

Une théorie prometteuse et controversée

Le groupe de Lie E_8 , dont Garrett Lisi veut faire le groupe d'unification, fascine les physiciens depuis longtemps.

Ainsi, dans l'une des théories des cordes (la théorie des cordes hétérotiques), une version fait jouer le rôle de groupe de symétrie de jauge à la combinaison $E_8 \times E_8$. Le groupe E_8 apparaît aussi dans les réductions dimensionnelles des théories dites de supergravité, qui sont les limites à basse énergie des théories des cordes.

De façon plus générale, le groupe E_8 est considéré comme un groupe prometteur en physique des particules. En effet, comme l'évoque G. Lisi, il contient d'une façon naturelle une série de sous-groupes souvent considérés dans le cadre des théories de grande unification. Cette idée, si l'on utilise le symbole d'in-

clusion $\subset$, peut se résumer par la hiérarchie :

$$U(1) \times SU(2) \times SU(3) \\ \subset SU(5) \subset SO(10) \subset E_8.$$

La proposition faite par G. Lisi en 2007 dans un article mis en ligne, très médiatisé, s'inscrit donc dans cette dernière mouvance, mais en utilisant une formulation qui lui permet d'inclure les symétries de l'espace-temps (c'est-à-dire le groupe de Lorentz).

Pour autant, la théorie prometteuse promue par G. Lisi doit encore franchir nombre d'épreuves avant de pouvoir être considérée comme une alternative viable à la théorie des cordes. Parmi elles, on notera notamment que :

- la théorie E_8 de G. Lisi n'explique pas l'asymétrie gauche-droite dans la nature, c'est-à-dire pourquoi seules les parti-

cules dont le spin est aligné sur la vitesse (hélicité gauche) interagissent. Ce phénomène a une traduction expérimentale connue sous le nom de violation de la parité.

- cette théorie annonce l'existence de fermions miroirs (aux nombres quantiques opposés) encore inconnus, ainsi que nombre de nouvelles particules et interactions, et il faut soit les découvrir, soit expliquer leur invisibilité.

- la dynamique quantique, c'est-à-dire l'évolution des champs quantiques associés aux particules et aux interactions décrite par les équations de la théorie n'est pas comprise, et semble pour l'instant entrer en conflit avec un théorème général de la physique des particules.

Emilian Dudas,

CNRS-École polytechnique, Palaiseau

Il n'y a maintenant plus qu'à mettre les morceaux ensemble. Avec la gravité décrite par $Spin(1, 3)$ et la théorie de grande unification privilégiée décrite par $Spin(10)$, il est naturel de les combiner en un unique groupe de Lie, $Spin(11, 3)$. Cela débouche sur une théorie gravitationnelle de grande unification, qu'ont introduite en 2010 Roberto Percacci, de l'École internationale d'études avancées de Trieste, en Italie, et Fabrizio Nesti, de l'Université de Ferrare. C'est un pas important sur la voie d'une théorie complète du Tout.

La théorie fondée sur le groupe $Spin(11, 3)$ inclut des blocs de 64 fermions et prédit leur spin ainsi que leurs charges électrofaible et forte. Elle inclut aussi un ensemble de bosons de Higgs. La courbure de l'espace fibré $Spin(11, 3)$ décrit correctement la dynamique de la gravité, les autres interactions et les bosons de Higgs. Elle inclut même une constante cosmologique qui explique l'énergie sombre cosmique. Tout s'éclaire.

L'espace-temps né d'une symétrie brisée ?

Les sceptiques ont objecté qu'une telle théorie devrait être impossible. Elle semble violer un théorème de la physique des particules, le théorème de Coleman-Mandula, qui interdit de combiner la gravité avec les autres interactions en un seul et même groupe de Lie. Mais le théorème a une faille importante : il ne s'applique que lorsque l'espace-temps existe. Dans la théorie $Spin(11, 3)$ (et dans la théorie E_8), la gravité n'est unifiée avec les autres interactions qu'avant la brisure de symétrie du groupe de Lie complet, et à ce stade, l'espace-temps n'existe pas encore. Notre Univers commence quand la symétrie se brise, une direction particulière devenant privilégiée dans le groupe de Lie unificateur. À cet instant, la gravitation devient une force indépendante, et l'espace-temps émerge soudain. Ainsi, le théorème reste satisfait. L'avènement du temps correspond ainsi à la brisure d'une symétrie parfaite.

Le diagramme des poids de la théorie $Spin(11, 3)$ est finement structuré et équilibré. Sa symétrie, comme celle de la théorie de grande unification fondée sur $Spin(10)$, pointe vers des structures mathématiques plus profondes. Ce motif élégant de particules fait partie de ce qui est peut-

de temps est $Spin(1, 3)$ – c'est le groupe de Lie de la gravitation. Nous ressentons la force de gravité parce que le champ de connexion spinorielle fait tourner notre référentiel quand nous nous déplaçons dans le temps, ce qui nous attire vers le centre de la Terre.

Des charges de spin

De même que les particules ont différents types de charge décrivant comment elles interagissent *via* les forces du modèle standard, elles ont un type de charge décrivant comment elles se comportent dans l'espace. Considérons ce qui se passe lorsqu'on fait tourner une règle de 360 degrés dans l'espace : elle revient à son état de départ. Cette règle (et le référentiel) a une charge de spin spatial égale à +1 ou -1. Mais si nous faisons tourner de 360 degrés dans l'espace un fermion tel qu'un électron, il ne revient pas dans son état initial. Pour ce faire, on doit le faire tourner de 720 degrés : l'électron a une charge de spin de +1/2 ou -1/2.

La charge de spin joue un rôle en gravitation parce que la gravité, par l'intermédiaire du référentiel et de la conne-

xion spinorielle, est liée à la géométrie de l'espace-temps. Comme nous l'avons fait pour les autres interactions, nous pouvons tracer un diagramme des poids pour la gravitation fondée sur le spin (*voir le diagramme correspondant page 74*). La charge de spin spatial d'une particule est son moment cinétique intrinsèque, et sa charge de spin temporel est liée à son mouvement dans l'espace. Les fermions dont le spin spatial et le mouvement sont alignés (*représentés en haut à droite et en bas à gauche du diagramme*) décrivent un tire-bouchon d'hélicité droite en se déplaçant dans l'espace. Les fermions avec un mouvement et un spin spatial de sens opposés sont d'hélicité gauche.

Ce qui est étrange, c'est que la charge de spin a aussi une pertinence inattendue pour l'interaction faible. Seules les particules d'hélicité gauche et les antiparticules d'hélicité droite ont une charge faible et sont soumises à l'interaction faible. Le fait que l'interaction faible soit sensible à la charge de spin suggère que la gravité et les autres forces, pour différentes qu'elles paraissent de l'extérieur, pourraient bien en fait être profondément liées.

être la structure la plus belle de toutes les mathématiques, le plus grand groupe de Lie exceptionnel simple, E_8 .

De la même façon que E_6 contient la structure de la théorie de grande unification Spin(10), avec ses 16 fermions, le groupe E_8 contient la structure de la théorie gravitationnelle de grande unification Spin(11,3), avec ses 64 fermions, spins compris. Ainsi, la gravité et les autres forces connues, les bosons de Higgs et une génération de fermions du modèle standard font tout partie du champ de superconnexion unifié d'un espace fibré E_8 .

Un chantier inachevé

Le groupe E_8 , avec ses 248 générateurs, a une structure riche et complexe (voir le schéma correspondant page 75). En plus de la gravité et des particules du modèle standard, E_8 inclut de nombreuses autres particules, dont certaines pourraient expliquer la matière noire cosmique, et d'autres qui pourraient rendre compte des particules des deuxième et troisième générations du modèle standard.

Cette nouvelle théorie fondée sur E_8 , groupe sur lequel plusieurs physiciens travaillent, est prometteuse, mais il reste beaucoup de travail à faire. Nous devons comprendre comment trois générations de fermions émergent, comment ils se mélangent et interagissent avec les bosons de Higgs pour acquérir leur masse, et exactement comment la théorie E_8 fonctionne dans le contexte de la théorie quantique.

Si la théorie E_8 est correcte, il est vraisemblable que le LHC détectera certaines des particules prédites. Mais si ce collisionneur détecte des particules qui ne correspondent pas au motif de E_8 , cela pourrait porter un coup fatal à la théorie. Dans un cas comme dans l'autre, les mêmes outils géométriques utilisés pour développer la théorie E_8 seront utiles pour comprendre les résultats du collisionneur. Toute particule que les expérimentateurs découvriront prendra sa place dans un diagramme de poids, et nous rapprochera un peu plus de la structure géométrique profonde de la nature. Et que la théorie E_8 soit la bonne ou pas, elle nous aura fait quand même progresser vers la théorie du Tout. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

R. Gilmore, *Lie Groups, Physics, and Geometry*, Cambridge University Press, 2008.

A. G. Lisi, *The beauty of particle physics*, www.ted.com/index.php/talks/garrett_lisi_on_his_theory_of_everything.html

A. G. Lisi, *An exceptionally simple theory of everything*, <http://arxiv.org/abs/0711.0770>

L. Smolin, *Des atomes d'espace et de temps*, *Pour la Science*, n° 316, 2004.

H. Bernstein et A. Phillips, *Les espaces fibrés et la théorie quantique*, *Pour la Science*, n° 47, 1981.

H. Georgi, *Une théorie unifiée des particules élémentaires et des interactions*, *Pour la Science*, n° 44, 1981.



le collège universcience
à la Cité des sciences et de l'industrie

Conférences
Le mardi à 18 h 30

Les deux infinis

Entre l'infiniment petit et l'infiniment grand, physiciens des particules et cosmologistes travaillent désormais la main dans la main pour mieux comprendre la matière et l'Univers. Quatre d'entre eux nous expliquent pourquoi et comment.

—

1^{er} mars
Dans l'immensité du cosmos
 Jean-Loup Puget, astrophysicien, directeur de recherche au CNRS, membre de l'Académie des sciences.

8 mars
Au plus intime de la matière
 Michel Davier, physicien, professeur à l'université Paris-Sud Orsay, membre de l'Académie des sciences.

—

15 mars
L'infiniment petit, clé de l'Univers ?
 Pierre Binétruy, directeur du laboratoire AstroParticule et Cosmologie (APC), CNRS-université Paris-Diderot.

—

22 mars
Le LHC, projection dans les infinis
 Michel Spiro, président du Conseil européen pour la recherche nucléaire (CERN).

universcience.fr

Avec le soutien de





