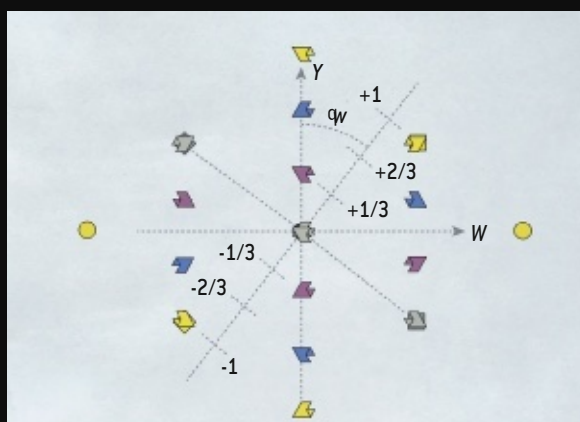


THÉORIES EN COURS D'ÉLABORATION

À chaque type de particule élémentaire correspond une fibre différente ; ces fibres s'enroulent autour des diverses fibres circulaires du photon et des autres bosons médiateurs des interactions. La façon dont la fibre représentant une particule s'enroule dépend de sa charge, électrique ou autre. Chacune des quatre interactions de la nature a son type de charge et son type de boson médiateur. Le motif des charges, nommé diagramme de poids par les mathématiciens, reflète la géométrie des enroulements de fibres, qui régissent les interactions des particules.

BOSONS	FERMIONS	
○ Photon	Neutrino	▲ Hélicité gauche, spin haut
● Bosons faibles	Électron	▲ Hélicité gauche, spin bas
● Gluons	Quark <i>u</i>	▲ Hélicité droite, spin haut
● Gravitons	Quark <i>d</i>	▲ Hélicité droite, spin bas
■ Boson de Higgs	Quark <i>u</i>	▲ Hélicité droite, spin haut, anti
○ Bosons plus faibles	Quark <i>d</i>	▲ Hélicité droite, spin bas, anti
● Bosons X	Quark <i>u</i>	▲ Hélicité gauche, spin haut, anti
● Autres bosons de Higgs	Quark <i>d</i>	▲ Hélicité gauche, spin bas, anti

Il existe deux types de particules élémentaires : les bosons [qui transmettent les interactions] et les fermions [constituant la matière]. À droite, sont symbolisés tous les types de fermions, qu'il s'agisse de fermions droits ou gauches, dotés d'un spin orienté vers le haut ou vers le bas, ou, des quarks, en trois couleurs. Comme le montre la colonne des fermions, ces symboles peuvent être empilés pour représenter des particules aux attributs différents au même endroit d'un diagramme de poids.



THÉORIE ÉLECTROFAIBLE : l'électromagnétisme et l'interaction nucléaire faible sont les deux facettes de l'interaction électrofaible. Sur le diagramme de poids de cette interaction, les physiciens placent les particules d'après leur hypercharge (*Y*) et leur charge faible (*W*). Les bosons de Higgs (carrés gris en partie cachés) se trouvent sur une ligne oblique (d'en haut à gauche à en bas à droite), qui est aussi le lieu des points de charge électrique nulle. Les particules chargées se trouvent sur des lignes obliques parallèles : la charge électrique est une combinaison particulière de l'hypercharge et de la charge faible.

avec cet $U(1)$ de l'hypercharge, les fibres circulaires W^3 se combinent avec les fibres circulaires d'hypercharge pour former un tore bidimensionnel. Ce tore peut être découpé de différentes façons, un peu comme chacun peut couper à sa façon une couronne de pain.

Les fibres des particules connues sous le nom de bosons de Higgs s'enroulent autour de l'enchevêtrement de fibres circulaires du groupe de Lie électrofaible et déterminent un ensemble particulier de cercles, ce qui brise la symétrie, comme si quelqu'un imposait sa façon de trancher une couronne de pain. Les fibres associées aux bosons de Higgs ne s'enroulent pas autour de ces fibres circulaires, qui correspondent alors au photon de masse nulle de l'électromagnétisme.

Perpendiculairement à ces fibres circulaires associées au photon, on a un autre ensemble de cercles, qui doit correspondre à une autre particule, que les pères de la théorie électrofaible ont nommée boson *Z*. Les fibres des bosons de Higgs s'enroulent autour des cercles du boson *Z* ainsi que des cercles du W^+ et du W^- , ce qui confère une masse non nulle à ces trois particules. Les expérimentateurs ont découvert les bosons W^+ , W^- et *Z* en 1983, ce qui a confirmé la pertinence de la théorie élec-

trofaible et montré comment des principes géométriques abstraits se traduisent concrètement dans le monde réel.

Une bonne façon de voir comment fonctionne la théorie électrofaible consiste à porter sur un diagramme les charges faibles et les hypercharges de toutes les particules connues (voir l'encadré ci-dessus et le suivant). Les mathématiciens nomment le résultat un « diagramme de poids », car ils désignent les charges par le terme générique de « poids ».

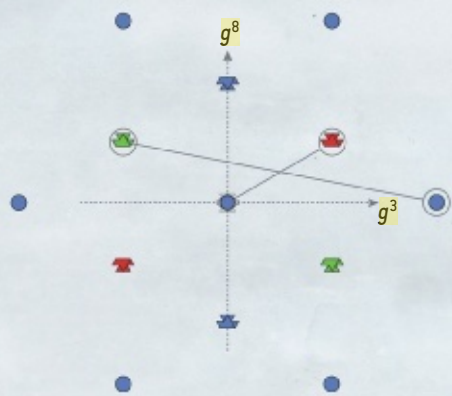
Les charges sur un diagramme

Dans ce diagramme, toutes les particules s'alignent sur des droites obliques régulièrement espacées, correspondant à leurs charges électriques. La charge électrique est donc une combinaison particulière de la charge faible et de l'hypercharge, déterminée par les bosons de Higgs. En mesurant expérimentalement l'intensité de l'interaction faible, les physiciens savent que l'angle de ces droites (« l'angle de mélange faible ») est d'environ 30 degrés. Expliquer la valeur de cet angle est l'un des principaux objectifs que doit atteindre une théorie unifiée.

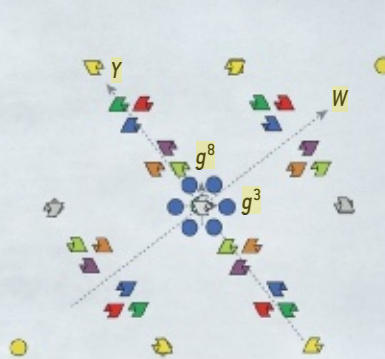
Dans le modèle standard, l'interaction forte qui lie les quarks pour former les nucléons (protons et neutrons) est associée à un groupe de Lie encore plus grand, noté $SU(3)$. La fibre de $SU(3)$ est un espace interne à huit dimensions composé de huit ensembles de cercles s'enroulant les uns autour des autres en un motif compliqué, ce qui se traduit par des interactions entre huit espèces de particules, analogues aux photons, nommées gluons (parce qu'ils collent les nucléons du noyau atomique comme de la glu).

La géométrie de la fibre de $SU(3)$ est fort complexe, mais on peut la décomposer en morceaux interprétables. Elle contient notamment un tore engendré par deux cercles, non enroulés l'un autour de l'autre, correspondant à deux générateurs du groupe notés g^3 et g^8 . Les six autres générateurs s'enroulent autour de ce tore, et leurs charges résultantes forment un motif hexagonal dans le diagramme des poids.

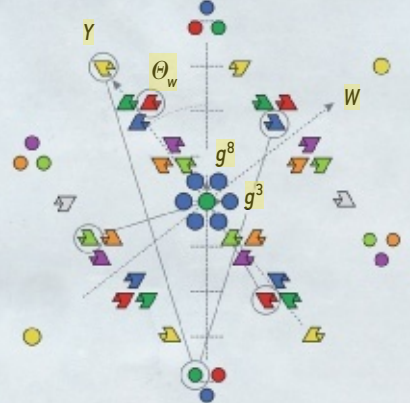
Les fibres des quarks s'enroulent autour de la fibre de ce groupe de Lie $SU(3)$, leurs « charges fortes » formant un triangle sur le diagramme des poids. Ces charges ont été étiquetées par trois couleurs – rouge, vert et bleu. Un ensemble de fibres de matière qui forme un motif complet,



INTERACTION FORTE : les huit gluons (six d'entre eux forment un hexagone, les deux autres se recouvrent au centre) qui transmettent l'interaction forte interagissent mutuellement et avec les quarks et les antiquarks en fonction de leurs charges fortes (g^3 et g^8). Trois quarks, un de chaque couleur, forment un motif triangulaire. Quand les particules interagissent, par exemple quand le gluon encadré interagit avec le quark vert pour produire un quark rouge, les charges doivent s'équilibrer.



MODÈLE STANDARD : il combine les diagrammes de poids des interactions électrofaibles et fortes, pour produire la meilleure théorie des interactions fondamentales disponible à ce jour. Le diagramme complet, quadridimensionnel, a été ici aplati. Toutes les particules et forces connues de la nature (hors gravitation) se trouvent sur cette figure, formant des groupes équilibrés. L'un des principaux objectifs de la physique contemporaine est d'expliquer pourquoi les particules doivent se ranger selon un tel motif.



THÉORIE DE GRANDE UNIFICATION : les physiciens sont en quête d'une théorie qui englobe et dépasse le modèle standard. Dans une telle théorie, ce qui apparaît comme des fibres multiples (pour les interactions électromagnétique, faible et forte) serait en fait différentes coupes d'une seule et même fibre. Le diagramme de poids présenté ici correspond à la théorie fondée sur le groupe $SU(5)$. Elle reproduit le modèle standard et implique l'existence de particules et phénomènes nouveaux.

comme le triangle de trois quarks, est appelé représentation du groupe de Lie $SU(3)$. Cette théorie qui décrit les interactions fortes en termes de « couleurs » est connue sous le nom de chromodynamique quantique.

À elles deux, la chromodynamique quantique et la théorie électrofaible constituent le modèle standard de la physique des particules. Le groupe de Lie du modèle standard est obtenu en combinant $SU(3)$, $SU(2)$ et $U(1)$, ainsi que les fibres de particules de matière selon plusieurs représentations. Cette structure est décrite par un diagramme des poids comportant quatre axes de charges, qui peuvent être projetés en deux dimensions et tracés. Ce diagramme est le joyau de la couronne de la physique moderne : y sont résumées toutes les interactions entre particules décrites dans le cadre du modèle standard.

Le modèle standard : trop de questions

Si le modèle standard est un grand succès, il pose nombre d'énigmes : pourquoi la nature utilise-t-elle cette combinaison de groupes de Lie ? Pourquoi les fibres de matière existent-elles ? Pourquoi le

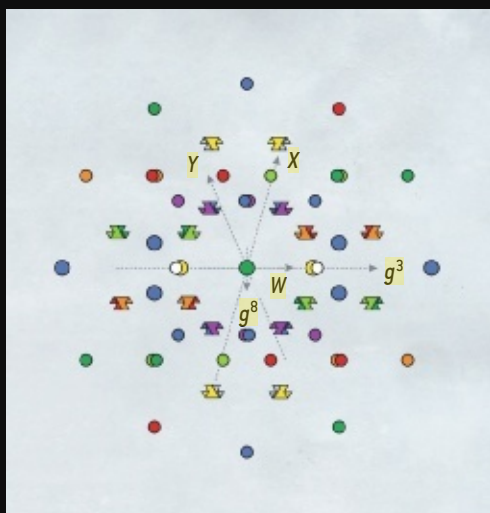
boson de Higgs existe-t-il ? Pourquoi la valeur de l'angle de mélange faible est-elle ce qu'elle est ? Comment la gravité entre-t-elle dans tout cela ? Et il y a d'autres mystères que nous n'avons pas encore abordés. Les quarks, électrons et neutrinos qui constituent la matière ordinaire forment ce qu'on appelle la première génération de fermions ; ils ont des doubles de deuxième et de troisième génération, des particules de charge identique, mais pourvues de masses beaucoup plus élevées. Pourquoi ? Et que sont la matière noire cosmique et l'énergie sombre ? Une théorie unifiée des interactions devrait être capable de répondre à ces questions et à d'autres. La première étape vers une telle théorie est l'unification des interactions forte et électrofaible.

Bien que les interactions électrofaible et forte puissent toutes deux être décrites au moyen d'espaces fibrés, leurs fibres sont distinctes. Les physiciens se sont demandé s'il n'existait pas une fibre unique qui englobe les deux. Au lieu de groupes de Lie différents pour chaque interaction, on aurait un seul groupe de Lie plus vaste, qui les contient tous. Un argument de poids va dans ce sens : à très courte distance (ou à très haute énergie), les intensités des inter-

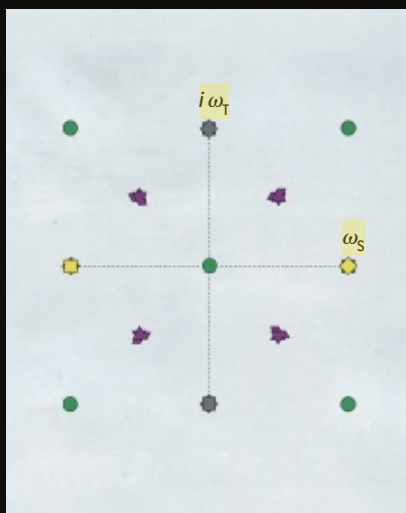
LES AUTEURS



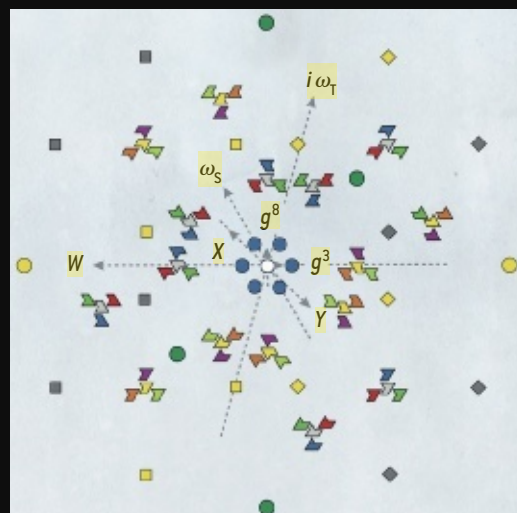
Garrett LISI, physicien, se partage entre la recherche et le surf, et travaille à fonder un institut des sciences à Hawaii. James Owen WEATHERALL, physicien et philosophe, se consacre actuellement à un livre sur l'histoire des idées, de la physique à la finance.



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'intégrrer 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