

Dans le modèle standard, l'intensité de chacune des quatre interactions dépend de certaines propriétés des particules, que l'on pourrait qualifier de «charges généralisées». Dans le cas de l'interaction électromagnétique, cette charge généralisée est tout simplement la charge de l'électron ; c'est la masse dans le cas de la gravitation. Dans le cas de l'interaction faible, la charge généralisée est la «charge faible» et, dans celui de l'interaction forte, c'est la «charge forte», que l'on nomme la «couleur». Si ces deux derniers termes nous semblent quelque peu abstraits, c'est que nous ne sommes pas confrontés au quotidien aux effets des interactions faibles et fortes !

Couplages variables

Les différentes charges associées aux interactions se mesurent en unités différentes ; la masse est mesurée en grammes, la charge électrique en coulombs. Toutefois, pour que l'on puisse comparer les différentes forces, les physiciens des particules utilisent des constantes de couplage sans dimension (c'est-à-dire préparées pour être sans unité) : plus une constante de couplage est grande, plus l'émission de particules intermédiaires est importante et plus l'interaction est forte. Comme nous allons le voir, ces constantes de couplage sans dimension ne sont pas des constantes fondamentales dont la valeur serait fixée : elles varient.

La constante de couplage de l'interaction électromagnétique est connue sous le nom de constante de structure fine de Sommerfeld. Sa valeur est d'environ $1/137$ aux énergies habituelles, une valeur notablement inférieure à 1. Sans une valeur aussi faible, les physiciens n'auraient pu appliquer la «méthode perturbative», la seule qu'ils ont trouvée pour résoudre les équations de la théorie quantique de l'électromagnétisme, nommée électrodynamique quantique. Les prédictions qu'ils ont faites grâce à la méthode perturbative sont si précises – 12 décimales après la virgule – que l'électrodynamique quantique est devenue la théorie la mieux vérifiée de toute la physique ! Impressionnés par ce succès, les physiciens des particules se sont inspirés de l'électrodynamique quantique quand ils ont construit les théories qui décrivent les quatre autres forces.

La masse des particules intermédiaires détermine la façon dont une interaction dépend de la distance (ou de l'énergie mise en jeu par l'interaction). Quand elle est nulle, comme c'est le cas pour le photon (la particule de l'interaction électromagnétique) et le graviton (la particule de l'interaction gravitationnelle), la portée de l'interaction est infinie. C'est ce qui explique que ces deux types de forces soient omniprésentes à l'échelle macroscopique, dans notre vie quotidienne. Les masses des bosons de l'interaction faible W et Z sont environ 100 fois supérieures à celle du proton. Pour cette raison, la portée de l'interaction faible n'excède pas le centième du diamètre du proton, c'est-à-dire environ 2×10^{-18} mètre.

Quant à la portée de l'interaction forte, elle est encore plus petite, de l'ordre du diamètre du proton, soit 10^{-15} mètre. Ce fait peut surprendre puisque les gluons ont, comme le photon ou le graviton, des masses nulles. Toutefois, il n'y a qu'aux distances très inférieures au diamètre du proton, que la constante de couplage de l'inter-

action forte devient très inférieure à 1. On peut alors, comme en électrodynamique quantique, considérer qu'une seule particule intermédiaire véhicule l'énergie de l'interaction. Les équations de la chromodynamique quantique (la théorie quantique des interactions fortes) se résolvent alors comme celles de l'électrodynamique quantique. En revanche, pour des distances supérieures, la multiplication des interactions des gluons accroît à tel point la constante de couplage de l'interaction forte, que les trois quarks vectoriels qui constituent le proton sont indissociables. Jusqu'à présent, les physiciens ne sont pas parvenus à expliquer de façon satisfaisante ce phénomène de «confinement» des quarks et des gluons au sein du proton. Ils pourraient y parvenir grâce aux nouveaux résultats qu'ils espèrent obtenir d'HERA.

Au sein d'HERA, lorsqu'un électron très énergétique heurte un proton, il émet une particule intermédiaire qui interagit avec les constituants du proton (il s'agit d'un photon ou d'un boson vectoriel). La quantité de



3. LE DÉTECTEUR ZEUS enregistre les particules issues des collisions entre les électrons et les protons de très haute énergie cinétique qui circulent dans HERA. Ultrasensible, ce détecteur haut comme une maison identifie les particules issues du choc en reconstituant leurs trajectoires.

mouvement (le produit de la masse par la vitesse) que ce messenger transfère détermine sur quelle distance l'interaction forte peut être étudiée. Plus la quantité de mouvement transférée est importante, plus la résolution spatiale du super microscope électronique est bonne. Dans la pratique, les énergies des faisceaux d'électrons et de protons sont choisies pour que le transfert de quantité de mouvement soit maximal. Grâce à celui atteint à HERA, la résolution sur les distances atteint 5×10^{-19} mètre. Ainsi, HERA permet l'exploration de distances cinq fois plus petites que la portée de l'interaction faible.

Pour chaque collision, la quantité de mouvement des particules intermédiaires se déduit de la mesure de l'énergie et de la déviation de la trajectoire de l'électron diffusé. Les détecteurs installés sur HERA permettront l'évaluation de l'intensité de l'interaction forte en fonction de la distance.

De la mesure des énergies et de la déviation des électrons diffusés, les physiciens savent aussi déduire quelle était la fraction de la quantité de mouvement du proton véhiculée par le quark avec lequel l'électron incident a interagi. Grâce aux énergies qu'atteignent les faisceaux de particules produits par HERA, on peut déceler avec une résolution de l'ordre de 5×10^{-16} mètre des quarks dont la quantité de mouvement n'excède pas 10^{-5} . Auparavant, seuls les quarks dont la quantité de mouvement était supérieure à 10^{-3} pouvaient être décelés. HERA donne aujourd'hui accès à un tout nouveau domaine de la physique.

La quête de la force originelle

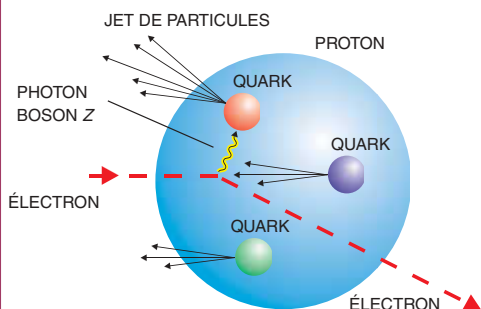
Qu'ont découvert les physiciens? Ils sont parvenus à mesurer l'intensité des interactions électromagnétiques et faibles au sein du proton en fonction de la distance. Ils ont établi que ces

deux interactions ont la même intensité quand les distances mises en jeu sont inférieures à la portée de l'interaction faible, et que la disparité aux distances supérieures résulte de la différence de masse entre les particules intermédiaires de ces deux interactions. Ainsi, les interactions faibles et électromagnétiques sont deux manifestations différentes d'une même force unique. Cette vérification expérimentale de la pertinence de l'idée d'unification est un résultat important.

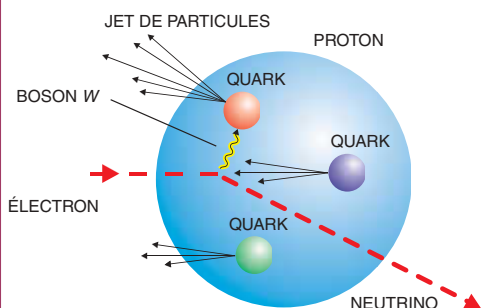
Comment pourrait-on progresser encore vers cette théorie unificatrice? Quand on extrapole les intensités mesurées pour les interactions fortes et électrofaibles vers les courtes distances, elles se rejoignent vers 10^{-29} mètre. Évidemment, on ne parviendra jamais à atteindre expérimentalement de telles distances : l'accélérateur qu'il faudrait construire serait plus grand que... la Voie lactée.

C'est pourquoi, seuls les théoriciens pourront établir la théorie de l'unifi-

L'unification des interactions faible et électromagnétique



Au cours des réactions à courants neutres, l'électron et le quark échangent des particules intermédiaires neutres : le photon, ou le boson Z^0 .



Au cours des réactions à courants chargés, l'électron et le quark échangent des particules intermédiaires chargées, les bosons W^+ et W^- .

Les expériences menées à HERA confirment que les interactions faible et électromagnétique sont deux facettes d'une même force, la force électrofaible. À HERA, les expérimentateurs mesurent deux types de collision : la collision à courants neutres et la collision à courants chargés.

Collisions à courants neutres :

Dans cette collision, un électron heurte un proton ; un électron est diffusé ainsi que d'autres particules. L'électron et les quarks du proton interagissent et les particules intermédiaires neutres mises en jeu sont soit un photon (lors de l'interaction électromagnétique) soit un boson Z^0 (lors de l'interaction faible). La fréquence avec laquelle les collisions à courants neutres se produisent reflète l'intensité des interactions électromagnétique et faible.

Collisions à courants chargés :

Dans cette collision, un électron heurte un proton ; un neutrino est diffusé ainsi que d'autres particules. Les particules intermédiaires mises en jeu sont les deux particules intermédiaires chargées de l'interaction faible, les bosons W^+ et W^- . La fréquence avec laquelle la collision à courants chargés reflète l'intensité des interactions électromagnétique et faible.

Dans chacune de ces collisions, un quark est «arraché», ce qui se traduit par la production d'un jet de particules. Les deux autres quarks continuent sur leur lancée et produisent eux aussi des jets de particules, qui ne laissent pas de traces dans le détecteur. Quand l'électron incident émet un photon ou un boson Z^0 , il est diffusé et peut-être mesuré dans le détecteur. En revanche, s'il émet un boson W chargé, l'électron se mue en un neutrino indétectable. Ce dernier traverse toute l'installation sans être perçu.

Les fréquences avec lesquelles ces deux réactions se produisent dépendent du transfert de la quantité de mouvement. Pour les faibles valeurs du transfert, lorsque la distance qui sépare l'électron du quark lors de la collision est grande, l'apparition de courants neutres est probable (l'interaction électromagnétique domine). Quand les transferts de quantité de mouvement sont grands, et que la distance entre l'électron et le quark est petite – inférieure à la portée de l'interaction faible –, les collisions à courants neutres sont aussi fréquentes que celles à courants chargés. L'interaction électromagnétique et l'interaction faible ont alors la même intensité : elles se fondent en une même interaction, l'interaction électrofaible.