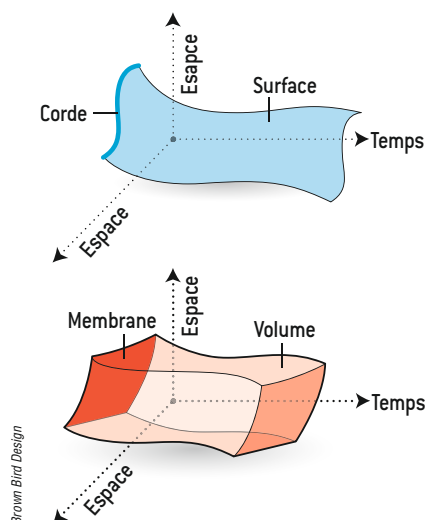


existe l'espace. Si cet univers est de dimension 1, 2, 4 ou 8, les particules de matière comme de force seraient des ondes décrites par un seul type de nombres, à savoir des nombres d'une certaine algèbre de division, où l'addition, la soustraction, la multiplication et la division sont possibles. En d'autres termes, dans ces dimensions, les vecteurs et les spineurs coïncident : les uns comme les autres sont simplement des nombres réels, des nombres complexes, des quaternions ou des octonions, respectivement. La supersymétrie émerge naturellement et fournit ainsi une description unifiée de la matière et des forces. Une simple multiplication décrit les interactions, et toutes les particules (quel que soit leur type) sont décrites à l'aide du même système de nombres.

Mais cet univers-jouet ne peut pas être réel, puisque nous devons prendre le temps en considération. Dans la théorie des cordes, cette considération a un effet très curieux. À tout instant, une corde est un objet unidimensionnel, comme une courbe ou une droite. Mais à mesure que le temps s'écoule, la corde trace une surface bidimensionnelle. On montre que cette évolution modifie les dimensions dans lesquelles la supersymétrie apparaît naturellement, en en ajoutant deux : une pour la corde, et une pour le temps. Au lieu de supersymétrie en dimension 1, 2, 4 ou 8, on obtient une supersymétrie en dimension 3, 4, 6 ou 10.

Or, comme par hasard, les théoriciens des cordes nous disent depuis des années que seules les versions à dix dimensions de la théorie sont cohérentes. Les autres sont entachées de défauts nommés anomalies : quand on calcule certaines grandeurs de deux façons distinctes, on obtient des résultats différents. Il n'y a qu'en dimension 10 que la théorie des cordes pourrait être valide. Mais la théorie des cordes à dix dimensions est, comme nous venons de le voir, la version de la théorie qui utilise les octonions. Si la théorie des cordes est vraie, les octonions ne sont donc plus une curiosité inutile ; ils pourraient apporter un éclairage nouveau sur le fait que la théorie des cordes n'est cohérente qu'en dimension 10. À dix dimensions, les particules de matière et de force sont représentées par le même type de nombres, à savoir les octonions.

Toutefois, ce n'est pas le dernier mot de l'histoire. Récemment, les physiciens se sont mis à aller au-delà des cordes et à considérer les membranes. Par exemple, une membrane à deux dimensions, ou



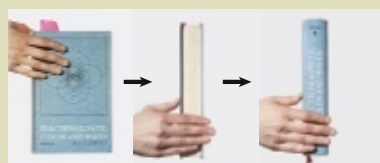
2. DANS LA THÉORIE DES CORDES, des cordes unidimensionnelles décrivent des surfaces bidimensionnelles au cours du temps. Dans la théorie M, des membranes bidimensionnelles décrivent des volumes tridimensionnels. L'ajout de ces dimensions aux huit dimensions des octonions fournit une piste pour expliquer pourquoi ces théories impliquent 10 ou 11 dimensions.

NON-COMMUTATIVITÉ

D'ordinaire, on peut multiplier les nombres dans n'importe quel ordre. Par exemple, 2×3 est égal à 3×2 . Ce n'est plus le cas dans les systèmes de dimensionnalité supérieure, tels ceux des quaternions et des octonions, qui sont non commutatifs. Les quaternions peuvent décrire les rotations en trois dimensions, qui sont aussi non commutatives : si on fait tourner successivement un objet tel qu'un livre autour d'axes différents, le résultat dépend de l'ordre des rotations. Sur la première ligne, on retourne d'abord le livre verticalement, puis on le fait tourner d'un quart de tour : la tranche apparaît. Sur la ligne du bas, on inverse les opérations, et c'est le dos qui apparaît.



Une rotation d'axe horizontal, suivie d'une rotation d'axe vertical.



Les deux rotations dans l'ordre inverse.

2-brane, ressemble à tout instant donné à une nappe. À mesure que le temps passe, elle décrit un volume tridimensionnel dans l'espace-temps.

Alors qu'en théorie des cordes, nous devons ajouter deux dimensions à la séquence classique 1, 2, 4 et 8, il nous faut maintenant en ajouter trois. Ainsi, quand nous avons affaire à des membranes, nous devrions nous attendre à ce que la supersymétrie émerge naturellement en dimensions 4, 5, 7 et 11. Et comme avec la théorie des cordes, une surprise nous attendait : les chercheurs affirment que la théorie M (où le « M » correspond entre autres à « membrane ») nécessite 11 dimensions, ce qui implique qu'elle fasse naturellement appel aux octonions. Hélas, personne ne comprend suffisamment bien la théorie M pour en écrire les équations fondamentales (le M signifie aussi bien « mystérieuse » !). Il est difficile de prédire la forme exacte qu'elle prendra.

Les octonions font-ils partie de la nature ?

À ce stade, insistons sur le fait que la théorie des cordes et la théorie M n'ont pas encore fait de prédictions que des expériences pourraient tester. Ce ne sont pour l'instant que de beaux rêves. Notre Univers ne nous semble pas avoir 10 ou 11 dimensions, et nous n'avons pas observé de symétrie entre particules de matière et particules d'interaction. David Gross, l'un des principaux spécialistes de la théorie des cordes, estime actuellement à 50 pour cent les chances de découvrir des preuves de supersymétrie au LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN. Les sceptiques pensent qu'elles sont beaucoup plus faibles que cela. L'avenir nous le dira.

Étant donné cette incertitude, nous sommes encore loin de savoir si les octonions ont une importance fondamentale pour la compréhension du monde qui nous entoure, ou s'ils ne sont que de la belle mathématique. Bien sûr, la beauté mathématique en soi est un objectif noble, mais cela serait encore plus merveilleux s'il s'avérait que les octonions font partie intégrante de la nature. Comme le prouvent l'histoire des nombres complexes et beaucoup d'autres développements mathématiques, cela ne serait pas la première fois que des inventions purement mathématiques apportent aux physiciens les outils dont ils auront ultérieurement besoin. ■

HISTOIRE DES SCIENCES

Du Trésor américain au projet Manhattan

En 1943, le Département américain de la Guerre a emprunté 13 000 tonnes d'argent au gouvernement pour mettre au point la première bombe atomique.

Cameron REED

Le projet Manhattan – nom de code du projet américain de construction d'une bombe atomique pendant la Seconde Guerre mondiale – présente tous les ingrédients d'une superproduction cinématographique : des personnalités hors du commun, plus de 100 000 seconds rôles, une science d'avant-garde, de l'espionnage et des intrigues diplomatiques, le tout sur fond d'un conflit mondial et de la grave menace que l'Allemagne nazie soit la première à produire l'arme la plus puissante au monde. Des milliards de dollars ont été investis dans la construction d'énormes installations secrètes visant à produire des matériaux pour une arme dévastatrice dont rien ne garantissait qu'elle fonctionnerait.

Comme tout scénario bien ficelé, le projet Manhattan comprend aussi des intrigues secondaires, qui ont suscité moins d'analyses historiques que les principales implications scientifiques, techniques, éthiques et géopolitiques du développement des armes nucléaires. C'est le cas du programme *Silver*. Ce dernier, qui nécessita d'emprunter 13 000 tonnes d'argent au Trésor américain dans le plus grand secret, a pourtant joué un rôle essentiel dans la course à la production des dizaines de kilogrammes d'uranium enrichi nécessaires à la fabrication de l'arme de destruction massive.

En 1942, le projet secret du gouvernement américain de construire « la bombe » est transmis au Département de la Guerre. Le principal problème du nouveau quartier militaire dédié à ce projet, le MED (*Manhattan Engineer District*), est de trouver les moyens de produire suffisamment d'ura-

nium enrichi en uranium 235 – l'isotope fissile de l'uranium – pour réaliser une bombe atomique. Début 1942, seules des quantités de l'ordre du milligramme d'uranium 235 ont été isolées, et l'on ignore si les méthodes de laboratoire utilisées pourront être transposées à l'échelle industrielle.

L'une d'elles, la spectrométrie de masse, semble particulièrement prometteuse : elle consiste à séparer les deux isotopes (uranium 235 et 238) contenus dans l'uranium naturel en fonction de leur masse grâce à un champ électromagnétique. Toutefois, James Marshall et Kenneth Nichols, les deux ingénieurs militaires à la tête du projet, s'aperçoivent vite que la production du champ électromagnétique nécessitera un grand nombre d'aimants, et donc des quantités considérables de cuivre pour construire leurs bobinages. Or le cuivre, utilisé dans les douilles d'obus, est une matière première prioritaire pendant la guerre. Les deux hommes ont alors l'idée d'utiliser l'argent comme substitut. Le Congrès a autorisé l'utilisation de 78 000 tonnes d'argent du ministère des Finances à des fins militaires ; en outre, en employer une partie pour la bombe éviterait de détourner de grandes quantités de cuivre – deux énormes atouts pour préserver le secret autour du projet.

Nichols rencontre le sous-secrétaire d'État aux finances le 3 août 1942, pour se renseigner sur la possibilité d'emprunter 5 000 tonnes d'argent aux caves du Trésor. Le projet est lancé. Une des premières démarches du colonel Leslie Groves, nommé directeur militaire du MED en septembre 1942, est d'acquérir un vaste terrain isolé dans l'Est du Tennessee qui répond aux critères pour y

implanter des installations d'enrichissement. L'armée expulse un millier de familles pour prendre possession d'une zone de près de 250 kilomètres carrés, à une trentaine de kilomètres de Knoxville, pour y établir le site, nommé Clinton Engineer Works, puis Oak Ridge après la guerre. C'est là que doit être construite l'usine de séparation électromagnétique des isotopes. Son nom de code : Y-12. L'entreprise est colossale : la construction de Y-12 nécessite 67 millions d'heures de travail, effectuées par près de 20 000 employés. Le complexe compte plus de 200 bâtiments et emploie 5 000 personnes pour l'exploitation et la maintenance. La plupart n'auront aucune idée du projet auquel ils contribuent jusqu'à l'annonce par le président Truman qu'une bombe a été larguée sur Hiroshima.

Des cyclotrons et des calutrons

Le besoin d'une telle quantité d'argent à Y-12 est une conséquence de la physique qui soutient la spectrométrie de masse. En optique, la spectrométrie consiste à séparer les différentes longueurs d'onde qui constituent la lumière à l'aide d'un prisme. De même, la spectrométrie de masse sépare les atomes ou molécules ionisés en fonction de leur masse, et c'est un champ magnétique qui joue le rôle de prisme. Les spectromètres de masse utilisés à Oak Ridge – les calutrons – sont dérivés du cyclotron, inventé en 1931 par le physicien américain Ernest Lawrence et pour lequel il reçut le prix Nobel.

Le dispositif original de Lawrence n'avait aucun rapport avec l'enrichissement de l'uranium. Il l'avait inventé en réponse à une crise



© Underwood & Underwood/Corbis

1. LES LINGOTS D'ARGENT du Trésor américain, ici transportés de New York au dépôt de métaux précieux de West Point, dans l'État de New York, vers 1937. En 1942, le Congrès américain autorisa l'utilisation de

78 000 tonnes d'argent à des fins militaires. La même année, le Département de la Guerre commença à retirer en secret des tonnes d'argent du dépôt pour le projet Manhattan, à l'origine de la première bombe atomique.

qui touchait la recherche en physique nucléaire. Pour étudier les noyaux atomiques, on bombardait des atomes cibles avec des projectiles adéquats – des particules alpha [noyaux d'hélium] –, afin de déclencher des réactions. Toutefois, dans les années 1920, les particules alpha, obtenues par désintégration radioactive naturelle de certains éléments chimiques, étaient de basse énergie et, par conséquent, repoussées par les protons des noyaux cibles, même de masse moyenne. Aussi les expérimentateurs étaient-ils limités à des éléments cibles légers tels que l'aluminium et le magnésium. Pour étudier des noyaux plus lourds, il leur fallait un moyen d'accélérer leurs projectiles.

Le cyclotron de Lawrence avait apporté une telle solution : ce type d'accélérateur circulaire utilise un champ magnétique intense et un champ électrique alternatif. Injecté en son centre, un faisceau de particules char-

gées est courbé par le champ magnétique et suit une trajectoire circulaire qui traverse périodiquement le champ électrique. Chaque passage dans le champ électrique augmente la vitesse – et donc l'énergie – des particules, et accroît le rayon de leur trajectoire dans le champ magnétique. Les particules suivent ainsi des trajectoires en spirale jusqu'à ce qu'elles heurtent les parois externes de l'enceinte, recouvertes des atomes cibles. Le premier cyclotron de Lawrence mesurait environ 13 centimètres de diamètre. La version de 1939, de 1,5 mètre de diamètre, nécessitait, pour la création du champ magnétique, un aimant de 200 tonnes.

Le calutron de Lawrence est construit selon le même principe, mais sans champ électrique alternatif : des molécules ionisées de tétrachlorure d'uranium, préalablement accélérées par un champ électrique, sont libérées dans une enceinte circulaire où un champ

magnétique intense courbe leur trajectoire sans modifier leur vitesse. Leur trajectoire est ainsi circulaire et son rayon dépend de divers paramètres : l'intensité du champ magnétique, le degré d'ionisation des particules, leur vitesse initiale et, surtout, leur masse. Le rayon de l'orbite d'un ion est d'autant plus grand que sa masse est élevée. Ainsi, à partir d'uranium naturel, le calutron sépare les ions de l'isotope fissile de masse atomique 235, l'uranium 235, un isotope rare qui ne représente que 0,7 pour cent de l'uranium naturel, et ceux de l'isotope courant, non fissile, de masse atomique 238. L'écart entre les deux faisceaux est maximal après une demi-orbite seulement, c'est donc là que les isotopes sont recueillis (voir la figure 3). Ensuite, l'uranium 235 est séparé chimiquement des molécules de tétrachlorure.

Si la méthode est simple sur le papier, sa mise en pratique à Oak Ridge l'est beaucoup