

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 super-cordes : 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.

