

Les mêmes principes s'appliquent aux interactions faible et forte. Chacune de ces interactions nucléaires a son propre type de charge et ses propres particules médiatrices. La différence avec l'électromagnétisme est que les forces nucléaires sont décrites par des fibres plus complexes, constituées non pas d'un seul cercle, mais d'un ensemble de cercles sécants, fibres qui interagissent entre elles et avec les fibres de particules de matière selon leurs enroulements.

L'interaction faible est associée à un groupe de Lie tridimensionnel noté $SU(2)$. Sa géométrie est caractérisée par trois générateurs de symétrie, qui correspondent aux trois « bosons faibles » W^+ , W^- et W^3 médiateurs de l'interaction faible – de rôle analogue à celui du photon. Les cercles associés aux bosons W^+ et W^- dans $SU(2)$ s'enroulent en sens contraires autour des cercles associés à W^3 parce qu'ils ont des charges faibles W opposées, égales à $+1$ et -1 . Étant dotées d'une charge faible, ces particules interagissent entre elles ainsi qu'avec les particules de matière.

Les fibres des particules de matière qui participent à l'interaction faible s'enroulent autour du cercle de W^3 et d'autres cercles de $SU(2)$. Il existe deux sortes de fermions, qui se distinguent par leurs hélicités, c'est-à-dire par la façon dont leurs

spins (moments cinétiques intrinsèques) s'alignent sur leur quantité de mouvement. Seuls les fermions d'hélicité gauche (spin de sens opposé à la quantité de mouvement) ont des charges faibles ; ainsi, le quark u et le neutrino gauches ont chacun une charge faible $+1/2$ et le quark d et l'électron gauches ont une charge faible égale à $-1/2$. Pour les antiparticules, c'est l'inverse : seules les antiparticules d'hélicité droite ont une charge faible. En d'autres termes, notre Univers ne présente pas une symétrie gauche-droite : nous pouvons dire si nous regardons des interactions faibles directement ou dans un miroir. Cette asymétrie est l'une des nombreuses énigmes que devra résoudre une théorie unifiée.

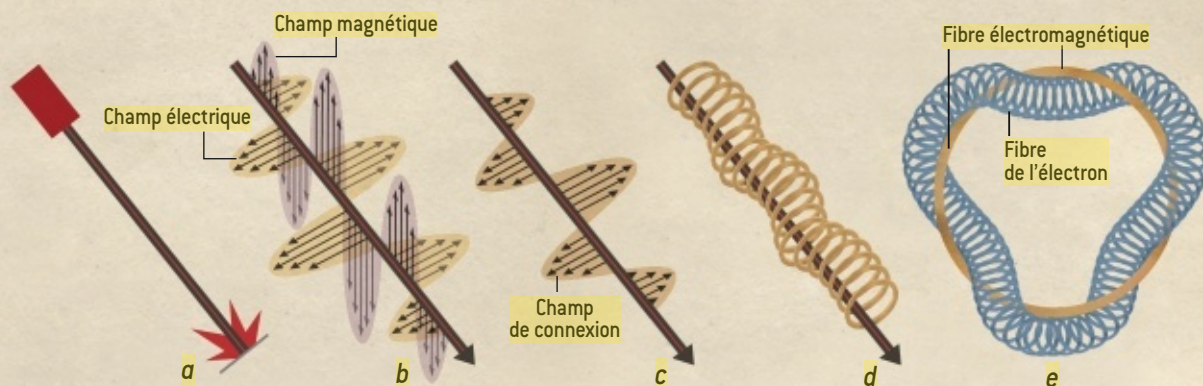
Des enroulements de fibres

Quand les physiciens ont unifié l'interaction faible avec l'électromagnétisme pour créer la théorie électrofaible, ils ont combiné la fibre associée à $SU(2)$ avec une fibre circulaire $U(1)$ particulière, associée à un précurseur de l'électromagnétisme nommé hypercharge, que l'on note Y . C'est pourquoi les fibres des particules de matière s'enroulent autour de ce cercle selon leur hypercharge. À l'intérieur du groupe de Lie de dimension quatre qui combine $SU(2)$

DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME À LA GÉOMÉTRIE

La vision géométrique de la nature découle naturellement de l'organisation du monde qui nous entoure. Les exemples les plus simples et les plus familiers sont les forces électriques et magnétiques. Les étincelles électriques, l'attraction magnétique et la lumière laser sont différentes manifestations des champs électriques et magnétiques, définis en tout point

de l'espace et à tout instant. En fait, les physiciens pensent que tout dans l'Univers – toutes les forces fondamentales et toutes les particules élémentaires de matière – découle de différents types de champs. Le comportement de ces champs suggère l'existence d'une structure géométrique sous-jacente qui peut être décrite par des « groupes de Lie » ou des « fibres ».



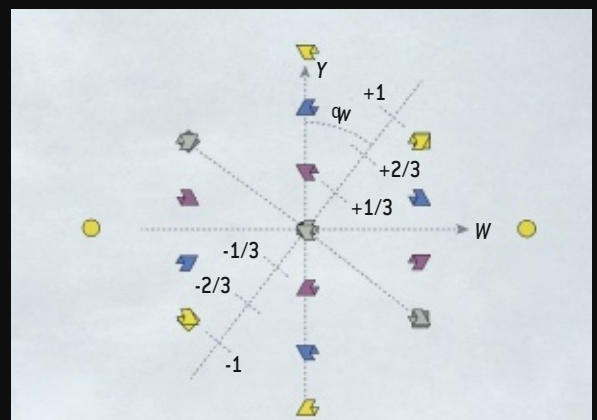
Un faisceau laser (a) est constitué d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui oscillent en se propageant (b) ; ils sont la manifestation d'un « champ de connexion » électromagnétique (c). Ce dernier décrit comment la fibre circulaire de l'électromagnétisme s'enroule autour de l'axe de propagation, un cercle différent

étant attaché à chaque point de l'espace-temps (d). La particule de lumière qu'est le photon correspond à des ondulations de ce cercle autour de l'axe du faisceau. Une particule chargée, un électron par exemple, correspond à une autre fibre qui s'enroule autour de la fibre circulaire de l'électromagnétisme.

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,