

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

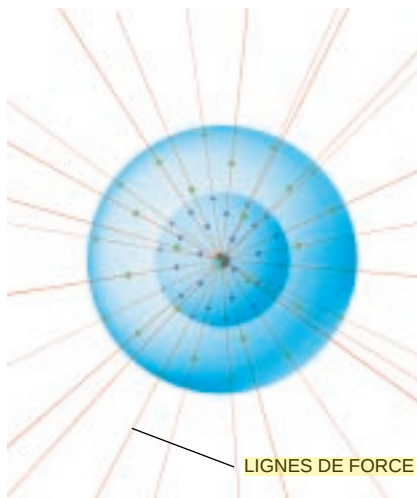
lié au nombre de dimensions où elle s'exerce. Les études de l'action de la gravité sur des distances inférieures au millimètre pourraient nous révéler la présence de grandes dimensions supplémentaires. De telles expériences sont en cours. Ces dimensions auraient également pour effet de rendre plus fréquente 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.

dans la figure 3. Aux échelles bien supérieures à son diamètre, la géométrie et la physique dans un tel univers se confondent quasiment avec celles de la droite. À petite échelle, au contraire, la présence de la dimension cyclique fait apparaître des propriétés originales. Notamment, quand une masse est présente, les lignes de champ gravitationnel (perpendiculaires aux lignes d'égale intensité des forces de gravitation) s'étalent dans l'espace, de sorte qu'aux distances supérieures au rayon R de la dimension cyclique, l'influence de la dimension cyclique n'intervient plus. De même, dans un modèle d'univers à dimensions cycliques supplémentaires, les lignes du champ de gravitation situées à une distance de la masse bien inférieure à R se répartissent dans les quatre dimensions spatiales, comme si l'espace était identique selon ces quatre dimensions, et l'intensité de la gravitation décroît alors comme l'inverse du cube de la distance à la masse. En revanche, à distance supérieure, les lignes de champ ne se répartissent régulièrement que dans trois dimensions, et la force de gravitation décroît comme l'inverse du carré de la distance.

L'introduction de dimensions supplémentaires donnerait aux forces de gravitation une intensité supérieure aux courtes distances, de sorte que l'échelle de Planck serait bien supérieure à 10^{-35} mètre. On résoudrait notamment le problème de la hiérarchie en ajoutant suffisamment de



2. DES LIGNES DE CHAMP GRAVITATIONNEL, dues à la masse de la Terre, rayonnent à partir de celle-ci, dans les trois dimensions de l'espace. Ces lignes de champ sont perpendiculaires aux surfaces composées de points qui subissent tous la même attraction gravitationnelle. À mesure qu'on s'éloigne de la Terre, la force gravitationnelle décroît, en raison de sa « dilution » sur des surfaces de plus en plus grandes (des sphères). Comme la surface de chacune de ces sphères augmente proportionnellement au carré de son rayon, la force de gravitation décroît comme l'inverse du carré de la distance.

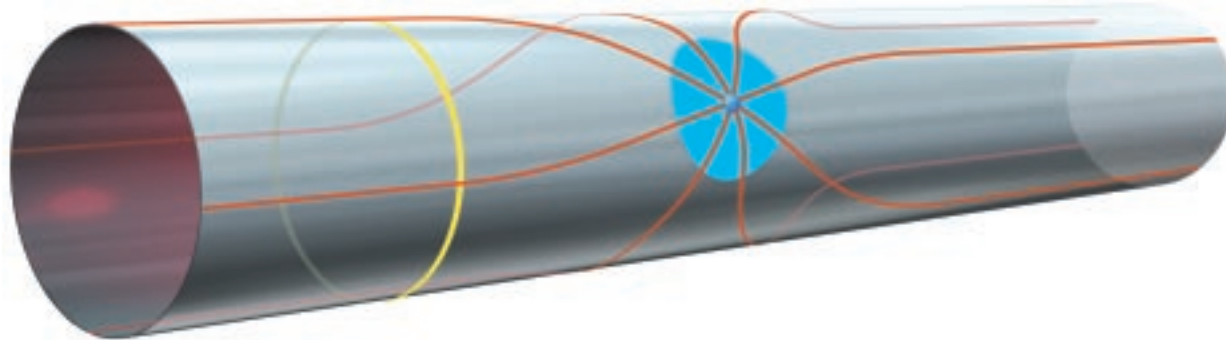
dimensions pour que l'échelle de Planck soit proche de l'échelle électrofaible : vers 10^{-19} mètre, au lieu de 10^{-35} . Une telle idée de dimensions cycliques supplémentaires n'est pas nouvelle : elle date des années 1920, quand le mathématicien polonais Theodor Kaluza et le physicien suédois Oskar Klein développèrent une remarquable théorie qui unifiait la gravitation et l'électromagnétisme à l'aide d'une dimension supplémentaire. L'idée fut ensuite reprise dans la théorie des cordes, édifice mathématique dont la cohérence nécessite dix dimensions spatiales. Cependant, les théoriciens qui utilisaient jusqu'à présent

des dimensions cycliques supplémentaires leur supposaient toujours un rayon proche de l'échelle de Planck habituelle, de 10^{-35} mètre ; le problème hiérarchique restait ouvert. Dans la théorie récemment proposée, au contraire, les dimensions cycliques sont à l'intérieur de cercles dont le rayon, selon les modèles, est compris entre 10^{-14} mètre à un millimètre.

Notre Univers sur un mur

Si de telles dimensions cachées existent, pourquoi ne les voyons-nous pas ? Les effets de dimensions cachées de l'ordre du millimètre devraient être discernables à l'œil nu et, *a fortiori*, au microscope. En outre, bien que la gravité n'ait jamais été mesurée aux distances inférieures à un millimètre, nous possédons une kyrielle de résultats expérimentaux sur les autres forces aux courtes distances. Or, tous s'expliquent par l'hypothèse d'un espace à seulement trois dimensions. Où se trouveraient des dimensions cachées de taille atteignant un millimètre ?

Supposons que la matière et les trois forces faible, forte et électromagnétique soient confinées dans une membrane (voir la figure 4), laquelle serait l'espace tridimensionnel classique. Nous vivrions alors comme les figures géométriques de *Flatland* : les particules décrites par le Modèle standard ne seraient présentes que dans la membrane, et seules les lignes de force gravitationnelles s'étendraient dans l'espace complet : autrement dit, seules les particules responsables de l'interaction, c'est-à-dire les gravitons, se déplaceraient librement dans les dimensions cycliques. Dans un tel univers, la présence de dimensions supplémentaires ne serait perceptible que par les effets de la gravité, par le



3. UNE PETITE DIMENSION D'ESPACE SUPPLÉMENTAIRE, refermée sur elle-même, aurait une influence sur les variations de la gravitation en fonction de la distance. Aux distances inférieures au rayon de la dimension refermée (zones bleues), les lignes de champ gra-

vitationnel (lignes rouges) s'écarteraient rapidement dans toutes les dimensions d'espace. À des distances bien supérieures (au-delà du cercle jaune), les lignes rempliraient régulièrement la dimension supplémentaire, qui n'aurait plus d'effet sur la gravitation.

détecteur d'énergie perdue dans les dimensions supplémentaires (voir l'encadré de la page 58).

Est-il si étrange que des particules soient confinées à une membrane? Pas tant que ça : les électrons d'un fil de cuivre ne se déplacent que dans le fil, et pas dans l'espace environnant ; les vagues se propagent essentiellement à la surface de l'océan, jamais vers le fond. L'idée des particules restreintes à une membrane provient de la théorie des cordes, où les physiciens ont identifié des membranes particulières nommées D-branes : le D est l'initiale du mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune

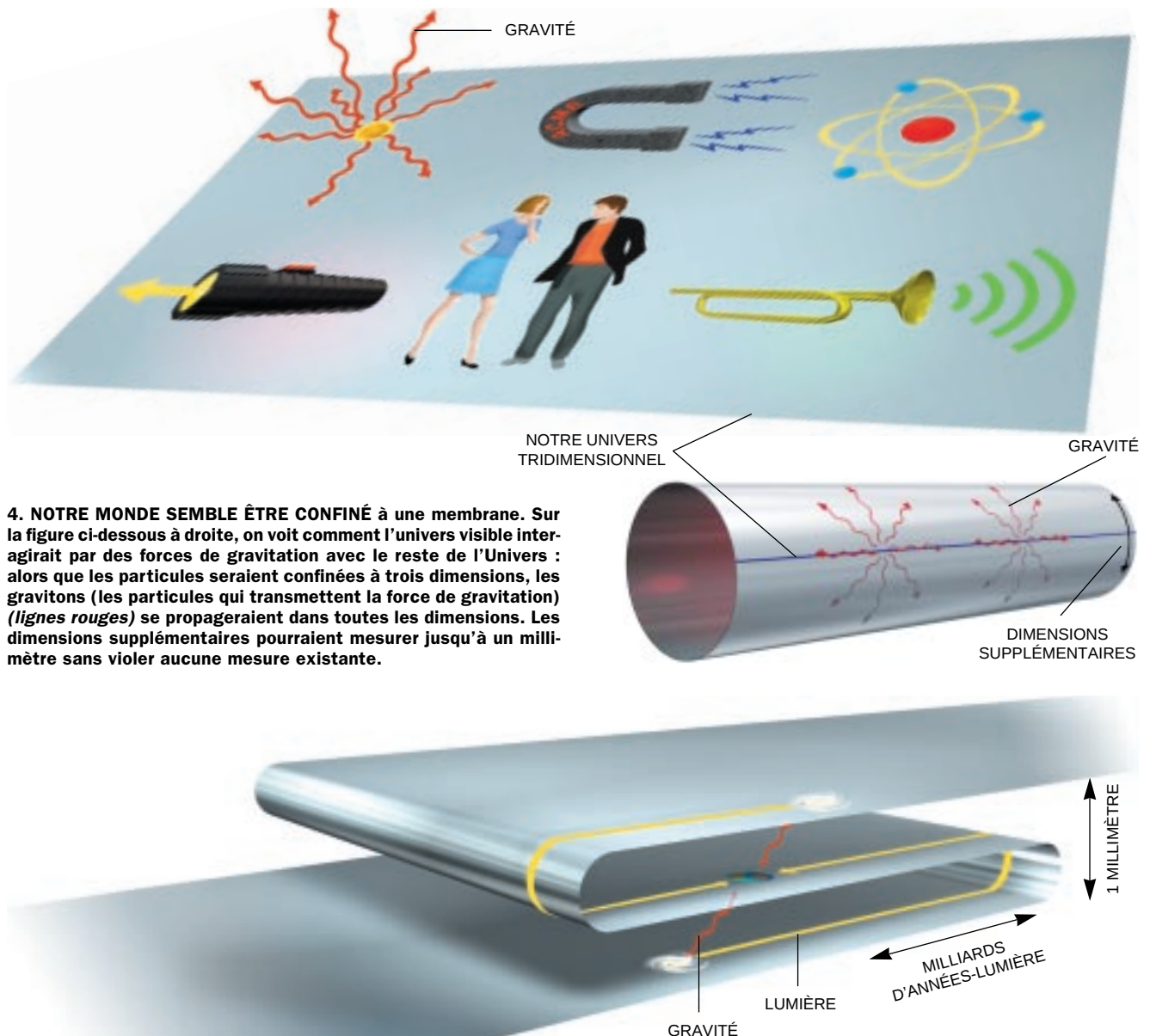
Dirichlet (1805-1859), mathématicien qui explora les propriétés mathématiques d'espaces tels que sont les D-branes. Selon la théorie des cordes, les électrons et les photons sont comme de minuscules bouts de corde dont les extrémités restent attachées à une D-brane ; les gravitons, en revanche, sont de minuscules boucles de corde qui se déplacent dans toutes les dimensions.

Évaporation de gravitons

Contrairement à ce que l'on croit, les bons physiciens passent moins de temps à construire des théories qu'à

chercher les failles des théories proposées par leurs collègues ou par eux-mêmes. Comme la théorie des dimensions cachées de grande taille modifie la gravité aux distances macroscopiques et impose une réinterprétation de certains phénomènes aux hautes énergies, sa réfutation a d'abord semblé simple. Pourtant, la théorie résiste aujourd'hui à tous les tests expérimentaux.

On craignait, par exemple, qu'une modification à petite distance de la gravité n'ait des effets sur la stabilité des systèmes macroscopiques, telles les étoiles ou les galaxies. Les calculs ont



4. NOTRE MONDE SEMBLE ÊTRE CONFINÉ à une membrane. Sur la figure ci-dessous à droite, on voit comment l'univers visible interagirait par des forces de gravitation avec le reste de l'Univers : alors que les particules seraient confinées à trois dimensions, les gravitons (les particules qui transmettent la force de gravitation) (*lignes rouges*) se propageraient dans toutes les dimensions. Les dimensions supplémentaires pourraient mesurer jusqu'à un millimètre sans violer aucune mesure existante.

5. DES UNIVERS PARALLÈLES pourraient côtoyer le nôtre, sur la même membrane, à moins d'un millimètre de distance, dans les dimensions supplémentaires. Ces univers parallèles pourraient également être sur des membranes différentes (*cas non représenté*). La matière dite «noire» correspondrait à des étoiles et à des

galaxies ordinaires appartenant à des couches adjacentes : leur gravité (*en rouge*) peut agir sur notre espace en prenant un raccourci par les dimensions supplémentaires, mais nous ne pouvons pas les voir, car la lumière (*en jaune*) devrait parcourir des milliards d'années-lumière jusqu'à la pluri avant de nous revenir.