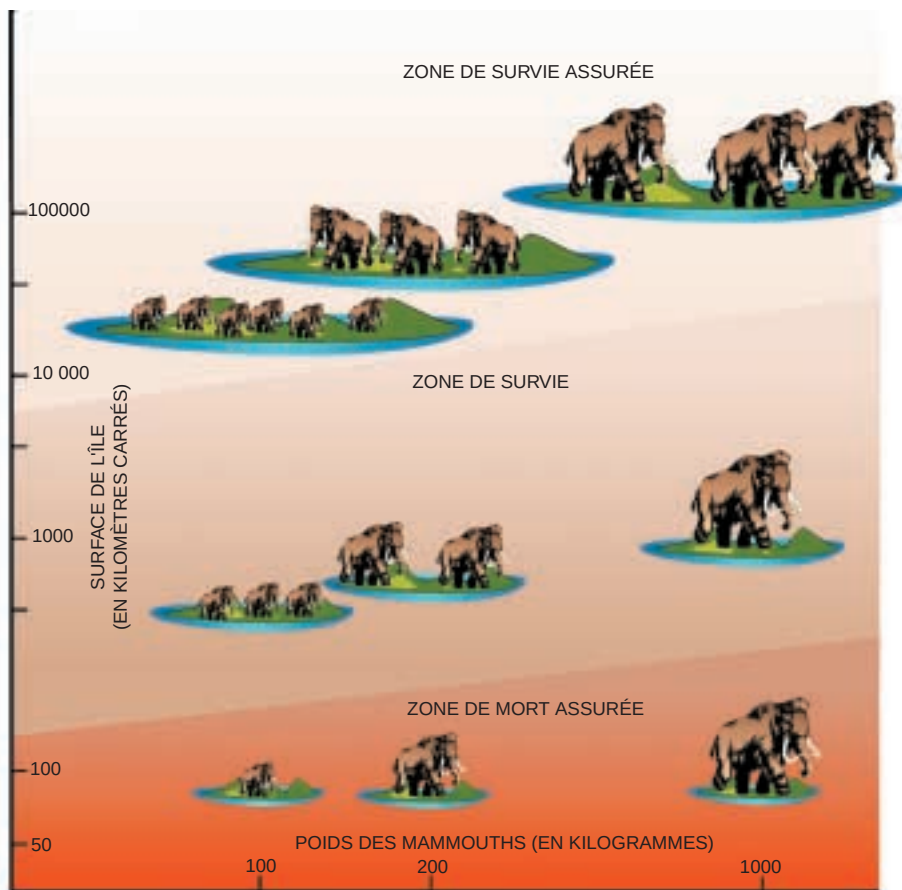




6. ÉTAGEMENT DES SURFACES INSULAIRES nécessaires pour qu'une population d'environ 500 mammouths de poids moyens 100, 200 et 1 000 kilogrammes se maintienne 1 000 ans. Ces résultats montrent qu'une population de mammouths pouvait mieux survivre sur une île si ses individus étaient de tailles réduites. Les mammouths insulaires n'étaient pas confrontés aux gros prédateurs, comme leurs congénères continentaux. Ils survivaient donc d'autant mieux qu'ils étaient petits et donc plus facilement rassasiés ! C'est pourquoi, les espèces insulaires de mammouth ont toutes évolué vers le nanisme.

protégé, le nombre d'individus d'une population était limité. Contrainte supplémentaire, ce nombre ne devait pas descendre au-dessous d'un certain seuil. Sinon, le manque de brassage aurait débilisé l'espèce, la vouant à disparaître. Sur certaines îles, cependant, de nouveaux géniteurs ont pu venir restaurer le patrimoine génétique. Tenant compte de l'effet du goulot d'étranglement, L. Roth a estimé que le nombre d'individus d'une population ne doit pas descendre au-dessous de 500. Elle a spéculé sur les surfaces insulaires nécessaires pour que 500 individus se maintiennent sur différentes îles, compte tenu du poids moyen qui y était observé. Elle est ainsi parvenue à préciser quels étaient les seuils de vulnérabilité pour les populations insulaires de proboscidiens en fonction de la surface de leur île.

Les chiffres qui concernent l'archipel de Santa Rosa montrent l'intérêt des résultats qu'elle a obtenus. Les

mammouths qui ont vécu sur les quelque 1 800 kilomètres carrés de ces îles pouvaient parfaitement s'y maintenir, à condition que leur taille soit comprise entre 200 kilogrammes et 2 tonnes. À l'évidence, l'espèce du continent, qui atteignait en moyenne dix tonnes, n'aurait eu aucune chance de persister dans un tel environnement ! L. Roth a aussi évalué la sur-

face insulaire minimale pour qu'une espèce de proboscidiens de 100, 200 kilogrammes, etc. perde 1 000 ans dans une île. Elle conclut que 140 à 3 600 kilomètres carrés sont nécessaires pour un groupe de 500 individus de 100 kilogrammes, 180 kilomètres carrés à 4 700 kilomètres carrés pour un groupe d'animaux deux fois plus lourds et 310 à 9 000 kilomètres carrés pour un groupe d'animaux dix fois plus lourds (une tonne). Dans les fourchettes précédentes, la limite basse correspond au cas où la végétation est soumise à des variations importantes et fréquentes, la limite haute à celui où le couvert végétal est stable. Ces derniers chiffres démontrent à quel point la dynamique du climat joue un rôle important dans la survie d'une grande espèce. En effet, selon la fréquence à laquelle les changements climatiques se succèdent, les paléocéologues estiment que l'espace vital minimum d'une grande espèce varie d'un facteur 1 à 20, voire s'agrandit 30 fois !

L'étude des faunes fossiles insulaires a un grand intérêt pour la gestion des populations actuelles de grands mammifères. Par la force des choses, les réserves où ces animaux sont confinés ont été divisées en multiples isolats au cours du dernier siècle. Les exemples anciens montrent que, si l'on souhaite conserver ces grosses bêtes, on doit accorder aux réserves et aux parcs naturels des surfaces suffisantes. Suivant les cas, ces derniers devront couvrir plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de kilomètres carrés. Le recul que donne l'étude des mammifères des îles du passé rend pessimiste. Tous les espèces insulaires ont fini par disparaître, même si certaines d'entre elles étaient... géantes.

Jean-Louis HARTENBERGER est paléontologue à l'Institut des sciences de l'évolution de l'Université de Montpellier.

V.L. ROTH, *Insular Dwarf Elephants : a Case Study in Body Mass Estimation and Ecological Inferences*, in *Body Size in Mammalian Paleobiology : Estimation and Ecological Inference*, sous la direction de J. Damuth et B.J. MacFadden, Cambridge University Press, 1990.

V.L. ROTH, *Inferences from Allometry and Fossils : Dwarfing of Elephants on Islands*, in *Oxford Surveys of Evolutionary Biology*, sous la direction de D. Futuyama

et J. Antonovics, vol. 8, pp. 259-288, 1992.

D.A. MCFARLANE, R.D.E. MCPHEE et D.E. FORD, *Body Size Variability and a Sanguonionian Extinction Model for Amblyrhiza a West Indian Megafaunal Rodent*, in *Quaternary Research*, n° 50, pp. 80-89, 1998.

A.H. SIMMONS, *Faunal Extinction in an Island Society. Pygmy Hippopotamus of Cyprus*, New York, Kluwer Academic, Plenum Publishers, 1999.

Jean-Denis VIGNE, *Les chasseurs préhistoriques dans les îles méditerranéennes*, in Dossier Pour La Science *La valse des espèces*, juillet 2000.

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 positon). 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

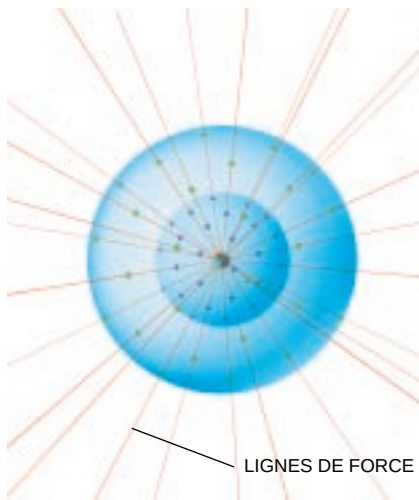
lié au nombre de dimensions où elle s'exerce. Les études de l'action de la gravité sur des distances inférieures au millimètre pourraient nous révéler la présence de grandes dimensions supplémentaires. De telles expériences sont en cours. Ces dimensions auraient également pour effet de rendre plus fréquente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

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.

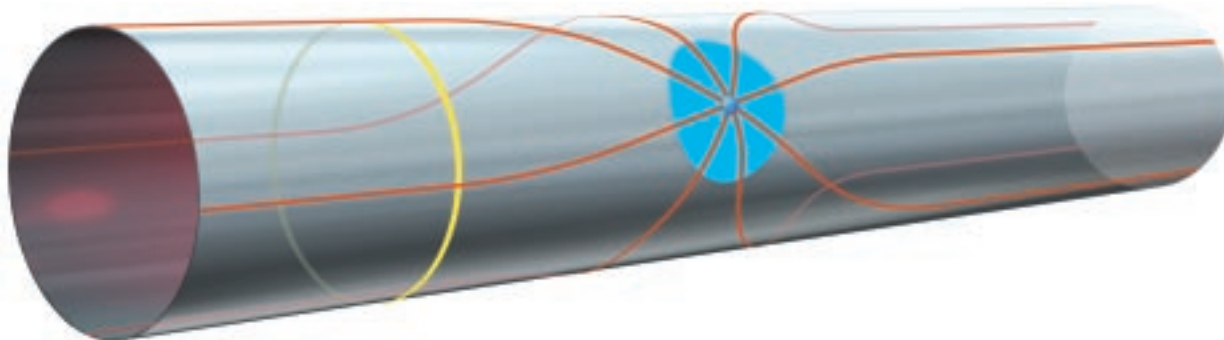
dimensions pour que l'échelle de Planck soit proche de l'échelle électrofaible : vers 10^{-19} mètre, au lieu de 10^{-35} . Une telle idée de dimensions cycliques supplémentaires n'est pas nouvelle : elle date des années 1920, quand le mathématicien polonais Theodor Kaluza et le physicien suédois Oskar 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-

vitational (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

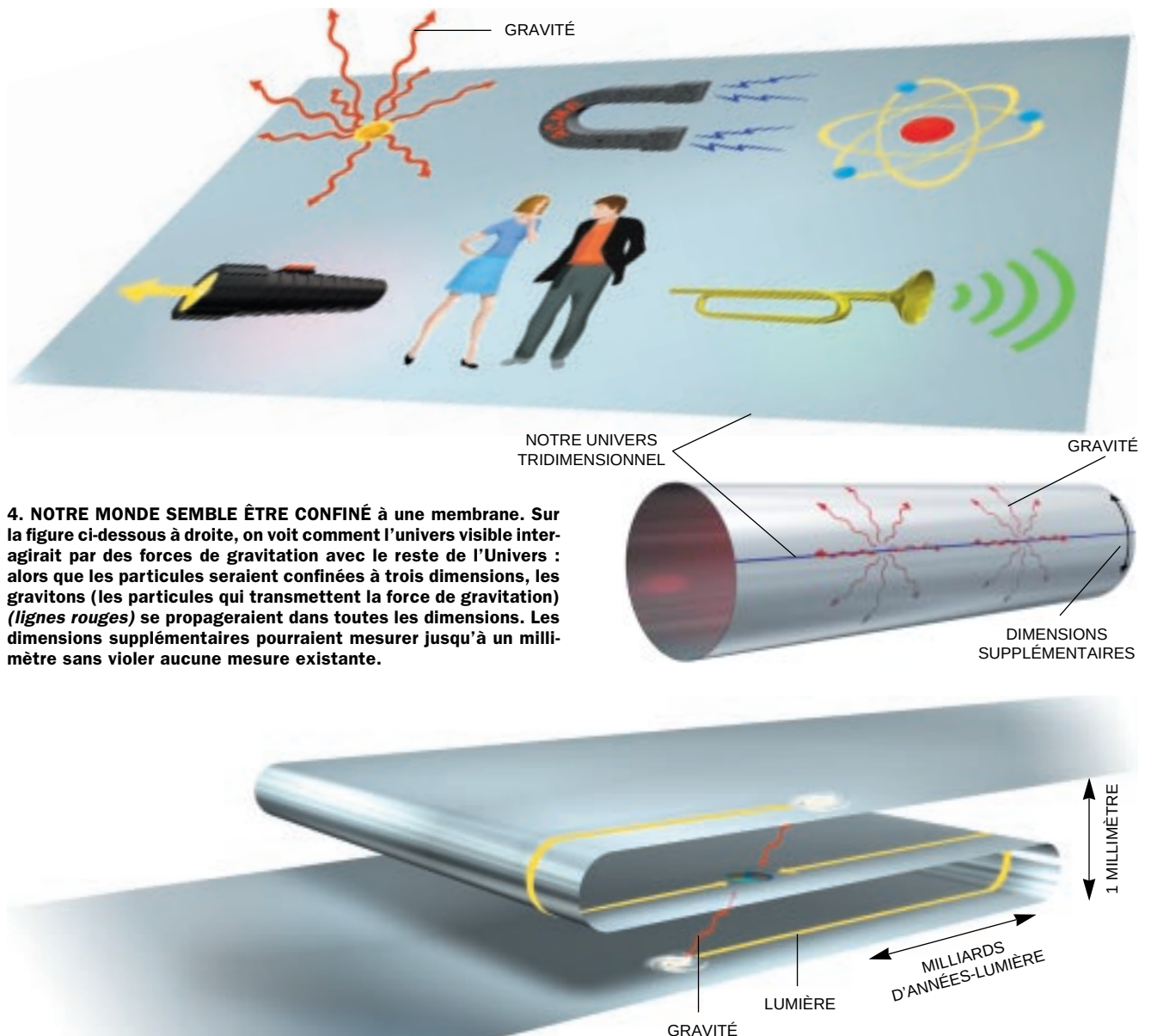
Dirichlet (1805-1859), mathématicien qui explora les propriétés mathématiques d'espaces tels que sont les D-branes. Selon la théorie des cordes, les électrons et les photons sont comme de minuscules bouts de corde dont les extrémités restent attachées à une D-brane ; les gravitons, en revanche, sont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

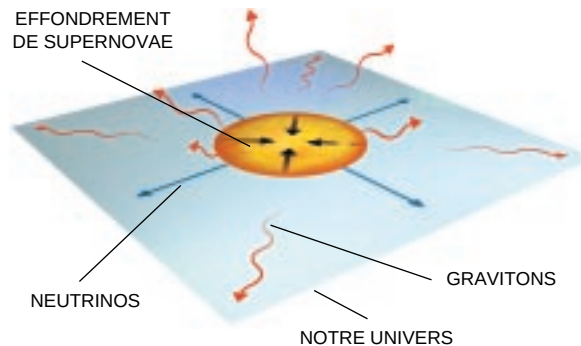
montré que les modifications éventuelles de la loi de Newton, aux distances submillimétriques, ne réduisent pas la cohésion des étoiles. En effet, même si la gravité est renforcée à petite distance, son intensité n'égale celle des autres forces qu'aux distances inférieures à 10^{-19} mètre ; aux grandes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

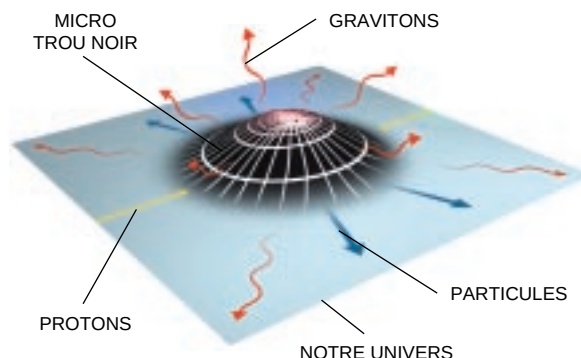
Les supernovae sont des phénomènes qui devraient libérer beaucoup de gravitons, qui quitteraient la membrane où nous sommes confinés. Les supernovae s'observent quand toute la matière des étoiles a fusionné, par des réactions nucléaires : l'énergie ne vainc alors plus la pression gravitationnelle, et 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'évaporerait 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'évaporerait 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

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.

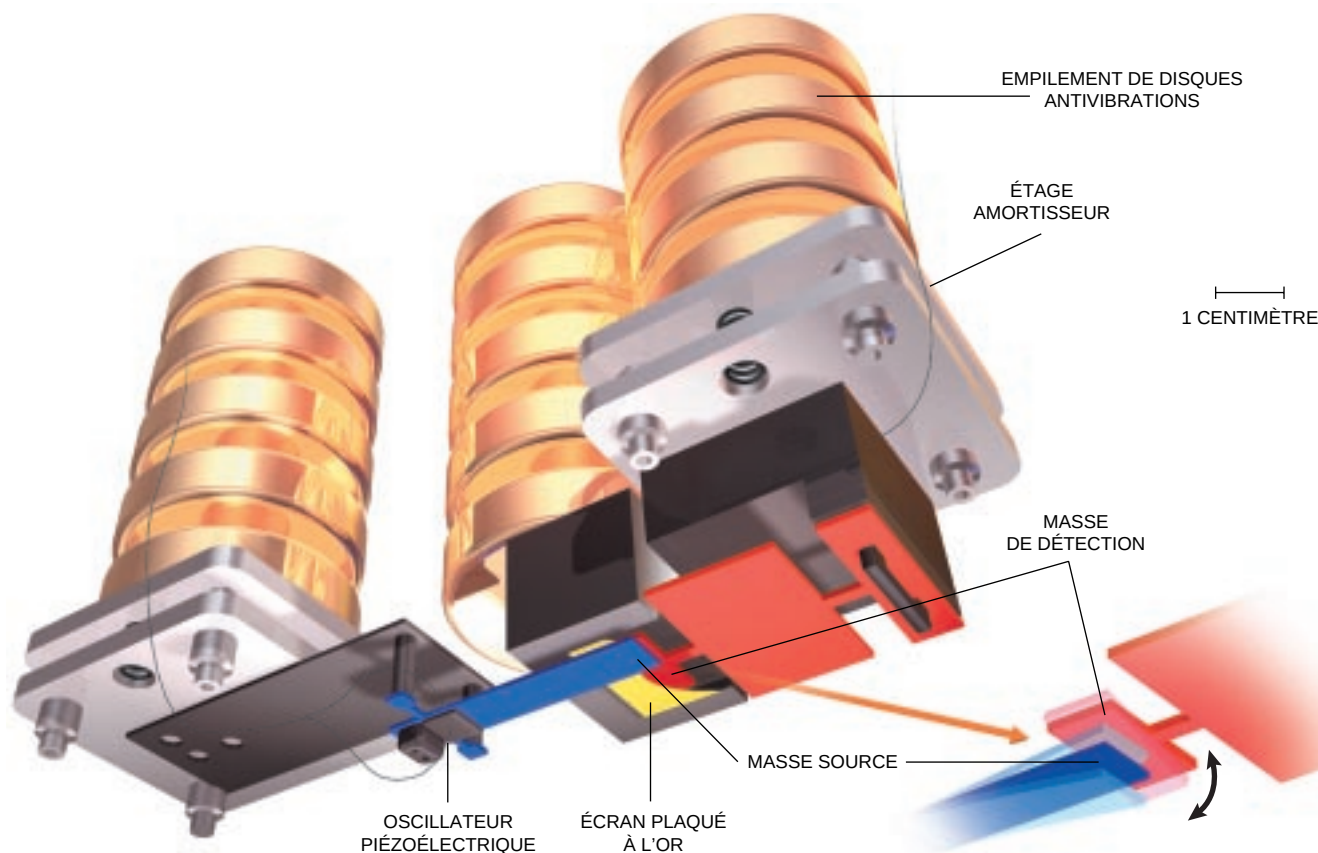
Le problème de la masse cachée de l'Univers est un autre mystère, qui se résoudrait grâce aux dimensions cachées. Invisible, comme son nom l'indique, la «matière noire» semble représenter plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers, mais les cosmologistes ne la trouvent pas. Serait-elle dans un ou 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'enverrait 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



8. UN OSCILLATEUR À TORSION, construit à l'Université du Colorado, mesure des forces de gravitation à des distances comprises entre 0,05 et 1,0 millimètre. Des cristaux piézo-électriques font vibrer une lame en tungstène (*en violet*) comme un plongeur. Toute force agissant entre la masse source et le détecteur (également en tungstène, *en rouge*) produit des oscillations de torsion du détecteur (*cartouche*), qui sont détectées par un dispositif électronique. Un bouclier recouvert d'une mince couche

d'or supprime les forces électrostatiques, et la suspension des piles d'isolation en laiton empêche les vibrations de se propager de la source au détecteur. Les boucliers électrostatiques entourant le dispositif ne sont pas représentés ici. On attend cette année les résultats des expériences effectuées à la température ambiante. Ultérieurement, afin d'obtenir des mesures plus précises, on refroidira le dispositif à l'hélium liquide, jusqu'à une température de quatre kelvins (-269°C).

idée, Joseph Lykken a ensuite tenté d'abaisser l'échelle d'unification à 10^{-19} mètre, mais sans invoquer de grandes dimensions supplémentaires. De leur côté, Keith Dienes et Tony Gherghetta, au CERN, ont observé en 1998 que des dimensions supplémentaires de rayon inférieur à 10^{-19} mètre permettraient une unification des forces à des distances bien supérieures à 10^{-32} mètre.

Après la publication de notre théorie, en 1998, plusieurs propositions dérivées sont apparues. Toutes font appel aux mêmes ingrédients de base : des dimensions supplémentaires cycliques et un modèle de monde sur une membrane. Ainsi, nos collègues Lisa Randall et Raman Sundrum ont proposé que la gravitation soit confinée dans une membrane à cinq dimensions infinies (non cycliques). Dans un tel univers, la gravitation serait nécessairement plus faible, car nous ne serions pas sur la membrane où elle se fait sentir.

Toutes ces théories cherchent différemment à résoudre le même pro-

blème de la hiérarchie. Pendant 20 ans, on a laissé l'échelle de Planck à 10^{-35} mètre tout en supposant que les interactions changent à partir de 10^{-19} mètre. Cette approche a le défaut de reléguer toute tentative de quantifier la gravitation au statut de pure spéculation théorique, à jamais hors de portée de l'expérience! Les deux années écoulées ont révélé une nouvelle voie. Si des dimensions cachées existent, si nous détectons bientôt des écarts par rapport à la loi de New-

ton, si le LHC révèle l'existence de minuscules trous noirs et d'états exotiques dus aux vibrations des cordes, la théorie quantique de la gravitation et celle des cordes deviendront des théories réfutables. Quoi qu'il en soit, l'étude du comportement de la gravité dans le domaine submillimétrique va enfin être entreprise. Avant 2010, nous appréhenderons mieux pourquoi la gravitation est si faible et nous saurons peut-être dans quel univers nous vivons.

Nima ARKANI-HAMED, Savas DIMOPOULOS et Georgi DVALI ont inventé la théorie des dimensions supplémentaires alors qu'ils étaient réunis à l'Université de Stanford, en février 1998. N. Arkani-Hamed est physicien à l'Université de Berkeley. S. Dimopoulos est professeur de physique à l'Université de Stanford. G. Dvali est professeur de physique à l'Université de New York.

Michael DUFF, *Les nouvelles théories des cordes*, in *Pour la Science*, avril 1998.

Edward KEARNS, Takaaki KAJITA et Yoichi TOITSUKA, *La détection des neutrinos massifs*, in *Pour la Science*, septembre 1999.

Brian GREENE, *The Elegant Universe : Superstrings, Hidden Dimensions and the Quest for the Ultimate Theory*, W.W. Norton, 1999.

Steven WEINBERG, *Vers l'unification de la physique*, in *Pour la Science*, janvier 2000.

Chris Llewellyn SMITH, *Le Grand Collisionneur de hadrons*, in *Pour la Science*, septembre 2000.

