

gné un autre article qui utilise des données confidentielles : le texte envisage la possibilité qu'une grosse météorite s'écrase sur la Terre.

La crainte d'un tel impact météoritique avait déjà conduit l'armée de l'air à publier les données des 17 premières années du programme DSP, depuis 1970. Les satellites DSP détectent l'énergie infrarouge libérée par des explosions dont l'intensité est supérieure à celle qui est libérée lors de la destruction d'un avion. Aussi, lorsqu'une météorite assez grosse pénètre dans l'atmosphère terrestre, elle explose en émettant une signature infrarouge spécifique, détectable par les satellites DSP.

Ayant accès aux mesures DSP plus récentes et à d'autres données, T. McCord a décrit une météorite qui a pénétré dans l'atmosphère le 1^{er} février 1994, au-dessus de l'océan Pacifique, non loin de l'île de Kosrae. Selon T. McCord, la masse de cette météorite était comprise entre 500 et 9 000 tonnes.

T. McCord a publié l'analyse de l'événement le 25 février 1995 dans le *Journal of Geophysical Research* : à partir des enregistrements des DSP et d'autres détecteurs, il a estimé l'orbite, la masse, la fragmentation et l'énergie libérée par la météorite (entre 34 et 630 kilotonnes). L'article précisait l'endroit où la météorite a été détectée pour la première fois (à 54 kilomètres d'altitude), sa trajectoire, son angle de pénétration dans l'atmosphère, sa désintégration, et comment les auteurs ont calculé son orbite et l'énergie libérée.

En revanche, T. McCord n'a pas décrit les capteurs utilisés ni mentionné leur embarquement dans les satellites DSP. Il indiquait seulement que les données provenaient de capteurs sensibles aux infrarouges et à la lumière visible, embarqués dans des engins du ministère américain de la Défense.

Renseignements d'urgence

Les membres du comité Médée ont aidé la communauté du renseignement à évaluer les dégradations environnementales et les catastrophes naturelles. Ces études écologiques sont devenues importantes, en 1993, lorsqu'une directive présidentielle décréta que les problèmes d'environnement sont des facteurs importants de la politique des États-Unis.

Par ses études de la Russie et de l'Europe de l'Est, le comité Médée a aidé les services de renseignements à évaluer les effets d'une série de marées noires dans la région de Komi, en Russie, et de la mise en décharge des armes chimiques russes dans l'Arctique. Selon un membre du NRO, les spécialistes du Bureau de cartographie et d'imagerie du ministère américain de la Défense ont appris quelques méthodes astucieuses de combinaison des données recueillies à différentes longueurs d'onde, pour créer une image unique contenant plus d'informations que chacune des images initiales.

Plusieurs membres du comité ont aussi participé au Groupe de travail sur l'environnement, présidé par le vice-président Al Gore et par le Premier ministre russe Viktor Chernomyrdine. Le groupe de travail a notamment échangé des images satellites, afin d'aider au nettoyage des zones entourant les installations militaires russes.

Puis, ensemble, les services secrets américains et le comité Médée ont étudié les inondations de l'hiver 1996-1997, en Californie du Nord, les dégâts causés par les ouragans dans le Sud-Est des États-Unis et les changements de régime du volcan de Montserrat, peu avant qu'il n'entre en éruption, en 1995. Dans ce dernier cas, ils ont alerté le gouvernement de l'île, qui a évacué 4 000 personnes de la zone dangereuse.

Enfin le comité a aidé les services forestiers américains qui n'avaient pas assez d'avions pour déterminer l'étendue des incendies en Alaska, en juin 1996. La tâche était aisée pour les satellites DSP et de reconnaissance.

L'avenir de Médée

Doit-on intensifier le programme Médée? Le gouvernement américain craint que l'utilisation de données secrètes par des organismes civils ne perturbe la discussion démocratique de leur politique : une telle utilisation interdirait aux responsables de donner l'ensemble des informations nécessaires aux prises de décision, de sorte que les experts extérieurs n'auraient pas accès aux données sur lesquelles ces politiques sont fondées. L'utilisation de systèmes de renseignements pour la recherche environnementale pourrait aussi freiner l'utilisation de satellites com-

merciaux de résolution suffisante pour la recherche environnementale – dont les résultats seront immédiatement disponibles pour un auditoire beaucoup plus vaste. Enfin, certains ont craint que les services de renseignements ne passent trop de temps à des tâches qui ne sont pas de leur ressort, mais selon Bo Tumas, directeur du programme Renseignement et environnement à la CIA, la collecte de données pour l'environnement occupe moins de un pour cent du temps des satellites de reconnaissance.

Malgré les difficultés, le comité Médée prépare une base de données importante sur l'environnement pour les scientifiques du XXI^e siècle. Au sein de la CIA, il promeut l'élargissement de la diffusion des données. Par exemple, les scientifiques de Médée ont déjà proposé de publier toutes les images satellites en rapport avec l'environnement jusqu'à aujourd'hui, quitte à réduire la résolution des satellites actuels en fournissant des images plus grossières. Les responsables de la CIA ont rejeté cette proposition, mais, sans le programme Médée, une telle possibilité n'aurait même sans doute jamais été envisagée.

Médée est autant une expérience que le fruit du travail de ses participants. Comme pour chaque expérience, il y aura des théories, des découvertes inattendues et, espère-t-on, des progrès à mesure que la collaboration entre les scientifiques et les espions mûrira.

Jeffrey RICHELSON travaille aux Archives pour la sécurité américaine, à Washington D.C.

Atlas de géographie de l'espace, sous la direction de Fernand Verger, éditions Belin, 1997.

Robert A. MACDONALD, *Corona : Success for Space Reconnaissance : A Look into the Cold War*, in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 6, pp. 689-720, juin 1995.

Gregg EASTERBROOK, *A Moment on the Earth : The Coming Age of Environmental Optimism*, Viking, 1995.

Scientific Utility of Naval Environmental Data, Medea Program Office, McLean, Va., 1995 (tel : 703-883-5265).

Scott PACE et al., *Using Intelligence Data for Environmental Needs : Balancing National Interests*, Rand, Santa Monica, Calif., 1997.

Les nouvelles théories des cordes

MICHAEL DUFF

Les physiciens qui cherchent à décrire tous les types de forces par un même formalisme ont amalgamé la théorie des cordes à une théorie des membranes et à une théorie des trous noirs.

La science serait un édifice achevé? Toutes les découvertes importantes auraient déjà été faites? C'est douteux : les deux principaux piliers de la physique du XX^e siècle, la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale, restent incompatibles : la relativité générale ne se plie pas aux lois quantiques, qui décrivent le comportement des particules élémentaires, tandis que les trous noirs ne sont pas décrits par la mécanique quantique. Cette difficulté est la promesse d'une révolution scientifique à venir.

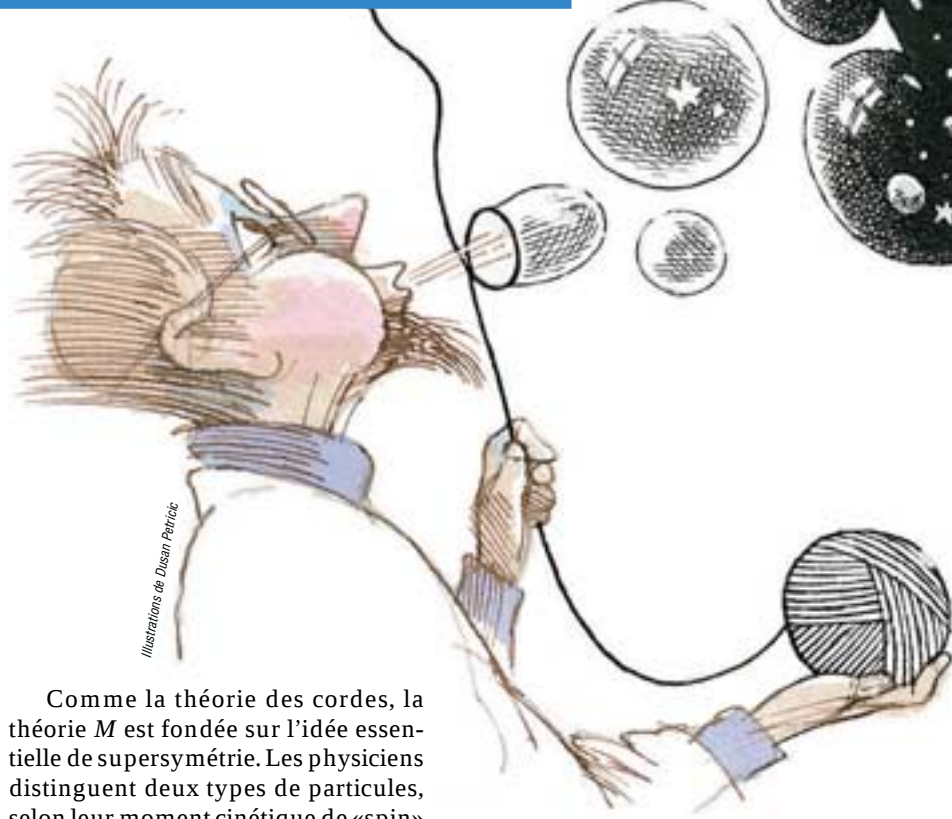
Encore récemment, on espérait que la théorie des cordes unifierait la gravitation et la mécanique quantique, et décrirait tous les phénomènes physiques à l'aide du même formalisme : les cordes sont des objets à une dimension dont on utilise les modes de vibration pour représenter les particules élémentaires. Puis, au cours des deux dernières années, la théorie des cordes a été détrônée par la théorie *M*, ou théorie des membranes, que nous examinerons plus loin. Chaque jour, cette théorie semble de plus en plus assurée : depuis l'apparition de la théorie des cordes, jamais la physique théorique ne s'est sentie aussi près du but.

Comme la théorie des cordes, la théorie *M* est fondée sur l'idée essentielle de supersymétrie. Les physiciens distinguent deux types de particules, selon leur moment cinétique de «spin» (le spin est un moment cinétique de rotation intrinsèque, comme si les particules tournaient sur elles-mêmes, à la façon de toupies). La supersymétrie stipule que, pour chaque particule connue dont le spin est un multiple entier de la constante de Planck (0, 1, 2, 3), il existe une particule de même masse ayant un spin demi-entier ($1/2$, $3/2$, $5/2$...), et vice versa.

Pourquoi les physiciens n'ont-ils découvert aucun de ces superpartenaires? Ils supposent que la symétrie existe, mais qu'elle est «brisée» : les particules postulées seraient trop massives pour être observées dans les accélérateurs actuels. Malgré l'absence de confirmations de la supersymétrie, les théoriciens ont conservé leur foi en l'hypothèse, parce qu'elle permet d'unifier les interactions faible, électromagnétique et forte à la force de gravitation.

La supersymétrie transforme les coordonnées d'espace et de temps, de sorte que les lois de la physique soient les mêmes pour tous les observateurs. Comme la théorie de la relativité générale découle de cette condition, la supersymétrie peut décrire la gravitation. La supersymétrie prédit même la «supergravité», où une particule de spin égal à 2 – le graviton – transmet les interactions gravitationnelles et possède le gravitino comme partenaire supersymétrique de spin égal à $3/2$.

Cependant la relativité générale peut être généralisée à n'importe quel nombre de dimensions d'espace-temps (notre Univers a trois dimensions d'espace et une dimension de temps) : en principe, ses équations peuvent être écrites dans un espace à plus de quatre dimensions. En revanche, la super-



Illustrations de Dusan Petrovic



1. L'UNIVERS résulte-t-il de l'interaction de cordes, de bulles et de feuilletés dans des dimensions supérieures d'espace-temps ?

Witten (lauréat de la médaille Fields, en 1990) et d'autres physiciens observèrent que cette «héllicité» ne s'expliquait pas par une réduction du nombre de dimensions de onze à quatre.

Les *p*-branes

La théorie des supercordes à dix dimensions supplanta alors la supergravité. Plus précisément, cinq théories des supercordes s'opposaient : la théorie des cordes hétérotiques $E_8 \times E_8$, la théorie des cordes hétérotiques $SO(32)$, la théorie des cordes de type I $SO(32)$, les théories des cordes de type IIA et de type IIB. Une corde de type I est «ouverte», composée seulement d'un segment, tandis que les autres sont des cordes «fermées» qui forment des boucles. La théorie des cordes $E_8 \times E_8$ semblait – du moins en principe – expliquer les particules élémentaires et les interactions connues, y compris leur hélicité. Contrairement à la supergravité, les théories des cordes semblaient réconcilier la relativité et la mécanique quantique.

Après l'euphorie initiale, les partisans des théories des cordes ont toutefois déchanté. Tout d'abord, de nombreuses questions importantes semblaient insolubles par les méthodes classiques de calcul ; des techniques radicalement nouvelles étaient nécessaires. Ensuite, pourquoi cinq théories des cordes différentes ? Une seule est la bonne, mais laquelle ? Troisièmement, si la supersymétrie admet onze dimensions, pourquoi les théories de supercordes s'arrêtent-elles à dix dimensions seulement ? Enfin, pourquoi assimiler les particules ponctuelles à des cordes, et non à des surfaces ou, plus généralement, à des objets à p dimensions ?

Ainsi, alors que la plupart des théoriciens se préoccupaient de «super-spaghettis», un petit groupe préférait les «super-raviolis» et la théorie des membranes, ou théorie *M*. Une particule ponctuelle, de dimension nulle, laisse une trace unidimensionnelle, ou «digne d'Univers», quand elle évolue dans l'espace-temps (voir la figure 2). De même, une corde, à une dimension,

gravité limite le nombre de dimensions d'espace-temps à 11.

Au début des années 1920, le physicien polonais Theodore Kaluza et le physicien suédois Oskar Klein ont proposé que l'espace-temps ait une cinquième dimension cachée. Cette dimension supplémentaire ne serait pas infinie, contrairement aux autres ; elle se refermerait sur elle-même en un cercle où se propageraient des ondes quantiques de longueur d'onde appropriée. Selon la mécanique quantique, seules les ondes dont la longueur d'onde est un sous-multiple exact de la longueur du cercle s'y propageraient ; chacune correspondrait à une particule d'énergie particulière, de sorte que l'énergie des particules serait quantifiée.

Un observateur vivant dans les quatre autres dimensions verrait un ensemble de particules dont les charges, plutôt que les énergies, sont discontinues. Le quantum de charge, ou unité de charge, dépendrait du rayon du cercle. Voilà qui nous rapprocherait du monde que nous connaissons, où la charge électrique est quantifiée : elle est toujours un multiple de la charge e de l'électron. Pour que la théorie décrive la valeur correcte de e , on doit supposer que le cercle de la cinquième dimension est minuscule, avec un rayon de l'ordre de 10^{-33} centimètre seulement. La petite taille de la dimension invi-

sible explique pourquoi nous ne percevons pas cette dimension et pourquoi les atomes n'y sont pas sensibles. Pourtant l'électromagnétisme en découlerait, et la gravitation serait alors unifiée avec ce dernier.

En 1978, à l'École normale supérieure de Paris, Eugène Cremmer, Bernard Julia et Joël Scherk ont compris que la supergravité autorise jusqu'à sept dimensions supplémentaires et gagne en élégance dans un espace-temps à onze dimensions (dix dimensions d'espace et une dimension de temps). Le monde réel que la théorie décrit finalement dépend de la façon dont les dimensions complémentaires bouclent, telle la cinquième dimension de la théorie de Kaluza et de Klein. Comme les dimensions supplémentaires pouvaient expliquer à la fois l'électromagnétisme et les interactions nucléaires fortes et faibles, de nombreux physiciens étudièrent la supergravité à onze dimensions, dans l'espoir qu'elle serait la théorie unificatrice dont ils rêvaient.

Cependant la supergravité à onze dimensions fut abattue en 1984, quand on lui découvrit une grave insuffisance. Dans le monde réel, la gauche et la droite ont une importance : les lois qui décrivent l'interaction nucléaire faible se modifient quand on les examine dans un miroir ; les neutrinos, par exemple, ont toujours un spin gauche. Or Edward

décrit une «surface d'Univers», à deux dimensions ; et une «membrane», à deux dimensions, balaie un «volume d'Univers» à trois dimensions. Plus généralement, une p -brane, à p dimensions, décrit un hypervolume d'univers à $p + 1$ dimensions (comme une p -brane doit pouvoir se déplacer dans l'espace-temps, $p + 1$ doit être inférieur ou égal au nombre de dimensions d'espace-temps).

Dès 1962, le physicien Paul Dirac, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, avait imaginé un modèle théorique fondé sur l'idée des membranes. Il avait supposé que l'électron n'était pas ponctuel, mais en forme de bulle, avec une membrane refermée sur elle-même ; les oscillations de la bulle auraient engendré des particules comme le muon, une version plus lourde de l'électron. L'idée théorique échoua, mais les équations utilisées aujourd'hui diffèrent peu de celles de Dirac. Elles décrivent que les membranes peuvent prendre la forme de bulles ou s'étendre dans deux directions, comme des feuilles de caoutchouc.

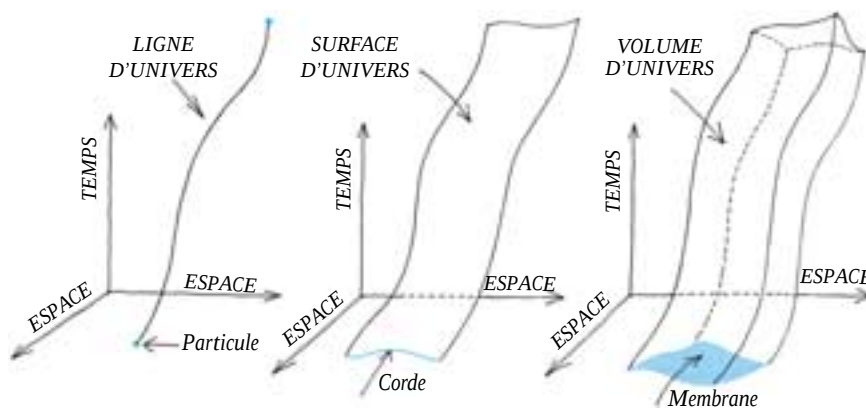
L'hypothèse de la supersymétrie limite les dimensions possibles d'une p -brane. Dans l'espace-temps à onze dimensions flotte une membrane, découverte mathématiquement par Eric Bergshoeff, de l'Université de Groningen, par Ergin Sezgin, de l'Université du Texas, et par Paul Townsend, de l'Université de Cambridge. Cette membrane a deux dimensions spatiales, et elle ressemble à une feuille. Paul Howe, du Collège royal de Londres, Takeo Inami, de l'Université de Kyoto, Kellogg Stelle, du Collège impérial de Londres, et moi avons montré que, si l'une des onze dimensions est un cercle, on peut enrouler une fois la membrane autour de cette dimension et recoller les bords opposés pour former un tube. Si le rayon du cercle est suffisamment petit, la membrane ainsi enroulée ressemble à une corde à dix dimensions ; plus précisément, c'est une supercorde de type IIA.

L'étude des membranes est d'abord restée marginale, mais des progrès réalisés dans un domaine apparemment sans relation avec celui qui nous inté-

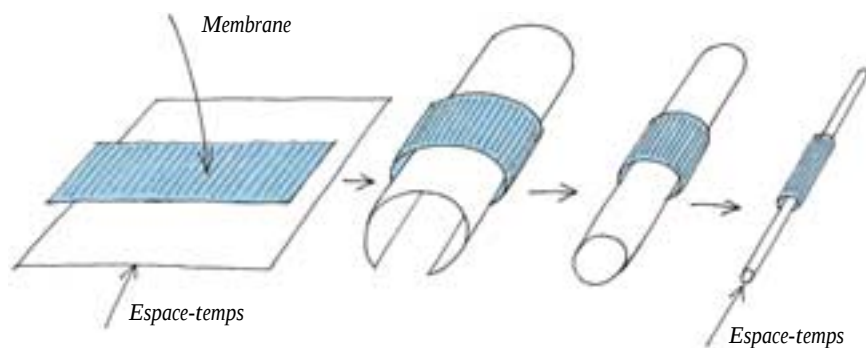
ressait ont changé l'état de la recherche. En 1917, la mathématicienne allemande Amalie Emmy Noether avait montré que la masse, la charge et d'autres caractéristiques des particules élémentaires sont généralement conservées en raison de l'existence de symétries. Par exemple, la conservation de l'énergie résulte de l'hypothèse d'une invariance des lois de la physique dans le temps, ce que l'on nomme une symétrie par rapport au temps ; de même, la conservation de la charge électrique découle de la symétrie de la fonction d'onde d'une particule (la fonction d'onde d'une particule est une fonction dont le carré correspond à la probabilité de présence de la particule en un point de l'espace ; cette fonction est une solution de l'équation de Schrödinger).

Néanmoins, certains attributs sont conservés en raison de déformations des champs. Les lois de conservation de ces attributs sont dites topologiques, parce que la topologie est cette branche des mathématiques qui s'intéresse aux caractéristiques des objets qui sont préservées quand les objets sont déformés : du point de vue topologique, une sphère percée d'un trou est analogue à un carré, parce que, si la sphère trouée est déformable, on peut pousser les bords du trou et l'aplatir. En revanche, les nœuds d'un ensemble de lignes de champ nommé soliton ne peuvent être dénoués lors de leurs déformations (le mascaret, cette vague qui remonte les fleuves, est un soliton) : c'est pour cette raison que les solitons ne se dissipent pas et qu'ils se comportent comme des particules. Les monopôles magnétiques, analogues à des pôles isolés de barreaux aimantés, seraient ainsi des solitons, parce qu'ils seraient associés à des configurations enchevêtrées dans certaines théories des champs (les physiciens ne les ont pas encore observés).

La physique considèrerait ainsi que les électrons et les quarks (qui portent les charges dites de Noether) étaient des particules fondamentales, et que les monopôles magnétiques (qui portent une charge topologique) étaient des particules dérivées. Néanmoins, en 1977, Claus Montonen, de l'Institut de physique d'Helsinki, et David Olive, de l'Université de Swansea, ont proposé l'idée inverse : existerait-il une formulation de la physique où les rôles des charges de Noether (comme la charge électrique) et des charges topologiques (comme la charge magnétique)



2. LA TRAJECTOIRE d'une particule dans l'espace-temps est une courbe nommée ligne d'univers. De même, une corde et une membrane décrivent respectivement une surface d'univers ou un volume d'univers.



3. UNE CORDE apparaît quand une membrane et une dimension de l'espace-temps deviennent simultanément plus compactes. Quand l'espace, représenté ici par une surface à deux dimensions, s'enroule en un cylindre, la membrane s'enroule autour de lui. Quand le diamètre du cylindre rétrécit, l'espace bidimensionnel finit par ressembler à une ligne, à une dimension. La membrane ressemble alors à une corde.

seraient échangés? Existe-t-il une description «duale», où les monopôles magnétiques représenteraient les objets élémentaires, tandis que les particules familières – quarks, électrons, etc. – apparaîtraient comme des solitons?

Une particule fondamentale de charge e , par exemple, serait équivalente à un soliton de charge $1/e$. Comme la charge d'une particule mesure l'intensité de ses interactions, un monopôle interagirait faiblement quand la particule originelle interagit fortement (c'est-à-dire quand la charge est grande), et *vice versa*.

La démonstration de cette conjecture faciliterait considérablement le travail des physiciens théoriciens. Dans la théorie des quarks, par exemple, les physiciens ne peuvent calculer les situations où les quarks interagissent fortement. En revanche, les monopôles interagiraient alors très peu, de sorte qu'on pourrait calculer les interactions de monopôles, avant d'en déduire, dans l'espace dual, les résultats sur les quarks. Malheureusement, on manquait de méthodes pour démontrer la conjecture.

Alors que les physiciens se décourageaient, on découvrit que les p -branes sont également analogues à des solitons. En 1990, Andrew Strominger, de l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, a trouvé qu'une corde à dix dimensions correspond à une 5-brane qui se comporte comme un soliton. Reprenant une de mes conjectures, A. Strominger a proposé qu'une corde interagissant beaucoup soit l'équivalent dual de 5-branes qui interagiraient peu.

Cette idée était intéressante, mais manquait de fondement : d'une part, la dualité entre électricité et magnétisme à quatre dimensions restait hypothétique, de sorte que la dualité entre cordes et 5-branes à dix dimensions était encore plus douteuse. Ensuite, comme on ignorait comment trouver les propriétés quantiques des 5-branes, on voyait mal comment prouver la nouvelle dualité.

Le premier obstacle fut levé lorsque Ashoke Sen, de l'Institut de recherches fondamentales Tata, à Bombay, établit que les théories supersymétriques prévoient l'existence de solitons qui portent à la fois une charge électrique et une charge magnétique, comme ceux que conjecturaient C. Montonen et D. Olive. Ce résultat convertit de nombreux sceptiques et suscita une avalanche d'articles scientifiques. Notamment, il poussa

4. LA DIMENSION SUPPLÉMENTAIRE refermée en un tube permet d'apercevoir la construction de l'espace-temps.



Nathan Seiberg, de l'Université Rutgers, et E. Witten à rechercher la dualité dans des versions plus réalistes (quoique toujours supersymétriques) des théories des quarks. Les deux physiciens ont obtenu, à propos des champs quantiques, des résultats inespérés.

La dualité des dualités

En 1990, plusieurs théoriciens ont généralisé l'idée de la dualité de C. Montonen et D. Olive aux supercordes à quatre dimensions, domaine où l'idée devient encore plus naturelle. Cette dualité, qui demeurerait spéculative, est la dualité S .

Entre-temps, les théoriciens des cordes s'étaient habitués à un tout autre genre de dualité : la dualité T , qui relie deux types de particules qui émergent lorsqu'une corde forme une boucle autour d'une dimension compacte. Les particules d'un premier type (les particules «vibrantes») sont analogues à celles qui avaient été prédites par T. Kaluza et O. Klein : elles résultent des vibrations de la corde refermée sur elle-même (voir l'encadré de la page 70), et elles sont plus énergiques si le cercle est petit. En outre, la corde peut s'enrouler plusieurs fois autour du cercle, comme un élastique autour d'un poignet ; son énergie croît à mesure qu'elle s'enroule et que le cercle s'agrandit. Chaque niveau d'énergie représente une nouvelle particule (il correspond à une particule d'«enroulement»).

La dualité T stipule que les particules d'«enroulement» pour un cercle de rayon R sont identiques aux particules «vibrantes» pour un cercle de rayon $1/R$, et *vice versa*. Pour un physicien, les deux ensembles de particules sont indiscernables : une dimension compacte, épaisse, donne apparem-

ment les mêmes particules qu'une dimension mince.

L'identification de cette dualité est importante. Pendant des décennies, les physiciens ont cherché à comprendre la nature aux échelles extrêmement petites, près de la longueur de Planck, égale à 10^{-33} centimètre. Ils ont toujours supposé que les lois de la nature, telles que nous les connaissons, ne s'appliquent pas aux distances inférieures. Cependant, selon la dualité T , l'Univers apparaît le même à ces échelles et aux grandes distances. On peut même imaginer que, si l'Univers rétrécissait jusqu'à ce que son rayon soit inférieur à la longueur de Planck, il se transformerait en un univers dual qui enflerait progressivement.

La dualité entre cordes et 5-branes demeurerait cependant conjecturale en raison des problèmes de quantification des 5-branes. Dès 1991, à l'Université du Texas, Jianxin Lu, Ruben Minasian, Ramzi Khuri et moi-même avons résolu le problème en l'évitant. Nous avons démontré que, si quatre des dix dimensions sont refermées en boucles et si la 5-brane s'enroule autour d'elles, cette dernière devient un objet unidimensionnel, une corde (de type soliton) dans un espace-temps à six dimensions. De surcroît, une corde fondamentale à dix dimensions reste fondamentale même à six dimensions. Ainsi le concept de dualité entre cordes et 5-branes a abouti à une autre conjecture : la dualité entre une corde de type soliton et une corde fondamentale.

Comme on sait quantifier les cordes, on peut tester les prévisions de cette dernière dualité. On peut démontrer, par exemple, que l'intensité des interactions de cordes de type soliton est inversement proportionnelle à l'intensité d'interaction des

cordes fondamentales, comme le prévoyait la conjecture.

Puis, en 1994, à Cambridge, Christopher Hull et P. Townsend proposèrent qu'une corde hétérotique qui interagirait faiblement soit la duale d'une corde de type IIA qui interagirait fortement, si elles ont toutes deux six dimensions : les différences entre les trop nombreuses théories des cordes s'estompent.

D'autre part, j'ai compris que la dualité corde-corde a une autre retombée inattendue : si nous réduisons l'espace-temps de six dimensions à quatre dimensions, en admettant que deux dimensions sont des boucles, la corde fondamentale et la corde de type soliton ont chacune un homologue par une dualité T . Or la duale T d'une corde de type soliton n'est rien d'autre que la duale S de la corde fondamentale, et *vice versa* ! Ce phénomène – où l'échange de charge dans une représentation est une inversion de longueurs dans la

représentation duale – est nommé dualité des dualités. La dualité S , jusqu'à spéculative, se retrouve sur un pied aussi ferme que la dualité T , bien établie. En outre, elle prédit que l'intensité d'interaction des objets – leur charge – dépend de la taille des dimensions invisibles. Ce qui est une charge dans un univers peut être une longueur dans un autre.

Au cours d'un exposé mémorable, à l'Université de Californie du Sud, en 1995, E. Witten a synthétisé tous les travaux sur la dualité T , la dualité S et la dualité corde-corde sous la bannière de la théorie M à onze dimensions. Au cours des mois suivants, des centaines d'articles ont été échangés sur le réseau Internet, confirmant que les membranes jouent certainement un rôle important dans la théorie M .

Même la théorie des cordes $E_8 \times E_8$, dont l'hélicité paraissait impossible à déduire en onze dimensions, trouve une origine dans la théorie M . À Prin-

ceton, E. Witten et Petr Horava ont montré comment compacter la dimension supplémentaire de la théorie M en un segment de droite. La théorie prévoit alors l'existence simultanée de deux univers à dix dimensions (chacun à une extrémité du segment) reliés par un espace-temps à onze dimensions. Les particules – et les cordes – n'existent que dans les univers des extrémités, qui ne communiquent que par l'intermédiaire de la gravitation (on peut imaginer que toute la matière visible de notre Univers se trouve sur un mur, alors que la « matière sombre, » supposée rendre compte de la masse invisible de l'Univers, se trouve dans un univers parallèle sur l'autre mur).

Comment tester expérimentalement la théorie M ? Les physiciens savent que l'intensité intrinsèque des diverses interactions dépend de l'énergie des particules qui transmettent ces interactions. Dans les théories supersymétriques, on trouve que les intensités des

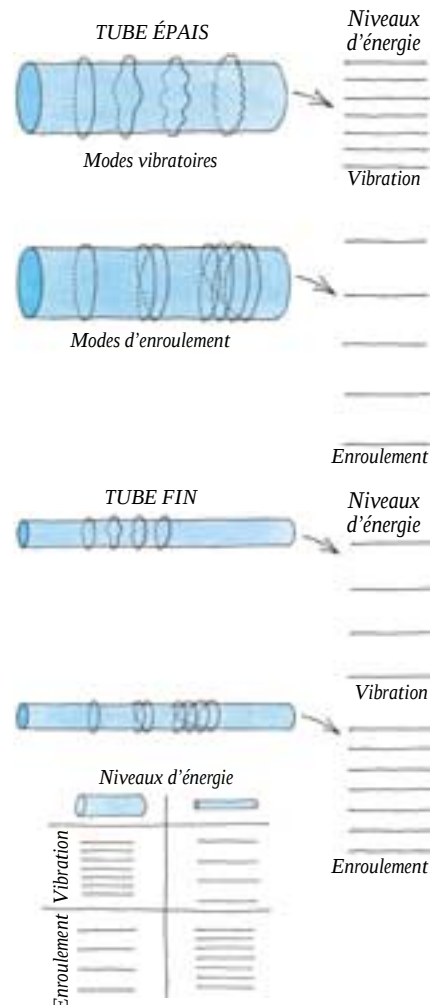
Dualité dans l'espace-temps

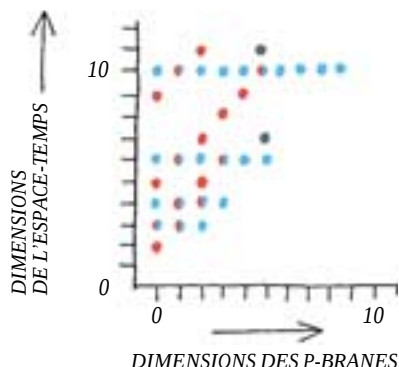
La dualité T relie la physique des grands espaces-temps à celle des petits espaces-temps. Imaginons un espace-temps enroulé sur lui-même comme un cylindre. L'énergie d'une corde enroulée autour du cylindre varie de deux façons. Tout d'abord, elle varie quand la corde ondule : ce sont les « modes vibratoires ». Quand le diamètre est notable, les longueurs d'ondes des ondulations sont grandes, et les énergies sont faibles : les énergies correspondant aux différents nombres d'onde autour du cylindre sont séparées par de petites quantités ; les niveaux d'énergie sont peu espacés.

La corde peut aussi s'enrouler autour du cylindre comme un élastique tendu. Si le cylindre est gros, la tension importante de la corde correspond à une énergie élevée. Les énergies des états correspondant à des nombres différents de boucles – ou modes « d'enroulement » – sont espacées.

Examinons maintenant les niveaux d'énergie dans l'hypothèse d'un cylindre fin. Les ondes qui l'enveloppent sont de courte longueur d'onde, et leur énergie est élevée : les états « vibratoires » sont largement espacés. Inversement les boucles correspondent à des états de faible énergie, et les modes « d'enroulement » sont peu espacés.

Un observateur extérieur ne perçoit pas les origines physiques différentes des états de vibration et d'enroulement. Les tubes fins et les tubes épais conduisent aux mêmes niveaux d'énergie, que les physiciens interprètent comme les particules. Donc, les plus petites échelles de l'espace-temps peuvent donner exactement la même physique que les grandes échelles de notre Univers.





5. LES MEMBRANES que l'espace-temps peut accueillir dépendent de la dimension de cet espace-temps. Les 0-branes, à zéro dimension, sont des particules ponctuelles ; les 1-branes, à une dimension, sont des cordes, et les membranes, ou 2-branes, à deux dimensions, sont des feuilles ou des bulles. Certaines *p*-branes, à *p* dimensions, sont dépourvues de spin (en rouge), mais les *p*-branes de Dirichlet ont un spin égal à 1 (en bleu).

interactions forte, faible et électromagnétique convergent, à une énergie E égale à 10^{16} gigaélectronvolts. En outre, ces intensités diffèrent alors peu du nombre sans dimension GE^2 , où G est la constante de gravitation. Cette quasi-égalité, qui n'est certainement pas fortuite, appelle une explication que les physiciens ont longtemps cherchée.

Dans l'espace-temps envisagé par P. Horava et par E. Witten, on peut choisir la taille de la onzième dimension de sorte que les quatre forces se rencontrent à cette énergie commune. Elle est bien inférieure à l'énergie de Planck de 10^{19} gigaélectronvolts, à laquelle on pensait précédemment que la gravité devenait forte (une énergie élevée correspond à une courte portée). Ainsi les effets de gravitation quantique apparaîtraient à des énergies inférieures à celles que les théoriciens prévoyaient ; cette découverte imposerait des modifications des théories cosmologiques.

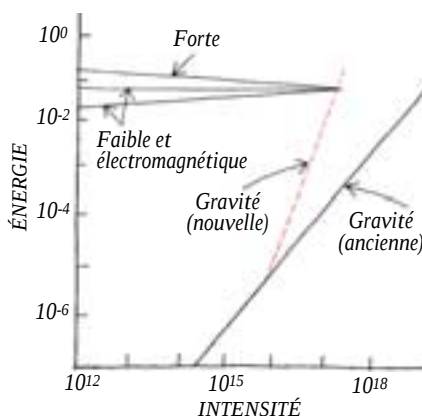
Récemment, à l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, Joseph Polchinski a montré que certaines *p*-branes ressemblent à une surface découverte au XX^e siècle par le mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune-Dirichlet. Dans certaines circonstances, ces *p*-branes peuvent être interprétées comme des trous noirs ou, plutôt, comme des membranes noires, des objets hors desquels rien ne sort, pas même la lumière.

Les cordes ouvertes, par exemple, seraient comme des cordes fermées dont certaines parties sont cachées par des membranes noires. Les progrès récents ont conduit à supposer que les trous

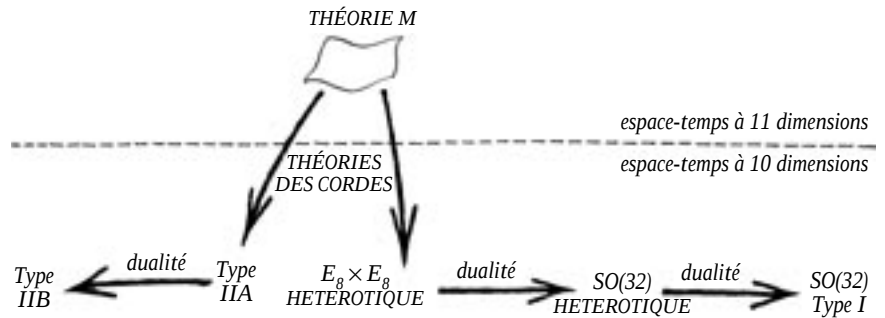
noirs sont des membranes noires qui se coupent, enveloppant sept dimensions compacifiées : les cosmologistes espèrent que la théorie *M* éclaircira les paradoxes des trous noirs soulevés par Stephen Hawking, de Cambridge.

En 1974, ce dernier avait calculé que les trous noirs ne sont pas totalement noirs : ils rayonneraient de l'énergie. Dans cette hypothèse, les trous noirs posséderaient une entropie non nulle (l'entropie mesure le désordre ; elle se définit à partir du nombre d'états quantiques disponibles). Pourtant l'origine microscopique de ces états quantiques restait un mystère. Grâce aux membranes de Dirichlet, A. Strominger et Cumrun Vafa, de Harvard, ont compté le nombre d'états quantiques dans les membranes noires : ils déterminent une entropie en très bon accord avec les prédictions de S. Hawking, corroborant la théorie *M*.

Les membranes noires seront-elles la clé d'un des plus grands problèmes de la théorie des cordes ? Comme il semble exister des milliards de façons de réduire le nombre de dimensions de dix à quatre, les comportements possibles du monde réel prévus par la théorie sont en nombre excessif, et ils ne peuvent pas être testés. Cependant la masse d'une membrane noire peut s'annuler quand le trou qu'elle enveloppe se contracte. Cette propriété modifie l'espace-temps, permettant à un espace-temps qui contient un certain nombre de trous internes (ressemblant à un morceau de gruyère) de



6. LES INTERACTIONS électromagnétiques, faibles et fortes convergent vers la même intensité quand l'énergie des particules qu'elles lient atteint 10^{16} gigaélectronvolts. Les physiciens pensaient naguère que la gravitation ne passait pas par le point de convergence, mais des calculs qui tiennent compte de la onzième dimension de la théorie *M* suggèrent que la gravité converge vers le même point.



7. LA THÉORIE M, qui décrit un espace-temps à onze dimensions, engendre cinq théories des cordes à dix dimensions. Quand les dimensions excédentaires se referment en cercle, la théorie *M* engendre les supercordes de type IIA, qui sont reliées aux cordes de type IIB par une opération nommée dualité. Cependant, si les dimensions excédentaires se contractent en un segment, la théorie *M* devient la théorie des cordes hétérotiques $E_8 \times E_8$, physiquement plausible. Cette dernière est reliée aux théories des cordes $SO(32)$ par des dualités.

se transformer en un autre avec un nombre différent de trous, violant les lois de la topologie classique.

Si tous les espaces-temps sont ainsi reliés, la recherche de l'espace-temps où nous vivons devient un problème abordable. Les cordes peuvent se placer dans l'espace-temps d'énergie minimale, par exemple. Leurs ondulations engendreraient alors les particules élémentaires et les interactions que nous connaissons, c'est-à-dire le monde réel.

De onze à dix

Malgré ces succès, les physiciens n'ont encore que des fragments de la théorie *M*. Récemment Thomas Banks et Stephen Shenker, de l'Université Rutgers, Willy Fischler, de l'Université du Texas, et Leonard Susskind, de l'Université de Stanford, ont proposé une définition rigoureuse de la théorie *M*. Leur théorie «matricielle» est fondée sur un nombre infini de 0-branes (c'est-à-dire de particules). Les coordonnées, ou positions, de ces particules, au lieu d'être des nombres ordinaires, sont des matrices (des tableaux de nombres) qui ne commutent pas : le produit XY de deux matrices X et Y n'est pas égal au produit YX . Dans cette représentation, l'espace-temps est un concept flou où les

coordonnées ne sont plus des nombres usuels, mais des matrices.

Les physiciens soupçonnent depuis longtemps que l'unification de la relativité (la géométrie de l'espace-temps) et de la physique quantique conduira à un espace-temps mal défini, au moins jusqu'à ce qu'une nouvelle définition soit découverte. L'approche matricielle a beaucoup intéressé les théoriciens, mais elle ne semble pas parfaitement adaptée. Au cours des prochaines années, nous espérons découvrir ce qu'est réellement la théorie *M*.

E. Witten s'amuse parfois à imaginer comment la physique se développerait sur une autre planète, où l'on aurait découvert la relativité générale, la mécanique quantique et la supersymétrie dans un ordre différent de celui que nous avons connu. De même, on peut imaginer comment, sur une planète plus logique que la nôtre, onze dimensions d'espace-temps ont constitué le point de départ pour l'élaboration d'une théorie des cordes à dix dimensions. Les historiens de demain auront peut-être le sentiment que les physiciens du XX^e siècle ont été comme des enfants sur une plage : ils ont joué avec les fragments de supercordes les plus lisses ou les plus beaux, tandis que l'immense océan de la théorie *M* s'étendait, inexploré, à leurs pieds.

Michael DUFF est professeur de physique à l'Université du Texas.

Michael DUFF et Christine SUTTON, *The Membrane at the End of the Universe*, in *New Scientist*, vol. 118, n° 1619, pp. 67-71, 30 juin 1988.

Paul TOWNSEND, *Unity from Duality*, in *Physics World*, vol. 8, n° 9, pp. 1-6, septembre 1995.

Madhusree MUKERJEE, *Explaining Everything*, in *Scientific American*, vol. 274, n° 1, pp. 72-74, janvier 1996.

Edward WITTEN, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward WITTEN, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.

