

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

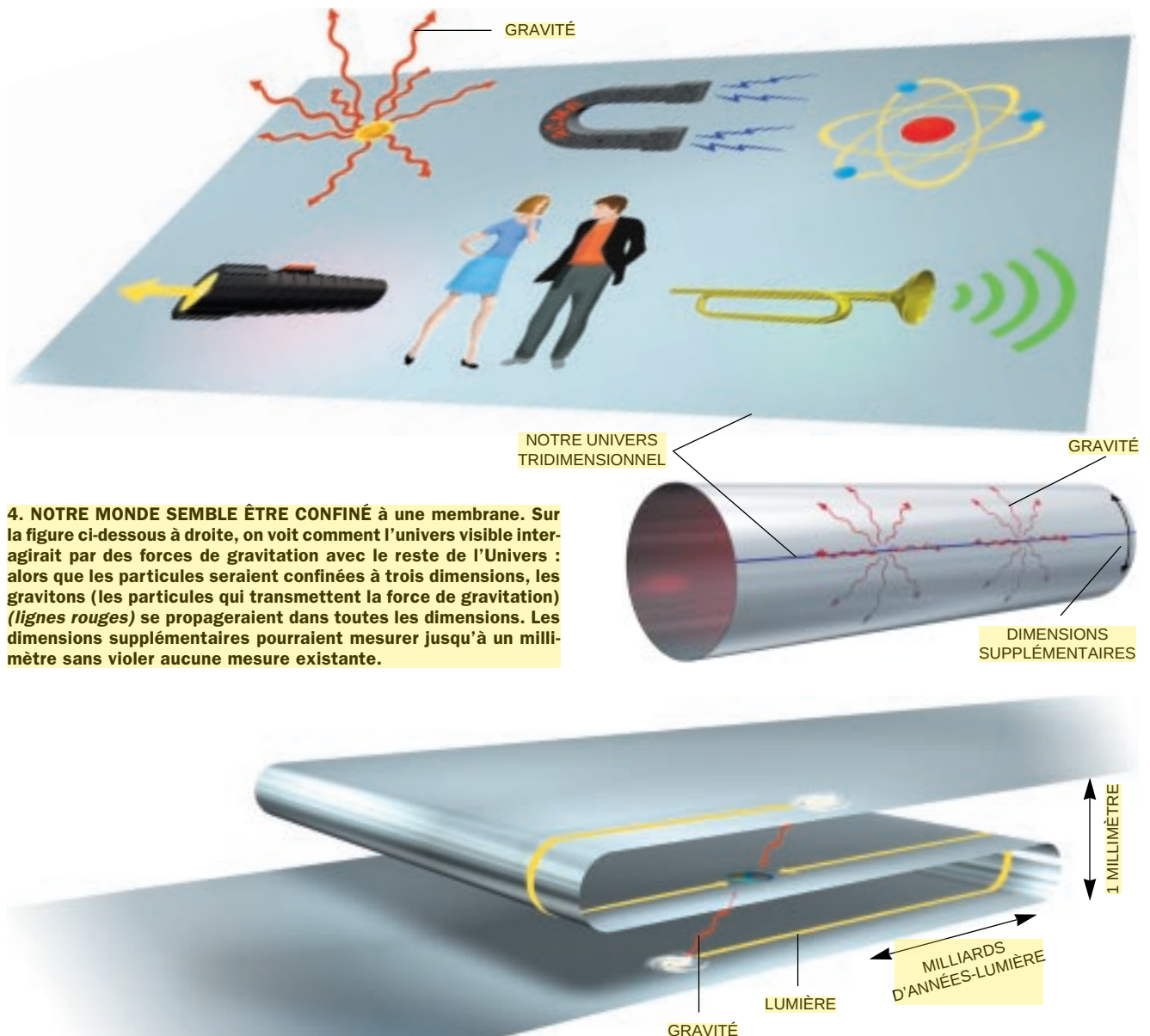
Dirichlet (1805-1859), mathématicien qui explora les propriétés mathématiques d'espaces tels que sont les D-branes. Selon la théorie des cordes, les électrons et les photons sont comme de minuscules bouts de corde dont les extrémités restent attachées à une D-brane ; les gravitons, en revanche, sont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

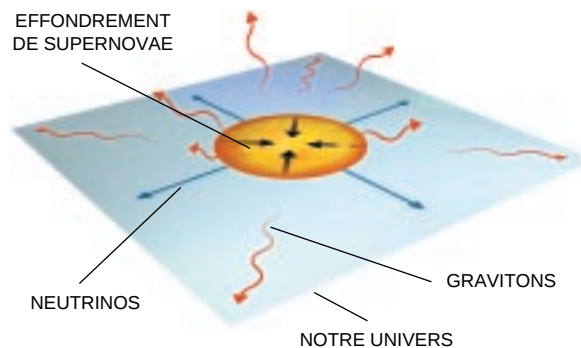
montré que les modifications éventuelles de la loi de Newton, aux distances submillimétriques, ne réduisent pas la cohésion des étoiles. En effet, même si la gravité est renforcée à petite distance, son intensité n'égale celle des autres forces qu'aux distances inférieures à 10^{-19} mètre ; aux grandes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

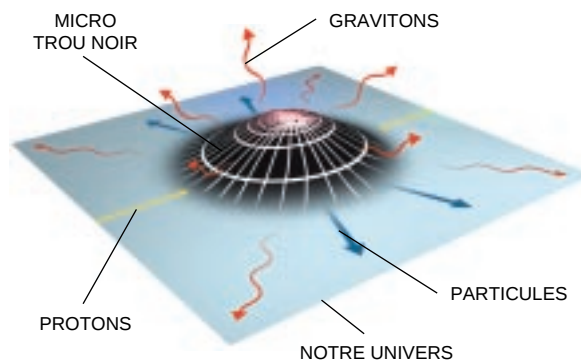
Les supernovae sont des phénomènes qui devraient libérer beaucoup de gravitons, qui quitteraient la membrane où nous sommes confinés. Les supernovae s'observent quand toute la matière des étoiles a fusionné, par des réactions nucléaires : l'énergie ne vainc alors plus la pression gravitationnelle, et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