

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

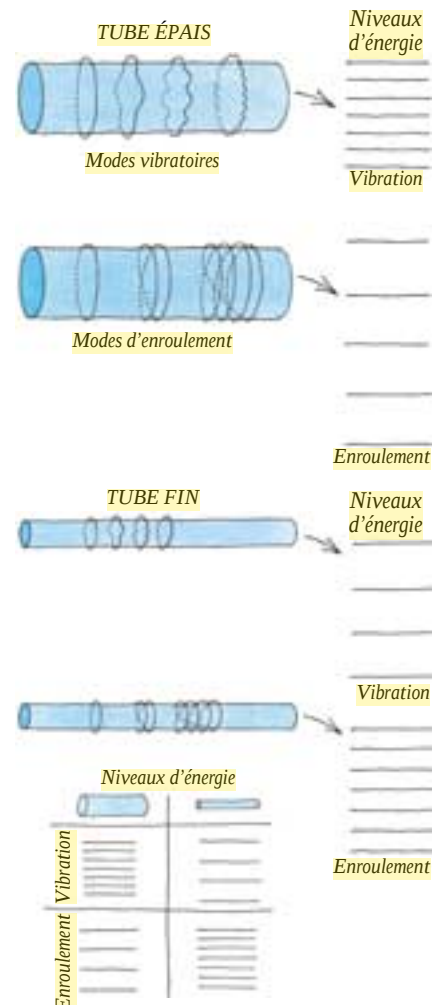
Dualité dans l'espace-temps

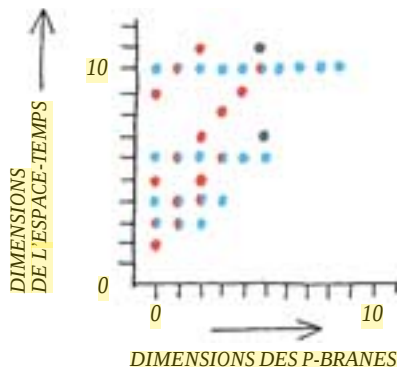
La dualité T relie la physique des grands espaces-temps à celle des petits espaces-temps. Imaginons un espace-temps enroulé sur lui-même comme un cylindre. L'énergie d'une corde enroulée autour du cylindre varie de deux façons. Tout d'abord, elle varie quand la corde ondule : ce sont les « modes vibratoires ». 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.

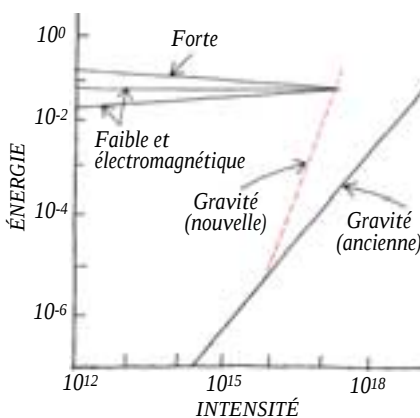
Récemment, à l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, Joseph Polchinski a montré que certaines *p*-branes ressemblent à une surface découverte au XX^e siècle par le mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune-Dirichlet. Dans certaines circonstances, ces *p*-branes peuvent être interprétées 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 compactifiées : 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.