Texte de la 219e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 6 août 2000.

L'antimatière existe : je l'ai rencontrée
par Catherine THIBAULT

« L'antimatière existe : je l'ai rencontrée », ce titre volontairement provocateur a pour but de souligner que l'antimatière n'est pas un mythe, mais une réalité. En effet, il est possible de détecter l'antimatière, d'en faire des faisceaux, ou de la confiner dans des pièges afin de l'observer tout à loisir.

La matière et ses constituants

« Antimatière », ce terme a été inventé par opposition à celui de matière Mais qu'est-ce au juste que la matière ? le Dictionnaire nous répond « ce dont une chose est faite » : notre corps est fait de matière, la terre sur laquelle nous vivons est faite de matière, le soleil et les planètes aussi.

En s'approchant du cœur de la matière grâce à des zooms de plus en plus puissants, dans le cas d'un cristal de silicium par exemple, on observe successivement **(figure 1)** que :

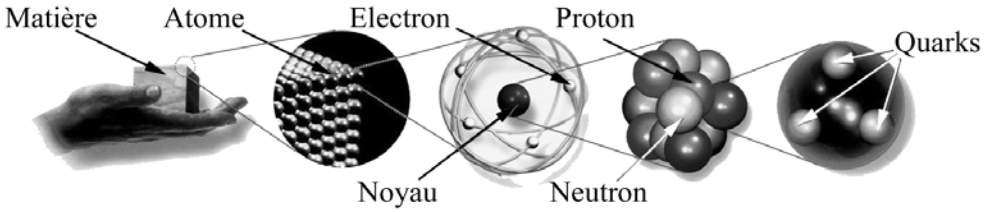

Figure 1 : Les constituants de la matière (d'après CERN)

- Le cristal est constitué d'« atomes » tous identiques disposés de façon très régulière.
- Chaque atome est constitué d'un noyau très dense doté d'une charge électrique positive ($14+$ pour le silicium) autour duquel gravite un nuage d'électrons. Les électrons e^- portent chacun une charge électrique négative, et l'atome est neutre. Le nombre d'électrons de l'atome détermine ses propriétés chimiques. L'atome de silicium est donc caractérisé par 14 électrons, tandis que, par exemple, l'hydrogène en a un seul, le carbone 6, et l'uranium 92.
- Le noyau lui-même est un agrégat de deux sortes de particules : des protons p porteurs d'une charge électrique positive et des neutrons n sans charge, neutres comme leur nom l'indique. Le noyau de silicium a donc 14 protons. Mais la charge électrique des protons produit une force de répulsion entre eux, ce qui interdit l'existence de noyaux composés uniquement de protons, excepté l'hydrogène qui en a un seul. Les neutrons, grâce à leur interaction « forte » avec les protons assurent la cohésion du noyau. Mais, les noyaux composés uniquement de neutrons n'étant pas viables non plus, il faut un dosage convenable de chacun des partenaires n et p. Le noyau de silicium a 3 isotopes stables, le 28, le 29 et le 30 qui ont respectivement 14, 15 et 16 neutrons.
- Enfin, les protons et les neutrons sont eux-mêmes constitués de 3 « quarks » : 2 quarks « up » et 1 « down » pour le proton, 2 quarks down et 1 up pour le neutron.

Actuellement, on pense que la matière stable, celle dont nous sommes faits, est formée de ces 3 constituants ultimes : électrons, quarks up et quarks down, insécables. Mais il n'est pas absolument certain que les quarks soient insécables.

Les débuts de l'antimatière

À la fin du XIXe siècle, grâce en particulier à James Clerk Maxwell, les lois de l'électromagnétisme étaient fermement établies. Elles décrivaient le comportement d'un électron de faible vitesse, tel qu'il apparaît dans les phénomènes électriques. Mais, au début du 20ème siècle, deux problèmes apparurent qui remirent en question la validité universelle de ces lois. En 1906, Albert Einstein établit la théorie de la relativité restreinte et montra que les lois de Newton n'étaient plus valables lorsque la vitesse des particules s'approchait de celle de la lumière. Puis, en 1926, vint la Mécanique Quantique avec Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, et finalement Erwin Schrödinger qui montrèrent que l'électron a un spin $+1/2$ ou $-1/2$. Ce spin peut être associé au sens du mouvement de rotation de l'électron. Les équations proposées par Schrödinger décrivaient le comportement de l'électron en tenant compte des aspects quantiques, mais seulement à faible vitesse.

C'est alors qu'un jeune physicien anglais, Paul Dirac, s'attaqua au problème de décrire un électron à la fois quantique et doté d'une vitesse très proche de celle de la lumière. Dès 1929, alors qu'il n'avait que 27 ans, il donna le résultat. Mais l'équation avait deux solutions ! la question, très débattue à l'époque fut alors de savoir si la deuxième solution correspondait ou non à une autre particule, et si oui, à laquelle ? Si la charge de la deuxième particule était négative comme celle de l'électron, son énergie était négative, ce qui n'avait pas de sens physique. Ce devait donc être une particule chargée positivement. La seule connue était le proton, mais sa masse était environ 2 000 fois supérieure à celle de l'électron. Cette hypothèse fut alors contestée par des physiciens tels que Heisenberg, Pauli ou Oppenheimer qui estimaient que la symétrie de l'équation impliquait l'égalité des masses des deux particules. Si la deuxième solution correspondait à une particule réelle, ce ne pourrait être qu'un « antiélectron » e^{+} de masse identique à celle de l'électron et de charge opposée.

Le débat en était là quand à l'autre bout du monde, un autre jeune physicien, Carl Anderson, fit une curieuse découverte. Il étudiait le rayonnement cosmique qui est composé de particules de très grande énergie provenant de tout l'univers. Pour visualiser le parcours des particules chargées, il utilisait une chambre de Wilson placée dans un champ magnétique qui courbe les trajectoires dans un sens ou dans l'autre selon le signe de la charge. Anderson détectait un grand nombre d'électrons, mais quelques uns d'entre eux, qu'il appela « positons », tournaient en sens inverse comme s'ils avaient une charge positive. Lorsque Anderson publia cette observation, en 1932, le même phénomène avait aussi été observé à Cavendish par Blackett et Occhialini. Mais ces derniers n'osaient pas publier ce trop surprenant résultat sans le vérifier soigneusement. Ils le firent en 1933, avançant plusieurs explications dont celle de paires d'électrons négatifs et positifs. Il apparut alors que le positon découvert par Anderson n'était autre que l'antiélectron. Dirac eut le prix Nobel en 1933, et Anderson en 1936.

Après cette découverte sensationnelle, la question s'est immédiatement posée de savoir si les autres particules, comme le proton et le neutron avaient aussi leurs antipartenaires de mêmes masses et de charges opposées. La création et la disparition des antiparticules sont régies par la célèbre loi d'Einstein : $E=mc^2$ qui permet de transformer de l'énergie E en masse m, et vice-versa (c est la vitesse de la lumière). Mais particule et antiparticule vont par paire : une paire se crée ou une paire « s'annihile ». Et si l'antiparticule est créée dans un environnement de matière, elle trouve très rapidement un partenaire d'annihilation. Le résultat final est de l'énergie sous forme de photons γ, c'est-à-dire de rayonnement.

Pour créer l'antiproton $\overline{p}$ (prononcé p-barre), ou l'antineutron $\overline{n}$ (n-barre), il faut créer une paire $p-\overline{p}$ ou $n-\overline{n}$. C'est beaucoup plus difficile que pour la paire $e^{-}-e^{+}$ car il faut 2000 fois plus d'énergie. Il faut donc disposer d'un accélérateur de particules

suffisamment puissant. Les Américains se lancèrent dans cette aventure, mais leur quête ne fut couronnée de succès que 23 ans plus tard grâce au Bevatron construit à Berkeley en Californie. $\overline{p}$ fut découvert en 1955 et $\overline{n}$ en 1956. (prix Nobel pour Chamberlain et Segré en 1959). Il était alors clair que, comme le proposaient les théoriciens, chaque particule a son antiparticule. Un cas très extraordinaire est celui du photon γ qui est sa propre antiparticule !

Par la suite, dans les années 70, des antinoyaux associant quelques $\overline{p}$ et quelques $\overline{n}$ furent identifiés dans des chambres à bulles placées dans des faisceaux de protons de grande énergie à Brookhaven (USA), Serpukhov (URSS) ou au CERN, l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire. Enfin, en 1995, 9 antiatomes d'hydrogène (un antiproton autour duquel gravite un positon) ont été fabriqués au CERN. Fabriquer des antiatomes est beaucoup plus difficile que des antinoyaux car il faut mettre le positon en orbite. C'est comme si on voulait capturer une voiture de course pour l'obliger à tourner sur un manège de chevaux de bois. Mais, ces antiatomes n'ont survécu que quelques milliardièmes de secondes jusqu'à leur détection par annihilation.

L'antimatière et la médecine

Les positons ont été découverts dans le rayonnement cosmique, et pourtant, ils sont émis par certains noyaux radioactifs. Les isotopes stables de silicium ont 14, 15 ou 16 neutrons. La **figure 2** indique les configurations stables pour les noyaux ayant 5 à 10 protons.

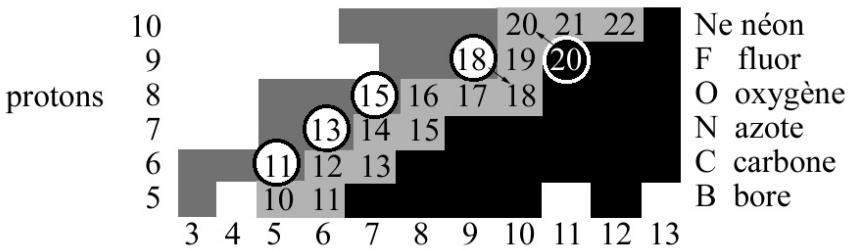

Figure 2 : Fragment de la charte des noyaux indiquant les noyaux stables (fond gris clair), les émetteurs β^- (fond gris foncé) et les émetteurs β^+ (fond noir)

Si un noyau a un excès de neutrons, comme par exemple le fluor 20, un de ses neutrons va se transformer en proton :

$$n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu}_e \qquad \text{soit} \qquad {}^{20}\text{F} \rightarrow {}^{20}\text{Ne}$$

C'est la radioactivité β^-, la plus connue. $\overline{\nu}_e$ est l'antineutrino associé à e^-. Il est très difficile à détecter car il interagit très peu avec la matière.

Si par contre le noyau n'a pas assez de neutrons, comme le fluor 18, c'est un de ses protons qui va se transformer en neutron :

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e \qquad \text{soit} \qquad {}^{18}\text{F} \rightarrow {}^{18}\text{O}$$

et cette fois il y a production de positons. C'est la radioactivité β^+. Le carbone 11, l'azote 13, l'oxygène 15, le fluor 18 sont de tels émetteurs β^+ dont les demi-vies (temps nécessaire pour que la moitié des atomes se soient transformés) vont de quelques minutes à 2 heures. Ils peuvent être facilement produits par des petits cyclotrons et incorporés dans des molécules appropriées. Si ces molécules marquées sont injectées par voie intraveineuse dans

le corps humain, le positon émis va immédiatement rencontrer un électron du milieu ambiant qui en regorge, et s'annihiler :

$$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$$

L'annihilation produit 2 photons γ qui ont une énergie de 511 keV [1] exactement égale à la masse de l'électron et du positon. Ils partent dos à dos et émergent du corps humain. Leur détection simultanée par des détecteurs disposés en couronne permet de localiser dans l'espace la position des molécules émettrices. C'est le principe de la TEP (PET en anglais), la Tomographie par Émission de Positons.

La molécule la plus utilisée est le Fluoro-Desoxy-Glucose qui contient du fluor 18 (demi-vie 110 minutes). Le glucose se fixe préférentiellement sur les tumeurs malignes et sur certains organes. Il est aussi consommé par les parties du cerveau qui sont en activité.

Les nombreuses applications de la TEP sont liées à ses trois grandes qualités : sa sensibilité, son innocuité pour le patient, et sa réponse en temps réel. En médecine, elle est surtout utilisée pour le suivi des thérapies anticancéreuses. En recherche, elle permet d'étudier en temps réel le fonctionnement du cerveau (rôle des différentes zones, épilepsie, Parkinson,…), les microcirculations et les métabolismes du cœur, du poumon ou du rein, la caractérisation de récepteurs ou l'identification de l'expression d'un gène, par exemple.

En thérapie anticancéreuse, une nouvelle utilisation de la radioactivité β^+ a été récemment mise en œuvre à Darmstadt en Allemagne. Les tumeurs sont détruites en les bombardant avec des ions de carbone, accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière. Ces ions ont la propriété de détruire les cellules sélectivement en fin de parcours. À ce même point, ils peuvent interagir avec le milieu ambiant et perdre un neutron. Le carbone 12 stable est alors transformé en carbone 11 radioactif β^+ dont la position peut être déterminée par un tomographe à positons. On peut ainsi contrôler en temps réel que la région détruite correspond effectivement à la tumeur visée. Depuis 1997, 67 patients ont déjà été traités avec succès.

Un outil pour les physiciens

Seules les particules qui constituent la matière stable ont été évoquées jusqu'à présent. Mais beaucoup d'autres particules existent. Elles sont plus massives, et leurs durées de vie sont très éphémères. Certaines, découvertes par hasard, ont donné bien du souci aux théoriciens. D'autres, en revanche, sont prédites par les théoriciens, et il faut vérifier leur existence pour valider ou invalider les théories. Le problème pour les expérimentateurs est que plus la masse de la particule hypothétique est grande, et plus il faut d'énergie pour la créer. Et, comble de malheur, si on organise une collision entre une particule accélérée à une vitesse proche de celle de la lumière et une cible fixe, la relativité restreinte nous apprend qu'on ne dispose que d'une petite fraction de l'énergie cinétique. Pour un proton de 200 GeV on ne pourra transformer en masse que 20 GeV environ. Par contre, dans une collision frontale, toute l'énergie cinétique peut être transformée en masse : 2 particules de 200 GeV libéreront 400 GeV. Dans un accélérateur en forme d'anneau, les trajectoires sont courbées par des champs magnétiques. Il est donc possible de faire tourner en sens inverse, dans un seul et même anneau, une particule et son antiparticule, et d'organiser des points de rencontre entre elles. On a alors un collisionneur pour le prix d'un seul accélérateur.

Les premiers collisionneurs utilisant de l'antimatière ont été réalisés avec des positons qui sont faciles à obtenir à partir d'émetteurs β^+, et des électrons. Ils ont fait découvrir

---

[1] 1 eV (électron-volt) est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1V. C'est une unité très petite. Ses multiples sont le keV (×1000), le MeV (×1 million), le GeV (×1 milliard). La masse de e^- est 511 keV, celles de p et n sont proches de 1 GeV.

beaucoup de nouvelles particules. Par la suite, une source d'antiprotons a été réalisée au CERN en bombardant une cible fixe avec des protons de 25 GeV. Environ un proton sur 1000 donne naissance à une paire proton-antiproton. Les antiprotons créés sont alors sélectionnés et stockés dans un anneau (typiquement de quelques dizaines de mètres de diamètre). Malheureusement seul 1 antiproton sur 1000 va être ainsi stocké, car c'est un peu comme lorsque un enfant essaie de remplir une bouteille d'eau en s'approchant d'un arroseur à gazon. Une fois stockés, les antiprotons sont extraits à la demande et peuvent être injectés dans le collisionneur de la même façon que les protons, excepté le fait qu'ils vont tourner en sens inverse.

C'est ainsi que Carlo Rubbia a découvert en 1983 les particules porteuses de l'interaction « faible », nommées W^+, W^- et Z^0 de masse 90 GeV environ, qui avaient été prédites par les théoriciens. Cette découverte lui valut le prix Nobel dès 1984, ainsi qu'à Simon Van der Meer qui était le principal artisan du stockage des protons. Récemment, aux USA, à FermiLab, près de Chicago, un collisionneur de même type a permis la découverte du top, le 6ème quark très massif (175 GeV) qui manquait aux théoriciens. Enfin, au CERN, un très grand collisionneur électron-positon, le LEP, est installé dans un tunnel dont la circonférence équivaut à celle du périphérique de Paris. Il est utilisé pour la recherche d'une autre particule : le boson de Higgs, responsable de la masse des particules.

Les antiprotons, source d'énergie

Par annihilation proton-antiproton, toute la masse est transformée en énergie. C'est donc un carburant extrêmement efficace : 2 000 fois plus que la fission utilisée dans les réacteurs nucléaires, et 200 fois plus que les réactions de fusion dont le soleil tire son énergie. Mais il faut le fabriquer, ce qui nécessite un milliard de fois plus d'énergie qu'on en récupère. Les antiprotons accumulés au CERN pendant un an ne feraient fonctionner une ampoule électrique que pendant quelques secondes. Les applications ne peuvent donc être que pour des situations très particulières où le poids du carburant joue un rôle essentiel. L'application la plus intéressante serait pour les fusées ou les vaisseaux spatiaux, comme le propose la série de science fiction *Star Trek* pour son vaisseau *Enterprise*. L'utilisation de l'antimatière permettrait d'aller plus rapidement sur Mars par exemple, et surtout, permettrait de réaliser des missions actuellement impossibles car le poids de carburant est totalement prohibitif. Il suffirait de quelques millionièmes de grammes d'antimatière, mais leur production correspond à 100 000 ans de fonctionnement du CERN ou de FermiLab…Il faut aussi un stockage plus compact et plus durable que le stockage dans un anneau. Ceci est possible en décélérant les antiprotons et en les piégeant dans une « bouteille » électromagnétique. Des antiprotons ont pu être conservés plusieurs semaines ainsi confinés dans un espace de quelques centimètres. Mais le piège nécessite un excellent vide et des aimants supraconducteurs refroidis à quelques degrés Kelvin si bien que son encombrement est quand même de plusieurs mètres, et il ne peut contenir qu'une très petite quantité d'antimatière. Et là aussi seul un antiproton sur 1000 va se laisser piéger… Certains proposent aussi des armes, mais le problème du stockage sous un format compact est encore plus crucial, et les quantités nécessaires sont plutôt de l'ordre du milligramme. Ces applications futuristes ne sont donc pas pour demain !

Un sujet d'étude pour les physiciens

L'antimatière n'est pas seulement un outil, mais c'est un sujet d'étude passionnant pour les physiciens. La question essentielle est de savoir si toutes les propriétés sont exactement identiques au signe près, ou s'il existe certaines différences.

Une prédiction très forte est que les masses doivent être strictement identiques. Cette identité a pu être vérifiée avec une précision de 1 dix milliardième pour le proton et l'antiproton grâce au piège électromagnétique évoqué dans le paragraphe précédent. La comparaison a été effectuée au CERN par une équipe américaine, en mesurant leurs fréquences de rotation dans le piège, qui sont inversement proportionnelles à leurs masses. C'est comme si on avait pesé un camion de 10 tonnes à 1 milligramme près. Pour une autre particule, le kaon neutre, des mesures indirectes montrent une égalité des masses à 10^{-19} près, soit une précision encore 1 milliard de fois supérieure. Une nouvelle « usine d'antimatière » vient de démarrer au CERN. Son but principal est d'essayer de fabriquer des antiatomes d'hydrogène à partir des antiprotons et des positons stockés dans un piège. Leur très faible énergie permettra de les étudier pour chercher à déceler si d'infimes différences existent. Un autre type d'expérience consiste à remplacer un des électrons de l'atome par un antiproton qui a la même charge électrique afin d'étudier l'effondrement de ce système instable.

Cependant, une asymétrie matière-antimatière a quand même été observée dans un cas, mais seulement un, actuellement. Il s'agit du kaon neutre qui est une particule bien étrange puisque elle est formée d'un quark et d'un antiquark, l'un des deux étant le quark down et l'autre le quark nommé « étrange » justement, qui est instable. Depuis 1964, on sait qu'une asymétrie, appelée « violation de *CP* », existe entre le kaon neutre K^0 et son antiparticule, le $\overline{K^0}$. Mais l'expérience CP-LEAR, au CERN, a permis une observation directe de cette asymétrie. En effet, le kaon a l'étonnante propriété de pouvoir osciller entre matière et antimatière. CP-LEAR a comparé les probabilités des 2 processus : $K^0 \rightarrow \overline{K^0}$ et $\overline{K^0} \rightarrow K^0$. Il faut réussir à « étiqueter » l'état matière ou antimatière du kaon à 2 instants différents : à l'instant de sa création, et à l'instant de sa disparition, qui ne sont séparés que par quelques milliardièmes de secondes. La création a été produite par annihilation d'un antiproton à l'arrêt dans une cible de protons, c'est-à-dire d'hydrogène. Le faisceau d'antiprotons était ralenti dans un décélérateur en anneau appelé LEAR (Low Energy Antiproton Ring) de telle sorte que les antiprotons terminaient leur parcours au centre de la cible.

La création du kaon est régie par les lois de l'interaction « forte » (π est une autre particule, appelée pion) :

$$\overline{p} + p \rightarrow K^0 + K^- + \pi^+$$

$$\overline{p} + p \rightarrow \overline{K^0} + K^+ + \pi^-$$

La disparition du kaon est régie par les lois de l'interaction « faible » :

$$K^0 \rightarrow e^+ + \pi^- + \nu_e$$

$$\overline{K^0} \rightarrow e^- + \pi^+ + \overline{\nu_e}$$

On voit donc que K^0 et $\overline{K^0}$ peuvent être étiquetés grâce au signe des charges électriques des particules associées aux 2 processus. Le détecteur construit par la Collaboration CP-LEAR à laquelle j'appartenais (une centaine de physiciens de 9 pays dont la France) a été optimisé pour identifier ces différentes particules et le signe de leur charge. L'asymétrie mesurée est de 0,7% en faveur de la matière.

Un univers d'antimatière ?

Matière et antimatière ne peuvent coexister sans s'annihiler, produisant alors du rayonnement. Le monde qui nous entoure : notre corps, la terre, les autres planètes, le soleil, notre galaxie, les autres galaxies aussi loin qu'on puisse les observer est seulement fait de matière, car sinon nous détecterions le rayonnement provenant des zones frontières d'annihilation. La théorie du Big Bang doit pouvoir rendre compte de ce fait extraordinaire.

Cette victoire de la matière sur l'antimatière est explicable en partie grâce à l'asymétrie décrite précédemment. Comme l'avait énoncé le physicien russe Andreï Sakharov dès 1967, il faut aussi que le proton soit instable, ce que les théories de grande unification prédisent, mais qui n'a pu être ni confirmé, ni infirmé par l'expérience. Le scénario du Big Bang prévoit qu'après quelques millisecondes, les protons et les neutrons vont s'annihiler avec leurs antiparticules, et, pour 1 000 000 000 d'annihilations, 1 seul proton ou neutron survivra, en bon accord avec les proportions photons/matière observées dans notre univers.

L'existence d'univers parallèles constitués d'antimatière ne peut être exclue expérimentalement, mais la séparation spatiale de la matière et de l'antimatière est difficile à imaginer dans le contexte du Big Bang.

Malgré tout, si jamais des extra-terrestres d'un univers très lointain nous contactaient dans le but de nous rencontrer, il serait prudent de s'assurer au préalable qu'ils vivent bien dans un univers de matière comme le nôtre. C'est possible grâce à l'asymétrie observée pour le kaon puisque les K^0 qui sont en surnombre doivent se désintégrer en donnant naissance à des positons qui ne sont pas les constituants des atomes dont nous sommes faits.