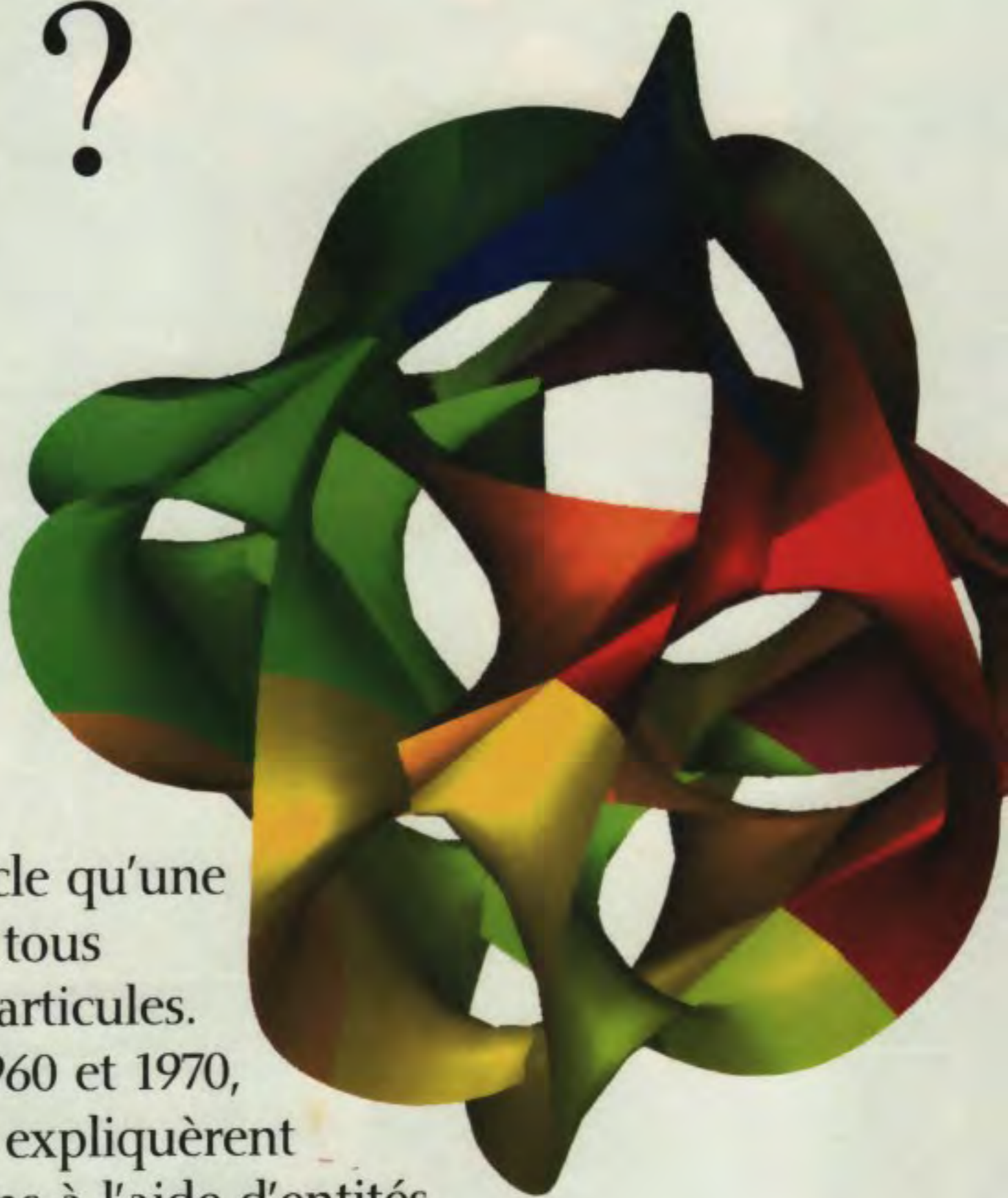


Dossier

Prouver la théorie des cordes ?

A la fin du XIX^e siècle, les modèles des atomistes expliquaient bien de nombreuses propriétés de la matière, mais le fondement de ces modèles, l'atome, restait invisible. C'est seulement dans les vingt premières années du XX^e siècle qu'une suite d'expériences imposa à tous l'existence physique de ces particules. De même, dans les années 1960 et 1970, les théoriciens des particules expliquèrent certaines de leurs observations à l'aide d'entités virtuelles, les quarks, bien avant de devoir en reconnaître la réalité physique. Les théoriciens des cordes sont aujourd'hui dans une situation analogue. Leur approche est radicale : ils proposent de remplacer toutes les particules élémentaires par de minuscules cordes, qui vibreraient dans un espace à neuf dimensions. Ils espèrent ainsi unifier les théories des particules élémentaires et de leurs interactions, en particulier en incluant la gravitation dans le même modèle que les trois autres interactions fondamentales. Mais personne n'a encore observé, même indirectement, une corde, ni l'une des dimensions d'espace supplémentaires dans lesquelles ces cordes se meuvent.



Cette forme géométrique peut donner une idée de l'espace dans lequel se déploie la théorie des cordes : elle représente en effet, à deux dimensions, un espace à six dimensions, enroulées les unes sur les autres comme pourraient l'être les dimensions supplémentaires de la théorie.
© Andrew J. Hanson, Indiana University

Les choses changeront-elles bientôt ? C'est ce qu'espère Ignatios Antoniadis (voir ci-dessous), pour qui des dimensions cachées de l'Univers, voire les cordes elles-mêmes, ne sont peut-être pas hors de notre portée : on pourrait en observer des manifestations dans le grand accélérateur qui entrera en service d'ici à quatre ou cinq ans au Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN). Depuis quelques mois, I. Antoniadis s'est d'ailleurs rapproché de la préparation de ces expériences en rejoignant le CERN. Brian Greene, autre théoricien des cordes, réfléchit, lui, à des preuves de cette théorie qui seraient issues d'observations cosmologiques. Il a par ailleurs fait l'effort, récompensé par le bon accueil du public, d'écrire un livre de vulgarisation sur cette théorie unificatrice. *La Recherche* l'a interrogé (voir page 31), sur les grandes étapes du développement de la théorie, et sur les raisons pour lesquelles tant de physiciens sont aujourd'hui persuadés de sa validité.

Les expériences ne sont plus hors de portée

Une théorie aussi mathématiquement élégante ne peut être que vraie : c'est aujourd'hui l'un des principaux arguments en faveur de la théorie des cordes, qui unifie toutes les autres théories physiques fondamentales en une seule description de l'Univers. Mais quelques physiciens n'ont pas oublié que des expériences sont indispensables pour démontrer la validité de cette construction.

Ignatios Antoniadis

est directeur de recherche au CNRS, et professeur chargé de cours à l'École polytechnique. Il est actuellement détaché au Laboratoire européen de physique des particules (CERN) à Genève. Il a reçu en 2000 la médaille d'argent du CNRS.
Ignatios.Antoniadis@cern.ch

La Recherche a publié :

(I) « La physique du fugace et du petit », p. 12, mai 2000 ;
« Gravité et dimensions cachées », p. 14, avril 2001.

(II) Pierre Fayet, « La supersymétrie : une piste sérieuse », janvier 2001.

Regardez devant vous. Maintenant, sur le côté. Puis, vers le haut. Ça y est, vous avez exploré toutes les dimensions spatiales connues de notre Univers : il n'y en a que trois. Vous êtes-vous jamais demandé l'origine de ce chiffre ? Avez-vous jamais imaginé qu'il pourrait exister d'autres dimensions, qui échapperaient à notre perception ?

La plupart des théories physiques s'appuient sur le sens commun, et se contentent de ces trois dimensions spatiales. Toutefois, il existe au moins une exception sérieuse : la théorie des cordes, qui impose l'existence de six nouvelles dimensions. Cette théorie est aujourd'hui le cadre général le plus vraisemblable qui englobe et rend compatibles entre elles les deux grandes théories physiques élaborées au XX^e siècle : la mécanique quantique, description du comportement des particules élémentaires, et la théorie de la

relativité générale d'Einstein, description de la gravitation dans l'Univers.

La théorie des cordes remplace toutes les particules ponctuelles, constituants élémentaires de la matière et de ses interactions, par un seul objet, étendu et sans épaisseur : une minuscule corde unidimensionnelle. Chaque particule élémentaire que nous observons, électron, quark, photon ou neutrino, pour n'en citer que quelques-unes, correspond en fait à un mode de vibration particulier de la corde (voir la figure 1). La diversité de ces particules et de leurs propriétés est liée à celle des modes de vibration.

Jusqu'à présent, la théorie des cordes n'a pas reçu la moindre confirmation expérimentale. Ses théoriciens en sont au même point qu'Einstein avec sa théorie de la relativité avant 1919. Une prédiction de la théorie n'a en effet été vérifiée pour la première fois que cette

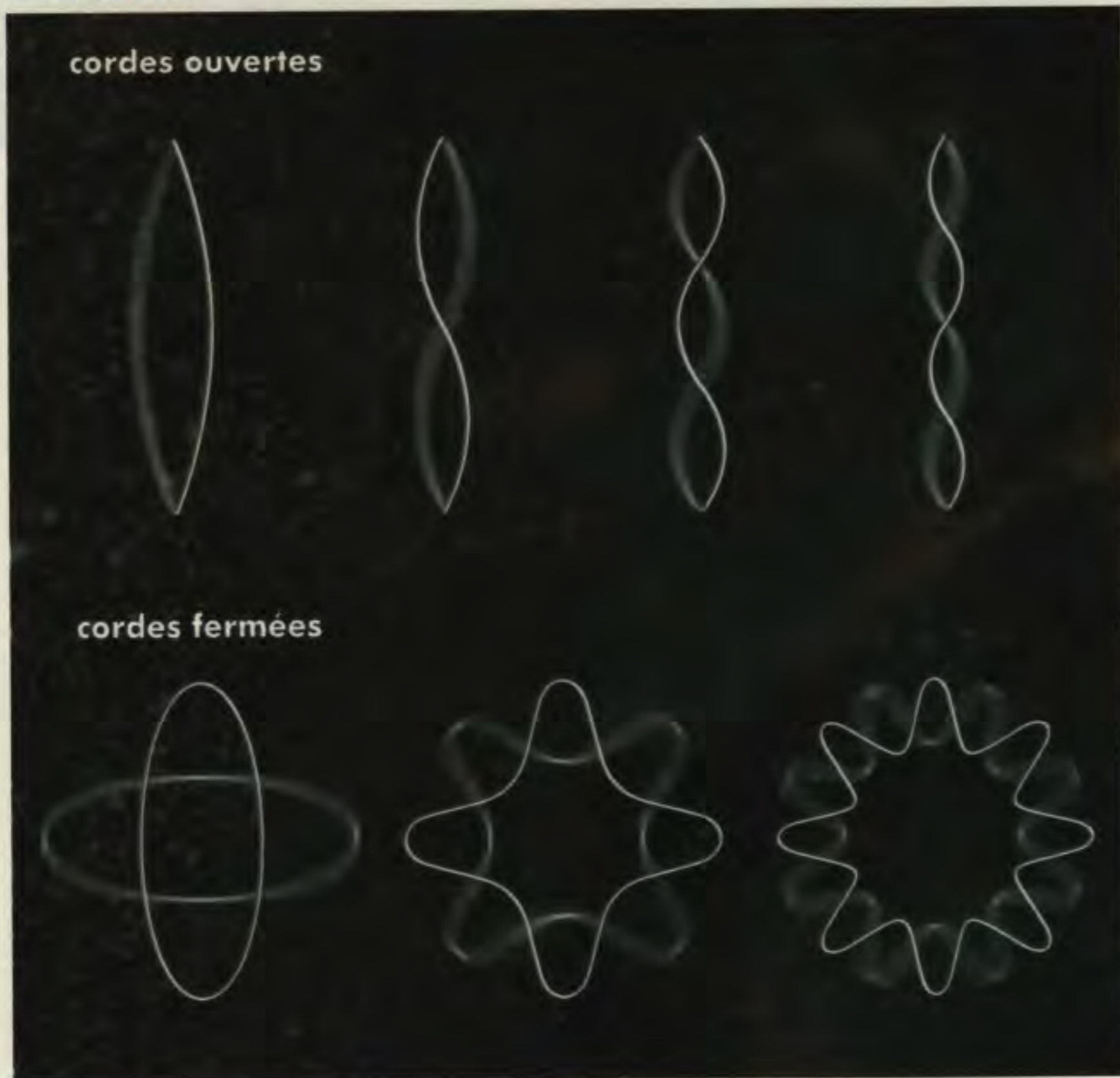


Figure 1. Dans la théorie des cordes, le seul constituant élémentaire de la matière est une minuscule corde, sans épaisseur mais de longueur finie, qui vibre dans neuf dimensions d'espace. Elle peut être ouverte, ses deux extrémités étant libres (en haut), ou fermée, bouclée sur elle-même (en bas). Ses différents modes de vibration, analogues à ceux figurés ici en deux dimensions, correspondent aux diverses particules élémentaires.

année-là, grâce à des observations menées à l'occasion d'une éclipse totale de Soleil. Les physiciens d'aujourd'hui croient en la théorie des cordes surtout pour des raisons formelles, et parce qu'elle est compatible avec les théories plus anciennes. L'aval de l'expérience est pourtant nécessaire pour qu'elle devienne la plus fondamentale des théories physiques.

Petites dimensions. Comment la tester? Si notre Univers possède réellement six dimensions supplémentaires, alors il doit être possible d'observer des phénomènes physiques nouveaux liés à l'existence de ces dimensions. Pourquoi personne n'y est-il encore parvenu? Les théoriciens des cordes ont longtemps eu une réponse *ad hoc* : au contraire des trois dimensions d'espace dans lesquelles nous évoluons, qui sont très grandes, voire infinies, les dimensions supplémentaires sont très petites.

Nous ne pouvons tenter d'imaginer ce que cela signifie qu'en réduisant le nombre de dimensions. Un cylindre infini, par exemple, est un espace à deux dimensions dont l'une est petite, et repliée sur elle-même : on se déplace sans limites dans la direction parallèle à l'axe, mais si l'on suit une circonférence, on revient vite au point de départ (fig. 2). Autre exemple, si l'une de nos trois dimensions était un petit intervalle, disons à l'échelle du millimètre, nous serions plutôt plats, et tandis que nos déplacements vers la gauche, la droite, l'avant ou l'arrière seraient aussi libres qu'aujourd'hui, il nous serait impossible de parcourir plus de quelques millimètres vers le haut ou vers le bas : au-delà, la notion d'espace n'aurait pas de sens.

Lorsqu'ils ont construit la théorie des cordes, les physiciens ont imaginé que celles-ci étaient extrêmement petites, et même qu'elles avaient la plus petite

longueur imaginable en physique, la longueur de Planck*, soit 10^{-35} mètre. Les cordes étaient en effet destinées à décrire la gravitation, et c'est à cette petite échelle seulement que l'intensité de cette interaction devient comparable à celle des trois autres interactions fondamentales (les interactions électromagnétique, nucléaire forte et nucléaire faible). Ils ont aussi, assez naturellement, fixé la taille des dimensions supplémentaires à la même échelle.

Dans ces conditions, toute manifestation d'un phénomène physique qui se déroulerait dans l'une de ces dimensions est largement hors de portée de nos



Figure 2. Une petite dimension d'espace peut se présenter sous deux formes. Elle peut être repliée sur elle-même : à la surface d'un cylindre, la dimension transverse à l'axe forme une boucle. Elle peut aussi former un intervalle, comme la petite épaisseur d'une boîte : il est impossible de sortir de la boîte, car il n'y a rien en dehors, même pas de vide. Evidemment, la représentation graphique de dimensions supplémentaires à notre espace à trois dimensions est impossible.

moyens d'observation actuels, y compris des accélérateurs de particules. Le Grand collisionneur de hadrons (LHC, pour *Large Hadrons Collider*), plus performant que tous ses prédécesseurs et qui entrera en service au Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN), à Genève, vers 2005, sondera des distances d'environ 10^{-19} mètre seulement (fig. 3).

La situation n'est cependant pas aussi désespérée qu'il y paraît. Depuis environ trois ans, de nombreux théoriciens se passionnent pour l'idée que les dimensions supplémentaires de la théorie des cordes ne sont peut-être pas si petites que cela. L'abondance des articles

Les physiciens ont d'abord imaginé que les cordes avaient la plus petite longueur physique, 10^{-35} mètre

(1) I. Antoniadis, C. Bachas, D. Lewellen, T. Tomaras, *Phys. Lett. B*, 207, 441, 1988.

(2) I. Antoniadis, *Phys. Lett. B*, 246, 577, 1990.

(3) I. Antoniadis, K. Benakli, M. Quirós, *Phys. Lett. B*, 331, 515, 1994 ; 460, 176, 1999.

(4) E. Witten, *Nucl. Phys. B*, 471, 135, 1996.

(5) J.D. Lykken, *Phys. Rev. D*, 54, 3693, 1996.

(6) N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. Dvali, *Phys. Lett. B*, 429, 263, 1998.

(7) I. Antoniadis, N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. Dvali, *Phys. Lett. B*, 436, 265, 1998.

(8) I. Antoniadis and B. Pioline, *Nucl. Phys. B*, 550, 41, 1999.

scientifiques publiés sur le sujet et les bonnes places qu'ils occupent régulièrement en tête du classement des articles de physique les plus cités⁽¹⁾ en témoignent. En développant ces idées avec mes collègues européens et américains, nous préparons en particulier des tests de la théorie des cordes qui pourront être réalisés avec le LHC.

Pour moi, cette histoire a commencé en 1988. Mon séjour post-doctoral au CERN touchait à sa fin et je rentrais à l'École polytechnique après cinq ans d'absence. Avec Costas Bachas, à l'époque à l'École polytechnique, David Lewellen, de l'université Stanford, et Theodore Tomaras, de l'université de Crète, nous terminions un article à propos du problème de la « brisure de supersymétrie » en théorie des cordes⁽¹⁾.

La supersymétrie⁽²⁾ est une symétrie fondamentale de la matière dont l'introduction dans le modèle standard de la physique des particules* rend compatible la gravitation, les trois autres interactions fondamentales, et les valeurs observées pour les masses des particules (voir l'encadré : « La supersymétrie »). Sans supersymétrie, l'introduction, dans le modèle standard de la gravitation, dont l'intensité est beaucoup plus faible que celles des trois autres interactions, conduit à la prédiction de masses des particules 10^{16} fois plus grandes que celles que l'on a observées : c'est ce que l'on nomme le problème de hiérarchie.

L'une des prédictions importantes de la supersymétrie est que chaque particule élémentaire connue possède un partenaire nommé sparticule. Toutefois, on n'a encore observé aucune de ces sparticules dans les grands accélérateurs : c'est donc, si la supersymétrie existe vraiment, que ces accélérateurs ne disposent pas d'assez d'énergie pour produire des sparticules. Autrement dit, en vertu de la correspondance entre la masse et l'énergie*, les sparticules sont beau-

La supersymétrie permet d'unifier la gravitation avec les trois autres interactions fondamentales et avec les observations

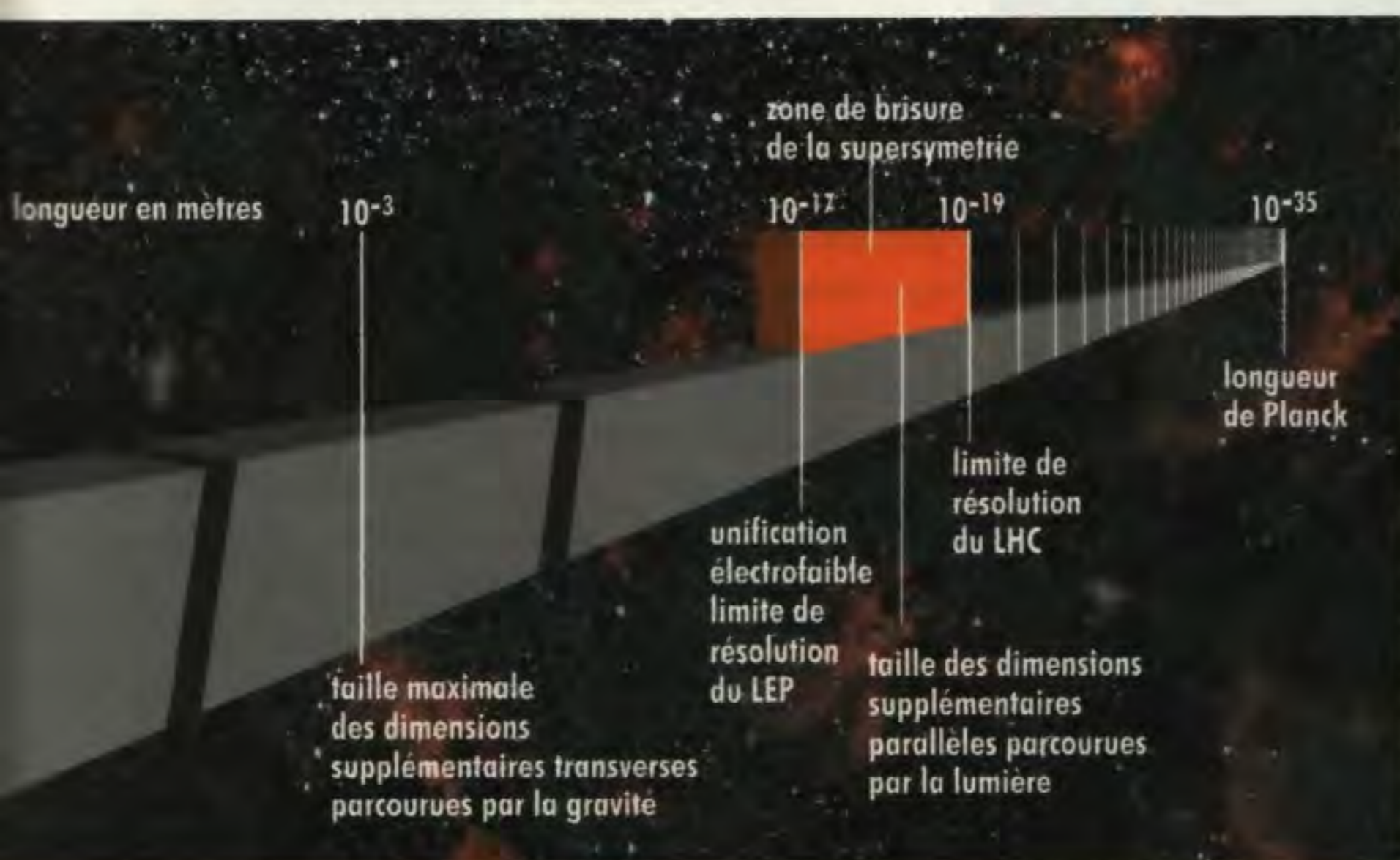


Figure 3. Les longueurs accessibles par les grands accélérateurs de particules sont énormément plus grandes que la longueur de Planck, taille initialement fixée par les physiciens pour la corde et les dimensions d'espace supplémentaires. Toutefois, les différentes théories proposées pour rendre compatible la gravitation avec les trois autres interactions fondamentales produisent toutes des prédictions testables dans le domaine accessible par le Grand collisionneur de hadrons du CERN (LHC) : l'existence de particules supersymétriques ou de nouvelles dimensions parcourues par la lumière.

La supersymétrie

Les lois de la physique sont compatibles avec une symétrie portant sur le spin des particules élémentaires, leur moment magnétique intrinsèque. Si cette symétrie est effectivement vérifiée par la nature, cela implique qu'il existe de nouvelles particules, les sparticules, symétriques en spin de celles que nous connaissons. Plus précisément, une sparticule a un spin inférieur d'une demi-unité à celui de la particule de matière correspondante. Ainsi, à l'électron, de spin 1/2, correspondrait le sélectron, de spin 0.

L'un des intérêts de la supersymétrie serait d'unifier dans un même cadre théorique toutes les particules connues : les bosons, de spin entier, et les fermions de spin demi-entier. La sparticule d'un boson est en effet un fermion, et réciproquement. Les physiciens comptent sur les mesures réalisées d'ici à quelques années dans le LHC pour confirmer ou invalider l'existence de la supersymétrie.

coup plus lourdes que tous leurs partenaires ordinaires que l'on a déjà observés. C'est ce phénomène que l'on nomme brisure de supersymétrie. Par ailleurs, les masses que nous avons observées pour les particules ordinaires indiquent aussi que l'énergie de la brisure de supersymétrie, c'est-à-dire l'écart entre ces masses et celles des partenaires supersymétriques, ne peut pas être supérieure au téraélectronvolt*.

Dans notre article, nous faisons l'hypothèse que la brisure de la supersymétrie tire son origine de la géométrie de l'Univers, plus précisément de la façon dont les dimensions supplémentaires sont disposées les unes par rapport aux autres. Nos calculs montraient que la valeur approximative de l'énergie de la brisure était liée à la taille des dimensions supplémentaires de la théorie des cordes. En particulier, nos résultats impliquaient que la brisure de supersymétrie se produirait effectivement autour du téraélectronvolt s'il existait au moins une dimension supplémentaire avec une taille de 10^{-18} mètre.

A l'époque, nous n'avons pas pris ce résultat au sérieux. Comme tous les physiciens, nous ne pouvions admettre que les dimensions supplémentaires soient plus grandes que 10^{-35} mètre. Il ne s'agissait que d'un préjugé théorique, mais nous nous y cantonnions, pour éviter d'invalider les seuls calculs que nous sachions faire.

Interactions faibles. Encore aujourd'hui, en théorie des cordes, les équations sont si complexes qu'on ne peut les résoudre que de façon approchée, et à condition que l'on puisse en négliger certaines parties : c'est ce que l'on appelle le calcul perturbatif (voir l'encadré : « Le calcul perturbatif »). Plus précisément, on ne sait mener à bien des calculs que si les cordes interagissent peu les unes avec les autres. Or, les interactions des cordes sont mesurées par une grandeur, nommée constante de couplage, qui est proportionnelle au rapport entre les tailles des dimensions supplémentaires et celle des cordes.

Si nous voulions examiner des dimensions supplémentaires plus grandes que 10^{-35} mètre, nous devions

tenir compte du fait que la constante de couplage devenait grande. Les approximations du calcul perturbatif n'étaient alors plus valables. En pratique, personne ne s'y risquait.

Le mécanisme que nous proposons pour la brisure de supersymétrie, qui faisait intervenir des dimensions de l'ordre de 10^{-18} mètre, allait donc à l'encontre des croyances de l'époque. A tel point que nous avons finalement réinterprété notre résultat comme une simple indication que la brisure de supersymétrie ne provenait pas de la géométrie de l'Univers et des dimensions supplémentaires, et que nous ne pouvions donc rien en dire.

Je n'étais toutefois pas satisfait. J'éprouvais le sentiment que notre conclusion avait été hâtive. Après tout, notre résultat était la seule prédiction générale et concrète de la théorie des cordes que nous avions une chance de tester dans un avenir proche au sein

d'un collisionneur de particules. La génération suivante de machines devait disposer de suffisamment d'énergie pour sonder des distances aussi courtes que 10^{-19} mètre : si la taille d'au moins une dimension supplémentaire atteignait réellement 10^{-18} mètre, alors on pouvait espérer l'observer.

C'est pourquoi, deux ans plus tard, en 1990, j'ai proposé des modèles d'Univers où l'on pouvait mener des calculs perturbatifs sur une partie des équations, même avec des dimensions supplémentaires aussi grandes que 10^{-18} mètre⁽²⁾. Dans cette classe de modèles, les dimensions supplémentaires forment de petits intervalles, et notre monde à trois dimensions qui contient la matière serait localisé à leurs extrémités. Les interactions fondamentales peuvent, elles, se propager dans ces intervalles.

Le Grand collisionneur de hadrons pourra observer de nouvelles dimensions, de 10^{-18} mètre, si elles existent

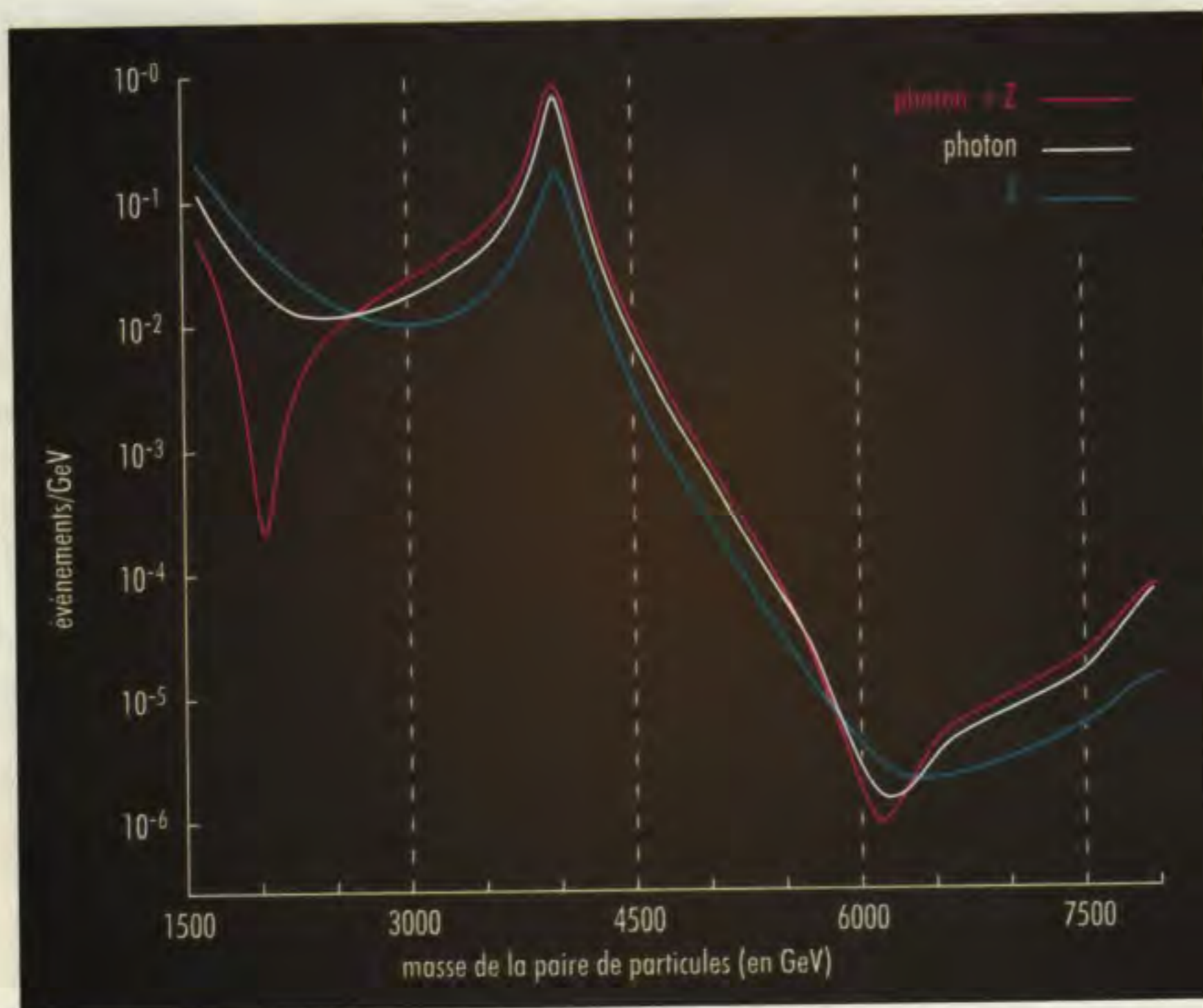


Figure 4. S'il existe au moins une dimension supplémentaire parcourue par la lumière à l'échelle de 10^{-18} mètre, on devrait observer au LHC la formation d'états de Kaluza-Klein du photon et du boson Z (un des médiateurs de l'interaction faible). On détectera en fait des paires électron-positon ou muon-antimuon, produit de décomposition de ces états. Le nombre d'événements attendu a été calculé en fonction de l'énergie de la paire.

Intérêt poli. Bien que la communauté des physiciens théoriciens ait accueilli ce travail avec un certain intérêt, il est resté en marge des principales activités du domaine, pour deux raisons. D'abord, il restait impossible de faire quelque calcul que ce soit à propos des cordes lorsque la constante de couplage était grande. Ensuite, tout le monde restait persuadé que la brisure de supersymétrie procédait d'un mécanisme inaccessible par le calcul perturbatif. Aussi, mes propositions furent-elles souvent critiquées lors des discussions, même par mes collaborateurs. Ces réactions peu encourageantes, et l'attrait que prirent d'autres sujets de recherche à mes yeux, m'ont retenu, pendant huit ans, de me consacrer pleinement à ces travaux. En mon for intérieur, je restais néanmoins persuadé que des théories où l'Univers possédait de



Figure 5. Comment dessiner un éléphant si l'on n'en a jamais vu et que l'on n'en aperçoit clairement que quelques parties bien différentes ? De la même façon, les cinq théories des cordes connues sont autant de points de vue partiels sur la théorie M, dont personne ne peut encore dire à quoi elle ressemble.

grandes dimensions supplémentaires étaient réalistes. L'année suivante, en 1991, j'ai proposé à Karim Benakli, qui commençait un travail de thèse, d'étudier les conséquences physiques des modèles d'Univers que j'avais proposés. Si notre Univers ressemblait à l'un de ceux-là, que devrions-nous observer ?

Nous savions déjà que si la lumière, par exemple, se propageait dans une dimension supplémentaire, alors on devrait observer des particules, baptisées états de Kaluza-Klein*, semblables aux photons, mais dotées d'une masse, masse d'autant plus élevée que la taille de la dimension est plus petite (voir la fig. 4). Avec Mariano Quirós, de l'Institut de la structure de la matière de Madrid, nous avons analysé la possibilité de produire des états de Kaluza-Klein dans les accélérateurs de particules⁽⁵⁾. S'il existe des dimensions supplémentaires à l'échelle de 10^{-18} mètre, une énergie de l'ordre du téraélectronvolt suffirait. Nous avons aussi calculé les masses des particules en fonction de la taille des dimensions supplémentaires. Le fait que ces prédictions soient testables avec le LHC était déjà un

Figure 6. Dans le modèle proposé en 1998, notre Univers est constitué, en plus des trois dimensions qui nous sont familières (ramenées ici à une seule, droite orange), de dimensions parallèles (ici, une seule, plan gris), dans lesquelles la lumière, décrite par des cordes ouvertes, peut se propager, et de dimensions transverses (ici, une seule aussi), parcourues seulement par la gravitation, représentée par des cordes fermées. La matière ne peut pas s'échapper de nos trois dimensions. Les dimensions parallèles et les cordes sont à l'échelle de 10^{-18} mètres, tandis que les dimensions transverses ont une taille d'au moins 10^{-12} mètre.



succès, mais peu de nos confrères s'y sont intéressés : la majorité continuaient à ne pas croire à l'existence de si grandes dimensions supplémentaires.

Nous en étions là en 1996, quand Edward Witten, de l'Institut d'études avancées de Princeton, l'un des théoriciens des cordes les plus respectés, a écrit que la taille de la corde est un paramètre libre de la théorie, et qu'il n'y avait aucune raison de la fixer à l'échelle de Planck⁽⁴⁾. Quelques mois plus tard, Joe Lykken, du Fermilab, à Chicago, a remarqué que l'échelle de la corde pourrait même s'approcher de 10^{-17} mètre⁽⁵⁾, ce qui est énorme par rapport à ce que l'on imaginait auparavant.

Cinq pour une. Pour comprendre ce retournement de situation, revenons quelques années en arrière. Tous les travaux dont nous avons parlé jusqu'ici avaient pour cadre une même théorie des cordes. Mais les physiciens n'en avaient pas construit qu'une : nous disposions en fait de cinq théories des cordes ! Dans certaines de ces théories, les cordes sont obligatoirement fermées sur elles-mêmes, formant des boucles ; dans une autre, des cordes sont ouvertes, et leurs extrémités sont libres ; en outre, toutes ces théories n'incluent pas la supersymétrie de la même manière. Cette multiplicité des théories posait problème : la théorie des cordes avait justement été inventée pour construire un cadre théorique unique, qui englobe tous les autres. L'une des cinq théories était certainement plus exacte que les autres, mais laquelle ? La réponse vint en 1994 : aucune. Grâce aux travaux de plusieurs équipes, notamment de E. Witten, on avait en effet découvert que chacune de ces théories est un cas particulier d'une théorie plus générale, baptisée théorie M (fig. 5).

Cette découverte n'avait pas résolu toutes les questions, loin de là. La principale difficulté était que personne ne pouvait dire à quoi ressemblait cette théorie

M (c'est encore vrai aujourd'hui, malheureusement). Mais il y avait tout de même un progrès pour les questions qui me préoccupaient : l'unification des cinq théories des cordes dans la théorie M était due à l'existence de symétries, nommées dualités, qui relient ces différentes théories les unes aux autres. Plus précisément, un certain type de dualité relie deux à deux des théories dont les constantes de couplage sont inverses l'une de l'autre.

Changement de théorie. Pour résoudre un problème avec une grande constante de couplage dans le cadre d'une des cinq théories, il suffit donc de le transformer à l'aide des relations de dualité. On obtient un nouveau problème avec une constante de couplage dont la valeur est l'inverse de la première : elle est petite, et on peut résoudre ce nouveau problème par le calcul perturbatif. Une fois que l'on a la solution, on la replace, toujours avec les relations de dualité, dans la première théorie, et le tour est joué (c'est bien entendu plus facile à dire qu'à faire). Comme les calculs avec une grande constante de couplage devenaient indirectement possibles, il n'y avait plus aucune raison de limiter les dimensions supplémentaires à la longueur de Planck.

En janvier 1998, Savas Dimopoulos, de l'université Stanford, m'a rendu visite à l'École polytechnique en compagnie de Nima Arkani-Hamed, qui venait de soutenir sa thèse à Berkeley. Ensemble, nous avons repris l'étude des modèles à grandes dimensions, dans l'idée d'exploiter les résultats issus des techniques de dualité.

De retour en Californie, ils se sont penchés, en collaboration avec Gia Dvali, de l'université de New York,

Le calcul perturbatif

Un joueur de golf envoie rarement sa balle dans le trou du premier coup. Il commence par des coups très longs, puis de plus en plus courts et de plus en plus précisément dans la direction du trou, jusqu'au putt final. De la même façon, lorsque l'on effectue une pesée avec une balance de Roberval, la taille des poids que l'on pose dans le plateau va décroissant, jusqu'à l'équilibre du fléau. Les astronomes ne procèdent pas autrement pour calculer précisément le mouvement de la Terre dans le Système solaire : ils déterminent une première trajectoire en ne tenant compte que de l'attraction gravitationnelle du Soleil, puis ils la corrigent en ajoutant les contributions de la Lune et des autres planètes.

Tous ces exemples illustrent le principe du calcul perturbatif : faute de pouvoir traiter ensemble toutes les contributions à un problème, on ne retient que la plus significative et on détermine une première solution. Puis on corrige celle-ci en ajoutant progressivement les autres éléments. Cette démarche ne fonctionne bien entendu que si les contributions que l'on ajoute sont de plus en plus faibles, et peuvent être considérées comme des perturbations vis-à-vis de la solution précédente. Si les planètes du Système solaire avaient la taille du Soleil, par exemple, leur influence sur le mouvement de la Terre ne serait plus négligeable, et le calcul perturbatif ne serait d'aucun secours.

*La longueur de Planck est l'échelle au-delà de laquelle les fluctuations quantiques de l'espace-temps deviennent si grandes que les notions de distance, de masse ou d'énergie n'ont plus de sens.

*Le modèle standard de la physique des particules est aujourd'hui la théorie acceptée par la plupart des physiciens pour la description de la matière et des interactions électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte. Il est toutefois incomplet, en particulier car il ne contient pas la gravitation.

*La correspondance entre la masse et l'énergie a été énoncée par Einstein sous la forme $E = mc^2$, où E est l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière dans le vide.

*Un téraélectronvolt vaut 10^{12} électronvolts, soit $1,6 \cdot 10^{-7}$ joule.

*Theodor Kaluza et Oskar Klein sont les deux physiciens qui, les premiers, proposèrent au début du XX^e siècle l'existence d'une quatrième dimension d'espace, dans le but d'unifier la gravitation et l'électromagnétisme.

En 1998, une théorie alternative à la supersymétrie a été proposée pour expliquer les valeurs des masses des particules

sur le problème de la hiérarchie : pourquoi l'intensité de la gravitation est-elle, jusqu'à l'échelle de Planck, bien inférieure à celles des autres interactions fondamentales? Jusque-là, la seule solution proposée à ce problème était, nous l'avons vu, l'introduction de la supersymétrie.

N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos et G. Dvali ont remarqué que si, à l'échelle du téraélectronvolt, la gravitation avait une intensité 10^{32} fois plus grande que ce que l'on pensait jusqu'ici, alors toutes les interactions y auraient quasiment la même intensité : plus de problème de hiérarchie, plus de nécessité absolue d'introduire la supersymétrie pour le résoudre⁽⁶⁾. Cette proposition était réalisable dans le cadre des modèles possédant de grandes dimensions supplémentaires, dans lesquelles la gravitation (et seulement elle) pourrait se propager : si la gravitation semble si peu intense aux échelles où nous l'observons, c'est que son intensité est répartie dans des dimensions supplémentaires qui nous sont restées inaccessibles jusqu'à présent. Afin d'augmenter l'intensité de la force gravitationnelle sans contredire les observations qui ont été réalisées jusqu'ici dans nos trois dimensions habituelles, au moins deux dimensions supplémentaires sont nécessaires. Leurs tailles seraient alors à peine inférieures au millimètre. A l'échelle de ces dimensions, l'intensité de la force gravitationnelle dans nos trois dimensions devrait dévier fortement de la loi de Newton, ce que l'on pourrait explorer expérimentalement (voir l'encadré « Tester la loi de Newton »).

Tester la loi de Newton



Le groupe Eötvash, de l'université de Washington, mesure l'intensité de l'attraction gravitationnelle à des distances de l'ordre de 0,1 millimètre à l'aide de cette balance de torsion.

En 1687, dans ses *Principia*, Isaac Newton énonçait que l'attraction gravitationnelle entre deux corps est proportionnelle au produit de leurs masses, et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Le succès de cette loi pour la description du mouvement des planètes a été particulièrement spectaculaire. Par exemple, en 1846, c'est en tentant d'expliquer les détails de la trajectoire d'Uranus que l'astronome français Le Verrier prédit l'existence de Neptune, effectivement observée quelques semaines après la publication de son mémoire.

A courte distance, en revanche, la validité de la loi de Newton n'est pas démontrée expérimentalement. En février 2001, C.D. Hoyle et ses collègues de l'université de Washington ont publié les résultats les plus précis à ce jour : à l'aide d'un pendule de torsion (figure), ils ont vérifié la validité de la loi jusqu'à la distance de 0,2 millimètre. La taille maximale de grandes dimensions supplémentaires dans lesquelles la gravitation se propagerait est limitée par cette valeur, mais rien n'interdit qu'il en existe à l'échelle du centième de millimètre par exemple. En réduisant encore l'échelle des mesures, on verrait alors une forte augmentation de la force gravitationnelle.

La faible intensité de la gravitation complique fortement ce type d'expérience : de nombreuses sources de bruit perturbent les mesures, et les physiciens doivent imaginer des dispositifs pour lesquels ils puissent quantifier très précisément les contributions de toutes les autres forces. A ces échelles il faut même tenir compte de l'effet Casimir, l'attraction qui apparaît entre deux surfaces conductrices, même neutres, à cause des seules fluctuations quantiques du vide.

Tout est alors devenu clair à mes yeux! En mars 1998, je me suis rendu à Stanford et, avec ces trois mêmes collègues, nous avons proposé une autre façon de résoudre le problème de hiérarchie : il suffit de fixer la longueur des cordes à 10^{-18} mètre⁽⁷⁾. Nous avons élaboré un modèle où cette condition est réalisée, en nous plaçant dans le cadre de l'une des cinq théories des cordes qui contient à la fois des cordes ouvertes et des cordes fermées. Notre monde est localisé sur une hypersurface, une membrane étendue possédant un nombre p de dimensions spatiales, inférieur à 9, et que l'on appelle une p -brane (fig. 6). Les cordes fermées, dont certains modes de vibration décrivent la gravitation, se déplacent dans les neuf dimensions d'espace : sur la p -brane, mais aussi dans les dimensions supplémentaires, transverses à celle-ci. Au contraire, les extrémités des cordes ouvertes, qui décrivent les autres interactions, ne se déplacent que sur la p -brane.

Univers étendu. Notre p -brane d'Univers a au moins trois dimensions, celles que nous observons quotidiennement. Elle peut aussi en avoir plus : contrairement aux dimensions transverses qui n'interagissent que par l'intermédiaire de la force gravitationnelle, ces dimensions « parallèles » supplémentaires seraient parcourues par la lumière, et on les observerait en particulier par la production d'états de Kaluza-Klein dans les accélérateurs, comme nous l'avons calculé auparavant.

Comme dans le modèle précédent de N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos et G. Dvali, l'existence de grandes dimensions, les dimensions transverses à notre p -brane, implique la gravitation devienne 10^{32} fois plus forte à l'échelle de la corde (téraélectronvolt). La taille maximale de ces dimensions transverses peut varier du millimètre (pour deux dimensions) à 10^{-14} mètre (pour six dimensions).

En février 1999, avec Boris Pioline, qui préparait sa thèse à l'École polytechnique, nous avons repris les modèles d'Univers que j'avais proposés en 1990. A l'époque, le fait que des dimensions supplémentaires soient beaucoup plus grandes que la corde, et donc que la constante de couplage soit forte, avait empêché de mener les calculs. Désormais, nous pouvions les faire avec une démarche perturbative, en transformant le cadre théorique de départ en sa théorie duale⁽⁸⁾.

En réalisant ces transformations, nous avons découvert que le modèle proposé en 1990 était en fait équivalent à celui de 1998, avec des cordes ouvertes et des dimensions transverses. En outre, en faisant varier le nombre de grandes dimensions supplémentaires dans le modèle de 1990, nous avons découvert, toujours grâce à la dualité, un autre modèle d'Univers avec une corde de 10^{-18} mètre, où le problème de hiérarchie est donc aussi résolu sans la supersymétrie. Dans ce modèle, il n'y a pas de grandes dimensions transverses, et l'intensité de la gravitation est très faible : elle est fixée par la constante de couplage de la corde, qui est un paramètre libre dans cette théorie.

Bien sûr, aujourd'hui, ces théories n'existent toujours

que dans notre imaginaire de théoriciens. Mais nous mettons tout notre espoir dans la prochaine génération d'expériences, notamment celles qui seront entreprises vers 2005 au LHC. Deux faisceaux de protons y entreront en collision avec une énergie de 14 téraélectronvolts dans le centre de masse, presque cent fois supérieure à celle du LEP, le précédent accélérateur du CERN, et dix fois plus élevée que celle du Tevatron, le collisionneur de protons et d'anti-protons actuellement en service au Fermilab, à Chi-

cago. Je suis persuadé, comme la plupart de mes collègues, que le LHC jouera un rôle décisif pour l'avenir de la physique des interactions fondamentales. Il est prévu depuis plusieurs années qu'il explore l'origine des masses des particules élémentaires, et qu'il teste la supersymétrie, en recherchant des particules. Nous espérons maintenant que cet accélérateur nous révélera des phénomènes encore plus spectaculaires que seraient de grandes dimensions d'espace supplémentaires. I.A. ■

Brian Greene : une théorie élégante

La théorie des cordes a été initiée dans les années 1970, mais elle n'a pris un véritable intérêt aux yeux de la plupart des physiciens théoriciens que depuis 1984. Grâce à elle, ils ont résolu les contradictions qui existaient entre la gravitation et la mécanique quantique. Leur ambition suprême est d'en déduire les notions même d'espace et de temps.

Brian Greene

est professeur de physique et de mathématiques à l'université Columbia, aux États-Unis, et mène des recherches en théorie des cordes. Il a publié en 1999 *The Elegant Universe, Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (Norton), best-seller de la vulgarisation scientifique, traduit en français sous le titre *L'Univers élégant* (Robert Laffont).

La Recherche : *Depuis plus de trente ans, les physiciens développent la théorie des cordes, mais ils ne l'ont toujours pas testée expérimentalement. Une telle longévité sans aucun support empirique est un cas sans précédent pour une théorie fondamentale dans l'histoire de la physique moderne. Comment expliquez-vous la « foi » qu'inspire la théorie des cordes ?*

Brian Greene : C'est avant tout, il me semble, parce que la théorie des cordes parvient à rendre compatibles entre elles deux théories physiques fondamentales qui, elles, reposent fermement sur l'expérience. D'un côté, la théorie de la relativité générale décrit l'Univers aux grandes échelles, celles où la gravité domine ; de l'autre, la mécanique quantique s'applique au monde des molécules, des atomes, et de tout ce qui est encore plus petit. Avant la théorie des cordes, ces deux piliers de la physique moderne étaient incompatibles. Or, les physiciens n'aiment guère l'idée que les lois fondamentales de notre Univers seraient un patchwork de lois, valables chacune uniquement dans son domaine. Ils ont aussi le souci esthétique plus général de parvenir à un cadre explicatif unique et élégant, qui rassemble non seulement la relativité générale et la mécanique quantique, mais aussi toutes les connaissances acquises ces cinquante dernières années en physique des particules. Et c'est ce que parvient à faire la théorie des cordes : tout ce que nous savons sur les constituants de la matière et la manière dont ils interagissent s'y inscrit naturellement. Dès lors, nous avons de bonnes raisons de penser que nous sommes sur le bon chemin...

Les débuts de la théorie des cordes furent pourtant moins prometteurs...

En effet, pendant les quinze premières années, bien peu de gens ont cru en l'idée fondamentale de la théorie, qui consiste à remplacer toutes les particules élémentaires ponctuelles par un seul objet bidimensionnel, une corde sans épaisseur mais de longueur finie. Il faut dire qu'à cette époque la théorie souffrait d'un défaut majeur : elle violait un principe général que respectent



© J. Bauer/Opale

tent, sous différentes formes, toutes nos lois physiques : le principe de conservation*. Heureusement, en 1984, John Schwarz du California Institute of Technology et Michael Green, alors au Queen Mary College, ont montré qu'en modifiant légèrement les équations de la théorie ce défaut disparaissait.

C'est ce que vous appelez la première « révolution » de la théorie des cordes. C'est à cette époque d'ailleurs que vous vous êtes lancé sur le sujet ?

Oui, je commençais tout juste ma thèse et je m'intéressais déjà beaucoup à la gravité quand les cordes devinrent soudainement, après la publication du résultat de Greene et de Schwarz, le sujet chaud de la physique théorique. Tout le monde abandonnait ses travaux pour se plonger dans ce qui était perçu alors comme une manière radicalement nouvelle de décrire l'Univers. C'était tellement nouveau que personne ne savait grand-chose sur le sujet : l'occasion était inespérée pour un jeune comme moi de travailler sur un pied d'égalité avec des physiciens plus expérimentés.

Vous identifiez en 1995 une deuxième révolution dans la jeune histoire de la théorie des cordes. Que s'est-il passé ?

Avant cette date, il n'y avait pas une seule théorie des cordes, mais cinq versions différentes. Même si ces versions n'étaient pas incompatibles entre elles et comportaient toutes les mêmes ingrédients de base (cordes, dimensions cachées), c'était une situation franchement embarrassante si vous vouliez convaincre les gens que vous étiez sur la piste de la théorie physique ultime de l'Univers... En 1995, Edward Witten, de l'Institut d'études avancées de Princeton, a montré que ces cinq versions n'étaient en fait que cinq manières différentes de regarder une même théorie, baptisée théorie M. Pour dire les choses plus techniquement, ces cinq théories étaient duales l'une de l'autre et leurs différences résultaient du niveau trop « grossier » d'analyse auquel on avait travaillé jusque-là.

Pouvez-vous expliquer cette notion de dualité ?

Si vous me posez une question en français, que je ne comprends pas, je serai incapable d'y répondre. Si ensuite l'un de vos confrères me pose la question en anglais, et qu'un interprète me dit qu'il s'agit de la même question, alors je pourrai vous répondre, avec son aide. Entre deux versions de la théorie des cordes, les différences de formulations sont plus subtiles qu'entre le français et l'anglais. Tout un travail mathématique complexe est nécessaire pour s'apercevoir que les questions posées dans une formulation de la théorie correspondent en fait à d'autres questions posées dans une autre formulation. Mais une fois établi ce lien de dualité, on est certain que chaque version de la théorie parle bien de la même chose et que les réponses sont les mêmes.

La théorie des cordes est souvent présentée comme la « théorie du tout ». Pour vous, que signifie cette expression ?

Je la déteste ! Ce terme de « tout » ne devrait être utilisé que dans un sens très restreint, à savoir « tout » au sens de toute la matière et toutes les forces par lesquelles la matière interagit, autrement dit tout ce dont traite la physique des particules. Mais la théorie des cordes ne nous dira pas s'il va pleuvoir ou neiger demain.

Vous rejetez donc une vision réductionniste de la science selon laquelle toutes nos connaissances pourraient dériver un jour de lois physiques fondamentales ?

Pas exactement. J'aime penser que notre travail puisse permettre, en principe, de décrire dans son essence tout phénomène physique. Mais ce « en principe » est une restriction capitale. Si vous me demandez s'il y a des choses qui seront difficiles, voire impossibles *en pratique*, de décrire à l'aide de cordes, je vous répondrais évidemment oui. En fait le débat pour moi est vraiment d'ordre pratique : en quoi serait-il *utile* d'étudier un phénomène physique dans le vocabulaire des cordes ? Par exemple, je doute fort qu'il y ait un intérêt à étudier ce qui se passe dans le cerveau en regardant le mouvement des quarks qui le constituent, et moins encore celui des cordes, si une telle chose était possible.

Justement, les cordes sont-elles uniquement des objets mathématiques, ou peut-on imaginer un jour les observer ?

L'image d'un filament vibrant et se déplaçant à travers l'espace est vraiment une image mentale très forte dans mon travail quotidien. Mais c'est clairement une image qui appartient au domaine de la physique classique. La question n'est de toute façon pas de « voir » un jour une corde comme on voit une chaise ou même une molécule. Dans le monde subatomique, « voir » une entité veut simplement dire en mesurer certaines propriétés, telles l'énergie ou la vitesse. Rien n'interdit aujourd'hui de penser que l'on détectera un jour des propriétés caractéristiques des cordes.

Une implication frappante de la théorie des cordes est l'existence de dimensions spatiales cachées. Est-ce une notion qui est née avec la théorie ?

Non, l'idée de dimensions cachées est plus ancienne. Einstein, bien naturellement, écrivit les équations de la relativité générale pour un espace à trois dimensions spatiales. Mais en 1919, un mathématicien polonais, Theodor Kaluza, réalisa que l'on pouvait étendre ces équations à un espace à quatre dimensions spatiales et obtenir des choses fort intéressantes. Cette démarche n'eut cependant pas de suite, et l'idée de dimensions supplémentaires tomba dans l'oubli, pour ne ressusciter qu'avec la théorie des cordes. Lorsqu'on se pencha sur les détails de ses équations, on s'aperçut en effet que celles-ci n'étaient pas logiquement cohérentes, à moins de supposer l'existence de... neuf dimensions spatiales.

Venons-en plus précisément aux succès de la théorie des

*Le principe de conservation stipule par exemple que la charge électrique ou l'énergie ne peuvent disparaître de l'Univers.

*Selon le principe d'incertitude de Heisenberg, deux propriétés d'une particule élémentaire, par exemple sa position et sa vitesse, ne peuvent être mesurées avec précision simultanément.

La Recherche a publié :
(I) Lee Smolin, « Une construction darwinienne de l'Univers », hors série n° 1, avril 1998.

(II) Stéphanie Ruphy, « Les trous noirs », septembre 1998.

(III) Gravité et dimensions cachées, avril 2001, p. 24.



cordes. Comment parvient-elle à unifier relativité générale et mécanique quantique ?

L'incompatibilité des deux théories est liée à la structure de l'espace-temps à petite échelle. Dans la théorie de la relativité d'Einstein, l'idée centrale est que la gravité se manifeste par la courbure de l'espace-temps à quatre dimensions, fruit de l'unification de notre espace familier et du temps. Mais ces courbures sont forcément douces : les ruptures brusques sont impossibles. Au contraire, aux échelles décrites par la mécanique quantique, c'est le règne du principe d'incertitude de Heisenberg*, et l'Univers est animé de fluctuations violentes. Si l'on tente d'utiliser les équations de la relativité à ces petites échelles, le champ gravitationnel, lui aussi soumis à ces fluctuations quantiques, se manifeste par des déformations de l'espace-temps trop violentes pour être compatibles avec la théorie d'Einstein.

En remplaçant des particules ponctuelles par des cordes, on « étale » en quelque sorte ces fluctuations. Elles ne disparaissent pas complètement, mais elles sont suffisamment « amorties » pour ne plus être incompatibles avec la « douceur » des courbures de l'espace-temps requise par la relativité générale.

Mais la théorie des cordes n'est pas la seule manière d'unifier les deux théories. Une autre approche, la gravité quantique en lacet, a elle aussi des adeptes, certes moins nombreux⁽¹⁾. Vous semble-t-elle aussi prometteuse ?

C'est une approche très intéressante, mais qui n'est pas encore à un stade de développement comparable à celui de la théorie des cordes. De plus, son ambition unificatrice est plus modeste puisqu'il s'agit seulement d'unifier gravité et mécanique quantique sans vraiment inclure l'ensemble de nos connaissances en physique des particules. Elle n'a toutefois rien d'incompatible avec la théorie des cordes. Après tout, ce n'est peut-être qu'une autre façon d'exprimer cette dernière.

Existe-t-il d'autres arguments qui permettent de privilégier la théorie des cordes ?

Un succès majeur de la théorie des cordes concerne les trous noirs. En 1997, les théoriciens des cordes ont en effet construit un modèle de trou noir qui permet de retrouver des résultats théoriques obtenus vingt ans plus tôt, et par une autre approche, par Stephen Hawking, de Cambridge. D'une manière plus rigoureuse que Hawking, ils ont montré qu'un trou noir n'est pas tout à fait noir : il émet une faible radiation due à un processus quantique^(II). C'est ce que l'on nomme l'évaporation des trous noirs.

Ce succès n'est encore que théorique. Vérifiera-t-on bientôt expérimentalement des prédictions de la théorie des cordes ?

Une prédiction que l'on pourrait tester bientôt est l'existence d'hypothétiques particules très lourdes, les sparticules. En effet, si la théorie des cordes est vraie, la nature doit pos-

séder une propriété particulière, la supersymétrie. Et si la nature est effectivement supersymétrique, alors chaque particule que nous connaissons doit posséder un partenaire beaucoup plus lourd qu'elle-même. Ces partenaires supersymétriques ne sont pas détectables aujourd'hui, mais devraient l'être dans la prochaine génération d'accélérateurs de particules.

Donc si l'on n'observe pas de sparticules, c'est que la théorie des cordes est fautive ?

J'aimerais vraiment pouvoir vous dire oui ! Mais malheureusement la théorie dans son état actuel n'est pas falsifiable. Autrement dit, détecter des sparticules serait un signe très encourageant, mais rien de plus. En fait, il n'existe pas encore de prédiction concluante, c'est-à-dire en mesure d'invalidier ou de confirmer la théorie des supercordes. Mais n'oublions pas que c'est une théorie jeune, encore en plein développement, et qui s'attaque, contrairement aux autres grandes théories physiques, à des échelles spatiales complètement étrangères à l'expérience humaine.

De nombreux théoriciens des cordes s'intéressent aujourd'hui à leurs implications en cosmologie^(III). Peut-on imaginer que des confirmations expérimentales viennent de ce côté ?

La cosmologie offre effectivement un nouveau champ de prédictions possibles, et je suis persuadé que cette ouverture va jouer un rôle important pour les théoriciens des cordes dans les dix prochaines années. On peut imaginer qu'en raison de l'expansion très rapide de l'Univers juste après le Big Bang une physique qui opère à très petite échelle puisse laisser une trace observable à des échelles astrophysiques. Par exemple, l'Univers baigne dans un « rayonnement de fond cosmologique », émis environ 300 000 ans après le Big Bang, et que l'on peut enregistrer : je travaille actuellement à définir quelle pourrait être l'empreinte laissée sur ce rayonnement par des phénomènes décrits par la théorie des cordes.

Quels sont les principaux obstacles qui restent à surmonter ?

Il y a bien sûr cette nécessité impérieuse de faire des prédictions expérimentales réalisables et concluantes. D'un point de vue strictement théorique, l'une des principales faiblesses de la théorie des cordes aujourd'hui est qu'elle présuppose un certain concept d'espace et de temps. Or, nous avons des raisons de penser que la manière dont nous concevons le temps et l'espace n'est qu'une approximation, valable seulement aux grandes échelles, de concepts organisateurs plus profonds, plus précis, à l'œuvre dans le monde subatomique et dont la nature nous échappe encore. Pour les saisir, il faudrait que les notions familières de temps et d'espace soient un produit, et non une présupposition, de la théorie des cordes.

Propos recueillis et traduits de l'américain par Stéphanie Ruphy