

Extra dimensions in physics and astrophysics/*Dimensions supplémentaires en physique et en astrophysique*

Foreword

Look in front of you. Now on your side. Next on the top. These are the known spatial dimensions of the Universe: there are just three. Have you ever wondered about the origin of this number? Have you ever thought if there are new dimensions that can escape our observation?

In all physical theories, the number of dimensions is a free parameter fixed to three by observation, with one exception: string theory, which predicts the existence of six new spatial dimensions. This is the only known theory today that unifies the two great discoveries of 20th century: quantum mechanics, describing the behavior of elementary particles, and Einstein's General Relativity, describing gravitational phenomena in our Universe [1].

String theory replaces all elementary point-particles that form matter and its interactions with a single extended object of vanishing width: a tiny string. Thus, every known elementary particle, such as the electron, quark, photon or neutrino, corresponds to a particular vibration mode of the string (see Fig. 1). The diversity of these particles is due to the different properties of the corresponding string vibrations.

Until now, there is no experimental confirmation of string theory. No one has ever observed strings, not even indirectly, nor the space of extra dimensions where they live. The main arguments in its favor are theoretical, because it provides a coherent framework for unification of all fundamental interactions. For a long time, string physicists thought that the six extra dimensions

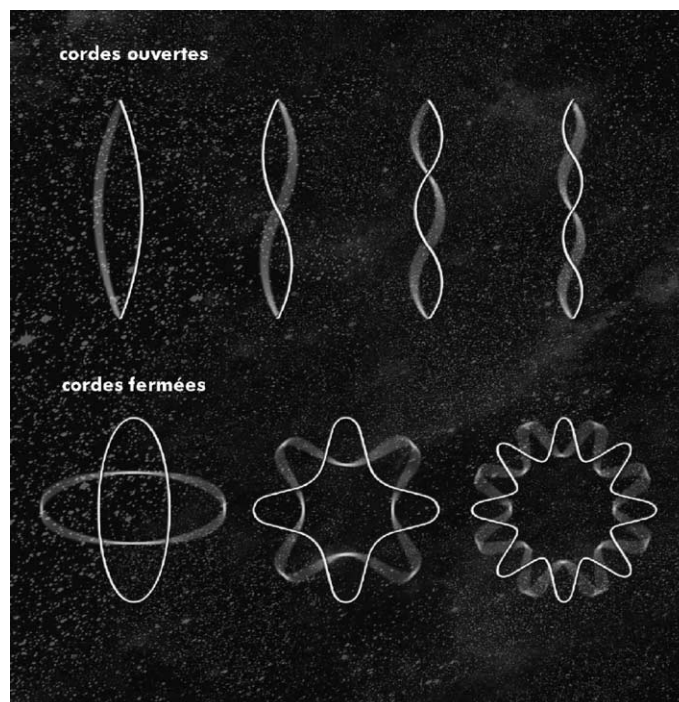


Fig. 1. In string theory, the elementary constituent of matter is a minuscule string, having vanishing width but finite size. It can be open with free ends (upper part), or closed (lower part). Its vibration modes, like the ones shown above, correspond to various elementary particles.

Fig. 1. Dans la théorie des cordes, il n'existe qu'un seul constituant élémentaire de la matière : une minuscule corde, sans épaisseur mais de longueur finie. Elle peut être ouverte, ses deux extrémités étant libres, ou fermée, bouclée sur elle-même. Ses différents modes de vibration correspondent aux différentes particules élémentaires.

were extremely small, having the smallest possible size of physics, associated to the Planck length $\sim 10^{-35}$ meters. In this case, the manifestation of new phenomena associated to the extra dimensions are by far out of experimental reach, at least in particle accelerators. Indeed, the Large Hadron Collider (LHC) which is the biggest accelerator under construction at CERN (European Center of Nuclear Research) in Geneva (Switzerland) will explore short distances, only up to 10^{-19} meters.

However, the situation changed drastically recently. It has been realized that the ‘hidden’ dimensions of string theory may be much larger than what we thought in the past and become within experimental reach in the near future, together with the strings themselves. These ideas lead in particular to experimental tests of string theory that can be performed at TEVATRON (current collider of protons–anti-protons at Fermilab in Chicago) and LHC.

The first indication of large extra dimensions in string theory came in 1988 from studies of the problem of supersymmetry breaking [2]. Supersymmetry is a new fundamental symmetry of matter which renders the masses of elementary particles compatible with gravitation [3]. In fact, in a quantum theory without supersymmetry, the presence of gravity, which is much weaker than the other interactions, introduces a new high energy scale, the Planck mass $\sim 10^{19}$ GeV (gigaelectronvolts), which attracts all masses of elementary particles to become 10^{16} times heavier than their observed values: this is the so-called mass hierarchy problem. One of the main predictions of supersymmetry is that every known elementary particle has a partner, called superparticle. However, since none of these superparticles have ever been produced in accelerators, they should be heavier than the observed particles. Supersymmetry should therefore be broken. On the other hand, protection of the mass hierarchy requires that its breaking scale, i.e., the mass splitting between the masses of ordinary particles and their partners, cannot be larger than a few TeV (teraelectronvolts). They can therefore be produced at LHC, which will test the idea of supersymmetry.

Assuming that supersymmetry breaking in string theory arises by the process of compactification of the extra dimensions (i.e., from their intrinsic geometry and topology), one can show that its energy breaking scale is tied to the size of these dimensions. Thus, a breaking scale in the TeV region would imply the existence of an extra dimension of size $\sim 10^{-18}$ meters. At the time however, this result was not taken seriously. The reason was rather due to a theoretical prejudice to evade invalidating the only computations we could do. More precisely, computations could be performed if strings interact weakly. The strength of string interactions is controlled by a parameter, called string coupling, which increases when extra dimensions become large.

Two years later, in 1990, specific models were proposed, where perturbative computations were possible in part of the theory, even in the presence of large extra dimensions of size of 10^{-18} meters [4]. In this class of models, the new dimensions form small intervals with our world localized at their ends. The mediators of interactions on the other hand can propagate in the bulk (along the intervals). The main characteristics of these models is the production of the so-called Kaluza–Klein states in particle accelerators [5,6]. If, for instance, the photon propagates along an extra dimension, one should observe a tower of massive

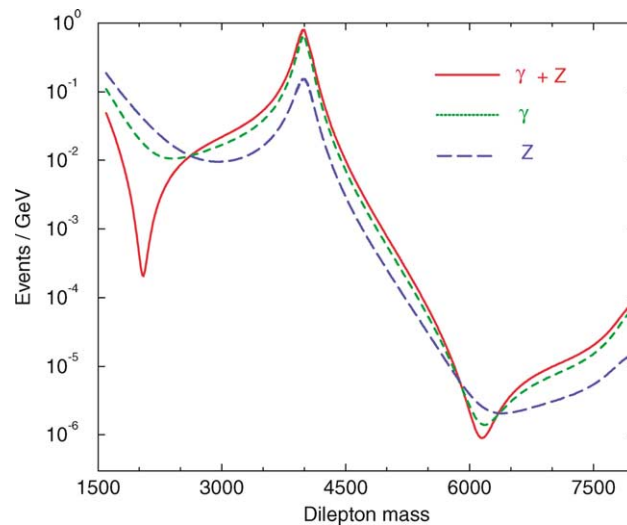


Fig. 2. If there is an extra dimension of size 10^{-18} meters, felt by the electroweak interactions, LHC should produce the first Kaluza–Klein states of the photon and of the Z boson (one of the mediators of weak interactions). We can then detect the electron–positron pairs produced by the desintegration of these states. The number of the expected events is computed as a function of the energy of the pair in GeV. From highest to lowest: excitation of photon + Z, photon and Z boson.

Fig. 2. Production de premiers états de Kaluza–Klein du photon et du boson Z (un des médiateurs des interactions faibles) au LHC, pour une dimension de 4 TeV. Les états produits se désintègrent à une paire de leptons (électron–positron ou muon–antimuon) qu’on observe. La figure montre le nombre d’événements (axe vertical) comme fonction de l’énergie de la paire.

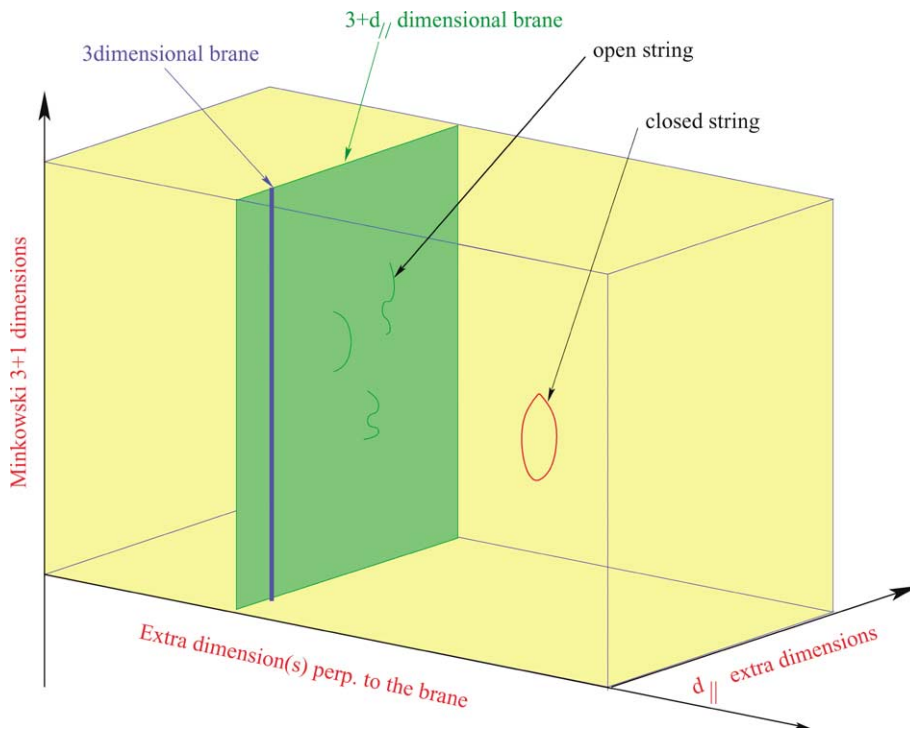


Fig. 3. In the type I string framework, our Universe contains, besides the three known spatial dimensions (denoted by a single blue line), some extra dimensions ($d_{||} = p - 3$) longitudinal to our world brane (green plane) along which the light described by open strings propagates, as well as some transverse dimensions (yellow space) where only gravity described by closed strings can propagate. The longitudinal extra dimensions have the string size of the order of 10^{-18} meters, while the size of the transverse dimensions varies in the range of 10^{-12} meters to a fraction of a millimeter.

Fig. 3. Dans le cadre de la théorie des cordes de type I, notre Univers est constitué, en plus des trois dimensions qui nous sont familières (ramenées ici à une ligne bleue), de $d_{||} = p - 3$ dimensions parallèles (plan vert), dans lesquelles la lumière (mais aussi les interactions nucléaires faibles et fortes) peut se propager, et de dimensions transverses (région jaune), parcourues par la gravitation. Les dimensions parallèles et les cordes sont à l'échelle de 10^{-18} m, tandis que les dimensions transverses sont beaucoup plus grandes, avec une taille d'au moins 10^{-12} m.

particles with the same properties as the photon but with a mass that becomes higher as the size of the extra dimension is getting smaller. It follows, that for a size of order 10^{-18} meters, an energy of order of a few TeV would be sufficient to produce them (see Fig. 2). Thus, the existence of such dimensions is testable in LHC.

All the works discussed until now were done in the context of the so-called Heterotic string theory. On the other hand, there were in total five consistent string theories! Four of them contain only closed strings that form closed loops; the other also contains open strings with ends that move freely with the speed of light; besides, all these theories do not have the same supersymmetry. This multiplicity of theories was creating a problem, since string theory was supposed to provide a unified framework of all physical theories. Thus, one of the five string theories had to be the right one to describe nature but which one? the answer has been provided in 1994: all of them simultaneously. Following the works of several groups and in particular of Witten, it was realized that every known string theory describes a particular limit of an underlying more general fundamental theory that can be defined in ten dimensions of space, called M-theory [7]. This achievement was made due to the discovery of duality symmetries. One type of these symmetries relates two theories with mutually inverse string couplings. Thus, a strongly coupled theory can be studied using perturbation theory in its weakly coupled dual, which has as coupling the inverse of the former. Since computations with large coupling became effectively possible, the road was open to study models with extra dimensions much larger than the Planck length [8].

In the meantime, in February 1998, a new idea was proposed for explaining the mass hierarchy problem. As we discussed above, a possible solution is provided by the introduction of supersymmetry at electroweak energies. The new observation is that if at the TeV scale gravity was 10^{32} times stronger than what we believed in the past, then all interactions would have comparable strengths [9]. This idea can be realized without experimental conflict in models possessing large extra dimensions along which only gravity propagates: gravity appears to us very weak at macroscopic scales because its intensity is spread in the 'hidden' extra dimensions. In order to increase the gravitational force without contradicting present observations, one has

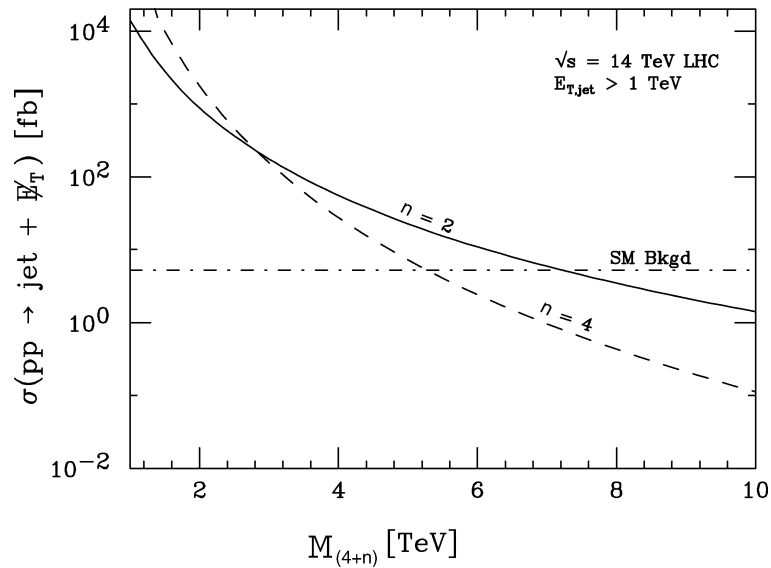


Fig. 4. Missing energy due to graviton emission in the LHC experiment, as a function of the fundamental scale $M_{(4+n)}$ of quantum gravity that propagates in n large transverse dimensions. It is produced together with a hadronic jet that one detects in the collision of the two proton beams. The figure shows the expected cross-section for $n = 2$ and $n = 4$ extra dimensions, together with the background (horizontal dotted-dashed line) coming from other known sources [12].

Fig. 4. Energie manquante, due à l'émission du graviton au LHC, comme fonction de l'échelle fondamentale de gravité quantique $M_{(4+n)}$, qui se propage dans n grandes dimensions supplémentaires. Il est produit avec un jet hadronique qu'on détecte dans la collision de deux faisceaux de protons. La figure montre le nombre d'événements (axe vertical) pour $n = 2$ et $n = 4$ dimensions supplémentaires, ainsi que le bruit de fond (ligne pointillée horizontale) [12].

to introduce at least two such extra dimensions of a size that can be as large as a fraction of a millimeter. At these distances, gravity should start to deviate from Newton's law, which may be possible to explore in laboratory experiments.

These developments led a few weeks later to a proposal of a new string theory framework for particle physics [10]. The hierarchy problem can be explained if the fundamental string size is fixed to 10^{-18} – 10^{-19} meters. A convenient perturbative framework realizing this idea is one of the five string theories, called type I, that contains simultaneously closed and open strings. Our universe should be localized on a hypersurface, i.e., a membrane extended in p spatial dimensions, called p -brane. Closed strings describe gravity and propagate in all nine dimensions of space: in those extended along the p -brane, as well as in the transverse ones. The endpoints of open strings describing the other interactions are, on the contrary, confined on the p -brane [11] (see Fig. 3).

Obviously, our p -braneworld must have at least the three known dimensions of space. But it may contain more: as opposed to the transverse dimensions that interact with us only gravitationally, the 'longitudinal' to the brane extra dimensions can be 'seen' by light at sufficiently high energies, giving rise to the production of massive Kaluza–Klein particles in accelerators (see Fig. 2). On the other hand, the existence of the extra large submillimeter dimensions, transverse to our p -brane universe, guarantee that gravitational interactions appear to us very weak at macroscopic distances, larger than a millimeter. The size of these transverse dimensions varies from a fraction of millimeter (in the case of two) to a fermi (10^{-14} meters in the case of six). Their characteristic signal in particle colliders is graviton emission into the bulk, leading to missing energy that escapes detection (see Fig. 4).

This special issue contains a collection of ten articles treating several aspects and applications of extra dimensions in physics and astrophysics. The present experimental status and future searches are summarized by M. Besançon for particle colliders, and by J. Long and J. Price for micro-gravity experiments. The main theoretical framework and motivations are reviewed by N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos and G. Dvali for the case of flat extra dimensions. Possible implications of extra dimensions are discussed by K. Dienes, E. Dudas and T. Gherghetta for the unification problem of fundamental forces, and by K. Benakli and M. Quirós for the electroweak symmetry breaking and Higgs physics. A major theoretical breakthrough using physics of extra dimensions is the description of strongly coupled four-dimensional gauge theories using classical string theory in five-dimensional anti-de Sitter spacetime [13], a topic which is analyzed in the research article of J. Maldacena and L. Maoz. The cosmology of a braneworld universe with extra dimensions is discussed in the review article of P. Binétruy, C. Deffayet and

D. Langlois, as well as by B. Ovrut in the M-theory context. Finally, an interesting application of these ideas to the quantum Hall effect is studied in the research article of H. Elvang and J. Polchinski.

Avant-propos

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 les deux grandes découvertes du XXe siècle, la mécanique quantique, qui décrit le comportement des particules élémentaires, et la théorie de la relativité générale d'Einstein, qui décrit la gravitation dans l'Univers [1].

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 Fig. 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. Personne n'a encore observé, même indirectement, une corde, ni l'une des dimensions d'espace supplémentaires dans lesquelles ces cordes se meuvent. Les arguments principaux en faveur de la théorie des cordes sont théoriques, parce qu'elle unifie toutes les théories physiques fondamentales en une seule description de l'Univers. Lorsqu'ils ont construit la théorie des cordes, les physiciens ont imaginé que les six dimensions supplémentaires étaient extrêmement petites, et même qu'elles avaient la plus petite longueur imaginable en physique, la longueur de Planck, soit $\sim 10^{-35}$ m. Dans ces conditions, toute manifestation d'un phénomène physique qui se déroulerait dans l'une de ces dimensions est largement hors de portée des accélérateurs de particules actuels. Le Grand collisionneur de hadrons (LHC), plus performant que tous ses prédécesseurs et qui entrera en service à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN), à Genève, vers 2007, sondera des distances d'environ 10^{-19} m seulement.

La situation est cependant changée depuis quelques années. 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. Ainsi, des dimensions cachées de l'Univers, voire les cordes elles-mêmes, ne sont peut-être pas hors de notre portée ; des tests de la théorie des cordes pourront être réalisés au Tevatron (collisionneur de protons et d'antiprotons actuellement en service au Fermilab, à Chicago) et au LHC.

La première motivation des dimensions supplémentaires de grande taille en théorie des cordes est apparue en 1988, par des études du problème de la brisure de supersymétrie [2]. La supersymétrie est une symétrie fondamentale de la matière dont l'introduction dans le modèle standard de la physique des particules rend compatible la gravitation avec les valeurs observées pour les masses des particules [3]. Sans supersymétrie, l'introduction dans le modèle standard de la gravitation, dont l'intensité est beaucoup plus faible que celles des trois autres interactions, introduit une nouvelle échelle, la masse de Planck $\sim 10^{19}$ GeV (gigaélectronvolts), et conduit à la prédiction de masses des particules 10^{16} fois plus grandes que celles qui ont été observées : c'est ce qu'on nomme le problème de hiérarchie. L'une des prédictions principales de la supersymétrie est que chaque particule élémentaire connue possède un partenaire nommé sparticule. Toutefois, comme on n'a encore observé aucune de ces sparticules dans les grands accélérateurs, elles doivent être beaucoup plus lourdes que tous leurs partenaires ordinaires déjà observés. C'est ce phénomène qu'on nomme brisure de supersymétrie. Par ailleurs, les masses que nous avons observées pour les particules ordinaires indiquent 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 TeV (teraélectronvolt). L'idée de la supersymétrie sera alors testée au LHC.

En supposant que la supersymétrie est brisée en théorie des cordes par la procédure de compactification, autrement dit par la façon dont les dimensions supplémentaires sont disposées les unes par rapport aux autres, on peut montrer que la valeur approximative de l'énergie de la brisure est liée à la taille des dimensions supplémentaires. Par conséquent, une brisure de supersymétrie autour du TeV découlerait assez naturellement de l'existence d'au moins une dimension supplémentaire, d'une taille de $\sim 10^{-18}$ m. Cependant, à l'époque, ce résultat n'était pas pris au sérieux. Il ne s'agissait que d'un préjugé théorique, pour éviter d'invalider les seuls calculs que nous sachions faire. Plus précisément, on ne savait mener à bien des calculs que dans le cas où 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 de la corde et croît quand ces dimensions deviennent grandes.

Deux ans plus tard, en 1990, des modèles d'Univers ont été proposés où l'on pouvait mener des calculs perturbatifs sur une partie des équations, même avec des dimensions supplémentaires aussi grandes que 10^{-18} m [4]. 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. La prédiction principale de ces modèles est la production des états, dits de Kaluza–Klein, dans les accélérateurs de particules [5,6]. Si la lumière, par exemple, se propageait dans une dimension supplémentaire, on devrait alors observer des particules, semblables aux photons, mais dotées d'une masse d'autant plus élevée que la taille de la dimension est plus petite. S'il existe des dimensions supplémentaires de l'ordre de 10^{-18} m, une énergie de l'ordre du TeV suffirait (voir Fig. 2). Leur existence est alors testable au LHC.

Tous les travaux dont nous avons parlé jusqu'ici avaient pour cadre une même théorie des cordes, appelée hétérotique. Mais on disposait de cinq théories des cordes cohérentes ! Dans certaines de ces théories, les cordes sont obligatoirement fermées sur elles-mêmes, formant des boucles ; dans une autre, certaines 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, comme la théorie des cordes avait justement été inventée pour construire un cadre théorique 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, définie en dix dimensions spatiales, baptisée théorie M [7]. Cette découverte 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. Par conséquent, une théorie fortement couplée peut être étudiée à l'aide de sa théorie duale faiblement couplée, la valeur de la constante de couplage de celle-ci étant l'inverse de la première. 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 [8].

Entre temps, en février 1998, une nouvelle idée a été proposée pour expliquer le problème de hiérarchie. Jusque-là, la seule solution proposée à ce problème était, nous l'avons vu, l'introduction de la supersymétrie. La nouvelle remarque était que si, à l'échelle du TeV, la gravitation avait une intensité 10^{32} fois plus grande que ce qu'on pensait jusqu'ici, alors toutes les interactions y auraient quasiment la même intensité [9]. Cette proposition est 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. À l'échelle de ces dimensions, l'intensité de la force gravitationnelle dans nos trois dimensions devrait dévier fortement de la loi de Newton, ce qu'on pourrait explorer expérimentalement.

Ces développements ont conduit quelques semaines plus tard à un nouveau cadre pour décrire la physique des particules dans la théorie des cordes [10]. Pour résoudre le problème de hiérarchie, il suffit de fixer la longueur des cordes à 10^{-18} – 10^{-19} m. Cette condition est réalisée de façon convenable et en couplage faible dans le cadre de l'une des cinq théories des cordes, dite de type I, 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, que l'on appelle une p -brane. 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 [11] (voir Fig. 3).

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 (voir Fig. 2). D'autre part, l'existence de très grandes dimensions, les dimensions transverses à notre p -brane, assure que l'interaction gravitationnelle apparaît si peu intense lorsqu'on l'observe à des échelles de distance supérieures au millimètre. La taille maximale de ces dimensions transverses peut varier du millimètre (pour deux dimensions) à 10^{-14} m (pour six dimensions). Leur signature caractéristique aux accélérateurs de particules serait l'émission gravitationnelle dans l'espace transverse, se manifestant comme énergie manquante qui échappe la détection (voir Fig. 4).

Ce volume particulier contient une collection de dix articles traitant différents aspects des dimensions supplémentaires et leurs conséquences en physique de particules et en astrophysique. Leur statut expérimental actuel ainsi que des recherches futures sont décrites par les exposés de M. Besançon pour les collisionneurs de particules, et de J. Long et J. Price pour les expériences de microgravité. Le cadre théorique est présenté par N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos et G. Dvali dans le cas des dimensions plates. Leurs conséquences phénoménologiques sont analysées par K. Dienes, E. Dudas et T. Gherghetta, pour le problème d'unification des forces fondamentales, et par K. Benakli et M. Quirós pour la brisure de la symétrie électrofaible et la physique du boson de Higgs. Une découverte théorique célèbre de la physique des dimensions supplémentaires est la description de la dynamique des théories de jauge fortement couplées à quatre dimensions en utilisant une théorie de cordes classique dans un espace courbe à cinq dimensions de géométrie anti-de Sitter [13] ; c'est précisément le sujet de recherche de

l'article de J. Maldacena et de L. Maoz. Les conséquences des dimensions supplémentaires en astrophysique et la cosmologie de l'univers branaire sont présentées dans les exposés de P. Binétruy, C. Deffayet et D. Langlois, ainsi que par B. Ovrut dans le cadre de la théorie M. Finalement, une application possible de ces idées dans l'effet Hall quantique est étudiée dans l'article de recherche de H. Elvang et J. Polchinski.

References

- [1] See, e.g., M.B. Green, J.H. Schwarz, E. Witten, *Superstring Theory*, Vols. 1 & 2, Cambridge University Press, 1987; J. Polchinski, *String Theory*, Vols. 1 & 2, Cambridge University Press, 1998; I. Antoniadis, E. Cremmer, K.S. Stelle, Les supercordes, *Gaz. Math.* 87 (janvier 2001) et 88 (avril 2001).
- [2] I. Antoniadis, C. Bachas, D. Lewellen, T. Tomaras, On supersymmetry breaking in superstrings, *Phys. Lett. B* 207 (1988) 441; I. Antoniadis, Les dimensions cachées de l'univers, *La Recherche* 343 (2001) 25.
- [3] See, e.g., P. Fayet, La supersymétrie : une piste sérieuse, *La Recherche* (janvier 2001).
- [4] I. Antoniadis, A possible new dimension at a few TeV, *Phys. Lett. B* 246 (1990) 377.
- [5] T. Kaluza, *Preuss. Akad. Wiss.* (1921) 966; O. Klein, *Z. Phys.* 37 (1926) 895.
- [6] I. Antoniadis, K. Benakli, M. Quirós, Production of Kaluza–Klein states at future colliders, *Phys. Lett. B* 331 (1994) 313 and B 460 (1999) 176.
- [7] E. Witten, String theory dynamics in various dimensions, *Nucl. Phys. B* 443 (1995) 85; P. Horava, E. Witten, Heterotic and type I string dynamics from eleven dimensions, *Nucl. Phys. B* 460 (1996) 506.
- [8] E. Witten, Strong coupling expansion of Calabi–Yau compactification, *Nucl. Phys. B* 471 (1996) 135; J.D. Lykken, Weak scale superstrings, *Phys. Rev. D* 54 (1996) 3693.
- [9] N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, The hierarchy problem and new dimensions at a millimeter, *Phys. Lett. B* 429 (1998) 263.
- [10] I. Antoniadis, N. Arkani-Hamed, S. Dimopoulos, G. Dvali, New dimensions at a millimeter to a fermi and superstrings at a TeV, *Phys. Lett. B* 436 (1998) 263.
- [11] J. Polchinski, Dirichlet-branes and Ramond-Ramond charges, *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 4724.
- [12] G.F. Giudice, R. Rattazzi, J.D. Wells, Quantum gravity and extra dimensions at high-energy colliders, *Nucl. Phys. B* 544 (1999) 3; E.A. Mirabelli, M. Perelstein, M.E. Peskin, Collider signatures of new large space dimensions, *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999) 2236.
- [13] J.M. Maldacena, The large N limit of superconformal field theories and supergravity, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998) 231.

Ignatios Antoniadis¹
 CERN, Theory Division
 CH-1211, Geneva 23
 Switzerland

E-mail address: Ignatios.Antoniadis@cern.ch (I. Antoniadis)

¹ On leave from Centre de physique théorique, École Polytechnique, 91128 Palaiseau, France.