

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

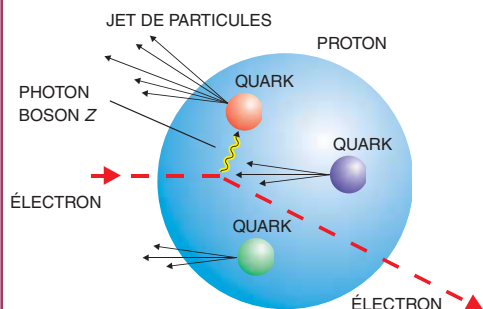
Qu'ont découvert les physiciens? Ils sont parvenus à mesurer l'intensité des interactions électromagnétiques et faibles au sein du proton en fonction de la distance. Ils ont établi que ces

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.

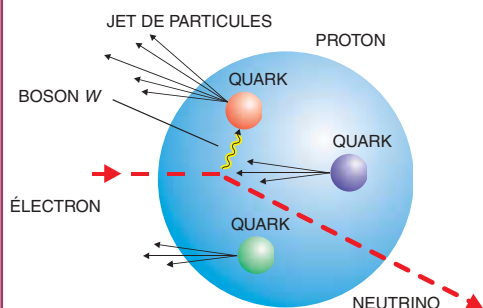
Comment pourrait-on progresser encore vers cette théorie unificatrice? Quand on extrapole les intensités mesurées pour les interactions fortes et électrofaibles vers les courtes distances, elles se rejoignent vers 10^{-29} mètre. Évidemment, on ne parviendra jamais à atteindre expérimentalement de telles 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.

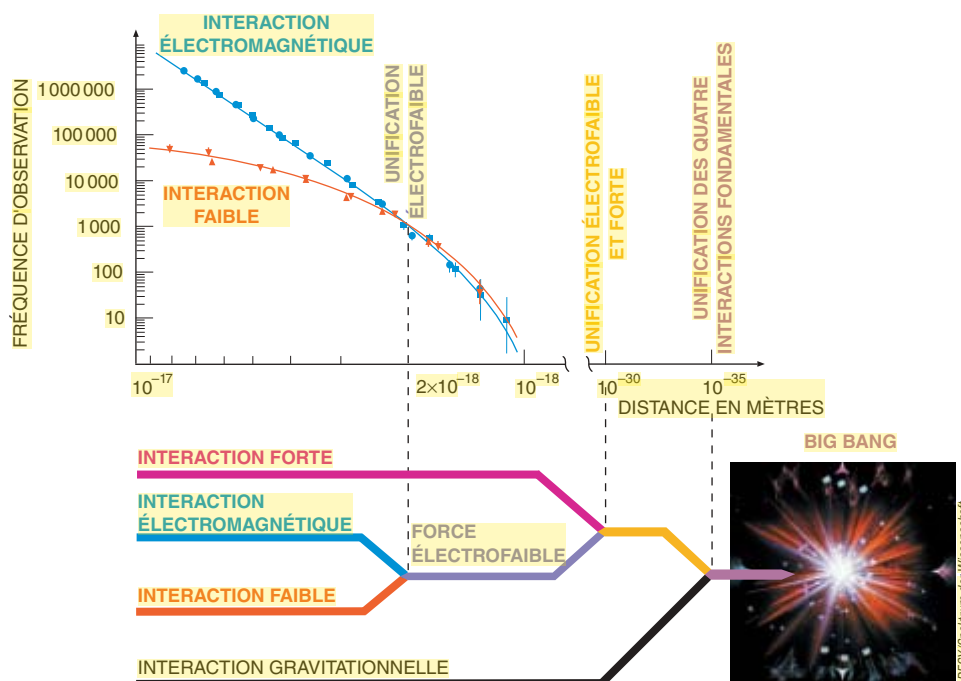
Les fréquences avec lesquelles ces deux réactions se produisent dépendent du transfert de la quantité de mouvement. Pour les faibles valeurs du transfert, lorsque la distance qui sépare l'électron du quark lors de la collision est grande, l'apparition de courants neutres est probable (l'interaction électromagnétique 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.

cation des quatre forces fondamentales. Aujourd'hui, la théorie la plus prometteuse est celle de la supersymétrie : chacune des particules élémentaires du modèle standard serait dotée d'un «compagnon supersymétrique». Ces derniers auraient été invisibles jusqu'à présent parce qu'ils n'interagiraient qu'à très haute énergie. Si cette hypothèse est pertinente, ces nouvelles familles de particules élémentaires seront détectables dans des accélérateurs plus puissants, tels le LHC (pour *Large Hadron Collider*), le grand collisionneur de hadrons en construction au CERN, près de Genève, et dans TESLA, un accélérateur linéaire d'électrons et de positons, dont la construction est prévue à Hambourg.

Les résultats obtenus à HERA confirment d'ores et déjà quelques-unes des hypothèses du modèle standard. Premièrement, les quarks et les électrons sont vraiment des particules ponctuelles, ou, du moins, leur diamètre ne dépasse pas un millième du diamètre du proton, soit 10^{-18} mètre. Aurions-nous enfin atteint la limite ultime de la démarche atomiste, qui nous a fait décomposer la matière en molécules, les molécules en atomes, les atomes en nuages électroniques et en noyaux, les noyaux en protons et en neutrons, et ces derniers en quarks ? Deuxièmement, nous pouvons exclure l'existence d'interactions fondamentales dont la portée excéderait 1 000 fois le rayon du proton. Troisièmement, en plus des trois dimensions d'espace qui nous sont familières, il ne peut en exister plus de trois autres, enroulées sur elles-mêmes, dont le rayon dépasserait 10^{-18} mètre (les physiciens supposent en effet qu'il pourrait exister des dimensions supplémentaires enroulées sur elles-mêmes suivant un certain rayon). Grâce aux transformations en cours sur HERA, la recherche de ces dimensions cachées sera bientôt possible avec une résolution spatiale meilleure encore.

Mer de quarks et de gluons

Malgré ces améliorations, les physiciens n'auront pas la possibilité d'observer à HERA l'unification de l'interaction forte et de l'interaction électrofaible. Toutefois, l'exploration de la structure du proton livre déjà des informations sur la nature de l'interaction forte. Ainsi les physiciens des



4. LES FRÉQUENCES de l'interaction électromagnétique et de l'interaction faible ont été représentées sur ce graphique. Quand les distances mises en jeu dans les collisions sont supérieures à la portée de l'interaction faible (2×10^{-18} mètre), l'interaction électromagnétique l'emporte sur l'interaction faible. Quand ces distances sont inférieures, les interactions électromagnétique et faible jouent des rôles comparables. Les deux interactions sont alors deux manifestations différentes d'une même interaction, l'interaction électrofaible. Pour des distances encore plus petites, les quatre interactions fondamentales de la nature s'unissent en une seule et même force originelle, qui aurait régné juste après le Big Bang (en bas).

expériences H1 et Zeus ont mesuré avec précision l'intensité de l'interaction forte entre quarks, et ont établi la loi qui lie la constante de couplage forte et la distance. Ces résultats ont confirmé ce que prévoit la chromodynamique quantique : la constante de couplage forte augmente très vite avec la distance.

Examinons une des méthodes de mesure employées. En plus des jets de particules émis lors de la diffusion d'un électron par un quark, un autre jet de particules, constitué de gluons est émis. Ces particules médiatrices de l'interaction forte sont émises au cours du choc avec une probabilité proportionnelle à la constante de couplage forte, c'est-à-dire à la «force» qui s'exerce entre les quarks. Les physiciens exploitent ces émissions de gluons pour déterminer comment la constante de couplage forte dépend de la distance. Ils mesurent la fréquence de ces émissions de gluons en fonction du transfert de quantité de mouvement. Leurs résultats confirment les prévisions de la chromodynamique quantique pour des distances comprises entre 10^{-16} et 10^{-18} mètre. Qu'elles aient été obtenues à HERA ou ailleurs, toutes les données coïncident avec ce que pré-

voit la théorie de la chromodynamique quantique, qui semble décrire correctement les interactions fortes.

HERA a été construit notamment pour explorer la structure du proton, objectif que les physiciens des expériences H1 et Zeus ont atteint aujourd'hui. Les incertitudes qui caractérisent les résultats de leurs études sont comprises entre deux et cinq pour cent, alors que les transferts de quantité de mouvement mis en jeu dans ces collisions couvrent plusieurs ordres de grandeur. Jamais des résultats aussi précis n'avaient été obtenus.

L'accélérateur permet aussi l'étude des transferts de petites quantités de mouvement, et les expérimentateurs ont eu la surprise de constater que le proton contient un très grand nombre de quarks et de gluons dont la quantité de mouvement est réduite. Dans les conditions d'observation ordinaires, on ne voit que les trois «quarks de valence», c'est-à-dire les trois quarks dont les quantités de mouvement sont importantes et qui sont à l'origine de la charge du proton. Toutefois, si l'on chausse des «lunettes» qui sélectionnent les seuls constituants dont la quantité de mouvement est inférieure à un pour cent de celle du proton, alors