



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.

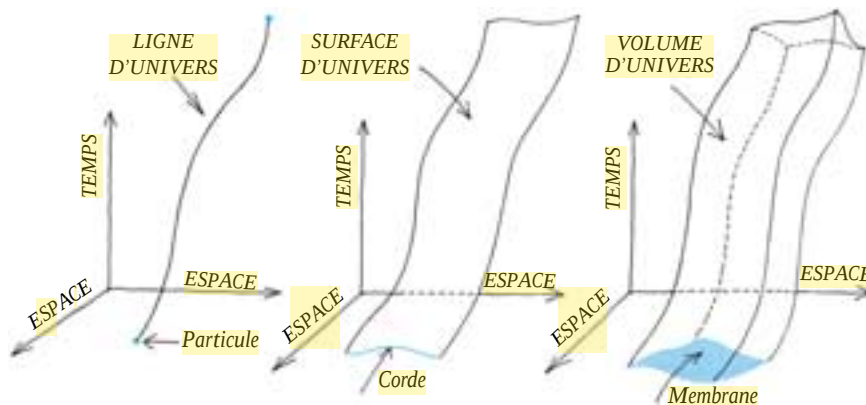
L'hypothèse de la supersymétrie limite les dimensions possibles d'une p -brane. Dans l'espace-temps à onze dimensions flotte une membrane, découverte mathématiquement par Eric Bergshoeff, de l'Université de Groningen, par Ergin Sezgin, de l'Université du Texas, et par Paul Townsend, de l'Université de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

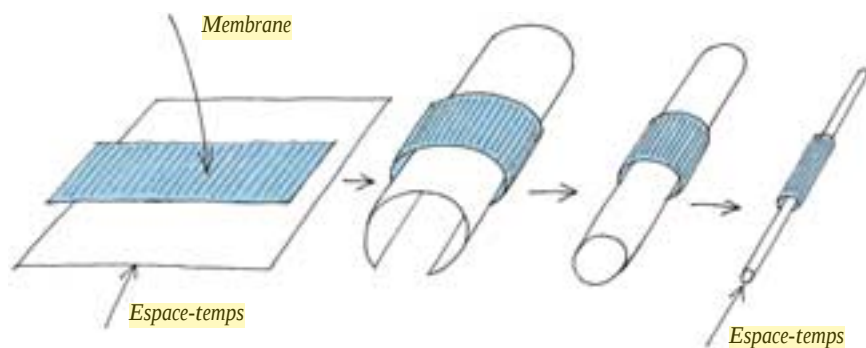
ressait ont changé l'état de la recherche. En 1917, la mathématicienne allemande Amalie Emmy Noether avait montré que la masse, la charge et d'autres caractéristiques des particules élémentaires sont généralement conservées en raison de l'existence de symétries. Par exemple, la conservation de l'énergie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