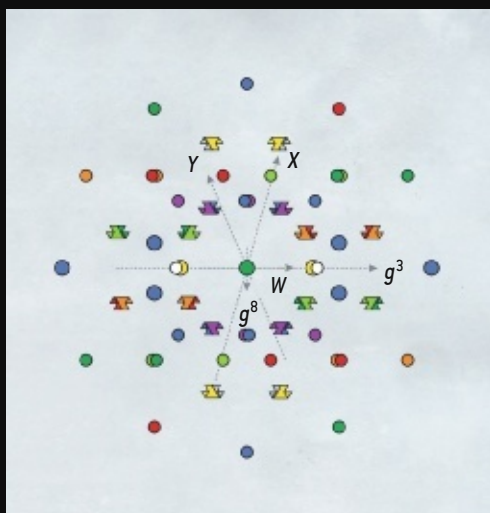
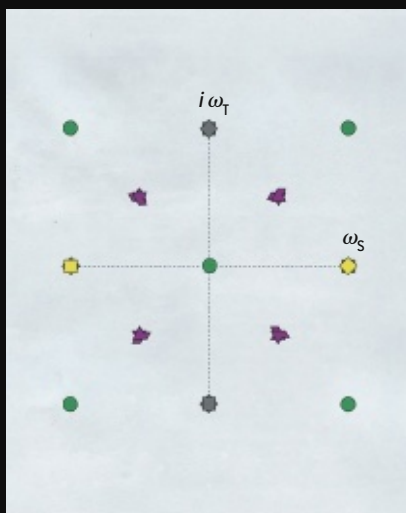
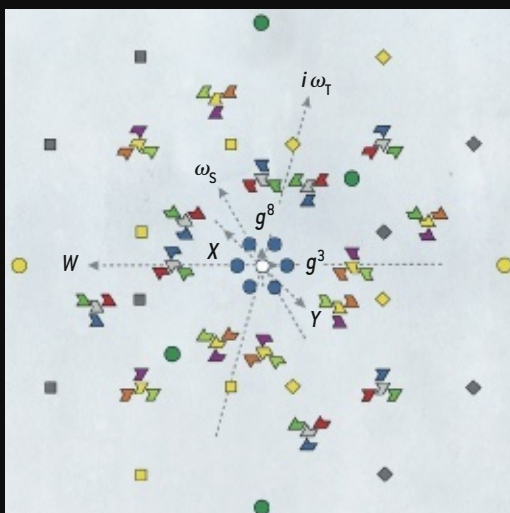




THÉORIE E_6 : une façon de pousser le processus d'unification plus loin consiste à considérer que les bosons médiateurs des interactions et les particules de matière peuvent tous être associés à une fibre unique. La fibre correspondant au groupe de Lie E_6 remplit ce cahier des charges, mais la structure qui en résulte n'incorpore ni les bosons de Higgs ni l'interaction gravitationnelle.



GRAVITATION : pour l'intégrer dans le schéma d'unification, il faut tenir compte de ses « charges » caractéristiques : le spin spatial $[\omega_S]$ et le spin temporel $[\omega_T]$, liés aux translations et aux rotations. Sur le diagramme, les particules des cadrans supérieur gauche et inférieur droit se vrillent dans l'espace comme un tire-bouchon tournant à gauche.



GRAVITATION ET MODÈLE STANDARD : la combinaison des diagrammes de poids du modèle standard et de la gravitation en produit un autre qui contient toutes les particules connues. Un boson de Higgs supplémentaire apparaît dont le rôle est d'unifier les bosons de Higgs avec la gravitation. La forme spécifique du diagramme de poids combiné résulte du fait que seuls les fermions d'hélicité gauche ont une charge faible.

actions électromagnétique, faible et forte deviennent à peu près égales, ce qui suggère que l'on a affaire à différents aspects d'une même force. Une théorie de grande unification doit décrire cette force, reproduire le modèle standard, et conduire à des prédictions testables.

Des théories de « grande unification »

Cette façon de faire rappelle le succès obtenu dans le passé avec le tableau périodique des éléments. Quand les chimistes ont mis au point ce tableau, ils ont commencé à anticiper les propriétés que devraient avoir les éléments qui y figureraient et à prédire l'existence possible d'éléments inconnus jusqu'alors. De même, les physiciens des particules essaient aujourd'hui de comprendre pourquoi le diagramme des poids du modèle standard présente ce motif particulier, et une fois qu'ils y seront parvenus, ils pourront expliquer les propriétés des particules connues et prédire d'éventuelles particules nouvelles.

La première tentative en vue d'une telle théorie a été proposée en 1973 par Howard Georgi et Sheldon Glashow. Ces physiciens

ont remarqué que la combinaison de groupes de Lie du modèle standard constitue un sous-groupe du groupe de Lie $SU(5)$. La théorie de grande unification fondée sur $SU(5)$ ainsi obtenue conduit à quelques prédictions spécifiques. Tout d'abord, les fermions y ont exactement les hypercharges qu'ils ont en réalité, ce qui est remarquable. Ensuite, l'angle de mélange faible devrait valoir 38 degrés, en bon accord avec l'expérience. Enfin, en plus des 12 bosons du modèle standard (8 gluons, 3 bosons faibles et le photon), 12 nouveaux bosons médiateurs de force apparaissent, nommés bosons X et Y.

Ce sont ces bosons X et Y qui ont mis la théorie en difficulté. Ces nouvelles particules permettraient aux protons de se désintégrer en particules plus légères, ce qui n'est pas possible dans le modèle standard. Malgré des expériences de grande ampleur, comme la traque de la désintégration du proton dans 50 000 tonnes d'eau dans une ancienne mine japonaise, la désintégration d'un proton n'a jamais été observée. Les physiciens ont dû écarter la théorie de grande unification fondée sur $SU(5)$.

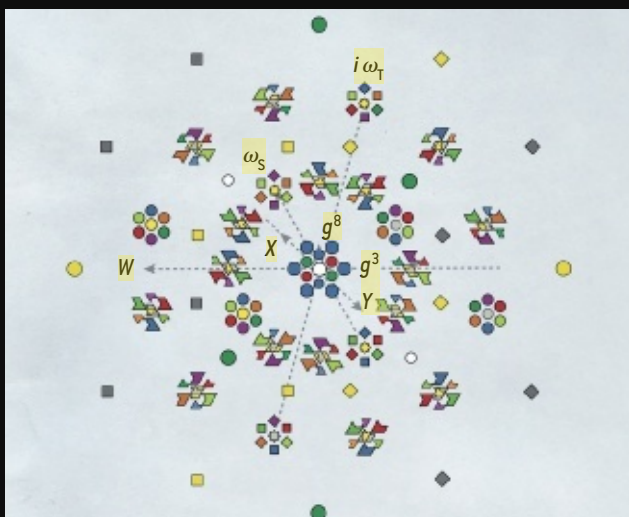
Malgré cet échec, les succès de la théorie $SU(5)$ indiquent que la voie empruntée

par H. Georgi et S. Glashow est intéressante. Une théorie de grande unification apparentée, développée à peu près au même moment, est fondée sur le groupe de Lie noté $Spin(10)$. Elle fournit les mêmes valeurs des hypercharges et de l'angle de mélange faible que $SU(5)$, et prédit en outre l'existence d'une nouvelle interaction, très semblable à l'interaction faible, mais plus faible encore.

D'autres interactions ?

Les médiateurs de cette interaction plus faible sont similaires aux bosons médiateurs de l'interaction faible ; on les note W'^+, W'^- et W'^3 . Ils interagissent avec les fermions d'hélicité droite, ce qui restaure ainsi la symétrie gauche-droite de l'Univers aux très courtes distances. Bien que cette théorie implique une abondance de bosons X (une bonne trentaine), elle suggère aussi que la désintégration du proton se produit à un taux inférieur à celui de la théorie $SU(5)$. Elle reste donc viable à ce jour.

Tracé d'une façon appropriée, le diagramme des poids de la théorie de grande unification fondée sur $Spin(10)$ montre que les charges des particules s'alignent en quatre cercles concentriques, un motif d'une



INTÉGRATION DANS E_8 : l'étude du diagramme de poids partiellement assemblé du modèle standard et de la gravitation montre que les charges de toutes les particules peuvent se ranger dans une structure complexe, qui correspond au groupe de Lie exceptionnel E_8 . Cette structure implique l'existence de particules exotiques, tels des fermions images des fermions existants (symbolisés en plus petit) et de nouveaux bosons médiateurs d'interactions à ce jour inconnues.



THÉORIE E_8 : l'intégration de toutes les particules dans la fibre correspondant à E_8 suggère que toutes les fibres associées à toutes les interactions et à toutes les particules connues, ainsi qu'une série de particules supplémentaires qui correspondent peut-être à la matière noire cosmique, pourraient se ranger au sein de ce remarquable diagramme de poids. Une symétrie, la «trialité», en relie les éléments ; elle pourrait expliquer pourquoi les fermions se présentent en trois familles. La théorie E_8 est-elle la théorie du Tout ?

rare élégance (voir l'encadré ci-dessus, à gauche). L'équilibre que présente ce diagramme a une cause profonde : le groupe de Lie Spin(10), avec ses 45 bosons ainsi que sa représentation de 16 fermions et leurs 16 antifermions, font en fait partie d'un seul groupe de Lie très particulier, le groupe de Lie exceptionnel E_6 . Les «groupes exceptionnels» jouent un rôle éminent en mathématiques. Comme il n'existe qu'un nombre limité de façons d'enrouler des cercles les uns autour des autres, il n'y a qu'une poignée de types de groupes de Lie différents. Les mathématiciens ont achevé leur classification il y a un siècle. Nous en avons déjà vu deux, de types SU et Spin, qui se rencontrent assez souvent en physique. Et parmi les groupes de Lie, il y a cinq cas exceptionnels qui se distinguent : G_2 , F_4 , E_6 , E_7 et E_8 . Ces groupes de Lie ont des structures particulièrement complexes et des liens profonds avec de nombreux domaines des mathématiques.

Le fait que les bosons et les fermions de Spin(10) et du modèle standard collent parfaitement à la structure de E_6 , avec ses 78 générateurs, est remarquable. Cela suscite une idée radicale. Jusqu'à présent, les physiciens ont toujours pensé que les bosons et les fermions étaient complètement dif-

férents. Les bosons sont représentés par des «fibres de force» laissées invariantes par les groupes de Lie associés aux interactions, tandis que les fermions sont représentés par des fibres de type différent qui s'enroulent autour des fibres bosoniques. Et si les bosons et les fermions faisaient partie d'une même fibre ? C'est ce que suggère l'intégration de la théorie Spin(10) dans E_6 . La structure de E_6 inclut les deux types de particules. Autrement dit, les bosons et les fermions peuvent être combinés en tant que parties d'un champ de superconnexion, ce qui constitue une unification radicale des forces et de la matière.

Bien que cette idée ait été critiquée par plusieurs personnes, parce qu'elle combine les bosons et les fermions d'une façon qui paraît fondamentalement incohérente au premier abord, elle a un ancrage mathématique solide. Et la courbure de cette superconnexion, qui décrit l'enroulement de E_6 dans l'espace-temps, reproduit succinctement la dynamique et les interactions des bosons et des fermions dans le modèle standard. Mais E_6 n'inclut ni les bosons de Higgs ni la gravitation.

Einstein a initialement décrit la gravitationnelle comme une courbure de l'espace-temps. Son approche mathématique

était à la pointe de ce qui se faisait au début du XX^e siècle. Mais depuis, les chercheurs ont peu à peu adopté une description plus moderne de la gravitation, physiquement équivalente, mais fondée sur les espaces fibrés.

Un groupe pour la gravitation

En chaque point de l'espace-temps, on peut imaginer un référentiel, c'est-à-dire trois règles perpendiculaires et une horloge. Sans ce référentiel, l'espace-temps ne serait qu'un tissu quadridimensionnel sans notions d'orientation ni de distance. Lorsqu'on se déplace de point en point dans l'espace-temps, le jeu de règles et d'horloge varie, notre référentiel d'origine subissant une rotation. Cette rotation peut être une rotation ordinaire dans l'espace ou bien, puisqu'Einstein a montré que l'espace et le temps sont unifiés, une rotation de l'espace dans le temps. La manière dont le référentiel effectue sa rotation de point en point est déterminée par la «connexion spinorielle», plus connue sous le nom de champ gravitationnel.

Le groupe de Lie des rotations possibles en trois dimensions d'espace et une