



La question qui tue !

Les quarks sont-ils élémentaires ?

« Élémentaire mon cher Watson ! » Euh... oui, mais ça veut dire quoi au juste « élémentaire » ? Dans cette revue, il est naturel que nous nous posions cette question... existentielle.

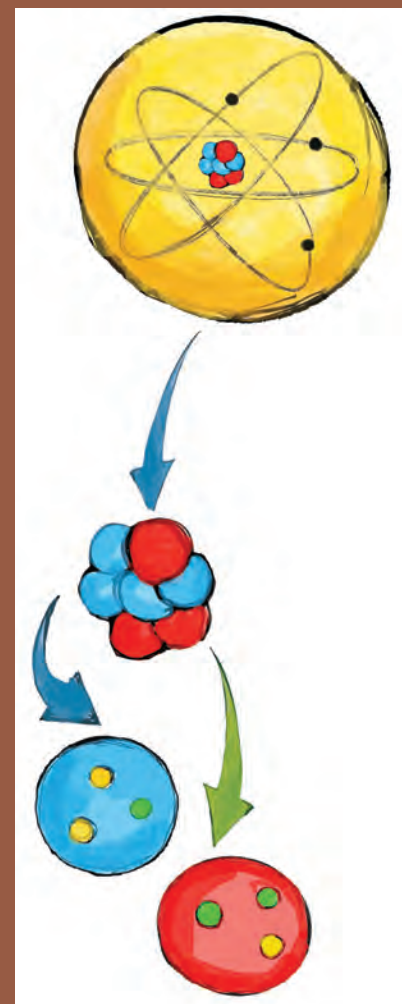
Les physiciens aiment bien comprendre, et expliquer si possible, la diversité et la complexité du monde qui nous entoure en termes d'objets et de notions de base « simples »... élémentaires. Nous savons aujourd'hui que toute la matière connue est composée d'atomes, qui sont eux-mêmes formés d'électrons et de noyaux, lesquels, à leur tour, sont des agencements de protons et de neutrons. Dans ce numéro, nous avons vu que ces derniers ne sont pas non plus des objets élémentaires, mais plutôt des objets composites, faits de quarks et de gluons. Jusqu'où cela s'arrêtera-t-il ? Y a-t-il une fin à cette descente dans le monde sub-atomique, sub-nucléaire, sub-nucléonique ? Nul ne le sait à l'heure actuelle. Il n'est d'ailleurs pas clair que cette question ait une réponse. Ce qui est sûr en revanche, c'est que les notions d'objet composite et de particule élémentaire ont été profondément modifiées au fur et à mesure de ces découvertes.

Réduire la matière en miettes

Commençons notre descente dans l'infiniment petit avec un atome. Pour savoir de quoi il est composé, une méthode consiste à le casser et à « compter » les morceaux. Pour cela, il faut lui fournir de l'énergie, par exemple à l'aide d'un choc avec une autre particule. A basse énergie, on a un choc élastique et notre atome reste intact. En augmentant progressivement l'énergie de la collision, on finit par réussir à le casser. Tant que l'énergie fournie est suffisamment faible, les morceaux que nous obtenons sont invariablement des électrons et un noyau. En faisant quelques (bons) comptes, on trouve que la masse de l'atome initial est approximativement égale à la somme des masses de ses constituants. De même, sa charge électrique est égale à la somme des charges de l'électron et du noyau. Il est alors naturel de conclure que notre atome est bien constitué d'un noyau et d'électrons.

On peut reprendre l'expérience avec le noyau atomique. En lui fournissant suffisamment d'énergie, on arrive à le briser en protons et en neutrons. Là encore, les propriétés globales du noyau se comprennent à partir de celles de ces nucléons, d'où on peut conclure que le noyau est bien constitué de ces derniers.

Mais arrêtons-nous un instant sur cette conclusion. Dans les deux cas précédents, la charge électrique de l'objet composite est exactement égale à la somme des charges des constituants (électrons et noyau de l'atome, protons et neutrons du noyau). Rien de mystérieux là-dedans : c'est simplement une conséquence de la loi de conservation de la charge électrique. Mais qu'en est-il pour la masse de l'objet composite, qui, elle, n'est qu'approximativement égale – et en fait légèrement inférieure – à la somme des masses des constituants ? Ici aussi une loi de conservation est à l'oeuvre : celle de l'énergie.



Quand on regarde la matière à des échelles de plus en plus petite, on « voit » l'atome (en haut et en jaune) composé d'électrons et d'un noyau (au milieu). Ce noyau est constitué de protons (en rouge) et de neutrons (en bleu). Ceux-ci sont formés de quarks et de gluons.



Les quarks sont-ils élémentaires ?

Masse et énergie de repos

La masse m , l'énergie E et l'impulsion p d'une particule satisfont la relation proposée par Einstein :

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

où c est la vitesse de la lumière dans le vide. Ainsi, une particule au repos ($p=0$) a une énergie – de repos – non nulle, proportionnelle à sa masse

$$E = mc^2.$$

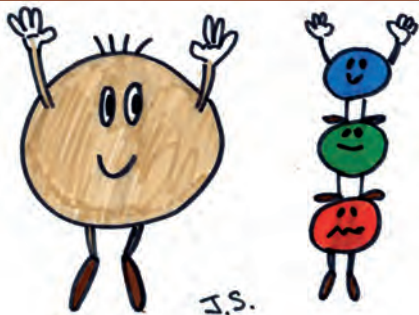
En vertu de l'équivalence entre masse et énergie – conséquence de la relativité restreinte – cette différence de masse correspond à la différence entre l'**énergie de repos** de l'objet composite et la somme des énergies de repos des constituants « séparés ». L'énergie manquante n'est autre que ce qu'il a fallu fournir pour vaincre l'interaction qui maintient les constituants ensemble et briser ainsi l'atome ou le noyau. On l'appelle « énergie de liaison ». Dans les cas de l'atome et du noyau, celle-ci est très petite devant l'énergie de repos de l'objet composite. Cela explique que la somme des énergies de repos (et donc des masses) des constituants soit approximativement égale à celle de l'objet composite, qu'on appelle « état lié ». Cette quasi-égalité justifie notre image d'un atome constitué d'électrons et d'un noyau. On peut procéder de même avec le noyau, constitué de protons et de neutrons liés par une force nucléaire résiduelle. En fait, c'est sur cette quasi-égalité qu'est basée l'image habituelle, classique, d'un objet composite : un objet que l'on peut briser en morceaux.

Un proton haut comme trois... quarks

Que se passe-t-il si on essaye de casser un proton ou un neutron pour voir de quoi il est fait ? La situation change complètement : l'énergie à fournir pour casser un de ces nucléons en morceaux n'est pas négligeable quand on la compare à son énergie de repos. En fait, cette énergie est si élevée qu'elle donne lieu à la création de nouvelles particules, de sorte que, contrairement au cas de l'atome ou du noyau, les morceaux que l'on ramasse après la collision ne sont pas les mêmes d'une collision à l'autre. Difficile dans tout ça de faire le tri entre les composants éventuels du nucléon qui a été brisé et les nombreuses particules qui ont été créées.

Mais alors, comment savoir de quoi est constitué un proton ? Comme nous l'avons vu dans la rubrique « Expérience », cela nécessite une analyse détaillée des caractéristiques (masses, charges, énergies, etc.) des particules produites dans diverses collisions permettant de le briser. Par exemple, ce type d'étude a démontré que le proton est en fait un assemblage de quarks, d'antiquarks et de gluons, lesquels n'apparaissent pourtant jamais en tant que tels dans les débris de la collision. On est loin du cas simple de l'atome ou du noyau, où les constituants étaient facilement libérés lors d'un choc.

De plus, dans ce cas, les masses – et donc les énergies de repos – des constituants sont très petites devant celle de l'objet composite. La majeure partie de l'énergie de repos de ce dernier est donc due à l'énergie de liaison : les constituants d'un proton interagissent fortement les uns avec les autres, par le biais d'une interaction qualifiée fort justement de... forte ! On comprend alors pourquoi l'énergie à fournir pour briser notre proton est si élevée. Dans une telle situation, nous perdons certains de nos repères, puisque les propriétés d'un objet composite peuvent s'avérer assez éloignées de celle de ses constituants.





Les quarks sont-ils élémentaires ?

Mais d'où vient la différence essentielle entre le cas du proton et ceux de l'atome ou du noyau ? Elle est due à la nature de l'interaction qui lie les constituants de ces objets. Comme nous l'avons vu dans la rubrique « Théorie », l'interaction forte entre quarks, qui assure la cohésion du proton, possède la propriété particulière d'être confinante : la force entre deux quarks augmente avec la distance qui les sépare. Ni l'interaction électromagnétique, qui assure la cohésion de l'atome, ni l'interaction forte entre nucléons, qui lie ces derniers au sein du noyau atomique, ne partagent cette propriété. C'est pourquoi le proton, ou tout autre assemblage de quarks, est un objet composite bien différent de ceux auxquels nous sommes habitués.

Alors... élémentaire or not élémentaire ?

Mais au fait, nous avons cassé l'atome, puis son noyau, puis les constituants de celui-ci. Que peut-on dire de l'autre constituant de base de l'atome initial : l'électron ? Est-il, lui aussi, un objet composite ? Ou bien est-il une particule élémentaire ? Pour répondre à cette question, il faut d'abord comprendre la différence entre les deux.

En physique classique, la notion de particule élémentaire est définie par opposition à celle d'objet composite : c'est un objet insécable, qu'on ne peut ni briser, ni faire disparaître dans aucune réaction. La relativité restreinte vient modifier cette image simple car elle rend possibles certaines réactions où deux particules disparaissent en combinant leurs énergies de repos pour créer de nouvelles particules. On parle de réactions d'annihilation. Par exemple, on peut bombarder notre électron avec un positron et le faire disparaître par annihilation, mais sans pour autant le briser.

Existe-t-il un moyen de faire disparaître l'électron dans une réaction qui ne soit pas une annihilation ? Oui ! On peut par exemple le bombarder avec un antimuon pour obtenir un neutrino électronique et un antineutrino muonique. Mais alors, doit-on en conclure que l'électron est composite ? Non ! L'analyse de cette réaction montre que l'électron n'a pas été brisé (ni l'antimuon d'ailleurs), mais a plutôt été converti en neutrino électronique (et l'antimuon en antineutrino muonique). L'électron est bien une particule élémentaire.

Réalité virtuelle... et vice-versa

Mais attention ! Être une particule élémentaire ne signifie pas être un objet ponctuel dépourvu de toute structure... En effet, nous sommes dans un domaine de la physique où mécanique quantique et relativité restreinte conjuguent leurs efforts pour compliquer toujours un peu plus notre vision de la matière... Les théoriciens du XX^{ème} siècle, qui ont combiné ces deux théories, ont obtenu des résultats assez surprenants, parmi lesquels le fait qu'une particule élémentaire peut fort bien adopter des visages



Les quarks sont-ils élémentaires ?

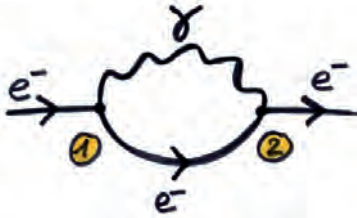


Figure 1 : un électron (e^-) émet un photon virtuel (γ) en ① et le réabsorbe en ②.



Figure 2 : un photon (γ) se désintègre, en ①, en une paire virtuelle électron-positron ($e^- - e^+$), laquelle s'annihile en ② pour redonner un photon.

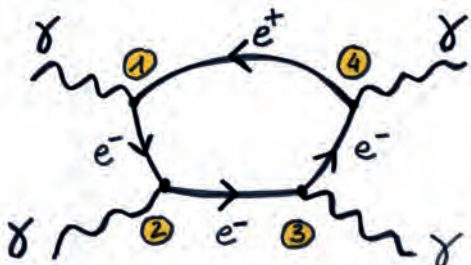


Figure 3 : diffusion photon-photon résultant de l'existence de fluctuations virtuelles.

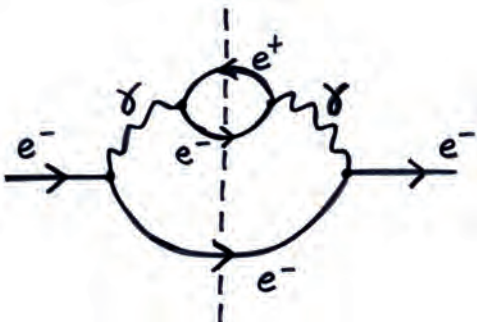


Figure 4 : un électron contient virtuellement des particules de charge positive (ici un positron).

très différents, et apparaître sous forme d'un état lié d'autres particules élémentaires. On parle de fluctuations quantiques de la particule.

Par exemple, un électron peut émettre un photon pour le réabsorber ensuite, selon le processus représenté sur la figure 1 ci-contre. Dans cette réaction, l'état intermédiaire contenant un électron et un photon n'est pas observé : on parle d'un état **virtuel**, ou encore d'une fluctuation quantique virtuelle de l'électron. Un autre exemple est représenté sur la figure 2, où un photon se convertit en une paire électron-positron.

Mais si ces états virtuels ne peuvent être observés directement, ils ont des effets physiques bien tangibles. L'exemple de la figure 2 montre que le photon est virtuellement composé de deux particules chargées, de charges égales et opposées. Il est donc susceptible d'interagir avec un autre photon selon la réaction de la figure 3 où, dans un premier temps, un des photons devient une paire formée d'un électron et d'un positron ① ; puis l'autre photon interagit avec l'électron selon un processus appelé diffusion Compton ② et ③; enfin, l'électron diffusé et le positron s'annihilent pour donner un nouveau photon ④. Au final, on obtient une collision élastique entre deux photons, c'est-à-dire une réaction de diffusion de la lumière par la lumière. Un tel phénomène, pourtant bien réel, est interdit par les lois de la physique classique. Il n'est rendu possible que grâce aux effets de fluctuations quantiques... virtuelles.

De même, l'électron peut fort bien exister sous la forme d'un état lié de trois particules chargées, à savoir deux électrons et un positron (figure 4). L'électron, particule élémentaire de charge électrique négative, contient donc virtuellement des particules de charge électrique positive ! On vous l'avait dit : la notion de particule élémentaire a considérablement évolué avec l'exploration du monde subatomique.

Mais au fait, nous avons déjà rencontré ces fluctuations quantiques virtuelles : ce sont elles qui sont responsables de la présence des quarks de la mer dans le proton. Les quarks de valence (uud dans le cas du proton) interagissent par le biais de gluons, lesquels peuvent fluctuer en paires quarks-antiquarks. Un électron passant par là pour sonder la structure du proton sera sensible, non seulement aux quarks de valence, mais aussi aux quarks et antiquarks de la mer (voir « Expérience »).

Une composition bien équilibrée

Vous l'aurez compris, dans le monde des particules, savoir si un objet peut être considéré comme élémentaire ou non n'est pas une tâche aisée. Cela nécessite une analyse de l'objet en question sous toutes les coutures ! Ainsi, toutes les expériences menées jusqu'à présent sont en accord avec l'image d'un électron ponctuel, sans contenu interne, mais susceptible de passer par des états virtuels contenant d'autres particules élémentaires du Modèle Standard. En revanche, les expériences menées sur le proton dans les années 50 ont rapidement invalidé un modèle ponctuel du proton,



Les quarks sont-ils élémentaires ?

même en tenant compte d'effets liés aux états virtuels

Il est important de souligner que la réponse à la question : « composite ou élémentaire ? » dépend aussi de façon cruciale de notre capacité à sonder la matière à des échelles toujours plus petites, ce qui nécessite des énergies toujours plus élevées. À ce jour, sont considérées comme particules élémentaires :

- le photon (interaction électromagnétique), les gluons (interaction forte), les bosons Z et W (interaction faible),
- les six quarks u,d,s,c,b,t,
- l'électron, le muon, le tau et les neutrinos associés (on les appelle les leptons),
- ainsi que leurs antiparticules respectives.

Les héros de ce numéro, les quarks et les gluons, sont donc, jusqu'à preuve du contraire, des particules élémentaires... mon cher Watson !

Réel et virtuel

L'énergie de repos d'une particule réelle est proportionnelle à sa masse, ce qui n'est pas le cas pour une particule dans un état virtuel. Autrement dit, la masse m , l'énergie E et l'impulsion p d'une telle particule ne satisfont pas la relation d'Einstein :

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

Ainsi, lors de la conversion d'un électron en une paire électron-photon, l'électron cède une partie de son impulsion et de son énergie au photon, de sorte qu'il devient virtuel.

Composants élémentaires de la matière

10⁸ m TERRE

1 m OBJET

10⁻⁵ m CRISTAL

10⁻¹⁰ m ATOME

10⁻¹⁴ m NOYAU ATOMIQUE

10⁻¹⁵ m PROTON

NEUTRON

ANTI-MATIÈRE

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
<p>Les membres de la 1^{re} famille composent l'essentiel de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...)</p>	<p>Élémentaire plus massive et instable de la 2^e famille. Le muon est un peu plus lourd que l'électron.</p>	<p>Élémentaire encore plus massive et instable de la 3^e famille. Le tauon est un peu plus lourd que le muon.</p>
<p>e électron</p> <p>ν_e neutrino e</p>	<p>μ muon</p> <p>ν_μ neutrino muon</p>	<p>τ tau</p> <p>ν_τ neutrino tau</p>
<p>u haut / up</p> <p>d bas / down</p>	<p>c charm / charme</p> <p>s strange / étrange</p>	<p>t top</p> <p>b beau / beauty / bottom</p>

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

Les interactions fondamentales

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

<p>Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?</p>
<p>Interaction faible Désintégrations radioactives. Z⁰, W⁺, W⁻</p>
<p>Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON</p>
<p>Interaction forte Cohésion des protons et des neutrons. GLUON</p>

Les 4 forces fondamentales sont indépendantes les unes des autres (sauf le cas de la gravitation) et interagissent avec l'interaction faible et forte.

Les 3 particules de la première famille ont pour masse dans le vide 0 qui équivaut à la somme de leur somme de photons, et de neutrinos.

L'affiche des composants élémentaires de la matière distribuée dans les classes de lycées en 2005 à l'occasion de l'année mondiale de la physique.