NOTRE UNIVERS est peut-être une mince membrane, dans un espace de dimension supérieure. Avant la fin de l'année 2000, les physiciens auront commencé les tests expérimentaux de cette théorie.

Notons que le système d'unités employé par les physiciens des particules leur permet de relier l'échelle d'énergie à celle des distances : plus un choc met d'énergie en jeu, plus les distances qui interviennent dans la collision sont petites. Au seuil d'énergie de Planck correspond ainsi une «distance de Planck» égale 10^{-35} mètre. Elle est la dimension au-dessous de laquelle toute mesure géométrique perd son sens. À titre de comparaison, l'unique proton qui constitue le noyau d'hydrogène a une masse 10^{19} fois inférieure à l'énergie de Planck (pour les physiciens, masse et énergie sont équivalents) et une taille 10^{19} supérieure à la distance de Planck. Rien d'étonnant donc à ce que l'échelle d'énergie (ou de distance) de Planck reste définitivement hors de la portée des accélérateurs. Même à son énergie maximale, le LHC n'explorera au mieux que des distances de l'ordre de 10^{-19} mètre, qui sont 10^{16} fois supérieures à celle de Planck. Comme les forces de gravité et les forces électromagnétiques ne sont comparables qu'à l'échelle de Planck, les physiciens ont toujours pensé qu'une théorie unifiant les diverses interactions ne pourrait être testée qu'à ces énergies ; autrement dit, une telle théorie d'unification resterait à jamais hors de portée expérimentale.

Aujourd'hui, les accélérateurs les plus puissants explorent les phénomènes à des énergies comprises entre 100 et 1 000 gigaélectronvolts. Dans ce domaine d'énergie, les expérimentateurs testent depuis 25 ans le Modèle

standard, la théorie qui unifie l'interaction électromagnétique et l'interaction faible (responsable des désintégrations bêta, caractérisées par l'émission d'un électron ou de son antiparticule, le positron). Comme le Modèle standard décrit très précisément les interactions faibles et électromagnétiques dans un nombre considérable de cas expérimentaux, les physiciens ne distinguent plus aujourd'hui ces deux interactions. Ils ne parlent plus que d'interaction électrofaible, et le domaine d'énergie des accélérateurs est dénommé échelle électrofaible. Nous comprendrions mieux l'extraordinaire faiblesse de la gravitation si le Modèle standard expliquait le facteur 10^{16} qui sépare l'échelle d'énergie électrofaible de celle de Planck.

C'est malheureusement impossible, car, pour bien décrire les phénomènes, le Modèle standard doit être ajusté : on doit donner des valeurs appropriées aux 17 paramètres du Modèle en fonction de l'énergie des phénomènes considérés. Quand ce réglage est réalisé avec une grande précision, le Modèle standard recueille un nombre impressionnant de succès. Notamment, il décrit très bien la myriade de phénomènes observés dans les accélérateurs. Toutefois la finesse extrême de ce réglage – 32 décimales sont nécessaires – intrigue les physiciens. Peu naturelle, cette précision phénoménale est cependant indispensable pour faire

disparaître les effets de certaines fluctuations quantiques prévues par la théorie. Or ces effets sont de l'ordre de l'énergie de Planck... L'ajustage fin du Modèle standard sur l'échelle électrofaible interdit aussi l'utilisation de la théorie à une autre échelle, la rendant ainsi inutile pour expliquer l'unification des interactions électrofaibles avec la gravitation à l'échelle de Planck.

C'est là une des grandes questions ouvertes de la physique des particules : pourquoi le Modèle standard ne s'applique-t-il qu'à l'échelle électrofaible ? Pour résoudre ce «problème hiérarchique», les théoriciens testent depuis 20 ans diverses façons de modifier le Modèle standard aux limites du domaine expérimental (10^{-19} mètre). Leur objectif est la construction d'une nouvelle théorie insensible aux fluctuations quantiques. L'approche la plus utilisée est une réorganisation de l'ensemble des particules élémentaires connues suivant une nouvelle symétrie, nommée supersymétrie. Cette théorie a notamment l'avantage de décrire par un même formalisme trois forces de la Nature : les interactions

électromagnétiques, faibles et fortes (responsable de la cohésion des noyaux d'atome). Bien que les tests expérimentaux restent à faire, certaines observations montrent l'intérêt d'une extension supersymétrique du Modèle standard. Notamment, les extrapolations des intensités mesurées à petite distance pour les interactions électromagnétiques, faibles et fortes faites ne convergent aux environs de 10^{-32} mètre que si les règles de la supersymétrie sont respectées. De nombreux physiciens y voient un fort indice de

l'unification des interactions faibles, fortes et électromagnétiques à cette échelle... inaccessible aux collisionneurs, bien qu'elle soit supérieure à celle de Planck.

La gravitation à grand nombre de dimensions

Une approche radicalement différente pourrait résoudre le problème hiérarchique. Au cours des deux dernières années, certains théoriciens ont proposé de modifier l'espace-temps, la

gravité et même l'échelle de Planck elle-même. À la base de cette proposition, on suppose que l'échelle de Planck doit être conçue comme l'énergie à laquelle les forces de la Nature s'équilibrent. Source de tant de difficultés dans la théorie actuelle, sa valeur résulterait d'une hypothèse jamais démontrée: la validité universelle de la loi de Newton.

La loi de Newton décrit l'intensité des forces par lesquelles deux masses s'attirent : elle stipule que cette intensité est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les masses. Cette loi de la gravitation est parfaitement vérifiée à grande distance : aux distances macroscopiques, à notre échelle ou à l'échelle des systèmes planétaires, stellaires, galactiques, etc. Toutefois, les forces gravitationnelles sont si faibles qu'on n'a pas mesuré leur intensité aux distances inférieures à un millimètre environ. Pour conclure qu'elles sont égales aux autres interactions à l'échelle de Planck, on doit extrapoler la loi macroscopique sur 32 ordres de grandeur!

La loi de Newton telle que nous la connaissons n'est naturelle que dans un espace à trois dimensions (voir la figure 2). Considérons, en effet, les forces d'attraction gravitationnelles dues à une masse sphérique. Ces forces, à une distance donnée, se répartissent sur une sphère dont la surface croît avec le carré du rayon, de sorte que l'intensité des forces doit diminuer d'autant. Dans un univers qui aurait quatre dimensions spatiales, les lignes de champ issues d'une masse ponctuelle se répartiraient sur l'équivalent d'une sphère, à quatre dimensions. Comme l'aire d'une telle hypersphère augmente avec le cube de son rayon, la force de gravitation serait inversement proportionnelle au cube de la distance à la masse.

Manifestement, une telle loi ne règle pas les phénomènes cosmiques. Supposons cependant qu'une quatrième dimension spatiale soit cyclique, de rayon R : en chaque point de l'espace tridimensionnel, on imagine la présence d'un petit cercle. Toutefois, on imagine difficilement la présence de ces cercles alors qu'ils ne sont pas dans l'espace tridimensionnel. Pour comprendre leur relation, imaginons un univers qui n'aurait que deux dimensions d'espace, dont une serait cyclique (voir la figure 3). Un tel univers serait comme le cylindre décrit

La structure de l'Univers

Les dimensions. Notre Univers semble avoir quatre dimensions : trois d'espace (haut-bas, gauche-droite, avant-arrière) et une de temps. Bien qu'il nous soit difficile de nous représenter des dimensions supplémentaires, les mathématiciens et les physiciens ont analysé depuis longtemps les propriétés d'espaces théoriques de dimension quelconque.

La taille des dimensions. Les quatre dimensions connues de l'espace-temps sont immenses. La dimension temporelle s'étend dans le passé sur au moins 15 milliards d'années, et peut-être à l'infini dans le futur. Les trois dimensions spatiales sont peut-être infinies ; nos télescopes ont détecté des objets situés à plus de 13 milliards d'années-lumière de nous. Cependant, les dimensions peuvent aussi être finies : par exemple, les deux dimensions de la surface de la Terre s'étendent seulement sur 40 000 kilomètres environ.

Les petites dimensions supplémentaires. Certaines théories physiques modernes postulent l'existence de dimensions d'espace additionnelles, enroulées en cercles si petits (peut-être seulement 10^{-35} mètre de rayon) que nous ne les avons pas encore détectées. Imaginons un fil de coton : en première approximation, il est unidimensionnel, car un nombre suffit pour déterminer où se trouve une fourmi sur le fil. Cependant, avec un microscope, on voit des acariens se déplacer sur la surface bidimensionnelle du fil : le long de la grande dimension (la longueur du fil), mais également de la petite dimension du fil (sa circonférence).

Les grandes dimensions supplémentaires. Récemment, les physiciens ont compris qu'il pourrait exister des dimensions supplémentaires à la fois «grandes» (jusqu'à un millimètre) et invisibles. De façon surprenante, aucune donnée expérimentale connue ne permet de rejeter cette théorie, qui expliquerait plusieurs énigmes de la physique des particules et de la cosmologie. Comme le reste de l'univers tridimensionnel que nous connaissons (hormis la gravité), nous serions coincés sur une «membrane», comme les boules de billard sur le feutre vert bidimensionnel de leur table.

Les dimensions et la gravitation. Le comportement de la gravitation, notamment son intensité, est intimement

lié au nombre de dimensions où elle s'exerce. Les études de l'action de la gravité sur des distances inférieures au millimètre pourraient nous révéler la présence de grandes dimensions supplémentaires. De telles expériences sont en cours. Ces dimensions auraient également pour effet de rendre plus fréquente la production d'objets bizarres postulés par la gravitation quantique, comme des micro-trous noirs, des gravitons et des supercordes : nous pourrions détecter ces objets, d'ici une dizaine d'années, dans les accélérateurs de particules de haute énergie.



LES PARTICULES FONDAMENTALES de la membrane qu'est notre Univers connu semble être comme des boules sur une table de billard. Les collisions des boules de billard rayonnent de l'énergie dans les trois dimensions sous forme d'ondes sonores (en rouge), analogues aux gravitons. Des études détaillées du mouvement des boules pourraient détecter l'énergie «manquante», et donc les dimensions supérieures.