

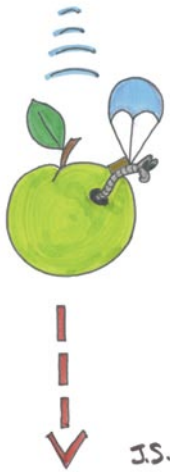


La question qui tue !

Peut-on (doit-on) tout unifier ?

L'union fait la force

La recherche d'une théorie « unifiée » décrivant toutes les interactions connues comme dérivant d'une seule interaction fondamentale anime nombre de physiciens. L'histoire des sciences est parsemée de telles unifications. Par exemple la chute des corps et le mouvement des planètes sont tous deux décrits par la seule gravitation universelle. On a mentionné dans « Théorie » l'unification des phénomènes électriques et magnétiques par Maxwell, mais il existe de nombreux autres exemples. Tous les phénomènes chimiques, toute la physique atomique et moléculaire, ainsi que la physique des solides, sont régies, au niveau le plus fondamental, par la seule interaction électromagnétique (ce qui ne rend pas pour autant les problèmes faciles à résoudre !). Toute la physique nucléaire et la physique des particules sont gouvernées par les interactions forte et électrofaible. Ajoutez à cela l'interaction gravitationnelle et vous avez virtuellement de quoi décrire essentiellement (bien que de façon compliquée) toutes les situations physiques connues. Par exemple, l'écoulement de l'eau dans un verre résulte in fine de la combinaison de l'interaction gravitationnelle et des interactions électromagnétiques entre les molécules d'eau.



Gravité

C'est bien sûr un des objets principaux de la Science que de mettre en relation des phénomènes apparemment dissemblables et de tenter de leur donner une explication commune : on cherche à décrire le plus de processus possibles en faisant aussi peu d'hypothèses que possible. Et ça marche ! C'est là un fait des plus remarquables et des plus fascinants. Derrière la multiplicité et la complexité des phénomènes que nous pouvons observer, se cache une certaine simplicité que les scientifiques essaient de découvrir. Ce sont les succès de cette vision analytique de la nature qui ont d'ailleurs incité à formuler la démarche scientifique sous sa forme contemporaine.

Toutes pour une...

Il est tentant de vouloir aller plus loin et de se demander si les quatre interactions connues ne sont pas, elles-mêmes, les différentes facettes d'un nombre plus restreint, voire d'une seule interaction fondamentale. C'est ce que l'on pourrait appeler une approche réductionniste.

Dans un premier temps, les physiciens ont cherché à unifier les interactions forte et électrofaible, qui ont de nombreuses similarités. En effet, elles reposent sur la même alliance de relativité restreinte, de mécanique quantique et de symétries, ce qui leur vaut le nom de « théories de jauge » (voir « Théorie »). Pour désigner cette unification des interactions forte et électrofaible, on parle de « théories de grande unification » (ou GUT pour « grand unified theories »). Outre la description des interactions actuellement observées, ces théories prévoient de nouvelles interactions, qui génèrent donc des processus spécifiques nouveaux...

Électro-
magnétique





Peut-on (doit-on) tout unifier ?

que l'on peut chercher à observer. Par exemple, dans la plupart de ces théories, le proton est une particule instable, qui peut se désintégrer en un électron et en deux photons (en fait, un électron et un pion neutre, qui se désintègre en deux photons). L'expérience SuperKamiokaNDE, qui a mis en évidence l'oscillation des neutrinos (voir Élémentaire N°5), avait, à l'origine, pour autre but de détecter d'éventuelles désintégrations de protons en observant une grande quantité de matière. Le fait qu'on n'en ait observé aucune à ce jour a permis d'exclure les modèles les plus simples de grande unification.

Bien sûr, l'unification des interactions est une idée séduisante, mais il faut rester ouvert et garder à l'esprit qu'il n'y a aucune garantie qu'elle soit vraie. En fait, à ce jour, il n'existe aucune indication expérimentale en ce sens. Les expériences menées jusqu'à présent montrent que, si le proton est instable, sa durée de vie est au moins de 10^{32} années, soit **10^{22} fois l'âge de l'Univers**. Mais les physiciens sont têtus et ne se découragent pas si facilement. La recherche de théories unifiées et de leur confirmation expérimentale est toujours un sujet de grande actualité.

... et une pour toutes ?

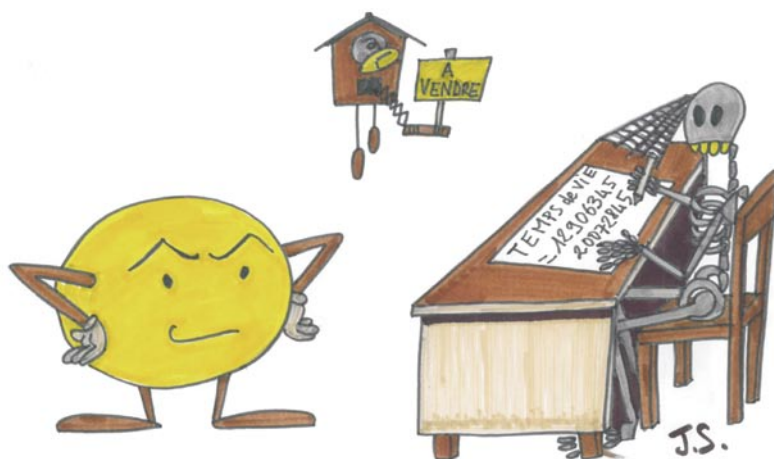
Il existe un autre type « d'unification » qui, contrairement au précédent, semble nécessaire, au moins d'un point de vue logique. Il s'agit de l'unification des concepts.

L'avènement de la mécanique quantique au début du siècle dernier a montré que les lois régissant les phénomènes microscopiques étaient fondamentalement différentes de celles du monde macroscopique « classique ». La séparation entre ces deux mondes est caractérisée par la constante de Planck \hbar , qui quantifie l'importance des effets quantiques. Formellement, la mécanique classique, celle de la « vie quotidienne », correspond à la limite $\hbar = 0$.

Quelques années plus tôt, en 1905, était née la théorie de la relativité restreinte, selon laquelle les lois de la physique « galiléenne » doivent être modifiées lorsqu'on considère des systèmes se déplaçant à des vitesses proches de celle de la lumière dans le vide, notée c . Les lois de la mécanique non-relativiste ne sont valables que pour des vitesses négligeables comparées à c . Elles correspondent formellement à la limite $c = \text{infini}$. Problème : la toute nouvelle mécanique quantique est intrinsèquement une théorie non-relativiste... et elle est incompatible avec la relativité restreinte !

10^{22} fois l'âge de l'Univers

Mais comment diable mesurer une durée de vie moyenne de 10^{32} années ? D'après la définition de la durée de vie moyenne (voir Élémentaire N°2), un proton aurait moins d'une chance sur 10^{32} de se désintégrer au bout d'un an. La solution ? Fastoche : il suffit d'observer un grand nombre de protons. Une tonne d'eau contient environ 7×10^{28} noyaux d'hydrogène (proton). On voit que pour avoir la chance d'observer ne serait-ce qu'une désintégration de proton par an, il faut tout de même quelques kilotonnes d'eau ! Pas si facile après tout. Par exemple, l'expérience SuperKamiokaNDE a surveillé de près 2,2 kilotonnes d'eau pendant plusieurs années.





Peut-on (doit-on) tout unifier ?

Longueur Compton

Pour se faire une idée, il est intéressant d'estimer la longueur Compton, en dessous de laquelle les effets quantiques et relativistes sont importants, pour différentes particules.

Par exemple, $L_{\text{electron}} = 2500 \text{ fm}$,
 $L_{\text{pion}} = 13 \text{ fm}$,
 $L_{\text{proton}} = 3 \text{ fm}$.

Que se passe-t-il si on sonde des distances inférieures à la longueur Compton d'une particule donnée ? Eh bien, pour une particule relativiste, cela correspond à des échelles de temps de l'ordre de $T = L/c$, ce qui, d'après la mécanique quantique correspond à des échelles d'énergies supérieures à $E = \hbar/T = M c^2$. Mais c'est justement l'énergie nécessaire (à un facteur deux près) pour créer des paires particules-antiparticules de masse M . Conclusion : sur des échelles de distance inférieures à la longueur Compton, une particule donnée n'apparaît plus comme un objet ponctuel élémentaire, mais entourée d'un nuage de paires particules-antiparticules (voir Élémentaire N°4).

D'un autre côté, il n'y a aucune raison a priori pour que des systèmes microscopiques (donc obéissant aux lois de la mécanique quantique) ne puissent être relativistes... c'est d'ailleurs le cas pour de nombreux constituants élémentaires de la matière étudiée au sein des accélérateurs de particules. Il apparaît donc nécessaire d'unifier les concepts de la mécanique quantique et de la relativité restreinte pour pouvoir décrire ces situations. Ici l'unification n'apparaît pas comme une hypothèse, un rêve de physicien, mais bel et bien comme une nécessité logique.

En effet, considérons une particule de masse M . En combinant les constantes fondamentales de la mécanique quantique et de la relativité restreinte avec M , on peut construire une échelle de longueur absolue $L = 2\pi\hbar/Mc$, appelée « **longueur Compton** » de la particule. Notons que ceci n'était possible ni en relativité « classique » (où la seule constante fondamentale à disposition est c), ni en mécanique quantique non-relativiste (où la seule constante utilisable est \hbar). On remarque que cette échelle absolue de longueur est nulle aussi bien dans la limite classique, $\hbar = 0$, que dans la limite non-relativiste, $c = \text{infini}$. Donc, tant que l'on ne sonde que des distances grandes devant L , on peut considérer que $L = 0$ et on peut négliger soit les effets relativistes, soit les effets quantiques, selon les cas. À l'inverse, il est clair que si l'on sonde des échelles de longueurs inférieures à L , on doit s'attendre à ce qu'aussi bien les effets quantiques que relativistes jouent un rôle important.

C'est Dirac qui, en 1932, pose les premières pierres de l'unification de la mécanique quantique avec la relativité restreinte, ce qui deviendra plus tard la « **théorie quantique des champs** ». Celle-ci est le cadre mathématique qui sert de base à la formulation du Modèle Standard des interactions forte et électrofaible.

C'est grave docteur ?

Et la gravité dans tout ça ? Eh bien, on a affaire à une situation analogue : la théorie de la gravitation universelle de Newton est incompatible avec la relativité restreinte. Or on peut imaginer des situations où le champ gravitationnel est si intense qu'on ne peut plus négliger les effets relativistes, comme par exemple au voisinage d'un trou noir. C'est ce qui a conduit Einstein à unifier gravitation et relativité restreinte dans la théorie de la relativité générale. Il ne reste donc plus qu'à inclure les effets quantiques et le tour est joué ! Hmm... le problème est qu'à ce jour personne ne sait formuler une telle théorie quantique de la gravitation.

Cependant, comme dans le cas précédent, on sait qu'une telle unification doit avoir lieu. En effet, la gravitation introduit une nouvelle constante fondamentale, la constante de Newton G . En combinant celle-ci avec les constantes \hbar (mécanique quantique) et c (relativité), on peut former une échelle de distance fondamentale – la même pour toutes les particules – appelée la longueur de Planck

$$L_p = \sqrt{\hbar G/c^3} = 1,6 \times 10^{-20} \text{ fm}$$



Forte



Peut-on (doit-on) tout unifier ?

ou, de façon équivalente, une échelle fondamentale d'énergie

$$E_p = \sqrt{\hbar c^5/G} = 10^{19} \text{ GeV.}$$

Pour des énergies inférieures à E_p , c'est-à-dire des distances supérieures à L_p , on peut considérer en pratique que $L_p = 0$, ce qui revient à prendre une des trois limites suivantes : $\hbar = 0$ (mécanique classique) ; $c = \text{infini}$ (mécanique non-relativiste); ou bien $G = 0$ (on néglige les effets gravitationnels). À l'inverse, si on sonde des échelles de distances inférieures à L_p , ce qui correspond à des énergies supérieures à E_p , on doit s'attendre à ce qu'aussi bien les effets relativistes, quantiques que gravitationnels jouent un rôle important. Il est alors nécessaire d'avoir une description unifiée de tous ces phénomènes.

Une telle description reste encore à inventer et c'est là une des questions majeures de la physique des hautes énergies. Des théories candidates ont été proposées, comme les théories de cordes et de supercordes, ou encore la gravité en boucles (« loop gravity »), mais aucune n'a reçu l'approbation unanime des physiciens pour le moment. Un des obstacles majeurs, outre le défi théorique que pose la construction d'une telle description, est qu'il est impossible à l'heure actuelle de tester directement ces théories. En effet, cela requiert des énergies plus de dix millions de milliards de fois plus élevées que celles que l'on est capable d'atteindre avec nos accélérateurs (si on prend 1 TeV comme l'énergie de référence de ces derniers). Ce n'est donc pas demain la veille !!!

Cependant, l'espoir de certains physiciens est que l'étude de l'Univers primordial, où les échelles d'énergies mises en jeu peuvent atteindre des valeurs colossales, pourrait fournir une fenêtre sur ces processus. Comme à l'époque de la découverte des rayons cosmiques les physiciens tournent leur regard vers le ciel et vers l'infiniment grand pour mieux comprendre et décrire plus simplement l'infiniment petit... Feront-ils ainsi quelques pas supplémentaires sur le chemin de l'unification ?



Théorie quantique des champs

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, les particules ne sont plus l'objet central de la description mathématique. Elles sont les excitations élémentaires d'un objet plus fondamental : le champ. Ce dernier est une fonction prenant des valeurs différentes en différents points de l'espace-temps. En guise d'illustration, on peut imaginer un « champ » qui mesure la hauteur de l'eau sur l'océan par rapport à un certain niveau de référence. Ce champ prend des valeurs différentes à différents endroits. Les excitations élémentaires de ce champ sont des vagues qui se propagent sur l'océan. En mécanique quantique, la hauteur des vagues ne peut prendre que certaines valeurs précises (on dit qu'elles sont « quantifiées ») et ces « vagues élémentaires » ne sont autres que les particules.

Il existe un type de champ pour chaque type de particule. Une conséquence remarquable de la théorie des champs est qu'elle permet d'expliquer pourquoi toutes les particules d'un même type (par exemple, tous les électrons de l'Univers) ont exactement les mêmes caractéristiques (masse, charge, etc...) : elles sont les excitations d'un seul et même champ (tout comme une vague sur l'Océan Indien n'est pas intrinsèquement différente d'une vague sur la Méditerranée).

Uni-
fication

