ABPPC – Bulletin 51-198-2013, p. 26-37

# Aux sources de la masse[1]

Tous les objets matériels[2] possèdent une masse. Cette propriété semble si naturelle qu'on se pose rarement la question de son origine. Pourtant, la physique moderne a réussi à mettre en évidence un certain nombre de mécanismes responsables de la masse des atomes. La toute récente découverte du boson scalaire de Brout-Englert-Higgs est venue confirmer de manière magistrale un élément clé de ces théories. Le but de ce texte est d'expliquer, au moyen de modèles simples, les deux mécanismes qui sont au cœur du problème : les interactions nucléaires qui donnent leur masse aux protons et neutrons composant les noyaux atomiques ; le champ associé au boson scalaire qui confère une masse aux constituants les plus élémentaires de la matière.

**Tout est masse…**

Selon Newton, la masse d'un corps est une mesure de sa quantité de matière. C'est une propriété intrinsèque du corps, une grandeur conservée et une source de gravitation. Dans ce texte, nous ne parlerons pas de cette dernière propriété. Nous ne considérons donc ici que ce que l'on appelle communément la masse inerte, c'est-à-dire la propriété qui contrôle la manière dont les corps réagissent aux forces qui tendent à modifier leur état de mouvement. La quantité de matière n'est cependant pas facile à mesurer (ni même à définir). Une bien meilleure manière d'introduire la masse $m$ d'un corps est de la relier à des grandeurs plus facilement mesurables :

- La quantité de mouvement $\vec{p} = m\vec{v}$, où $\vec{v}$ est la vitesse du corps, est la grandeur modifiée par l'action d'une force $\vec{F} = d\vec{p}/dt$.
- L'énergie cinétique $E = \frac{1}{2}m\vec{v}^2$ mesure l'énergie d'un corps due à sa vitesse.

Pour un système isolé, ces deux grandeurs sont conservées, ce qui leur confère une grande importance physique.

**Tout est énergie…**

La théorie de Newton restera incontestée pendant plus de deux siècles, engrangeant des succès extraordinaires : la description du mouvement des planètes, la prédiction du retour des comètes, le fonctionnement des machines (avec l'aide de la thermodynamique), etc. Mais dès la fin du 19e siècle, la physique va se trouver confrontée à de terribles difficultés qui ne seront résolues que par l'apparition d'une toute nouvelle théorie, la relativité restreinte, établie par Albert Einstein en 1905. Les conséquences de cette théorie sont extraordinaires : relativité de la simultanéité, dilatation du temps, contraction des longueurs, structuration de l'univers en espace-temps et surtout – ce qui nous intéresse au plus haut point – de nouvelles lois de la dynamique. La quantité de mouvement relativiste s'écrit ainsi [1]

$$\vec{p} = m\vec{v}\frac{1}{\sqrt{1-\vec{v}^2/c^2}}\,. \qquad (1)$$

[1] Ce texte est le compte-rendu d'un exposé donné le 19 mars 2013 au Palais provincial de Namur dans le cadre d'un cours-conférence organisé par le Collège Belgique.

[2] Une particule est dite « matérielle » s'il est toujours possible de définir, au moins instantanément, un référentiel d'inertie dans lequel cette particule est au repos. Cela implique que le photon n'est pas une particule matérielle car sa vitesse $c$ est la même dans tout référentiel d'inertie.

On reconnaît la forme classique (non relativiste) corrigée par un facteur qui dépend de la vitesse de la lumière dans le vide $c$. Ce facteur vaut 1 à vitesse nulle et tend vers l'infini quand $|\vec{v}|$ tend vers $c$. On constate sur la Fig. 1a qu'il faut des vitesses non négligeables devant $c$ pour remarquer une différence significative entre les versions classique et relativiste de la quantité de mouvement. L'énergie relativiste s'écrit

$$E = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\vec{v}^2/c^2}} . \tag{2}$$

*A priori*, on ne reconnaît pas grand-chose, mais si on regarde la limite des faibles vitesses, on trouve

$$E \approx mc^2 + \frac{1}{2} m\vec{v}^2 . \tag{3}$$

On retrouve bien le résultat classique, mais avec en plus un terme un peu inattendu, $mc^2$. Cette grandeur est appelée énergie de repos car elle correspond à l'énergie que le corps possède alors qu'il n'est animé d'aucune vitesse. Comme pour la quantité de mouvement, la différence entre les formules classique et relativiste de l'énergie – une fois l'énergie de repos prise en compte – ne se marque qu'à grande vitesse, comme on peut le voir sur la Fig. 1b. L'énergie relativiste peut également se mettre sous la forme

$$E = \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4} . \tag{4}$$

Signalons que cette dernière formule, contrairement aux précédentes, est également valable si la masse est nulle.

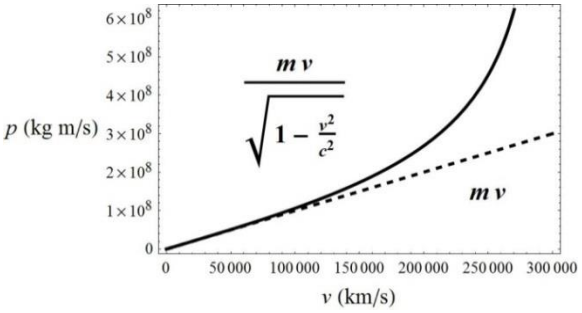


**Fig. 1a.** Quantités de mouvement classique et relativiste d'une masse de 1 kg.

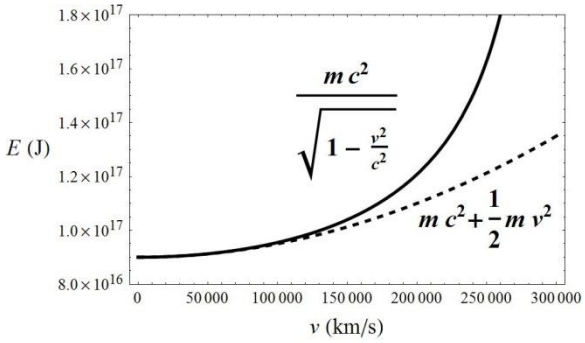


**Fig. 1b.** Énergies classique et relativiste d'une masse de 1 kg.

Si Einstein a raison, à cause du facteur $c^2$, une petite quantité de matière représente une grande quantité d'énergie. On calcule facilement qu'un gramme de matière équivaut à environ $9\times10^{13}$ J ou 25 millions de kWh, ce qui représente la production quotidienne d'une centrale nucléaire de 1 GW ou encore la quantité d'énergie libérée par une bombe atomique de 20 kt (Hiroshima).

Pour que le concept d'énergie de repos ait du sens, il faut qu'on puisse effectivement transformer de la masse en énergie. La nature nous fournit de nombreux processus dans lesquels ce phénomène de conversion se produit. Les plus spectaculaires sont certainement les processus nucléaires. La production d'énergie de nos centrales atomiques est assurée par la fission de l'uranium qui peut convertir environ 0,8 ‰ de la matière fissile en énergie. Les étoiles brillent grâce à la fusion thermonucléaire qui transforme en énergie environ 4 ‰ de leur hydrogène. La conversion de la masse en énergie peut être totale lorsqu'une particule de matière et une particule d'antimatière s'annihilent en photons gamma. L'antimatière n'existe

plus qu'en très faible quantité dans l'univers, mais elle peut être produite dans nos accélérateurs par la transformation inverse de l'énergie de collisions des particules accélérées.

En fait, même les réactions chimiques transforment de la matière en énergie, mais le taux de conversion est extrêmement faible, voisin de $1{,}5\times10^{-10}$. Il est assez facile de s'en convaincre en prenant comme exemple les réactions chimiques de digestion. Un être humain mange environ 1 kg de nourriture par jour, ce qui représente à peu près $10^{17}$ J d'énergie de repos. Or, notre survie est assurée par la consommation quotidienne d'environ 2 400 kcal, c'est-à-dire 10 millions de joules. Le rapport de ces deux chiffres, $10^7/10^{17}$, fait bien $10^{-10}$. Avec un si petit nombre, on peut donc dire que la masse est, en très bonne approximation, conservée lors d'une réaction chimique.

Pour bien comprendre la notion d'énergie de repos, examinons le cas d'un noyau d'hélium (ou particule $\alpha$) composé de quatre nucléons, deux protons ($p$) et deux neutrons ($n$). Sa masse est inférieure à celle de ses quatre constituants. Le défaut de masse est significatif et avoisine 0,8 %. Il s'explique par le fait que les nucléons ne sont pas simplement empaquetés dans le noyau. Ils bougent et interagissent sous l'effet des forces nucléaires et électromagnétiques. Ils possèdent donc une énergie cinétique (positive) $T$ et une énergie potentielle (négative) $V$. L'énergie de repos du noyau est donc donnée par

$$m_\alpha c^2 = 2m_p c^2 + 2m_n c^2 + T + V\,. \tag{5}$$

Les énergies cinétique et potentielle contribuent toutes deux à l'énergie de repos – et donc à la masse – du noyau d'hélium. Le bilan négatif de ces deux contributions constitue ce que l'on appelle l'énergie de liaison nucléaire qui est à l'origine du défaut de masse. C'est cela qui assure la cohésion de noyau : les quatre nucléons liés ne possèdent pas assez d'énergie pour exister individuellement à l'état libre.

D'une manière générale, toute énergie injectée dans un corps contribue (positivement ou négativement) à sa masse. Ainsi un système lié est généralement moins massif que ses constituants (nous verrons plus loin que ce n'est pas toujours le cas). Une montre mécanique dont on a remonté le ressort est (très légèrement) plus massive que lorsque son ressort est détendu. Un corps est (très légèrement) plus massif lorsqu'il est plus chaud, etc.

**Tout est champ…**

Lorsqu'un faisceau lumineux passe à travers les deux fentes d'un obstacle, on observe un système de franges alternativement claires et sombres sur un écran placé plus loin. Ces franges, causées par des interférences, sont la signature indubitable d'un phénomène de nature ondulatoire. Pourtant, si on remplace l'écran par une plaque photographique, on constate que les zones impressionnées sont constituées d'une multitude de points où l'énergie lumineuse s'est déposée localement comme par interaction de la plaque avec une particule. La lumière participe donc d'une double nature, à la fois onde sous son aspect champ électromagnétique et à la fois corpuscules sous son avatar quanta de lumière, c'est-à-dire photons. Mais cette dualité onde-corpuscule n'est pas uniquement valable pour la lumière. Elle s'étend à toutes les formes de rayonnements et de matières : électrons, neutrinos, protons, etc.

Pour modéliser au mieux cette étrange caractéristique de la nature, les physiciens ont introduit un concept unificateur, celui de « champ ». La théorie associée est la théorie quantique des champs qui est la fois relativiste (la vitesse des objets de la théorie peut approcher $c$) et quantique (les « actions »[3] caractéristiques sont de l'ordre de $\hbar$). On peut ainsi considérer que

[3] L' « action » est une grandeur de type « masse × longueur × vitesse » qui contrôle le mouvement d'un corps. $\hbar = h/(2\pi)$, où $h$ est la constante de Planck. Une action, $h$ et $\hbar$ ont la dimension d'un moment angulaire.

l'univers entier est rempli d'un champ de photons, électrons, neutrinos, protons, etc. dans lesquels les particules associées existent à l'état virtuel. Quand on injecte suffisamment d'énergie en un point du champ (grâce à une collision dans un accélérateur, par exemple), on peut matérialiser une particule en la faisant passer à l'état réel ; elle est alors observable, c'est-à-dire détectable dans un appareil de mesure. De plus, l'interaction entre deux particules est traitée comme un couplage entre les champs associés.

Une méthode à la fois graphique et analytique a été développée pour réaliser les calculs, par exemple pour déterminer la probabilité d'interaction entre deux objets ou le temps de vie d'une particule instable. Il s'agit de la technique des diagrammes de Feynman, du nom de leur inventeur[4], dans laquelle les différentes particules sont représentées par différentes lignes qui se connectent en des points appelés vertex. Ces vertex dépendent de constantes de couplage caractéristiques des interactions. Leur nombre et leur nature déterminent l'amplitude du processus représenté. Les particules réelles ou observables interagissent ainsi par échanges de particules virtuelles.

Dans la Fig. 2a (2b), un processus à deux (quatre) vertex est représenté pour l'interaction électromagnétique entre deux électrons. Les lignes ondulées représentent les photons, les lignes non ondulées les électrons. Les particules réelles sont dessinées en noir, tandis que les particules virtuelles le sont en gris. On remarque dans la Fig. 2b qu'un électron peut contribuer à la fois en tant que particule réelle et en tant que particule virtuelle (pour être précis, une des deux lignes qui forment la boucle entre les vertex est une ligne de positron, particule d'antimatière associée à l'électron).

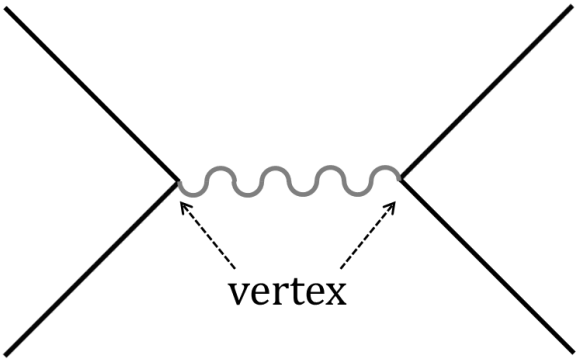


**Fig. 2a.** Le diagramme de Feynman à deux vertex pour l'interaction électromagnétique entre deux électrons.

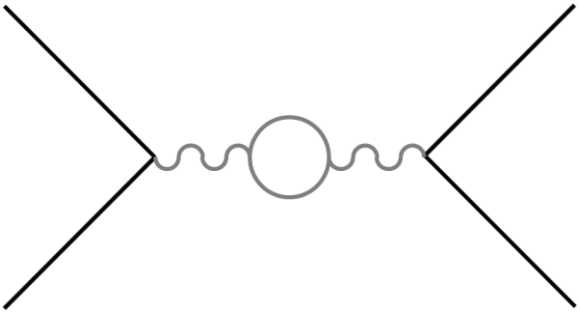

**Fig. 2b.** Un diagramme de Feynman à quatre vertex pour l'interaction électromagnétique entre deux électrons.

**Tout est atome…**

Toute la matière qui nous entoure, ainsi que toute celle dont nous sommes faits, est constituée d'atomes. C'est donc dans l'atome qu'il faut chercher la masse. Un atome, c'est un noyau entouré d'un cortège d'électrons. Le noyau contient des protons et des neutrons. Les protons chargés positivement et les électrons chargés négativement sont en nombres égaux, ce qui assure la neutralité de l'ensemble. Les neutrons, électriquement neutres, sont en général un peu plus nombreux que les protons.

Faisons le bilan de toutes les contributions à l'énergie de repos de l'atome. Exprimons ces énergies en MeV, unité bien adaptée à cette échelle. 1 MeV est égal à un million d'électronvolts (eV), 1 eV représentant une quantité d'énergie égale à celle qu'acquiert un

[4] Richard Phillips Feynman (1918 -1988), prix Nobel de physique en 1965 pour ses travaux en électrodynamique quantique.

électron soumis à une différence de potentiel électrique de 1 V ($1{,}6\times10^{-19}$ J). Pour l'électron, nous avons une énergie de repos de 0,511 MeV, le proton et le neutron faisant chacun environ 940 MeV. À cela, il faut ajouter l'énergie de liaison nucléaire qui apporte à peu près –8 MeV par nucléon. La contribution de l'énergie électromagnétique qui lie les électrons au noyau peut être estimée à $-10^{-3}$ MeV par électron. Il est clair que la majeure partie de la masse d'un atome se cache dans les nucléons.

**Tout ou presque est nucléon…**

Les nucléons ne sont pas des particules élémentaires ; ils sont composés de « quarks » [2,3]. Il existe 6 variétés de quarks présentées dans le Tableau 1. Les particules composées de quarks sont appelées hadrons. Il en existe de deux types : les baryons faits de trois quarks et les mésons faits d'un quark et d'un antiquark (quark d'antimatière). Les nucléons sont des baryons. Pour un proton, nous avons le contenu *uud*, pour un neutron, *udd*. D'autres baryons, les Δ, ne sont eux aussi composés que de quarks[5] *u* et *d*. Le seul hadron stable à l'état libre est le proton, le neutron n'étant stable que dans les noyaux. Tous les autres hadrons peuvent être produits dans les accélérateurs, mais se désintègrent rapidement en d'autres particules.

| | | |
|---|---|---|
| ***u*** (up)<br>2,3 MeV<br>+2/3 | ***c*** (charm)<br>1 275 MeV<br>+2/3 | ***t*** (top)<br>173 500 MeV<br>+2/3 |
| ***d*** (down)<br>4,8 MeV<br>–1/3 | ***s*** (strange)<br>95 MeV<br>–1/3 | ***b*** (beauty)<br>4 180 MeV<br>–1/3 |

**Tableau 1.** Quarks :
- ***symbole*** (nom)
- énergie de repos
- charge électrique rapportée à celle du proton

Dans un nucléon, les trois quarks portent, en plus d'une charge électrique, une charge très particulière, dite de « couleur », bien que cela n'ait rien à voir avec la couleur que nos yeux perçoivent. Pour comprendre la raison de cette terminologie, il est intéressant de faire une comparaison avec l'électromagnétisme. Il existe deux types de charges électriques, positive et négative. Deux particules de charges opposées s'attirent et se neutralisent mutuellement laissant un système neutre. La charge de couleur que porte un quark existe en trois variétés qui s'attirent et se neutralisent, un peu comme les trois couleurs fondamentales qui donnent du blanc en se mélangeant. Il faut ajouter que les antiquarks possèdent une charge d'« anticouleur », ce qui porte en fait à six le nombre total de charges de couleur différentes.

Les quarks interagissent en échangeant leur couleur au moyen de particules, appelées gluons, qui portent à la fois une charge de couleur et une charge d'anticouleur. Par exemple, un quark rouge devient bleu en émettant un gluon virtuel rouge-antibleu. Celui-ci, capturé par un quark bleu, le transforme en quark rouge. Les deux quarks ont ainsi échangé leur couleur (charge) en échangeant un gluon virtuel. La force de couleur est aussi appelée force nucléaire forte et la théorie quantique des champs qui gère cette interaction particulière est appelée « chromodynamique quantique ».

Faisons à nouveau une comparaison avec l'électromagnétisme. Deux électrons interagissent en échangeant des photons virtuels. Ces photons sont dépourvus de charge et ne peuvent donc pas interagir entre eux. Pour les gluons, la situation est très différente. Ils sont porteurs de charges de couleur et peuvent, à l'instar des quarks, interagir entre eux. Cela a des conséquences extraordinaires sur le comportement de la force inter-quarks. Considérons un méson, formé d'un quark et d'un antiquark, qui est un système plus simple qu'un nucléon. On

[5] Le contenu en quarks des baryons Δ est *uuu*, *uud*, *udd*, *ddd*, mais avec des propriétés de symétrie qui rendent les états *uud* et *udd* différents des nucléons. Rappelons que les particules possèdent un moment angulaire intrinsèque appelé « spin ». Les Δ sont des particules de spin 3/2, alors que pour les nucléons le spin vaut 1/2.

montre que l'interaction qui unit ces deux particules prend la forme d'un tube de flux très mince d'énergie pure et de densité d'énergie linéique presque constante. Ce tube, terminé à une extrémité par le quark et à l'autre par l'antiquark, peut vibrer et tourner (pensons à deux billes attachées par un élastique). Si on injecte de l'énergie dans le méson (par une collision dans un accélérateur, par exemple), le tube s'allonge. Si l'énergie devient trop importante, le tube se casse mais en créant à chaque « extrémité libre » un nouveau (anti)quark, de telle manière que deux mésons soient formés. Ce phénomène fait qu'il est impossible d'isoler un quark à l'état libre. Cette étrange propriété est appelée confinement.

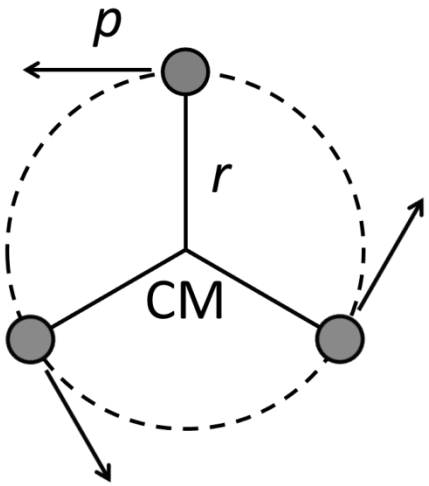


**Fig. 3.** Modèle simplifié d'un baryon.

Ainsi la meilleure image que l'on ait actuellement d'un baryon est un système de trois quarks, chacun attaché à un tube de flux, les trois tubes se réunissant en un point de manière à minimiser l'énergie du baryon. Considérons un proton (*uud*) dont l'énergie de repos est de 940 MeV. En se référant au Tableau 1, on constate que les quarks ne totalisent qu'environ 10 MeV. Évidemment, il ne faut pas oublier que ces quarks bougent et que chaque tube de flux emporte de l'énergie.

Pour comprendre l'origine de la masse de ce proton, étudions un petit modèle simple de baryon composé de quarks *u* ou *d* (nucléon ou Δ). Ce modèle est une version simplifiée de l'approche semi-classique développée dans la référence [4]. On suppose que les trois quarks, identiques, attachés par trois tubes de flux de même longueur *r*, tournent sur une orbite circulaire autour de leur centre de masse (CM), comme indiqué sur la Fig. 3. La masse des quarks *u* et *d* est si petite devant la masse du baryon, qu'on peut raisonnablement la considérer comme nulle. Alors, en vertu de l'équation (4), l'énergie de chaque quark s'écrit simplement $E = pc$, où *p* est son moment relativiste. Si on appelle $\sigma$ la densité d'énergie linéique des tubes de flux, l'énergie d'un tube vaut $\sigma r$, et l'énergie de repos du baryon s'écrit

$$Mc^2 = 3pc + 3\sigma r\,, \tag{6}$$

où *M* est sa masse et *r* son rayon. Le moment angulaire d'un quark est égal à $|\vec{r} \times \vec{p}| = rp$ car $\vec{r}$ et $\vec{p}$ sont perpendiculaires. Le moment angulaire total du baryon $3rp$ étant quantifié, il doit pouvoir s'exprimer comme un multiple de $\hbar$ : $3rp = L\hbar$, où *L* est un nombre entier. On peut donc écrire la masse du baryon en fonction de son rayon

$$Mc^2 = \frac{L\hbar c}{r} + 3\sigma r\,, \tag{7}$$

où $\hbar c = 197{,}33$ MeV fm (1 fm = $10^{-15}$ m)[6]. Il est facile de déterminer que *M* présente un minimum pour le rayon $r_0 = \sqrt{L\hbar c/(3\sigma)}$. L'énergie de repos est donc finalement donnée par la formule (7) évaluée en $r_0$,

$$Mc^2 = \sqrt{12\hbar c\sigma L}\,. \tag{8}$$

[6] « fm » est le symbole de femtomètre. Les physiciens des particules ont pour habitude d'appeler cette unité « fermi » en l'honneur du physicien Enrico Fermi (1901-1954).

Notons que, grâce à l'analyse dimensionnelle, on peut montrer que, disposant d'une densité d'énergie $\sigma$ (interaction), d'un moment angulaire $L\hbar$ (grandeur quantique) et de la vitesse de la lumière $c$ (signature de la relativité), seule la grandeur $\sqrt{\hbar c \sigma L}$ a la dimension d'une énergie. Notre modèle simple donne une moitié de la masse au repos du baryon provenant de l'énergie cinétique des quarks, l'autre de l'énergie contenue dans les tubes de flux. En effet, on a

$$3pc\big|_{r=r_0} = 3\sigma r_0 = \sqrt{3\hbar c \sigma L} = Mc^2/2\,. \tag{9}$$

Pour vérifier la pertinence de notre calcul, regardons le résultat du modèle réaliste de la référence [5]. On obtient ainsi pour le carré de l'énergie de repos d'un baryon

$$M^2c^4 = 2\pi\hbar c\sigma(L+N+3/2)\,. \tag{10}$$

On trouve $2\pi$ au lieu de 12 et des nombres quantiques supplémentaires, mais dans l'ensemble on peut dire que notre petit modèle tient la route. Le nombre entier $N$ tient compte des vibrations du baryon, non considérées dans notre approche simplifiée (ce qui est équivalent à faire $N=0$). Le nombre 3/2 mesure « l'énergie de point zéro », propre aux systèmes quantiques, que l'on ne peut pas obtenir avec notre modèle trop simple. Sur la Fig. 4, on peut constater que la formule (10) permet de très bien reproduire les masses de la famille des baryons Δ. L'ajustement sur les données permet d'obtenir la valeur de $\sigma$, environ 880 MeV/fm. Ce chiffre est compatible avec ceux obtenus dans d'autres approches. Notons que pour reproduire correctement les masses des nucléons et des Δ, il faut également tenir compte d'effets dus au spin des quarks qui sont faibles par rapport à ceux dus aux tubes de flux.

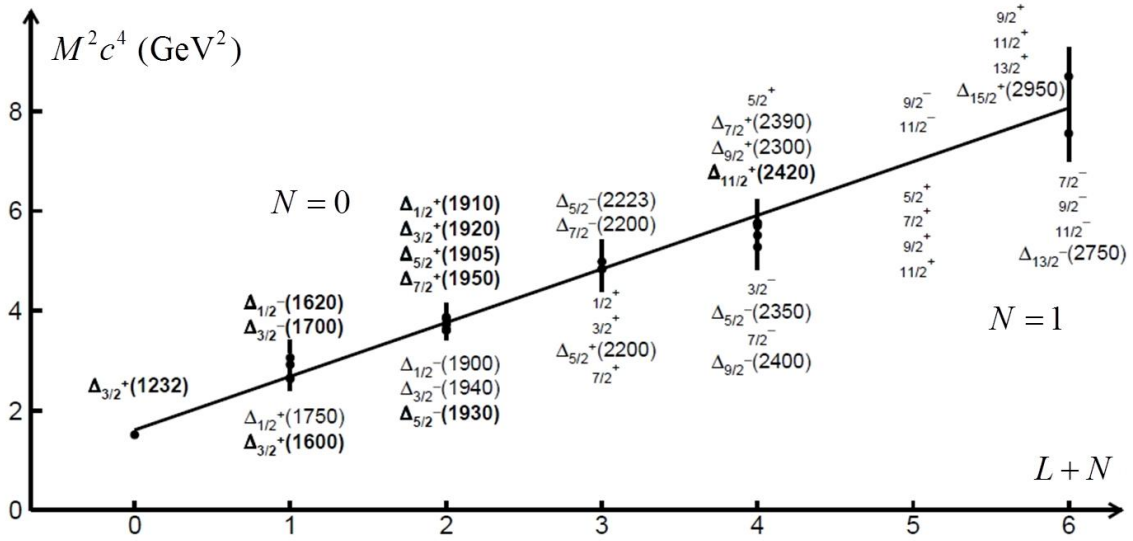


**Fig. 4.** Masses $M$ des baryons Δ en fonction des nombres quantiques $L$ et $N$. Les énergies sont données en GeV (1 GeV = $10^3$ MeV). La droite est un ajustement de la formule (10) sur les données expérimentales. Le graphique est adapté de la référence [6].

La quasi-totalité de l'énergie de repos d'un baryon, et en particulier d'un nucléon, est donc de nature dynamique. L'énergie d'interaction due aux tubes de flux contribue positivement et s'ajoute à l'énergie cinétique positive des quarks, ce qui rend le nucléon beaucoup plus massif que ses constituants. Ceux-ci ne peuvent cependant pas exister à l'état libre, car ils sont liés par le confinement. La majorité de la masse des nucléons – et donc des atomes – est ainsi due à de l'énergie ayant pour origine le champ de couleur généré par les quarks. À titre d'exemple, pour une personne de 75 kg, il faut compter environ :

- 900 g d'électrons et de quarks *u* et *d* ;
- 74,1 kg d'énergie pure due au champ de couleur.

J'espère que la révélation de notre relative « immatérialité » ne traumatisera personne…

**Tout le reste est boson scalaire…**

Il reste à expliquer la masse des entités élémentaires, électrons et quarks. À l'instar de ce qui a été présenté plus haut, on peut considérer que l'univers entier est rempli d'un champ particulier, dit « champ de Higgs », qui se couple à tous les autres champs. Si un champ interagit fortement avec le champ de Higgs, la particule associée a une grande masse, s'il interagit faiblement, une petite masse, et s'il n'interagit pas du tout, une masse nulle. En injectant suffisamment d'énergie dans le champ de Higgs, on doit pouvoir matérialiser la particule associée, appelée boson de Brout-Englert-Higgs, ou boson de Higgs, ou encore boson scalaire[7]. C'est bien ce qui semble avoir été réussi à l'accélérateur LHC du CERN où, comme annoncé en juillet 2012, une particule ayant toutes les caractéristiques attendues du boson scalaire a été produite avec une énergie de repos de 126 GeV [7,8].

Pour expliquer ce mécanisme, je vais procéder par analogie en suivant la méthodologie présentée dans la référence [9]. Alors que dans la section précédente le modèle de baryon était bâti sur la nature corpusculaire des quarks, nous allons utiliser ici une approche « hybride » faisant à la fois intervenir les aspects champ et particule. Considérons un condensateur de volume *v*, placé dans le vide, entre les plaques duquel règne un champ électrique d'intensité *E*. Plaçons entre les plaques une particule de charge *q* à un endroit où le potentiel électrique vaut *V*(*E*). L'énergie totale $U$ du système est alors donnée par la somme de l'énergie $qV(E)$ de la particule dans le potentiel et de l'énergie $\varepsilon_0 E^2 v/2$ emmagasinée dans le condensateur,

$$U = qV(E) + \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 v, \tag{11}$$

où $\varepsilon_0$ est la permittivité du vide. Pour s'affranchir de la géométrie du système, on considère plutôt la densité d'énergie $u = U/v$, en introduisant la densité de matière $\rho = 1/v$,

$$u = q\rho V(E) + \frac{\varepsilon_0}{2} E^2. \tag{12}$$

Arrivé à ce stade, je décide que toute densité d'énergie doit pouvoir s'écrire comme un de ces deux termes, à savoir :

- une constante de couplage (*q*) fois une densité de matière ($\rho$) fois un potentiel (*V*(*E*)) ;
- une constante de couplage ($\varepsilon_0/2$) fois un champ (*E*) fois un champ (*E*).

Il s'agit là d'un argument esthétique, mais rappelons que la physique a bien souvent été guidée avec bonheur par de tels arguments. Pour se simplifier la vie, on suppose que tous les termes sont positifs. Le « vide » du modèle, défini comme l'état d'énergie minimale, est atteint lorsque le champ est nul (le potentiel est alors nul).

On se rappelle maintenant que la théorie est relativiste et qu'il faut ajouter l'énergie de repos $mc^2$ de la particule, ce qui donne

$$u = q\rho V(E) + \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 + m\rho c^2. \tag{13}$$

[7] Le boson est dit scalaire car la théorie lui prédit un spin nul.

Malheureusement, le dernier terme ajouté n'est pas du même type que les deux premiers. Nous avons bien une constante de couplage ($m$) fois une densité de particule ($\rho$), mais le dernier facteur est le carré d'une constante universelle et pas un potentiel.

Il faut donc remplacer ce terme d'énergie de repos par un mécanisme de couplage qui puisse s'y substituer en satisfaisant à un des deux critères donnés plus haut. Introduisons donc un nouveau champ $\phi$ et son potentiel associé $\Upsilon(\phi)$. Celui-ci se couple à la matière par la constante $a$, au champ $E$ par $g$ et à lui-même par $g'$. Par analogie avec la formule (12), cela donne pour la densité d'énergie

$$u = q\rho V(E) + \frac{\varepsilon_0}{2}E^2 + a\rho\Upsilon(\phi) + gE\phi + g'\phi^2. \tag{14}$$

À nouveau, tous les termes sont supposés positifs et le vide est atteint quand les deux champs $E$ et $\phi$ sont nuls. On peut choisir $a$ sans dimension et $\Upsilon(\phi)$ ayant la dimension d'une énergie. Nous n'aurons pas besoin des dimensions des autres grandeurs.

Malheureusement, si on laisse les choses en l'état, on ne va pas pouvoir atteindre l'objectif qui est de donner une masse à la particule. L'idée géniale est de remplacer le terme quadratique $g'\phi^2$ par une quartique bien particulière $-|g'|\phi^2 + \phi^4$. Cette densité d'énergie possède alors un minimum en $\phi_0 = \sqrt{|g'|/2}$, comme indiqué sur la Fig. 5. Notre densité d'énergie s'écrit donc suivant une formule un peu compliquée mais dont, rassurez-vous, un seul terme va finalement nous intéresser,

$$u = q\rho V(E) + \frac{\varepsilon_0}{2}E^2 + a\rho\Upsilon(\phi) + gE\phi - |g'|\phi^2 + \phi^4. \tag{15}$$

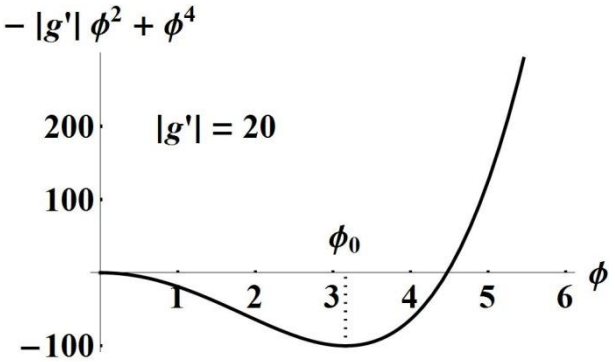


**Fig. 5.** Exemple de densité d'énergie pour le champ $\phi$.

Dans ce cas, l'état d'énergie minimale est atteint quand $E = 0$ et $\phi = \phi_0$, c'est-à-dire pour une valeur non nulle du nouveau champ. Nous pouvons donc exprimer le champ $\phi$ comme étant égal à sa valeur sur le vide plus un reste variable : $\phi = \phi_0 + \eta$. De même, pour le potentiel associé $\Upsilon(\phi)$, on peut écrire : $\Upsilon(\phi) = \Upsilon_0 + \Upsilon_1$, $\Upsilon_0$ étant le potentiel du vide avec $\Upsilon_0 \neq 0$. Puisque $\Upsilon_0$ est le potentiel du champ dans le vide, il doit être le même partout. Dans la formule (15), regardons uniquement le terme de couplage de la matière avec le champ $\phi$. On peut écrire

$$a\rho\Upsilon(\phi) = a\rho\Upsilon_0 + a\rho\Upsilon_1. \tag{16}$$

Le premier terme du membre de droite de cette équation, $a\rho\Upsilon_0$, peut être identifié sans ambiguïté à la contribution de l'énergie de repos $m\rho c^2$ d'une particule puisque $\Upsilon_0$ est une constante universelle. On a alors

$$m = \frac{a}{c^2}\Upsilon_0, \tag{17}$$

ce qui nous donne une définition de la masse. Le deuxième terme, $a\rho\Upsilon_1$, exprime le couplage entre la matière et le reste du champ (variable) avec une intensité

$$a = \frac{mc^2}{\Upsilon_0}. \tag{18}$$

Plus le couplage $a$ de la matière avec le champ $\phi$ est grand, plus la masse de la particule est élevée. Même en l'absence de tout champ $E$, le champ $\phi$ a toujours sa valeur sur le vide $\phi_0$ non nulle et son potentiel associé $\Upsilon_0$ non nul. On obtient ainsi un mécanisme pour générer une masse à partir d'une interaction. Les autres termes de la formule (15) contiennent des termes de couplage entre les champs et un terme de masse pour le champ $\phi$ lui-même.

Le champ $\phi$ est bien évidemment le champ de Higgs. Sa valeur non nulle sur le vide, due à la forme particulière de sa densité d'énergie, permet à la particule $X$ d'acquérir une masse $m_X = a_X \Upsilon_0 / c^2$ par un couplage, contrôlé par une constante de couplage propre $a_X$, avec une échelle d'énergie universelle $\Upsilon_0$. Par exemple, on a ainsi $a_d > a_u > a_{\text{électron}}$. Au niveau le plus fondamental, on peut donc ne garder que la notion d'interaction et faire « l'économie » du concept de masse. Cette grandeur reste néanmoins très pratique à utiliser dans des modèles phénoménologiques et dans la vie de tous les jours.

Le « Modèle Standard » est le nom donné à la théorie quantique des champs qui décrit de manière unifiée l'électromagnétisme ainsi que les forces nucléaires forte et faible[8]. La présence d'un champ de Higgs y est indispensable. À l'origine, ce champ a été introduit pour donner une masse aux trois bosons $W^{\pm}$ et $Z^0$ qui sont les particules porteuses de l'interaction faible (ce qui explique sa portée extrêmement réduite), tout en préservant une masse nulle pour le photon porteur de l'interaction électromagnétique (ce qui permet sa portée infinie). C'est un subtil mécanisme mathématique inventé par R. Brout, F. Englert et P. Higgs en 1964, et basé sur la notion de « brisure spontanée de symétrie », qui ne confère une masse qu'à trois des quatre particules porteuses des interactions. Cette notion n'est pas décrite ici, mais le lecteur intéressé pourra en trouver une première approche simplifiée dans les références [8,9]. Actuellement, nous avons de bonnes raisons de penser que le champ de Higgs est à l'origine de la masse de toutes les particules élémentaires.

**Tout est interaction…**

La masse est donc clairement une propriété dynamique avec deux mécanismes principaux maintenant bien établis :

- le champ de Higgs pour les masses des entités élémentaires, comme les électrons et les quarks $u$ et $d$ ;
- le champ de couleur qui confère leur masse aux nucléons, constituant environ 99 % de la masse des atomes.

À cela il faut ajouter les (petites) contributions négatives des forces nucléaires fortes liant les nucléons dans le noyau[9] et des forces électromagnétiques liant les électrons au noyau (voir la section *Tout est atome…*). Contribuent aussi les interactions nucléaires faibles et les interactions gravitationnelles, mais leur intensité est si petite qu'elles peuvent être complètement négligées pour le calcul de la masse. En effet, les constantes de couplage pour les différentes interactions sont de l'ordre de 1 pour la force de couleur, $10^{-2}$ pour l'électromagnétisme, $10^{-12}$ pour la force nucléaire faible et $10^{-45}$ pour la gravitation.

[8] L'interaction nucléaire faible est responsable des désintégrations radioactives.

[9] La force nucléaire forte existant entre les nucléons est en fait due à l'interaction résiduelle du champ de couleur s'exerçant hors des nucléons. Cette situation a un équivalent électromagnétique dans l'interaction entre deux dipôles électriques neutres.

La théorie correcte pour décrire ces phénomènes est la théorie quantique des champs, théorie à la fois quantique et relativiste. Je pense que les modèles développés dans ce texte capturent l'essentiel des idées physiques importantes, mais ils sont bien évidemment très approximatifs. Ainsi, l'échelle d'énergie typique de la chromodynamique quantique n'est pas vraiment la grandeur $\sqrt{\hbar c \sigma}$, mais bien le paramètre que l'on désigne habituellement par $\Lambda_{\mathrm{QCD}}$ [10] et dont la valeur est estimée à 300 MeV. Lorsque l'énergie d'interaction des quarks est au-dessus de cette valeur, la force de couleur est relativement faible, en dessous elle devient extrêmement forte. La densité d'énergie $\sigma$ du tube de flux peut se déduire de $\Lambda_{\mathrm{QCD}}$. En ce qui concerne le champ de Higgs, il n'est pas vraiment nécessaire d'introduire le potentiel, le champ lui-même – avec sa valeur $\phi_0$ non nulle sur le vide – étant l'élément clé de la théorie. L'échelle d'énergie naturelle du problème, $\sqrt{\hbar c}\phi_0 = 246,22/\sqrt{2}$ GeV, est connue avec grande précision car elle est liée à la masse de certaines particules (le facteur $\sqrt{2}$ est purement conventionnel).

Alors que le monde dans lequel nous vivons ne nous apparaît ni relativiste ni quantique, une propriété aussi banale que la masse a pour origine des phénomènes on ne peut plus relativistes et quantiques. C'est là le paradoxe de la science moderne qui, pour expliquer la nature, a besoin de concepts qui de prime abord nous semblent si peu naturels…

**Tout n'est pas compris…**

Bien sûr, nous avons des mécanismes pour expliquer l'origine de la masse des atomes, mais tout n'est pas compris pour autant. Le Modèle Standard dépend de nombreux paramètres : les échelles d'énergie $\Lambda_{\mathrm{QCD}}$ et $\sqrt{\hbar c}\phi_0$, mais aussi les constantes de couplage des différentes particules élémentaires au champ de Higgs. Les valeurs de ces paramètres ne sont (encore) prédites par aucune théorie.

Mais, ce n'est pas le plus grave ! Dans la cadre des théories actuelles de la cosmologie, les atomes ne constituent que 5 % du contenu énergétique de l'univers. 23 % seraient dus à ce que l'on appelle la « matière noire ». Comme son nom l'indique, cette matière n'est pas lumineuse, mais sa présence est indispensable pour expliquer la rotation des galaxies et les mouvements des amas de galaxies. Elle est constituée de particules encore non identifiées, mais plus que probablement différentes des atomes. Tout le reste, c'est-à-dire 72 %, est attribué à une mystérieuse « énergie sombre » qui pilote l'expansion de l'univers et dont nous ne sommes pas certains qu'on puisse réellement lui attribuer un statut de « substance » [10]. Nul doute que le chemin de la connaissance sera long, très long. Mais à n'en pas douter, il sera passionnant.

*Merci à Yves Brihaye, Fabien Buisseret et Gwendolyn Lacroix pour leur lecture attentive du texte. Un remerciement tout particulier à Gwendolyn Lacroix qui m'a donné l'idée de réaliser ce travail.*

Claude Semay (chargé de cours, UMONS)

**Références**

[1] C. Semay et B. Silvestre-Brac, *Relativité restreinte. Bases et applications*, Dunod, 2010.
[2] D. Husson, *Les quarks, histoire d'une découverte*, Ellipses, 2000.
[3] Y. Nambu, *Quarks. Frontiers in Elementary Particle Physics*, World Scientific, 1985.
[4] C. Semay et F. Buisseret, *Two- and three-body calculations within the dominantly orbital state method*, Physics Letters A **377**, 1826 (2013).

[10] « QCD » pour « quantum chromodynamics ».

[5] H. Forkel, T. Frederico and M. Beyer, *Linear square-mass trajectories of radially and orbitally excited hadrons in holographic QCD*, Journal of High Energy Physics **07**, 077 (2007).
[6] E. Klempt, Δ-*resonances: Quark models, chiral symmetry and AdS/QCD*, European Physical Journal A **38**, 187 (2008).
[7] Voir le dossier « La quête du boson de Higgs » sur le site du CERN.
[8] G. Cohen-Tannoudji et M. Spiro, *Le boson et le chapeau mexicain*, Folio essais, 2013.
[9] G. Organtini, *Unveiling the Higgs mechanism to students*, European Journal of Physics **33,** 1397 (2012).
[10] F. M. Lev, *Do We Need Dark Energy to Explain the Cosmological Acceleration?*, Journal of Modern Physics **3**, 1185 (2012).