

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.

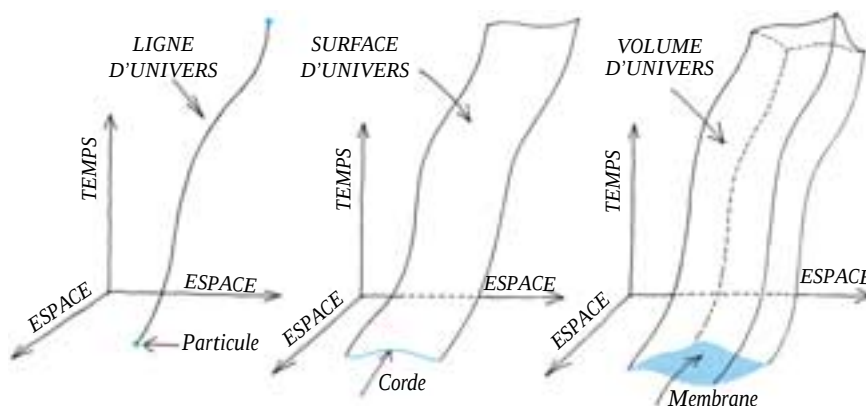
L'hypothèse de la supersymétrie limite les dimensions possibles d'une  $p$ -brane. Dans l'espace-temps à onze dimensions flotte une membrane, découverte mathématiquement par Eric Bergshoeff, de l'Université de Groningen, par Ergin Sezgin, de l'Université du Texas, et par Paul Townsend, de l'Université 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-

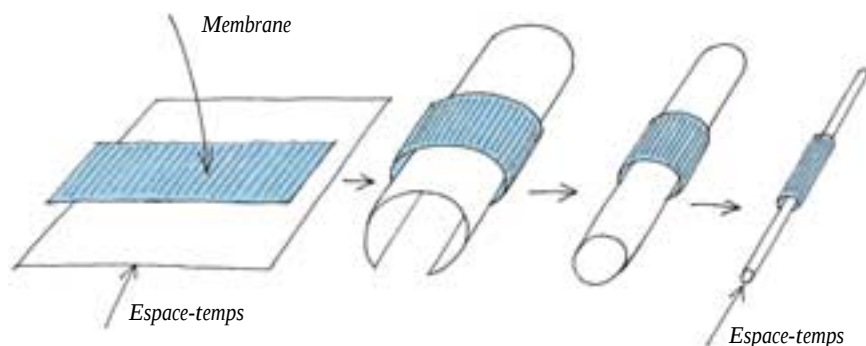
ressait ont changé l'état de la recherche. En 1917, la mathématicienne allemande Amalie Emmy Noether avait montré que la masse, la charge et d'autres caractéristiques des particules élémentaires sont généralement conservées en raison de l'existence de symétries. Par exemple, la conservation de l'énergie 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 énergétiques 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