

Matière-antimatière, symétries et dissymétries

par Catherine Thibault, directrice de recherche au CNRS

Catherine Thibault est directrice de recherche émérite au CNRS, Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse, Orsay.



Après une formation d'ingénieure à l'Ecole supérieure de physique et chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI), elle est entrée au CNRS en 1964, et a soutenu sa thèse d'Etat en 1971 sur l'«Étude par spectrométrie de masse en ligne de noyaux légers exotiques produits dans les réactions à haute énergie». Elle a ensuite consacré une très grande partie de sa carrière à mesurer les masses et étudier la forme de nombreux noyaux très éloignés de la stabilité (dits exotiques) jusqu'à quelques millisecondes de demi-vies, ce qui a permis d'obtenir des résultats importants dont certains très inattendus. En intermède, de 1992 à 2000, elle a participé à l'expérience de physique des particules CP-Lear qui a étudié la dissymétrie matière-antimatière au Cern, ce qui est le sujet de cet article. En parallèle, elle a préparé des diaporamas adaptés au grand public et aux lycéens sur divers sujets (radioactivité, antimatière, destin des étoiles, énergies en particulier), qu'elle-même et des collègues ont présenté lors de nombreuses interventions.

Catherine Thibault est chevalier de la Légion d'Honneur.

Résumé

La première partie a pour but de familiariser le lecteur avec les connaissances actuelles sur les composants ultimes de la matière. La découverte de l'antimatière est ensuite présentée dans son contexte historique du début du 20^e siècle. On a alors pensé que ces deux sœurs jumelles –matière et antimatière - étaient destinées à se comporter de façon strictement identique vis-à-vis des différentes interactions. Mais il est montré ici que la deuxième moitié du 20^e siècle a apporté bien des surprises, et que le 21^e siècle se trouve actuellement confronté à plusieurs questions encore en suspens qu'il va devoir essayer de résoudre.

Abstract

The first part aims to familiarize the reader with the current knowledge on the ultimate components of matter. Next, the antimatter discovery is presented within its historical context of the beginning of the 20th century.

It was afterwards thought that these twin sisters - matter and antimatter- were intended to behave strictly identical to the various interactions. However, it is here shown that the second half of the 20th century brought a lot of surprises, and that the 21st century is now facing several still outstanding issues that it will have to try to solve.

« Antimatière » s'oppose bien sûr à « Matière ». Mais quel est le rapport exact entre matière et antimatière ?

La matière et ses constituants ultimes :

En premier lieu, il peut être utile de rappeler quels sont les constituants de la matière. La figure 1 montre une mouche qui a une taille d'environ 1 cm. En utilisant une loupe, un microscope, un accélérateur de particules, on peut zoomer progressivement sur le cœur de la matière. La molécule d'ADN ne

mesure déjà plus qu'un centième de micromètre. 100 fois plus petit, on trouve l'atome composé d'un noyau très dense autour duquel gravite un nuage d'électrons. Chaque électron e^- porte une charge négative. Leur nombre détermine les propriétés chimiques : ainsi, l'hydrogène a 1 électron, le carbone en a 12, et l'uranium 92, ce qui a permis à Mendeleiev de classer les éléments chimiques.

Le noyau, très compact, est 10 000 fois plus petit que l'atome. C'est un agrégat de particules environ

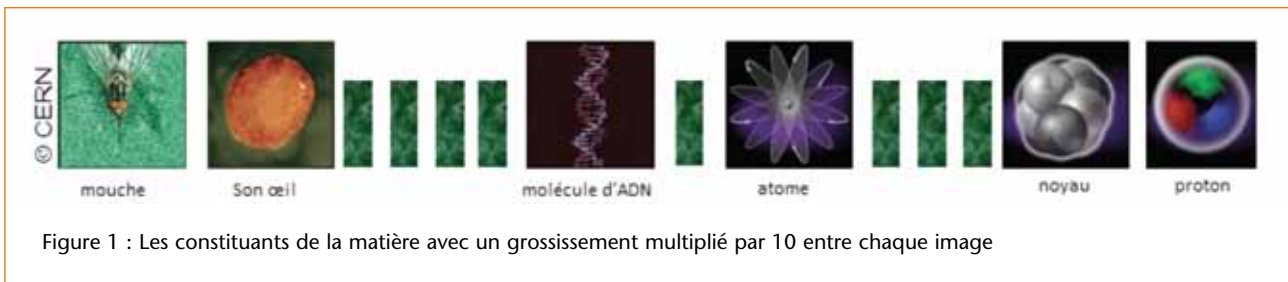


Figure 1 : Les constituants de la matière avec un grossissement multiplié par 10 entre chaque image

2 000 fois plus massives que l'électron : d'une part des protons porteurs d'une charge électrique positive, et donc en même nombre que les électrons : le noyau d'hydrogène a 1 proton, le carbone en a 6 et l'uranium 92 ; d'autre part des neutrons sans charge électrique. En effet, 2 interactions sont en compétition dans le noyau : l'interaction *électromagnétique*, force de répulsion entre les protons porteurs de charges identiques, et l'interaction *forte*, force d'attraction entre neutrons et/ou protons qui permet de créer des noyaux stables quand le mélange protons-

Enfin, il faut ajouter une 4^e particule à cette famille : le neutrino qui a une masse très faible et qui, n'étant pas chargé, est insensible à l'interaction *électromagnétique*. Comme l'électron, le neutrino n'est pas sensible non plus à l'interaction forte. Par contre, les 2 autres interactions connues, l'interaction faible, et la gravité agissent sur toutes les particules. La famille (électron, neutrino ν_e , quarks u et d) est accompagnée de 2 autres familles composées chacune de 4 particules analogues, mais plus massives et instables (Table 1).

	Charge	Famille 1	Famille 2	Famille 3
quarks	+2/3 -1/3	up <i>u</i> down <i>d</i>	charme <i>c</i> étrange <i>s</i>	top <i>t</i> beau <i>b</i>
leptons	-1 0	électron e^- neutrino ν_e	muon μ^- neutrino ν_μ	tau τ^- neutrino ν_τ

Table 1 : Les 3 familles de particules, En rouge, elles sont sensibles aux 4 interactions ; en orange elles ne le sont pas à l'interaction forte ; en noir, elles ne le sont ni à l'interaction forte ni à l'interaction électromagnétique

neutrons est correctement dosé : le noyau d'hydrogène a 3 isotopes stables^a avec 0, 1, ou 2 neutrons, celui de carbone peut en avoir 6 ou 7 ; par contre aucun noyau d'uranium n'est stable, ni aucun des noyaux au-delà du plomb qui a 82 protons.

Enfin, les protons et les neutrons eux-mêmes sont formés de 3 « quarks »^b : 2 quarks « up » *u* (charge +2/3) et 1 quark « down » *d* (charge -1/3) pour le proton, 1 quark *u* et 2 quarks *d* pour le neutron. Les quarks sont donc sensibles aux interactions *électromagnétique* et *forte*. Ces 2 quarks et l'électron (non sensible à l'interaction *forte*) suffisent à constituer toute la matière de notre univers. Actuellement, on pense que les électrons sont des particules « élémentaires » insécables et que les quarks le sont probablement aussi. L'interaction *forte* permet aussi d'assembler un quark et un antiquark pour former des particules appelées « mésons », qui sont toutes instables.

Et l'antimatière ?

La découverte de l'existence de l'antimatière est une histoire particulièrement fascinante et instructive. A la fin du 19^e siècle, les scientifiques pensaient avoir tout résolu. En particulier, le comportement des électrons semblait être très bien décrit par les lois de l'électromagnétisme établies par James Clark Maxwell. Mais, surprise ! Le 20^e siècle a tout remis en question. Dès 1906, Albert Einstein montra que les lois de Newton n'étaient valables que pour de faibles vitesses, et que pour des vitesses proches de la vitesse de la lumière, il fallait prendre en compte sa théorie de la relativité restreinte. Puis, en 1926, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg puis Erwin Schrödinger introduisirent la Mécanique Quantique et montrèrent que l'électron a un spin +1/2 ou -1/2 associé au sens de sa rotation quand il est en mouvement. En 1929, tous ces aspects ont été réunis en

une seule théorie par un jeune physicien anglais de 27 ans, très brillant, Paul Dirac. Mais son équation avait 2 solutions. Une controverse s'engagea alors sur l'interprétation de cette 2^e solution : une existence mathématique, mais sans signification physique ? Ou, au contraire, l'indication d'une nouvelle particule qui aurait une charge positive ? Comme la particule positive la plus légère connue était le proton 2 000 fois plus massif que l'électron, Dirac imagina l'existence d'un anti-électron, ou « positron » (ou encore positon en français)^C, très semblable à l'électron mais de charge positive. Pendant ce temps, à l'autre bout du monde, plus exactement au Caltech (États-Unis), un autre jeune physicien, Carl Anderson, étudiait les rayons cosmiques à l'aide d'une chambre de Wilson placée dans un champ magnétique. La trajectoire des particules est ainsi visualisée sous forme de petites gouttelettes, et le sens de sa courbure (induite par le champ magnétique) dépend du signe de la charge électrique. C'est ainsi qu'en 1932, lorsqu'Anderson remarqua des électrons chargés « à l'envers », c'est-à-dire positivement, il fit le rapprochement avec les suggestions de Dirac. Deux autres équipes dans le monde avaient déjà observé des électrons chargés positivement un peu avant Anderson, mais n'avaient pas osé publier leurs résultats craignant un artefact expérimental. Ainsi va la science... Dirac et Anderson eurent tous deux le prix Nobel, respectivement en 1933 et 1936.

S'est alors immédiatement posée la question de savoir s'il s'agissait d'un phénomène spécifique à l'électron, ou au contraire très général : le proton a-t-il un antiproton de charge négative ? Et le neutron, bien que non-chargé, un antineutron, etc. (la notation utilisée par la suite pour les antiparticules, excepté le positon, sera \bar{p} , \bar{n} , etc.).

Les positons observés par Anderson étaient créés par des réactions nucléaires entre les rayons cosmiques et l'atmosphère. En effet, selon la célèbre loi d'Einstein $E=Mc^2$, l'énergie libérée E peut donner naissance à des paires particules-antiparticules de masse M. Mais pour la paire proton-antiproton, il faut disposer d'une énergie 2 000 fois supérieure à celle nécessaire pour créer la paire électron-positon. Les Américains se lancèrent alors dans l'aventure en construisant à Berkeley un accélérateur de particules, le Bevatron. Ce fut long et difficile, et les premiers antiprotons ne furent découverts qu'en 1955, rapidement suivis

par la mise en évidence de l'antineutron en 1956 (prix Nobel pour Chamberlain et Segré en 1959). En effet, bien que n'ayant pas de charge électrique, les antineutrons se distinguent facilement des neutrons par leurs produits de désintégration :

$$\bar{n} \rightarrow \bar{p} + e^+ + \nu$$

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

Il faut cependant remarquer que certaines particules, telles le photon γ ou le méson π^0 , sont identiques à leur antiparticule.

Les symétries C, P, T

Particule et antiparticule : deux sœurs jumelles, que l'on crée toujours conjointement, mais jusqu'où va leur ressemblance ? Ont-elles **exactement** la même masse, la même durée de vie si elles sont radioactives, les mêmes spectres lumineux s'il s'agit d'atomes et d'anti-atomes ? Sont-elles soumises, avec **exactement** les mêmes lois, aux interactions électromagnétique, forte et faible, ou à la gravité ?

En physique des particules, 3 symétries discrètes sont essentielles : C, P, et T (Figure 2), ainsi que leurs combinaisons CP et CPT :

- C, la conjugaison de charge inverse les charges, et transforme une particule en son antiparticule,
- P, la parité, agit comme un miroir,
- T, l'inversion du sens du temps, agit comme si on passait un film à l'envers.

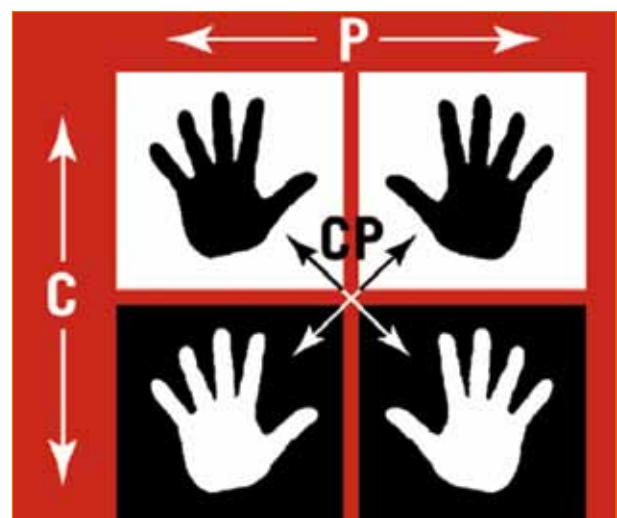
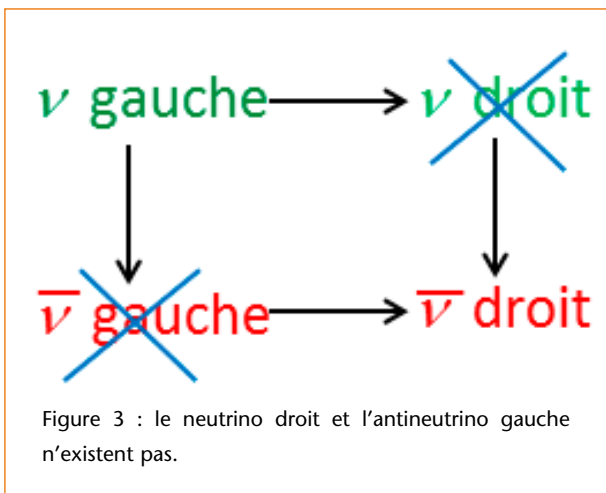


Figure 2 : symétries C, P, CP



A priori, on pourrait penser, ou espérer, que ces symétries soient parfaitement conservées (« invariants »), c'est-à-dire que toutes les lois physiques soient identiques pour une particule et sa transformée par la symétrie considérée. Il peut paraître étrange que l'on ait pensé que T soit conservée car à notre échelle, quand on inverse le temps en passant un film à l'envers, le plongeur remonte sur son tremplin et le vase cassé se recolle miraculeusement. Mais à l'échelle des particules la conservation de T paraissait tout aussi probable que celle de C et P, et, jusqu'à présent, toutes les observations montrent que c'est effectivement le cas dans les interactions forte et électromagnétique.

Par contre, pour l'interaction faible, aux USA en 1956, Tsung Dao Lee et Chen Ning Yang, deux jeunes théoriciens, ont remarqué qu'il n'existait pas de preuve expérimentale de la conservation de P ; et en particulier, que si l'hypothèse de violation de P était vérifiée, alors les 2 particules, θ^+ (theta⁺) et τ^+ (tau⁺) qui avaient été observées avec les mêmes masse et durée de vie pourraient être une seule et même particule, bien que se désintégrant vers des états de parités différentes. Quelques mois plus tard, toujours aux USA, Chien-Shiung Wu, « la Marie Curie chinoise », et ses collaborateurs réalisèrent une des expériences proposées par Lee et Yang et prouvèrent, en étudiant la désintégration β d'atomes de cobalt 60, que P n'est pas conservée dans l'interaction faible (prix Nobel 1957 pour Lee et Yang). La violation de P ainsi que celle de C peuvent même y être maximales ! Ainsi il a pu être conclu que les 2 particules θ^+ et τ^+ sont une seule et même particule : le méson K^+ qui peut se désintégrer en violant P.



L'exemple le plus frappant est celui du neutrino gauche (Figure 3) : P le transforme en neutrino droit qui n'existe pas, et C le transforme en antineutrino gauche qui n'existe pas non plus. Seule la combinaison CP qui le transforme en antineutrino droit aboutit à une particule qui existe.

On a alors misé sur l'invariance de la combinaison CP. Mais en 1964, une petite dissymétrie, tout à fait inattendue, a été mise en évidence aux USA par James Christenson, James Watson Cronin, Val Fitch et René Turlay qui ont observé que 2 % des mésons K (ou kaons) neutres pouvaient se désintégrer selon un mode interdit par la conservation de CP. (prix Nobel 1980 pour Christenson, Cronin, et Fitch). Les kaons neutres K^0 et \bar{K}^0 font intervenir le quark « étrange » s, et sont respectivement composés de ($d \bar{s}$) et ($\bar{d} s$). Le modèle de base de la physique des particules appelé « Modèle standard » a pu prendre en compte cette violation de CP et a alors prédit une violation plus forte pour le méson B qui contient un quark b, ce qui a été confirmé par les expériences Babar aux USA et Belle au Japon. Mais très récemment l'expérience LHCb au Large Hadron Collider LHC du Cern (Organisation européenne pour la Recherche nucléaire) a mis en évidence la violation de CP aussi dans le méson charmé (avec un quark c), avec une amplitude beaucoup plus forte qu'attendu¹ : affaire à suivre...

Depuis 1964, tous les espoirs se sont alors reportés sur la conservation de CPT. Dans ce cas, la foi en son invariance est très forte car elle s'appuie sur le « théorème CPT » qui est basé sur la théorie quantique des champs. Ce théorème a été démontré dans les années 1954-55, indépendamment, par divers théoriciens dont Gerhard. Lüders, Wolfgang Pauli ou John Stewart Bell ; une démonstration plus générale en a été donnée par Res Jost en 1957. Les principales conséquences sont une stricte égalité des masses et durées de vie des particules et de leurs antiparticules. Jusqu'à présent, aucune faille n'a été trouvée ni pour e^-e^+ , ni pour P, \bar{P} , ni pour $K^0-\bar{K}^0$. La comparaison directe des masses de e^- , e^+ , P, \bar{P} , a atteint une précision de 10^{-9} (un milliardième) sans montrer aucun écart significatif ; ces mesures sont obtenues en comparant leurs fréquences de rotation, qui sont inversement proportionnelles à leurs masses, dans le champ magnétique d'un piège électromagnétique dans lequel on

les a confinés. Pour le kaon neutre, la comparaison de masse est indirecte, mais la précision atteinte est 10^{-18} , soit 1 milliardième de milliardième, pour un niveau de confiance de 90 %. Les mesures de durée de vie sont beaucoup moins précises et donc peu significatives.

Posant alors que *CPT* est invariant, il faut fatalement que *T* soit violée. Des observations indirectes le suggéraient d'ailleurs, mais la première observation directe a été faite au Cern en 1998, par l'expérience CP-Lear à laquelle j'ai participé. Il s'agit à nouveau des kaons neutres. CP-Lear était capable « d'étiqueter » les K^0 et les \bar{K}^0 lors de leur création, et lors de leur désintégration. Or une propriété très particulière du kaon neutre est sa capacité d'osciller entre les 2 états K^0 et \bar{K}^0 . Ainsi en comparant en fonction du temps τ la probabilité pour un K^0 créé au temps $t = 0$ d'être identifié comme \bar{K}^0 à l'instant $t = 0$ de sa désintégration :

- K^0 à $t = 0 \rightarrow \bar{K}^0$ à $t = \tau$,

avec celle du processus image par inversion du temps :

- \bar{K}^0 à $t = 0 \rightarrow K^0$ à $t = \tau$

le résultat a été une différence de 6,6 ‰ en faveur de la transformation $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$ pour τ compris entre 0,2 et 2 ns, preuve directe de la violation de la symétrie *T*.

La force de gravité

Nous avons vu que les symétries sont conservées

matière et antimatière ? En se basant sur le « principe d'équivalence » selon lequel un corps placé dans un champ gravitationnel subit une accélération g indépendante de la nature du corps, il y a là aussi une très forte présomption en faveur de l'invariance de l'attraction gravitationnelle. Mais il n'y a aucune preuve directe alors que certains théoriciens proposent la possibilité d'une attraction différente, voire même d'une répulsion².

Pour vérifier ce qu'il en est, il n'est pas possible d'utiliser des antiprotons car les forces *électromagnétiques* dues à l'environnement, et auxquelles ils sont extrêmement sensibles, masquent complètement les effets de la gravitation. Il faut donc utiliser de l'antimatière neutre, et l'antiatome le plus simple est l'anti-hydrogène \bar{H} (\bar{p} e^+). Si il est ultra-froid (énergie cinétique quasi-nulle), il est alors possible de le laisser tomber et de mesurer l'intensité et la direction de l'attraction gravitationnelle qu'il subit. Au Cern, plusieurs équipes travaillent à fabriquer des \bar{H} depuis une vingtaine d'années. En 1995, 9 \bar{H} ont été observés, mais ils avaient une grande énergie cinétique. En 1999, a été lancée la construction de l'Antiproton Decelerator AD qui décélère les \bar{p} de 3,5 GeV^d jusqu'à 5,3 MeV. En les ralentissant ensuite à une dizaine de keV par le passage dans une feuille mince, ils peuvent être capturés dans des pièges électromagnétiques et refroidis à moins de 100 meV équivalent à une température de 1200K, ce qui permet de les faire se combiner à un positon pour former un \bar{H} (Figure 4).

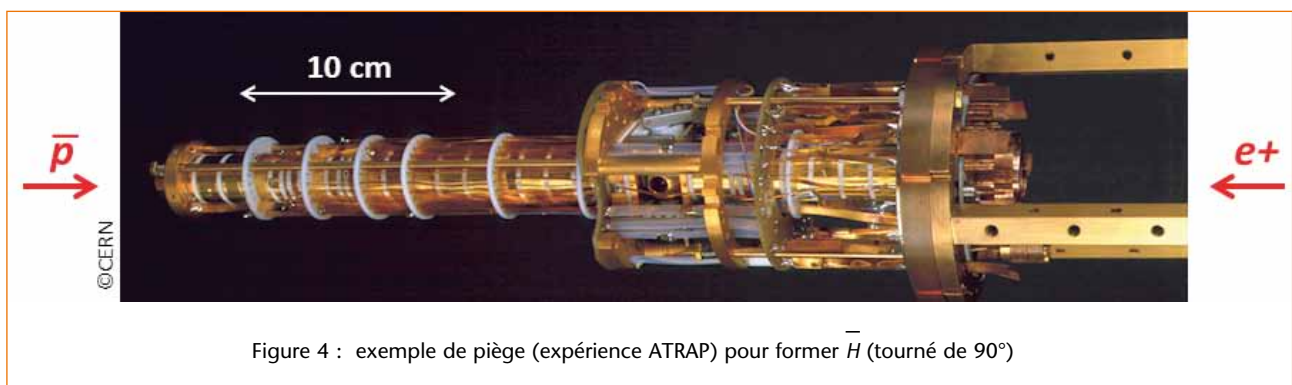


Figure 4 : exemple de piège (expérience ATRAP) pour former \bar{H} (tourné de 90°)

dans les interactions *électromagnétique* et *forte*, et que les symétries *C*, *P*, *T* et leurs combinaisons, à la seule exception de *CPT*, sont violées dans l'interaction *faible*. Mais qu'en est-il de la gravité ? L'attraction gravitationnelle est-elle la même pour

Les premiers \bar{H} refroidis ont été obtenus en 2002, par les expériences Athena, puis Atrap³. Depuis, plusieurs centaines de millions de \bar{H} froids ont été fabriqués. Mais, pour étudier leurs propriétés, il faut disposer de temps, ce qui nécessite que les \hbar



eux-mêmes soient confinés dans un piège, opération très compliquée car ils n'ont pas de charge électrique ! Ce n'est qu'en 2011 que l'expérience Alpha³ a réussi à piéger 309 \bar{H} pendant plus d'un quart d'heure, ce qui ouvre la porte aux premières études de spectroscopie laser qui seront un nouveau test de l'invariance de *CPT*.

Pour la gravitation, deux expériences sont en préparation, et nécessitent des statistiques importantes. L'efficacité de piégeage n'étant actuellement que de 1‰, le Cern a décidé la construction d'un décélérateur supplémentaire, Elena (*Extremely Low ENergy Antiproton ring*), qui décélèrera les \bar{p} de 5,3 MeV jusqu'à 100 keV, et les rendra plus faciles à piéger. Dans les 2 expériences, les positons sont d'abord combinés avec des électrons pour former des positroniums Ps, et les \bar{H} sont formés en capturant un positon lors d'interactions ($P_s^- \bar{p}$). Dans l'expérience Aegis³, un faisceau horizontal de \bar{H} est formé et accéléré, et \bar{g} sera mesuré grâce à un déflectomètre couplé à un détecteur de position qui mesure le déplacement vertical du faisceau. Dans l'expérience GBAR⁴, un positon supplémentaire est capturé, ce qui permettra de former l'ion H^+ qui peut être piégé et refroidi jusqu'à quelques neV (20 μ K). Un laser arrache alors le positon en excès, ce qui détermine le temps 0, et l'antiatome neutre tombe (ou s'élève si on croit la gravité de signe opposé pour des antiparticules). Si la gravité est inchangée, la vitesse de chute sera de l'ordre de 1 m/s et des détecteurs placés à 10 cm au-dessus et au-dessous permettront de mesurer le temps d'arrivée et de déterminer \bar{g} . Les deux expériences espèrent une précision d'au moins 1 % avec un but ultime de 1‰. Affaire à suivre⁵...

Le lien cosmologique.

Dans notre univers, nous n'observons pas d'antimatière autre que les très faibles quantités produites dans les interactions entre les rayons cosmiques et le milieu interstellaire, alors qu'au moment du BigBang, les particules et les antiparticules ont toujours été formées par paires. Elles auraient dû ensuite toutes s'annihiler, reconvertissant ainsi leur masse en énergie selon $E=Mc^2$, ce qui n'est pas le cas. Les observations montrent qu'à ce moment, les protons avaient un léger excès de un milliardième. Cette question n'est pas encore complètement élucidée,

mais l'une des conditions nécessaires proposées par Sakharov en 1967 est la violation de *CP*, mais elle n'est pas suffisante. Affaire à suivre là aussi...

Conclusion

La saga de l'antimatière a commencé à partir d'une équation mathématique. Près d'un siècle plus tard, il y a encore bien des zones d'ombre et elle nous réserve sûrement encore des surprises !

Références

1. <http://cerncourier.com/cws/article/cern/48323>
2. Motivation for antigravity in General Relativity: G. Chardin, *Hyperfine Interactions* 109, 83 (1997)
3. <http://public.web.cern.ch/public/fr/Research/OtherExp-fr.html>
4. <http://cdsweb.cern.ch/record/1386684/files/moriond.in2p3.fr/J11/transparents/dupre.pdf>
5. d'autres aspects de l'antimatière : <http://www.csnsm.in2p3.fr/Grand-Public>

Lexique

- a. Isotopes : Les noyaux des isotopes ne diffèrent que par le nombre de neutrons. Ayant le même nombre de protons, ils correspondent donc au même élément chimique : par exemple l'uranium 235 (92 p et 143 n) et l'uranium 238 (92 p et 146 n) sont des isotopes de l'uranium.
- b. Quark : il n'est jamais observé seul. Soit 3 quarks se regroupent pour former la matière, en particulier les neutrons et les protons. Soit un quark s'allie à un antiquark pour former un Méson toujours instable
- c. Positron, ou positon : antiparticule de l'électron. Même masse, mais charge électrique opposée (positive)
- d. Unité d'énergie utilisée en physique des particules: l'électron-volt eV, énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de 1V, et toutes les dérivées : keV, MeV GeV, TeV,... vers les grandes énergies, meV, μ eV, neV,... vers les basses énergies. Equivalence température-énergie : 300K (température ambiante) correspond à 25 meV.