

pliqués, ou tenter de deviner en presque aveugles ces secrets qui, pour la nature elle-même, vont de soi. »

Ce compagnonnage se prolonge dans les réalisations expérimentales qui confirment la réalité des surprises que l'esprit a quelques difficultés à entrevoir.

La visite de la Sainte Chapelle

« Ces surprises jubilatoires face à l'univers quantique se retrouvent lors de l'enseignement de cette discipline. La marche d'approche n'est certes pas des plus aisées : si l'apprentissage d'une théorie physique peut se comparer à la découverte d'un monument, celui de la mécanique quantique ressemble davantage à la visite de la Sainte Chapelle qu'à celle du château de Versailles. On ne découvre ses richesses qu'après avoir traversé des cours étroites et des salles basses. Mais une fois sur place, les élèves se piquent au jeu et rivalisent d'inventivité pour trouver de nouveaux tours, tentant de déterminer furtivement si la particule est à droite ou à gauche, voire de téléporter leurs camarades » remarque Jean Dalibard.

La physique expérimentale a ses réalités. Juliette Simonet a illustré cette tâche par le maniement de l'outil : « Aujourd'hui je suis en dernière année de thèse et je manie beaucoup la clé de 13 (par exemple pour changer une pompe).... L'expérimentation a un impact important sur la théorie, non seulement pour la vérifier, mais aussi pour simuler au laboratoire des problèmes non solubles numériquement. »

Pour quoi faire ?

La physique fondamentale crée ses propres instruments d'action. Écoutez Christian Bordé : « La mécanique quantique reste encore bien mystérieuse, mais elle envahit peu à peu notre échelle humaine grâce à cette métrologie quantique en plein développement. À un bout de la chaîne ces recherches sont enracinées dans l'héritage de De Broglie et d'Einstein. À l'autre, elles conduisent à de nouveaux outils pour l'exploration du monde et pas seulement sur terre car, à en juger par la multiplication des projets de missions spatiales qui les proposent, leur avenir est aussi dans l'espace. »

L'IFFRAF est un réseau de 33 équipes de recherche toutes associées au CNRS et réparties sur différents établissements : l'École normale supérieure, l'Observatoire de Paris, l'Institut d'Optique et les universités UPMC, Paris-Sud 11 et Paris-Nord 13. L'IFFRAF a également associé 8 équipes situées dans d'autres établissements. Son siège est à l'École normale supérieure, 45 rue d'Ulm, 75 231, Paris, Cedex 05.

Contact : leduc@lkb.ens.fr.

Les recherches à l'IFFRAF regroupent trois axes scientifiques :

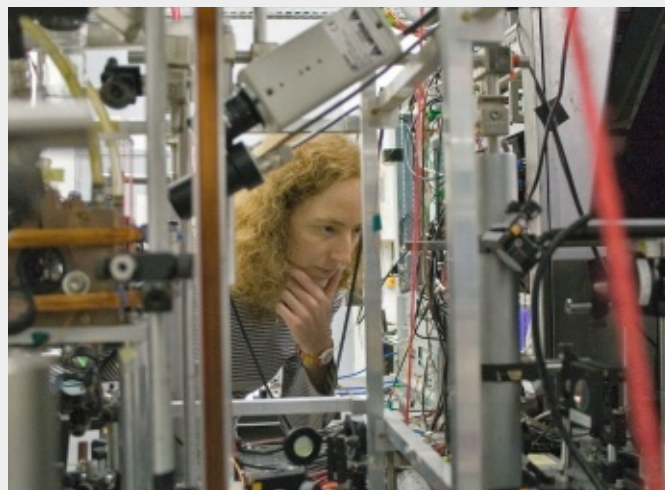
- Les gaz quantiques et les comportements collectifs dans les condensats de Bose-Einstein. Les atomes froids, bosons ou fermions, placés dans des potentiels optiques périodiques forment des systèmes modèles pour mieux comprendre la matière condensée. Ces études s'étendent aux molécules froides.
- La métrologie de précision. L'utilisation des atomes froids fait gagner plusieurs ordres de grandeur sur la précision des horloges, des gyroscopes, des gravimètres et des capteurs inertiels pour le positionnement et la navigation. La miniaturisation sur des puces à atomes est en cours.
- L'information quantique. Les atomes froids isolés et piégés en petit nombre permettent d'envisager de nouveaux dispositifs fondés sur l'intrication entre particules (atome/atome ou atome /photon) destinés au stockage de l'information ou à la cryptographie quantique.

Dans les horloges atomiques « chefs-d'œuvre quantiques », le temps est mesuré comme l'inverse d'une fréquence, laquelle est elle-même liée à l'énergie de transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome. Ces horloges, toujours perfectionnées, sont les plus précises du monde (une seconde sur 100 millions d'années) et servent à la définition de la seconde. Pour Noël Dimarcq « Le spectre d'applications des horloges atomiques est extrêmement large. La synchronisation d'horloges est essentielle aux réseaux de télécommunications, aux observations astronomiques par les systèmes d'interférométrie à longue base ou à la navigation des sondes dans le Système solaire.

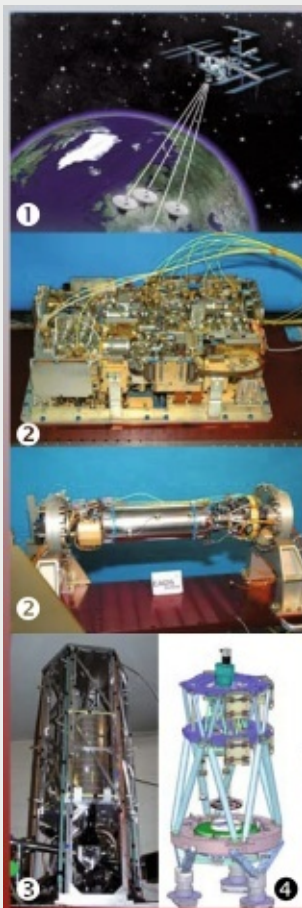
Cette amélioration des mesures viendra peut-être un jour contrarier des précisions supposées infaillibles. Tout physicien rêve de vivre une telle révolution associant l'amertume de la théorie abandonnée à l'excitation des domaines à découvrir. »



Yvan Castin, Michèle Leduc, David Guéry-Odelin, Claude Cohen-Tannoudji



Hélène Perrin s'interrogeant sur la marche de l'expérience



Les atomes froids mesurent l'espace-temps

Une application phare des recherches de l'IFRAF est le développement de concepts innovants de « capteurs d'espace-temps ». Dans ces instruments de très haute précision, l'aspect ondulatoire des atomes froids est exploité pour réaliser des interférences dont le résultat dépend d'une fréquence, d'une vitesse de rotation, d'une accélération, du champ de pesanteur.

Le laboratoire SYRTE (*) pilote de nombreux projets en partenariat avec d'autres équipes de l'IFRAF, les grandes agences spatiales et de défense, le monde industriel. Les domaines d'application sont très variés : métrologie fondamentale, test des lois fondamentales de la physique au sol et dans l'espace, échelles de temps atomique, navigation, positionnement, synchronisation, géophysique, etc.

(*) Le SYRTE - Systèmes de Référence Temps-Espace est une unité mixte de recherche du CNRS, de l'Observatoire de Paris, de l'Université Pierre et Marie Curie et du LNE - Laboratoire National de Métrologie et d'Essais.

① Comparaison d'horloges sol avec la mission spatiale ACES ; ② Horloge spatiale PHARAO ; ③ Fontaine atomique ; ④ Gravimètre atomique ; ⑤ Horloge à réseau optique d'atomes de strontium ; ⑥ Gyromètre à atomes froids ; ⑦ Horloge compacte à atomes froids pour GALILEO ; ⑧ Horloge optique à atomes de mercure



Votre solution laser à solide

Quantel, acteur majeur dans le secteur des lasers à solide, développe depuis 40 ans un savoir-faire unique pour concevoir, fabriquer et commercialiser dans le monde entier des produits innovants.

www.quantel-laser.com

UN SOUTIEN INDUSTRIEL À LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

Quantel, membre du directoire de l'IFRAF depuis la création de l'Institut, participe à la vie de la communauté scientifique en apportant sa vision industrielle au sein de la Société Française d'Optique, d'OpticsValley ou d'autres organismes.

UNE COLLABORATION ÉTROITE AVEC L'IFRAF

Quantel collabore dans le domaine des lasers à fibre pour le pompage d'atomes froids avec plusieurs laboratoires de l'IFRAF dont l'Institut d'Optique (IOGS).

Conception : Poussettes d'Études 01/11
Crédit photo : Agence Photonics - Grande Bretagne



LA QUÊTE D'UNE THÉORIE unifiée des interactions

Monsieur Unification Entretien avec Steven Weinberg, page 62 • **L'insaisissable théorie unifiée** par Stephen Hawking et Leonard Mlodinow, page 65 • **Une théorie géométrique du Tout** par Garrett Lisi et James Weatherall, page 68

Pour décrire et comprendre les phénomènes de la nature, les physiciens ont toujours recherché des lois générales et reposant sur le plus petit nombre de principes possible. Cette démarche est particulièrement flagrante en physique des particules, où la quête d'une théorie unificatrice est entamée depuis les années 1930 au moins.

Quatre interactions fondamentales ont été identifiées dans la nature : la gravitation, la force électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte, ces deux dernières n'agissant qu'à l'échelle des noyaux atomiques et en deçà. La théorie classique de l'électromagnétisme, œuvre de James Clerk Maxwell vers 1865, est elle-même une théorie (classique) qui unifie l'électricité et le magnétisme. Mais l'étape suivante dans l'unification des interactions fondamentales n'a été franchie qu'autour des années 1970, avec la théorie électrofaible, une œuvre collective de longue haleine pour laquelle trois de ses principaux protagonistes, Steven Weinberg, Abdus Salam et Sheldon Glashow ont été récompensés par le prix Nobel en 1979.

La théorie électrofaible réunit l'interaction électromagnétique et l'interaction faible en un seul édifice, une théorie quantique des champs fondée sur d'élégants principes de symétrie. Sa confirmation expérimentale la plus spectaculaire a été la découverte au CERN, en 1982 et 1983, des bosons W et Z prédits par la théorie. Une autre particule clef de la théorie électrofaible est le boson de Higgs, inobservé à ce jour, mais que l'on espère bien détecter prochainement grâce au collisionneur LHC du CERN, entré en fonction il y a huit mois.

Dans les années 1970 également, une théorie cohérente de l'interaction forte, fondée sur les mêmes principes de symétrie que la théorie électrofaible, a vu le jour, sous le nom de chromodynamique quantique. La juxtaposition de la théorie électrofaible et de la chromodynamique quan-

tique constitue le « modèle standard » de la physique des particules.

Ce modèle est une théorie quantique qui n'intègre pas la quatrième interaction fondamentale, la gravitation, décrite par la relativité générale d'Einstein – une théorie non quantique. Les physiciens en quête d'unification sont ainsi confrontés à plusieurs défis apparentés : construire une théorie quantique de la gravitation, réunir la gravitation avec les trois autres interactions, aller au-delà du modèle standard pour éliminer les parts d'ombre et d'arbitraire qu'il contient.

Malgré des décennies de recherche, le chantier de l'unification reste inachevé. Le dossier que nous publions présente trois regards différents sur la question. Steven Weinberg nous rappelle dans un entretien les enjeux, les difficultés et les pistes existantes, selon lui.

Dans le deuxième article, Stephen Hawking et Leonard Mlodinow attirent notre attention, au travers de l'état actuel de la « théorie des cordes », sur le fait que la théorie unifiée tant recherchée est peut-être une utopie : plusieurs édifices complémentaires et en partie distincts pourraient être nécessaires.

Enfin, dans le troisième article, Garrett Lisi et James Weatherall présentent – en utilisant le langage des « fibrés » plutôt que le langage habituel de la théorie des groupes de symétrie – une voie de recherche qui s'appuie sur les mêmes principes géométriques que la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique. G. Lisi, physicien extérieur au milieu scientifique professionnel, a été très médiatisé en 2007 en publiant sur Internet une ébauche de théorie unificatrice fondée sur un groupe noté E_8 . Ses travaux laissent toujours sceptiques la plupart des spécialistes. Mais même si ces idées se révèlent un jour non pertinentes, son article a le mérite de bien retracer la série de tentatives qui ont été faites pour étendre le modèle standard.

Monsieur Unification

La construction d'une théorie unifiant les interactions fondamentales de la physique est un chantier ouvert depuis des décennies. Steven Weinberg est l'un de ses principaux protagonistes.

Entretien avec Steven Weinberg

→ **Le collisionneur LHC, au CERN, suscite beaucoup d'espoirs. Certains ont comparé les résultats attendus avec les révolutions quantique et relativiste du premier tiers du XX^e siècle. Qu'en pensez-vous ?**

→ **Steven Weinberg**

On peut imaginer que ces résultats vont conduire à une révolution de notre pensée en physique comparable à celle du début du XX^e siècle, mais ce n'est pas une certitude. Pour qu'une telle révolution se produise, il faut qu'arrive quelque chose de complètement imprévu... que je ne peux donc pas prévoir !

À court terme, nous essayons d'avancer au-delà du modèle standard, et aussi d'imaginer ce qui s'est passé aux débuts de l'Univers. Cela prendra du temps. Nous espérons ensuite pouvoir tout relier, et disposer enfin d'une théorie rendant compte de toutes les particules et de toutes leurs interactions. Nous ignorons à quoi elle ressemblera.

Quand nous aurons une compréhension vraiment complète de la nature au niveau le plus fondamental, elle diffusera dans la société. Elle sera probablement très mathématique, et le grand public mettra longtemps à comprendre, comme il a fallu longtemps avant que les scientifiques eux-mêmes comprennent la théorie de Newton. Mais cette dernière a finalement eu une profonde influence sur la façon dont les gens en général conçoivent le monde et la vie humaine. Elle a eu des répercussions sur l'économie, la biologie, la politique et la religion. Une situation semblable pourrait se produire si

nous parvenons à une théorie vraiment complète de la nature.

Notre représentation de la nature se fait de plus en plus globale, et des énigmes d'autrefois, comme la nature des forces qui assurent la cohésion des particules au sein d'un atome, ont été parfaitement comprises – pour être aussitôt remplacées par de nouvelles énigmes, telle l'origine des propriétés des particules élémentaires, particules du modèle standard. Et le processus par lequel on explique des énigmes tout en en suscitant de nouvelles se poursuivra longtemps. Ce n'est qu'une supposition, mais je pense que nous parviendrons à un point où il n'y aura plus le même genre d'énigmes. Et ce sera alors un remarquable tournant dans l'histoire de la pensée.

→ **La découverte du boson de Higgs est le premier grand objectif poursuivi au LHC, à supposer que les physiciens du Tevatron, au Fermilab, ne le trouvent pas en premier. Dans quelle mesure l'unification électrofaible et le modèle standard dépendent-ils du boson de Higgs ?**

→ **Steven Weinberg**

Le modèle standard repose complètement sur l'existence d'une brisure de la symétrie électrofaible. Mais si vous vous demandez pourquoi la symétrie est brisée, le doute est permis. Le mécanisme de brisure de symétrie mis en œuvre dans le modèle de Weinberg-Salam (le secteur électrofaible du modèle standard) requiert l'existence d'une nouvelle particule, qui a pris le nom de boson de Higgs. Ce modèle simple a conduit à la pré-

diction du rapport des masses des bosons faibles, prédiction qui semble très bonne.

Pour autant, une autre possibilité existe : que la symétrie soit brisée par des interactions fortes d'un type nouveau, de façon qu'il n'y ait pas de boson de Higgs. Ces nouvelles interactions devraient être bien plus fortes que l'interaction forte ordinaire. Lenny Susskind et moi avons, indépendamment, mis au point une théorie sur ce principe que nous avons d'un commun accord nommée Technicouleur. Elle prédit bien elle aussi les masses des bosons faibles, mais peine à expliquer les masses des quarks. Certains théoriciens continuent de travailler sur la Technicouleur. Si cette théorie est pertinente, le LHC devrait la mettre en évidence, ainsi que tout un ensemble de particules nouvelles.

Ainsi, même si le LHC ne trouve pas le boson de Higgs, il se peut que ce collisionneur trouve autre chose d'équivalent, par exemple des indices de la validité de la Technicouleur. De fait, on montre que sans particules nouvelles, on a des incohérences mathématiques.

→ **Un autre principe que les physiciens espèrent confirmer au LHC est la supersymétrie, l'idée selon laquelle les particules médiatrices des interactions, tels les bosons faibles, et les particules de matière, telles que les électrons et les quarks, sont intimement reliées. Certains physiciens ont autant confiance dans la supersymétrie qu'Einstein en avait dans la relativité : elle est si convaincante qu'elle ne peut qu'être vraie. Est-ce aussi ce que vous ressentez ?**

→ Steven Weinberg

Non. La relativité restreinte s'inscrivait dans tout ce qui était déjà connu théoriquement et expérimentalement à la fin du XIX^e siècle, à savoir la théorie électromagnétique de Maxwell, et le fait que personne ne parvenait à découvrir les effets de l'« éther » dont on supposait qu'il remplissait tout l'espace. Si j'avais eu la chance d'inventer la relativité restreinte en 1905, j'aurais ressenti comme Einstein que cette théorie ne pouvait qu'être juste.

Je ne ressens pas les choses de la même façon à propos de la supersymétrie. Cette théorie a quelques succès mineurs à son actif : elle améliore la prédiction d'un paramètre crucial du modèle standard ; elle fournit un candidat naturel pour les particules de matière noire ; elle a aussi la très séduisante propriété d'être la seule symétrie susceptible d'unifier des particules comme les bosons faibles avec des particules comme les électrons. Mais rien de cela n'est assez impressionnant pour me convaincre que la supersymétrie est nécessairement juste.

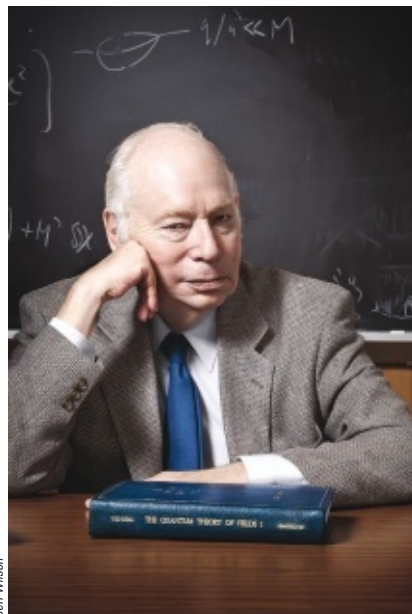
→ Vous avez avancé que le principe anthropique – l'idée que certains aspects de notre Univers n'ont pas d'explication plus profonde que le fait que nous vivons dans une partie particulièrement habitable d'un domaine plus vaste – est notre meilleure explication de la densité d'énergie sombre, cette mystérieuse substance responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Pouvez-vous nous en parler ?

→ Steven Weinberg

Nous spéculons beaucoup sur ce que nous considérons comme fondamental, par exemple la masse des particules, les différentes interactions, les trois dimensions d'espace flanquées d'une dimension de temps, mais il se pourrait que tout cela ne soit pas fondamental, mais lié à notre environnement. L'Univers pourrait être beaucoup plus grand que nous ne l'avons imaginé, et englober beaucoup plus que le Big Bang observé autour de nous. Il pourrait comprendre différentes parties – par « parties », je désigne diverses choses pos-

sibles – dotées de propriétés très différentes et où ce que nous nommons les principes fondamentaux de la nature pourraient être différents, et où même les dimensions d'espace et de temps seraient différentes. Il devrait y avoir un grand principe sous-jacent qui décrit l'ensemble, mais il se pourrait que soyons bien plus loin de le découvrir que nous ne l'imaginons aujourd'hui.

Quand j'ai commencé à écrire sur ce sujet en 1987, j'avais l'esprit complètement



Steven WEINBERG, prix Nobel de physique en 1979 pour sa contribution à la théorie électrofaible, est physicien théoricien à l'Université du Texas à Austin (États-Unis).

Ses propos ont été recueillis par Amir ACZEL, chercheur à l'Université de Boston et écrivain.

ouvert – et c'est toujours le cas aujourd'hui – quant aux diverses façons dont on pourrait concevoir ces parties de l'Univers, avec des propriétés telles que des densités d'énergie sombre différentes. Une des pistes est l'inflation chaotique d'Andrei Linde, qui suppose de nombreux Big Bang se produisant épisodiquement ici ou là, chacun étant caractérisé par des valeurs différentes des paramètres tels que la densité d'énergie sombre.

Comme Stephen Hawking le décrit (voir l'article de S. Hawking et L. Mlodinow dans

ce numéro), l'Univers pourrait être une superposition quantique de plusieurs états, comparables au célèbre chat de Schrödinger (un chat à la fois vivant et mort imaginé par Erwin Schrödinger pour exprimer la notion de superposition quantique d'états). Ainsi, comme il est possible en théorie quantique qu'un chat se trouve dans deux états à la fois, l'un où il est vivant, l'autre où il est mort, il en va peut-être de même pour l'Univers. Dans l'état où le chat est vivant, le chat sait qu'il est vivant, et dans l'autre état il ne sait rien du tout. De même, il y aurait des états de l'Univers comportant des chercheurs explorant ce qui leur semble être l'Univers entier, et d'autres états où peut-être l'Univers est trop petit ou évolue trop vite, et où il n'y a personne pour l'explorer.

Les arguments anthropiques prédisent que la densité de l'énergie sombre doit être assez faible pour que puissent se former des galaxies, mais pas trop, parce que les univers où elle est nettement plus petite sont rares. Un calcul que j'ai effectué en 1998 avec deux astrophysiciens de l'Université du Texas à Austin, Hugo Martel et Paul Shapiro, suggérait que toute énergie sombre devrait être en quantité assez importante pour qu'on la découvre bientôt. Et peu de temps après, les astronomes découvraient son existence.

→ Vous faites le lien entre deux communautés différentes de physiciens : ceux qui font de la cosmologie et de la relativité générale, et ceux qui font de la physique des particules et de la théorie quantique. Cette double expertise vous aide-t-elle à voir comment unifier ces deux domaines ?

→ Steven Weinberg

Pour le moment, je ne vois aucune direction d'unification. J'aurais certainement aimé en voir. J'ai des idées sur les voies possibles vers l'unification, qui me viennent de la physique expérimentale des particules, mais il est beaucoup trop tôt pour dire si ces idées ont un rapport quelconque avec la réalité.

On présente souvent la théorie des cordes comme la seule façon de traiter le problème des infinis apparaissant en théorie

quantique de la gravitation, mais une alternative existe, fondée sur des théories quantiques des champs du même type général que celle utilisée dans le modèle standard. Cette idée, que j'ai nommée protection asymptotique, affirme que l'intensité des forces évolue vers des valeurs finies aux hautes énergies : elles y sont empêchées (protégées) d'atteindre l'infini.

Cette idée a longtemps stagné parce qu'il est difficile de montrer que les théories sont ou ne sont pas asymptotiquement protégées. J'ai fait des calculs préliminaires, que j'ai trouvés encourageants, mais leur poursuite était trop difficile, et j'ai travaillé sur d'autres choses. Puis, un peu avant 2000, un certain nombre de chercheurs en Europe se sont emparés du sujet, et ils ont établi la protection asymptotique dans diverses approximations et montré qu'elles sont

mathématiquement aussi bien définies que le modèle standard.

→ En quoi cette approche est-elle différente de la théorie des cordes ?

→ Steven Weinberg

Elle procède à l'opposé de ce que l'on fait en théorie des cordes. Dans cette dernière, on abandonne la théorie quantique des champs usuelle pour inventer quelque chose de vraiment nouveau. La théorie des cordes est un grand pas dans une direction nouvelle. La protection asymptotique consiste plutôt à partir du fait que la bonne vieille théorie des champs, celle avec laquelle nous travaillons depuis 60 ou 70 ans, est tout ce dont nous avons besoin.

Je ne vais pas faire particulièrement l'article en faveur de la protection asymptotique.

S'il devait s'avérer que la vérité est du côté de la théorie des cordes, je ne serais pas surpris. Cette théorie est belle du point de vue mathématique. La protection asymptotique n'est qu'une possibilité qui vaut aussi la peine d'être explorée sérieusement.

Jusqu'à présent, aucune de ces deux approches n'a débouché sur une percée, comme le serait le calcul des paramètres du modèle standard, dont les valeurs (précises) sont données sans explication. Comprendre pourquoi les masses des particules présentent les rapports qu'on leur connaît serait le véritable test. Ces masses sont une énigme comparable à un texte dans une écriture ancienne telle que le linéaire A : nous avons le texte, mais nous ignorons sa signification.

S. Weinberg, *Lake Views : This World and the Universe*, Belknap Press, 2010.

Et tout s'éclaire

france culture

La marche des sciences
14h/15h jeudi

avec Aurélie Luneau
en partenariat avec le magazine Pour la Science

franceculture.com

DREAM ON - Radio France / Christophe Aramowitz

L'insaisissable théorie unifiée

Stephen Hawking et Leonard Mlodinow

Les physiciens recherchent une théorie décrivant de façon unifiée les quatre interactions fondamentales. Mais ils auront peut-être besoin de plusieurs théories...

L'ESSENTIEL

✓ Nous modélisons la réalité physique à partir de ce que nous voyons du monde, qui dépend de nous et de notre point de vue. Dès lors, un « réalisme dépendant du modèle » semble préférable au réalisme absolu habituel en physique.

✓ Or la théorie des cordes, candidate préférée des physiciens au titre de la théorie du Tout, se présente sous cinq formulations différentes, valables chacune dans certaines conditions.

✓ Des liens mathématiques relient toutefois ces cinq théories en un réseau, nommé théorie M. Cette dernière est-elle la théorie tant recherchée ?

Le conseil municipal de Monza, en Italie, a interdit un jour de mettre les poissons rouges dans des bocaux ronds. C'est pure cruauté, ont justifié les édiles, car cela impose aux pauvres poissons une vision déformée de la réalité. Pour curieuse qu'elle soit, cette anecdote pose une intéressante question philosophique : comment savons-nous que la réalité que nous percevons est vraie ? Celle que voit le poisson diffère de la nôtre, mais est-elle pour autant moins réelle ?

En physique, cette question n'est pas gratuite. Les physiciens et les cosmologistes se trouvent dans une situation similaire à celle du poisson rouge : depuis des décennies, ils s'efforcent de mettre au point une « théorie ultime du Tout », c'est-à-dire un ensemble complet et cohérent de lois fondamentales capable d'expliquer tous les aspects de la réalité. Or voilà qu'il apparaît que cette quête pourrait conduire non pas à une théorie unique, mais à toute une famille de théories reliées, chacune décrivant sa propre version de la réalité, comme si elle voyait l'Univers depuis son propre bocal...

Cette idée est difficile à accepter, y compris pour nombre de physiciens. La plupart des gens croient en l'existence d'une réalité objective et extérieure, et au fait que nos sens et notre science nous renseignent directement sur le monde

matériel. La science classique est fondée sur la conviction qu'il existe un monde extérieur, dont les propriétés sont bien définies et indépendantes de l'esprit de l'observateur. En philosophie, cette doctrine se nomme « réalisme ».

Ceux qui se souviennent de Timothy Leary (un psychologue américain partisan de l'usage thérapeutique du LSD) et des années 1960 savent qu'il y a une autre possibilité : la conception de la réalité peut dépendre de l'esprit de celui qui la perçoit. À des différences subtiles près, ce point de vue se décline sous les noms d'antiréalisme, d'instrumentalisme ou encore d'idéalisme. Dans ces doctrines, le monde que nous connaissons est construit par l'esprit humain à partir de la matière brute des données sensorielles, et il est mis en forme par le cerveau. Ce point de vue peut sembler difficile à



© Shutterstock/Tschemko 17114

accepter, mais pas à comprendre. S'agissant de notre perception du monde, il n'existe aucun moyen de supprimer l'observateur – c'est-à-dire nous.

Les développements de la physique sont tels que le réalisme devient difficile à défendre. En physique classique (la physique newtonienne, qui décrit bien nos expériences quotidiennes), l'interprétation de termes tels qu'« objet » et « position » est pour l'essentiel en harmonie avec notre compréhension « réaliste », de bon sens, de ces concepts. Mais nous sommes des instruments de mesure grossiers. Les physiciens ont découvert que les objets qui nous entourent et la lumière grâce à laquelle nous les voyons sont constitués d'objets (tels les électrons et les photons) que nous ne percevons pas directement. Ces objets ne sont pas régis par les lois de la physique classique, mais par celles de la théorie quantique.

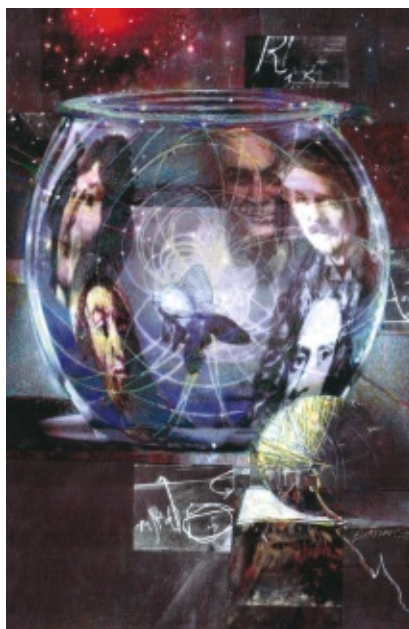
La réalité de la théorie quantique est en rupture radicale avec celle de la physique classique. En théorie quantique, les particules n'ont ni position définie ni vitesse définie avant qu'un observateur ne mesure ces quantités. Dans certains cas, des objets individuels n'ont même pas d'existence indépendante, mais existent seulement en tant que partie d'un ensemble. La physique quantique a aussi des implications importantes sur notre conception du passé. Alors que la physique classique voit le passé comme une série définie d'événements, en physique quantique le passé, comme le futur, n'existent qu'en tant qu'éventail de possibilités. Même l'Univers dans son ensemble n'a pas de passé unique. La physique quantique implique donc une réalité différente de celle de la physique classique, même si cette dernière correspond à notre intuition et nous est fort utile pour construire des immeubles ou des ponts.

Ces exemples nous amènent à une conclusion importante : il n'y a pas de concept de réalité indépendant de toute représentation ou théorie. C'est pourquoi nous préconisons plutôt un « réalisme dépendant du modèle ». Dans cette vision, une théorie physique ou une représentation du monde n'est qu'un modèle et un ensemble de règles qui relient les éléments du modèle aux observations. Il est alors vain de se demander si un modèle est réel ; il importe seulement qu'il soit en accord avec les observations. Si deux modèles sont compatibles avec les

observations, aucun des deux ne peut être considéré plus réel que l'autre.

Plusieurs réalités selon le point de vue ?

L'idée de réalités alternatives est l'un des piliers de la culture populaire moderne. Par exemple, dans le film *Matrix*, les hommes vivent sans le savoir dans une réalité virtuelle créée par des ordinateurs intelligents ; le but de ces machines est de maintenir les humains dans une léthargie satisfaite et paisible, afin de pouvoir pomper leur « énergie bioélectrique » (allez savoir ce que c'est...). Le film pose une



COMME UN POISSON ROUGE dans son bocal, nous sommes enfermés dans un point de vue sur l'Univers. Nous pouvons modéliser ce qui se passe hors du bocal, mais sans nous affranchir de notre point de vue. Dès lors, il est peut-être inévitable que la quête d'une théorie du Tout produise plusieurs solutions, impossibles à unifier sans la possibilité d'un regard... extérieur à l'Univers ?

bonne question : comment pouvons-nous être sûrs que nous ne sommes pas des êtres peuplant un monde factice ?

Si nous vivions dans un monde synthétique imaginaire, les événements s'y déroulant n'auraient pas nécessairement de logique ou de cohérence, ou n'obéiraient pas forcément à des lois. Les maîtres nous contrôlant pourraient trouver intéressant ou amusant de tester nos réactions, par exemple en nous faisant brus-

quement décider de tous haïr le chocolat, ou que la guerre est inévitable, mais rien de cela n'est arrivé. Si ces maîtres supposés imposaient des lois cohérentes, nous n'aurions aucun moyen de savoir qu'il existe une autre réalité derrière la réalité simulée. Il est facile d'étiqueter le monde des maîtres comme « réel », et le monde engendré par ordinateur comme « faux ». Mais, si (comme nous), les êtres du monde virtuel ne pouvaient voir dans leur univers depuis l'extérieur, quelles raisons auraient-ils de mettre en doute leur propre vision de la réalité ?

Les poissons rouges sont dans une situation identique. Depuis leur bocal courbe, ils ne voient pas la même chose que nous qui regardons du dehors, mais ils pourraient néanmoins formuler des lois gouvernant le mouvement des objets extérieurs au bocal. Par exemple, puisque la lumière est défléchie en passant de l'air à l'eau, un objet qui est pour nous sur une trajectoire rectiligne serait perçu par le poisson rouge comme décrivant une trajectoire courbe. Depuis leur référentiel déformé, les poissons savants pourraient formuler des lois toujours vérifiées et autorisant des prédictions sur le mouvement des objets extérieurs au bocal. Leurs lois seraient plus compliquées que dans notre référentiel, mais la simplicité est une question de goût ! Si les poissons rouges formulaient une telle théorie, nous devrions admettre que leur vision est une représentation valable de la réalité.

Un exemple concret et célèbre de représentations différentes de la réalité est le contraste entre le modèle du cosmos de Ptolémée (centré sur la Terre) et celui de Copernic (centré sur le Soleil). On a beau dire que Copernic a donné tort à Ptolémée, cela n'est pas vrai. Comme dans le cas de notre vision opposée à celle du poisson rouge, on peut utiliser l'une ou l'autre représentation comme modèle de l'Univers, parce que nous pouvons expliquer nos observations de la voûte céleste indifféremment en supposant que la Terre ou que le Soleil est au repos. En dépit de son rôle dans les débats philosophiques sur la nature de notre Univers, le véritable avantage du système copernicien est que les équations du mouvement sont beaucoup plus simples dans le référentiel où c'est le Soleil qui est au repos.

Le réalisme dépendant du modèle s'applique non seulement aux modèles scientifiques, mais aussi aux modèles men-

taux conscients et subconscients que nous créons tous pour interpréter et comprendre le monde de tous les jours. Par exemple, le cerveau humain traite les données brutes du nerf optique, combinant les données des deux yeux, augmentant la résolution et comblant les lacunes telles que celle du point aveugle de la rétine. De plus, il crée l'impression d'un espace tridimensionnel à partir des données bidimensionnelles de la rétine. Quand vous voyez une chaise, vous avez simplement utilisé la lumière diffusée par la chaise pour construire une image mentale, c'est-à-dire un « modèle » de la chaise. Le cerveau est tellement doué pour construire des modèles que si l'on équipe les gens de lunettes qui renversent l'image, leur cerveau change le modèle de telle sorte qu'ils voient à nouveau les choses dans le bon sens... et, avec un peu de chance, avant qu'ils aient le temps d'essayer de s'asseoir !

Cinq théories ultimes ?

Dans la quête pour découvrir les principes ultimes de la physique, aucune approche n'a suscité autant d'espoirs que la théorie des cordes. Cette théorie a été proposée dans les années 1970 comme tentative d'unification des quatre interactions fondamentales de la nature en un cadre cohérent ; elle visait particulièrement à faire entrer la gravitation dans le cadre de la théorie quantique. Toutefois, dès le début des années 1990, les physiciens se sont aperçus que la théorie des cordes souffrait d'un malencontreux défaut : en fait, il y en a cinq différentes ! Pour ceux qui poussaient « la » théorie des cordes en tant que « théorie du Tout », c'était pour le moins embarrassant.

Au milieu des années 1990, les chercheurs ont commencé à découvrir que ces différentes théories (à laquelle s'ajoutait désormais la supergravité) décrivent en fait le même phénomène, ravivant leur espoir d'en faire finalement une théorie unifiée. Ces théories sont effectivement reliées par ce que les physiciens nomment des dualités, qui sont une sorte de dictionnaire mathématique pour traduire les concepts dans un sens ou dans l'autre. Malheureusement, chaque théorie n'est une bonne description des phénomènes que dans un ensemble donné de conditions (par exemple, uniquement pour les basses énergies). Aucune ne peut décrire à elle seule tous les aspects de l'Univers.

Les théoriciens des cordes sont maintenant convaincus que les cinq théories des cordes différentes sont juste différentes approximations d'une théorie plus fondamentale qui serait la « théorie M » (personne ne semble savoir à quoi correspond ce M. Il pourrait désigner le terme « maîtresse », « miracle » ou « mystère », ou les trois). On essaye encore de déchiffrer la nature de la théorie M, mais il semble que l'attente habituelle d'une théorie unique de la nature ne soit pas tenable, et que pour décrire l'Univers, il nous faudra appliquer différentes théories dans différentes situations.

Un réseau de théories

Ainsi, la théorie M n'est pas une théorie au sens classique du terme, mais un réseau de théories. Elle est comparable à une carte géographique. Pour représenter fidèlement l'ensemble de la Terre sur une surface plane, on doit recourir à un ensemble de cartes, qui couvrent chacune une région limitée. Les cartes se recouvrent à certains endroits, et là où il y a chevauchement, elles montrent le même paysage. De même, les différentes théories de la famille de la théorie M peuvent sembler très différentes, mais on peut les considérer comme des versions de la même théorie sous-jacente. Elles prédisent toutes les mêmes phénomènes là où elles se chevauchent, mais aucune ne fonctionne bien dans toutes les situations.

À chaque fois que nous développons un modèle de l'Univers qui fonctionne bien, nous avons tendance à attribuer à ce modèle la qualité de réalité ou de vérité absolue. Mais la théorie M, comme dans l'exemple du poisson rouge, montre qu'une même situation physique peut être modélisée de différentes façons, utilisant chacune des éléments fondamentaux et des concepts différents.

Il se pourrait que pour décrire l'Univers, nous ayons à appliquer différentes théories dans différentes situations. Chaque théorie peut avoir sa propre version de la réalité, mais d'après le réalisme dépendant du modèle, cette diversité est acceptable, et on ne peut dire d'aucune version qu'elle est plus réelle qu'une autre. Ce n'est pas ce que les physiciens attendaient *a priori* d'une théorie de la nature, et cela ne correspond pas non plus à l'idée que l'on se fait d'ordinaire de la réalité. Mais l'Univers est peut-être ainsi. ■

LES AUTEURS



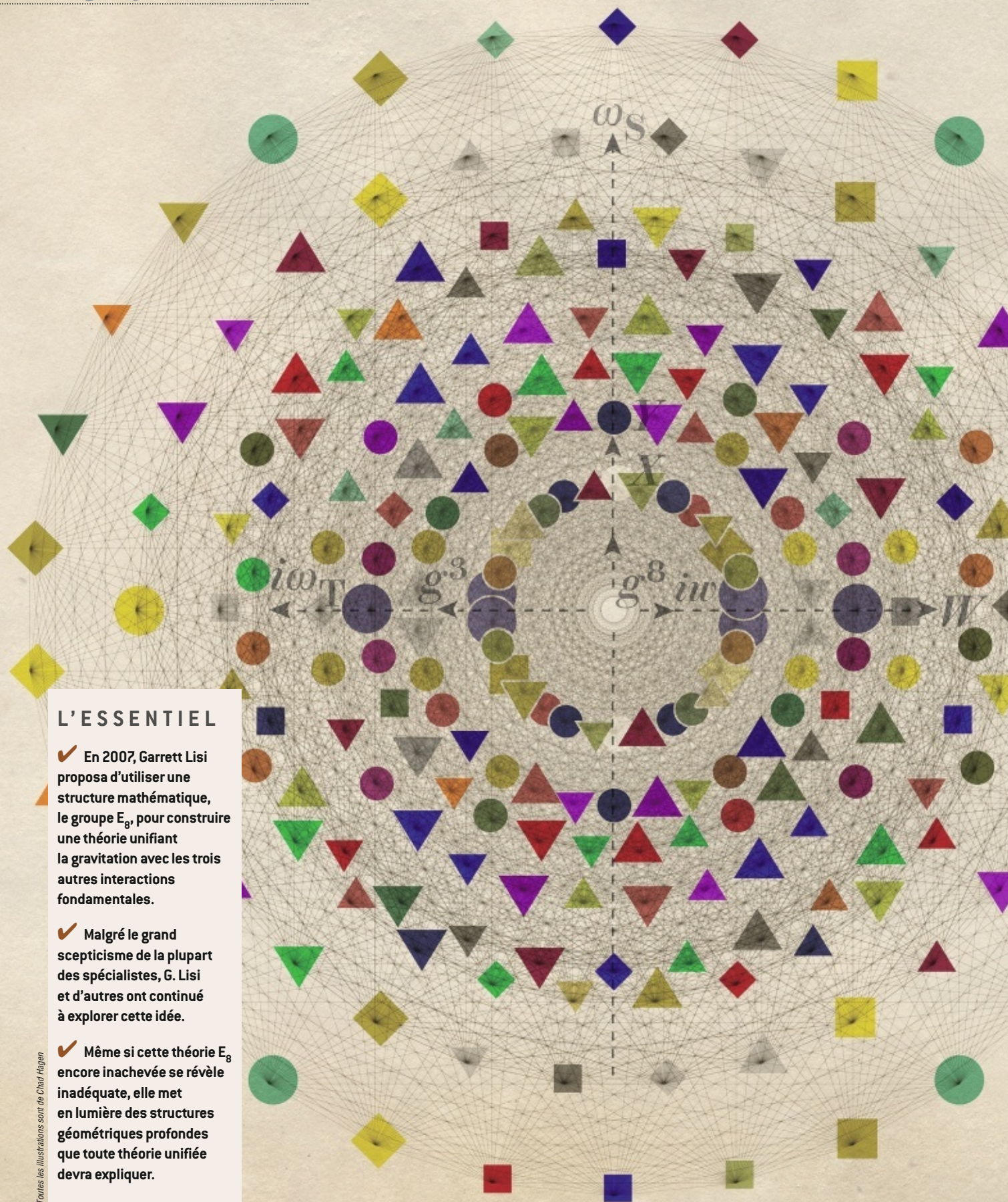
Stephen HAWKING, professeur émérite de mathématiques à l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, est l'auteur de travaux essentiels à la compréhension moderne des trous noirs et des débuts de l'Univers. Leonard MLODINOW est physicien théoricien à l'Institut de technologie de Californie.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Hawking et L. Mlodinow, *The Grand Design*, Bantam Books, 2010.

J. Maldacena, *La gravité est-elle illusion ?*, *Pour la Science*, n° 339, janvier 2006.

M. J. Duff, *Les nouvelles théories des cordes*, *Pour la Science*, n° 246, avril 1998.



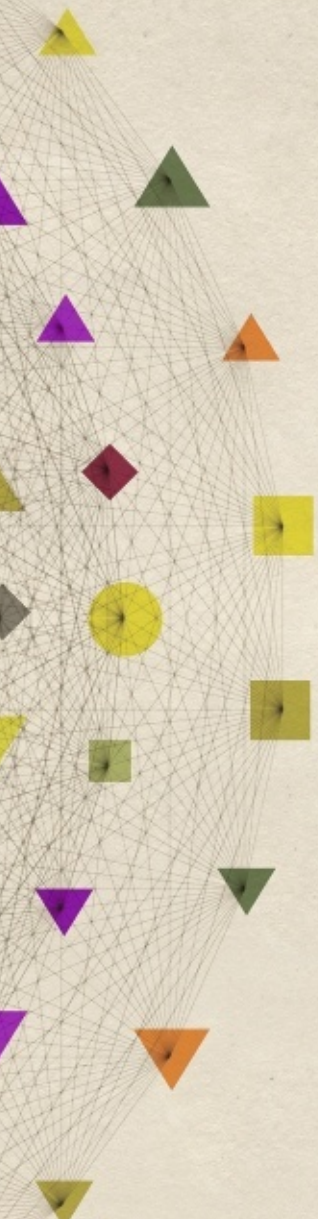
L'ESSENTIEL

✓ En 2007, Garrett Lisi proposa d'utiliser une structure mathématique, le groupe E_8 , pour construire une théorie unifiant la gravitation avec les trois autres interactions fondamentales.

✓ Malgré le grand scepticisme de la plupart des spécialistes, G. Lisi et d'autres ont continué à explorer cette idée.

✓ Même si cette théorie E_8 encore inachevée se révèle inadéquate, elle met en lumière des structures géométriques profondes que toute théorie unifiée devra expliquer.

Toutes les illustrations sont de Chad Hagen



Une théorie géométrique du Tout

Garrett Lisi et James Weatherall

Les particules élémentaires et leurs interactions reflètent sans doute une structure géométrique profonde de la nature. Cette structure a-t-elle quelque chose à voir avec le groupe de symétrie E_8 ?

La physique moderne est née en 1687 d'un processus d'unification. Avec sa loi universelle de la gravitation, Isaac Newton montrait que les descriptions théoriques d'alors des mouvements du pendule, des planètes, des marées, etc., n'étaient en fait que différentes facettes d'une même théorie. Depuis, les unifications se succèdent et jouent un rôle central en physique. Au XIX^e siècle, James Clerk Maxwell fusionna électricité et magnétisme. L'électromagnétisme résultant fut unifié 100 ans plus tard, vers 1970, avec la théorie de l'interaction faible – qui régit la radioactivité bêta –, ce qui a donné la théorie dite électrofaible.

Aller au-delà du modèle standard

La quête de l'unification a des motivations pratiques, philosophiques et esthétiques : la réunion de plusieurs théories physiques en une seule clarifie notre compréhension de l'Univers et en révèle des aspects insoupçonnés ; les physiciens, persuadés que les lois physiques découlent d'une unique structure mathématique, trouvent une telle théorie unifiée plus élégante. C'est pourquoi les expériences menées à l'aide d'accélérateurs comme le LHC (*Large Hadron Collider*, ou grand collisionneur de hadrons), au CERN à Genève, servent autant

à rechercher les phénomènes attendus par la théorie électrofaible qu'à recueillir les signatures possibles d'une éventuelle théorie du « Tout », décrivant toutes les particules et leurs interactions.

La meilleure théorie actuelle des interactions non gravitationnelles – à savoir l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte – a été élaborée dès les années 1970. Qualifiée de « modèle standard » de la physique des particules, elle décrit ces interactions et les particules qu'elles mettent en jeu. La formulation mathématique de cette théorie repose sur des objets géométriques abstraits nommés groupes de Lie et espaces fibrés ou plus simplement « fibrés ».

Le modèle standard n'en reste pas moins une théorie composée d'éléments disparates, puisqu'un objet géométrique différent décrit chaque interaction. C'est pour réduire, voire faire disparaître cette imperfection, que les physiciens n'ont cessé de tenter d'unifier les divers éléments du modèle standard et ont proposé des « théories de grande unification ». Dans chacune de ces théories, un objet géométrique unique est censé expliquer les interactions, mais nul ne sait laquelle de ces théories de grande unification est pertinente, ni même si l'une d'entre elles l'est...

Du reste, un problème d'unification plus profond se pose aux physiciens : l'intégration de l'interaction gravitationnelle et des trois autres interactions

LE ZOO DES PARTICULES
élémentaires n'est pas un tohu-bohu : il présente des structures et des relations remarquables que l'on peut lire sur un diagramme caractéristique d'un groupe de symétrie.

fondamentales dans une même structure mathématique. Depuis les années 1980, la stratégie dominante pour ce faire est la théorie des cordes, qui tente de décrire la gravitation et les trois autres interactions en termes de cordes et de membranes vibrantes au sein d'un espace-temps ayant de nombreuses dimensions.

Un petit groupe de chercheurs explorent une autre voie : la « gravitation quantique à boucles ». Elle fait appel à un cadre mathématique moins élaboré, plus proche de celui du modèle standard. En s'appuyant sur ses idées, l'un d'entre nous, (G. Lisi) a proposé en 2007 une nouvelle théorie unifiée. L'idée directrice est d'étendre de façon cohérente, à l'aide d'un groupe de Lie noté E_8 , le cadre géométrique des théories de grande unification pour y inclure la gravitation.

La « théorie E_8 », comme toutes les nouvelles idées, doit subir l'épreuve de l'expérience. Nombre de physiciens sont sceptiques, à juste titre, car cette théorie reste inachevée. Toutefois, même à ce stade précoce de développement, la théorie E_8 révèle certaines des structures profondes en jeu dans la nature, et prédit de nouvelles particules que le LHC découvrira peut-être.

Avant d'expliquer la théorie E_8 , commençons par poser les principes géométriques qui gouvernent les interactions. La géométrie est l'étude des formes. Oui, mais s'agissant de physique fondamentale, de

espace ; on peut les imaginer comme des espaces internes attachés à chaque point de l'espace-temps, dont la forme est liée aux propriétés des particules.

L'idée de formuler une théorie physique à partir des espaces fibrés fut introduite en 1918 par le mathématicien allemand Hermann Weyl (1885-1955). Les fibres à la H. Weyl sont distinctes des dimensions spatiales ondulantes postulées en théorie des cordes ; elles sont de forme constante ; leur évolution dans le temps découle de la façon dont elles sont rattachées à l'espace-temps quadridimensionnel.

Les champs électrique et magnétique présents partout dans notre espace peuvent être représentés par des fibres circulaires. Une fibre circulaire est associée au plus simple des groupes de Lie, qui est noté $U(1)$.

Rappelons qu'un groupe est, en mathématiques, un ensemble dont les éléments peuvent être composés de façon associative, dont un des éléments est neutre (son produit par n'importe quel élément donne cet élément) et dont chaque élément a un symétrique pour cette loi (son produit avec son symétrique donne l'élément neutre). Quant aux groupes de Lie (d'après le mathématicien norvégien du XIX^e siècle Sophus Lie), ce sont des groupes à la fois continus (chaque élément peut être approché d'aussi près que l'on veut par d'autres éléments) et lisses (on peut y faire du calcul différentiel).

Les champs des forces électrique et magnétique qui emplissent l'espace et évoluent dans le temps correspondent à la courbure de ce faisceau de fibres. Autrement dit, d'un point de vue géométrique, les champs électriques et magnétiques sont déterminés par la façon dont les fibres évoluent par rotation dans l'espace et le temps. Une onde électromagnétique correspond à une ondulation par rotation de ces fibres circulaires successives dans l'espace-temps. Et un quantum d'une onde électromagnétique est un photon, c'est-à-dire une particule de lumière qui se propage, et qui véhicule la force électromagnétique entre particules chargées.

Une fibre pour chaque type de particules

À chaque type de particules élémentaires correspond une fibre différente. Ainsi, tous les électrons du monde résultent de l'évolution dans l'espace-temps d'un même type de fibre, ce qui explique, entre autres, pourquoi tous les électrons sont identiques. Les fibres de particules électriquement chargées, tels les électrons, s'enroulent autour des fibres circulaires de l'électromagnétisme comme le filetage d'une vis, et cela en proportion de leurs charges électriques.

Parmi les « fermions » (les particules élémentaires de matière), les électrons ont une charge électrique de -1 (trois enroulements), les quarks u ont des charges électriques de $+2/3$ (deux enroulements dans l'autre sens), les quarks d ont une charge électrique de $-1/3$ (un enroulement), et les neutrinos une charge nulle. Les particules d'antimatière, tels les positrons et les antiquarks, s'enroulent dans le sens contraire autour de la fibre circulaire de l'électromagnétisme, ce qui leur confère des charges électriques opposées.

Quand des particules entrent en collision, elles peuvent se transformer en d'autres particules, mais de façon que la charge totale reste la même. Ce point essentiel est la conséquence d'une propriété géométrique des fibres : quand deux particules se rencontrent, les enroulements de leurs fibres s'ajoutent. La représentation en termes de fibrés explique ainsi ce que l'on sait de l'électromagnétisme. Les charges électriques décrivent la structure géométrique du fibré constitué par les fibres électromagnétiques et matérielles (d'un électron par exemple), cette structure déterminant quelles sont les interactions possibles entre particules chargées.

MÊME INACHEVÉE, LA « THÉORIE E_8 »

révèle certaines des structures profondes en jeu dans la nature et prédit de nouvelles particules.

quelles formes ? Il y a quelque 2400 ans, Platon associait des polyèdres réguliers à chacun des « éléments » tels que l'air ou le feu. De même, des objets géométriques fondamentaux peuvent être associés aux particules élémentaires. Il s'agit de formes géométriques parfaites et continues, invisibles parce qu'elles sont hors de notre espace, mais dont nous constatons les effets.

La principale idée géométrique sous-tendant le modèle standard est qu'à chaque point de l'espace-temps sont attachés des espaces mathématiques nommés « fibres », chacune correspondant à un type de particules. L'ensemble formé par l'espace-temps et les fibres rattachées à ses points constitue ce que l'on nomme un espace fibré ou plus simplement un fibré. Les fibres n'appartiennent pas à notre

Par exemple, $U(1)$ est le groupe des nombres complexes de module un, dont chacun représente une rotation sur le cercle de rayon un. Le cercle unité est la fibre associée à $U(1)$. Il a une seule symétrie : une rotation de n'importe quel angle laisse le cercle inchangé. On nomme générateur du groupe de Lie $U(1)$ une rotation du cercle d'un angle infinitésimal.

De façon imagée, on peut donc dire que l'espace fibré de l'électromagnétisme est constitué de fibres circulaires successives attachées à chaque point de l'espace-temps (voir l'encadré page 71). Chose essentielle, chaque cercle peut tourner un peu sur lui-même par rapport à ses voisins immédiats. Le « champ de connexion » d'un espace fibré décrit la façon dont se correspondent des fibres voisines par ces rotations.