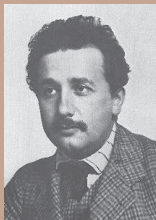




La question qui tue !

Qu'est-ce que la masse?

C'est à la suite d'une étude sur l'électrodynamique qu'**Albert Einstein** (1879-1955) réalisa qu'un corps émettant une énergie E (par exemple sous forme de lumière) devrait voir sa masse diminuer



d'une quantité égale à E/c^2 . Il proposa d'essayer d'observer cet effet avec le radium récemment découvert et qui émettait un rayonnement intense. Le coefficient de proportionnalité (c^2) entre la masse et l'énergie est une conséquence du principe de relativité.

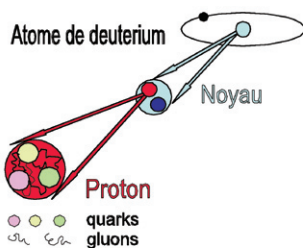


Schéma de la sous-structure d'un atome.

La réponse qui achève

Dans la vie courante, le terme de masse recouvre différentes notions : on dit de quelqu'un qu'il est massif s'il est volumineux, on dit de l'or qu'il est massif lorsqu'il titre 24 carats, on dit d'une essence de bois qu'elle est massive (comme l'orme massif) lorsqu'elle est non-agglomérée, etc... Mais de façon intuitive, on associe la masse d'un objet à l'inertie qu'il présente à toute modification de son mouvement : plus un objet est massif, plus il sera difficile de modifier sa trajectoire. Ainsi, un simple coup de pied dans un ballon de football le fera s'envoler vers les buts. Le même geste sur une voiture n'aura comme effet que de provoquer de grosses douleurs au pied. Ceci s'explique évidemment par le fait que le ballon est suffisamment léger pour qu'un coup de pied le mette en mouvement, tandis que la voiture est beaucoup trop massive par rapport à la force du même geste.

Mais, en termes scientifiques, qu'est-ce que la masse ? Comment peut-on se représenter la masse des atomes, ou celle des particules élémentaires ? D'où provient-elle ? Est-elle altérée par le mouvement de ces mêmes particules ?

La masse : un immense réservoir d'énergie

La masse correspond à l'énergie interne des objets et elle ne varie pas avec leur vitesse. Cette équivalence entre la masse et l'énergie d'un corps au repos a été découverte par **Albert Einstein** en 1905 lors de la formulation de la théorie de la relativité restreinte. Il s'agit de l'expression célèbre :

$$E=mc^2$$

où l'énergie d'un objet au repos, E , est égale à la masse m multipliée par le carré de la vitesse de la lumière c .

Tout le monde a l'expérience de ce qu'est la masse d'un objet à travers son poids. La masse est alors considérée comme étant additive. Par exemple, si vous vous pesez avec vos chaussures vous trouvez que l'indication de la balance correspond bien à votre poids, augmenté de celui de vos souliers. Cependant, pour des objets plus petits, formés de constituants plus élémentaires et en interaction, la masse totale n'est plus simplement la somme des masses des constituants mais elle contient aussi les énergies correspondant aux différents mouvements internes au système (rotations, vibrations, ...).

Prenons l'exemple d'un atome d'hydrogène (H), qui est un système lié formé d'un proton (p) et d'un électron (e), la masse vaut :

$$M_H = m_p + m_e - \text{énergie de liaison}$$

On observe ici que l'énergie de liaison se soustrait de la somme des masses des composants. Le fait que l'hydrogène ait une masse plus petite que ses constituants est à l'origine de sa stabilité : telle une bille qui ne s'arrête de rouler que si elle atteint le bas de la colline (où l'énergie potentielle est minimale), un atome fraîchement créé ne sera stable que si son énergie est plus faible que celle du noyau et des électrons qui le composent.



Qu'est-ce que la masse ?

Si l'on remplace les différents termes par leur valeur, on trouve que l'énergie de liaison ne correspond qu'à une correction d'une partie pour cent millions (1/100 000 000) environ. Certains vont sans doute penser que tout cela correspond à beaucoup de bruit pour pas grand-chose, puisque cette énergie minimale est de l'ordre de quelques électron-Volts par atome (13,6 précisément pour l'hydrogène). Bien que correspondant à une différence de masse très faible, cette énergie de liaison est tout à fait conséquente puisqu'elle produit à elle seule toute l'énergie libérée lors des réactions chimiques (chauffage, explosion de dynamite...). Le fait que de très faibles différences de masse puissent conduire à de grandes variations d'énergie provient du terme de la vitesse de la lumière élevée au carré dans l'équation d'Einstein. Numériquement, on trouve qu'un kilogramme de matière contient autant d'énergie que celle produite, pendant une année, par une centrale fournissant 3GW !

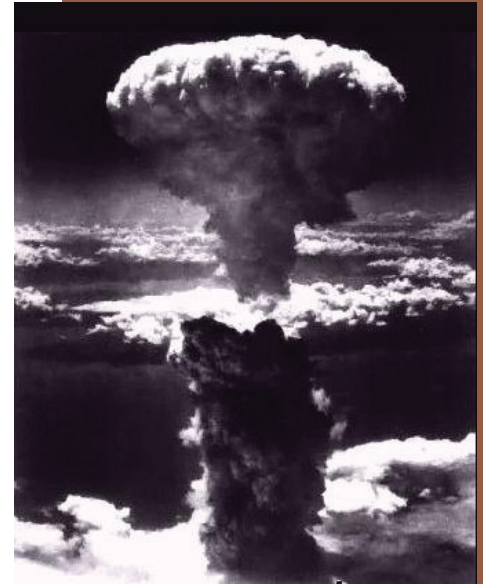
De fait, de si faibles différences de masse étaient passées inaperçues aux yeux des chimistes qui avaient noté que le poids des substances de départ, dans une réaction chimique, était égal au poids des substances résultantes. C'était le célèbre : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » de Lavoisier.

Passons maintenant aux noyaux qui sont des états liés formés de protons (p) et de neutrons (n). Le plus simple d'entre eux est celui du deutérium (D) constitué d'un proton et d'un neutron. Dans ce cas :

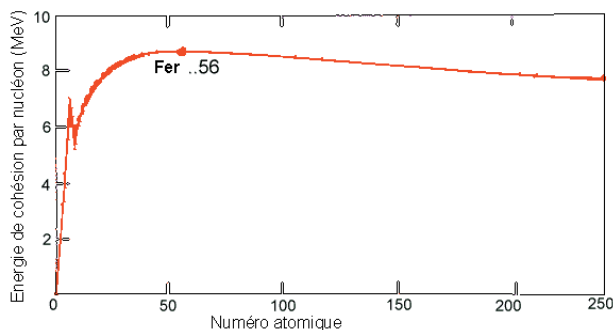
$$M_D = m_p + m_n - 2,2 \text{ MeV}$$

La correction est maintenant voisine de 1/1 000, soit cent mille fois plus grande que dans le cas des atomes. Ceci donne une idée de la différence d'ordres de grandeur entre l'énergie chimique et l'énergie nucléaire.

Cette possibilité de libérer de l'énergie à partir de réactions entre noyaux fut remarquée dans les années 30 par les scientifiques allemands Lise



La première bombe nucléaire appelée « Trinity » a été testée dans le désert du Nouveau Mexique le 16 Juillet 1945. Cet essai faisait partie du projet Manhattan qui a mené à la construction de « Little Boy » et de « Fat man », les bombes atomiques qui ont détruit un mois plus tard Hiroshima et Nagasaki, les 6 et 9 août respectivement. Ces deux bombes qui utilisaient près d'un kilo d'uranium pour l'une et un kilo de plutonium pour l'autre, ont libéré en explosant une énergie équivalente à 15 000 et 20 000 tonnes de TNT respectivement.



Variation de l'énergie de liaison d'un nucléon au sein d'un noyau, en fonction du nombre atomique. Le point rouge correspond au cas du Fer (Z=56) pour lequel cette valeur est maximale. En dessous du fer, la cohésion augmente avec Z, ce qui montre que de l'énergie peut-être libérée si deux noyaux légers se combinent pour former un seul noyau de masse moyenne (c'est la fusion nucléaire). Au contraire, à grand Z, la liaison entre nucléons diminue quand Z augmente : de l'énergie peut ainsi être libérée par la fission d'un noyau lourd en deux noyaux plus petits (c'est la fission nucléaire, utilisée dans les centrales nucléaires pour produire de l'énergie, voir la rubrique «Énergie»).



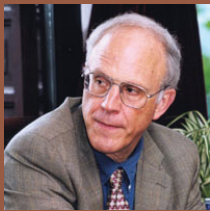
Trinity : la toute première bombe au plutonium



Qu'est-ce que la masse?

Prix Nobel 2004

En octobre 2004, le prix Nobel de physique a été décerné à D. Gross, H. D. Politzer et F. Wilczek pour leur contribution décisive à la description théorique de la force forte. Cette théorie, connue sous le nom de Chromodynamique Quantique (QCD), explique l'attraction augmentant avec la distance entre les quarks



© WGBH/NOVA

D. Gross : directeur de l'Institut de Physique Théorique KAVLI, Université de Californie, Santa Barbara, USA.



© The Nobel Foundation

H. D. Politzer, Institut de Californie, CALTECH, Pasadena, USA.



© Donna Coveney

F. Wilczek, MIT, Cambridge, USA.

Meitner, Otto Hahn et Fritz Strassmann. Elle a été exploitée pour la production d'énergie nucléaire civile mais aussi –malheureusement– pour la fabrication des bombes nucléaires.

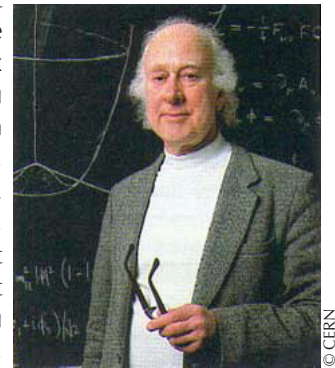
Mais que se passe-t-il dans le proton ?

Poursuivant notre progression vers l'intérieur du noyau, nous arrivons maintenant au proton. Celui-ci n'est pas élémentaire : il est composé de trois quarks et doit son existence à la force dite « forte » qui retient les quarks ensemble. Cette interaction est différente des autres forces connues (électromagnétique, faible et gravitationnelle) puisqu'elle augmente avec la distance ! Pour cette raison on ne peut pas disposer de quarks libres pour mesurer leur masse : plus on essaie de les éloigner les uns des autres afin de les séparer, plus ils s'attirent. Si on arrive à casser le proton en lui envoyant un projectile, on libère les quarks qui « s'habillent » immédiatement en particules plus complexes.

On arrive néanmoins à mesurer la masse des quarks par des moyens indirects et à l'aide de calculs théoriques. On trouve alors que la somme des masses des quarks composant le proton représente à peine 5% de sa masse. Le reste provient des médiateurs de la force forte responsable de la cohésion du proton, les gluons, qui pourtant sont sans masse !

Mais alors : pourquoi le proton ne cherche-t-il pas à se casser en trois quarks qui ont une énergie (masse) totale plus faible comme dans le cas d'un atome ? C'est à cause du caractère très particulier de la force forte qui retient les quarks collés ensemble (voir encadré **Prix Nobel 2004**)

Notre voyage se termine au niveau des quarks et des leptons (électron, neutrino..) dont on pense actuellement que ce sont des objets fondamentaux (non constitués de briques plus élémentaires). D'où vient alors leur masse ? Répondre à cette question est un des objectifs principaux du programme LHC, actuellement en cours de construction au CERN. Pour expliquer la variété des masses de particules, il existe des modèles théoriques qui postulent l'existence d'une (des) particule(s) qu'il resterait à découvrir : le(s) boson(s) de **Higgs**, du nom du physicien écossais qui l'a proposé. Il faut retenir ici, que son existence éventuelle constitue la source génératrice des masses de toutes les particules qui remplissent l'Univers.



© CERN

Peter Higgs

Mécanisme de Higgs

La masse d'une particule élémentaire proviendrait de son interaction permanente avec un champ bien particulier, le champ de Higgs (du nom de Peter Higgs, physicien écossais, qui l'a proposé) qui remplirait tout l'espace. C'est parce que cette interaction est plus ou moins forte que la particule qui baigne dans ce champ est plus ou moins massive. Ce mécanisme peut se visualiser à travers des phénomènes bien connus : un électron traversant un morceau de cristal subit le champ cristallin et sa masse apparente se trouve multipliée par un facteur allant jusqu'à 40 ! De même, une bille posée à la surface d'un liquide coule plus ou moins vite suivant la viscosité de celui-ci comme si sa masse initiale en était affectée.