

Les impossibles en physique des particules

MICHEL SPIRO

À mesure que se poursuit la quête de particules toujours plus élémentaires, la preuve de l'existence de ces particules devient de plus en plus abstraite.

Démocrite, au IV^e siècle avant notre ère, pensa, pour des raisons diffuses, qu'il existait des constituants insécables de la matière. L'idée de Démocrite était bonne, mais il ne savait pas que les particules ultimes sont élusives. Toujours est-il que, dans le langage de la chimie moderne, on a baptisé atomes les éléments chimiques de la classification périodique des éléments.

Revenons un peu en arrière pour mieux définir ce qu'est cette élémentarité. Boyle, au XVII^e siècle précise que les "éléments" (il parle en chimiste) sont des corps d'une telle simplicité que les efforts de l'art sont insuffisants pour les décomposer. Hélas pour la simplicité, l'art du physicien progresse. À mesure que l'on explore la matière, on s'aperçoit que les atomes sont formés d'électrons et de noyaux ; que ces noyaux sont formés d'autres particules, les neutrons et les protons. Que les protons et les neutrons sont constitués de quarks de types différents. Peu de physiciens pensent sérieusement aujourd'hui que les quarks sont les constituants définitivement insécables de la matière.

De plus, Einstein a démontré l'équivalence de la matière et de l'énergie et, en conséquence, toute énergie est potentiellement riche de particules matérielles. À de très hautes énergies, on sait créer des particules fugaces qui ne vivent que quelques milliardièmes de seconde en laboratoire.

Pour identifier une particule, on a longtemps cru qu'il fallait l'isoler de ce à quoi elle était liée. Or, il semble que les quarks soient à jamais emprisonnés dans la cage qu'ils constituent eux-mêmes : aussi les indices de leur présence sont-ils indirects. Au contraire, les neutrinos ne se lient à rien, ou presque, et leur étude est très difficile. Imaginez une particule qui n'interagit avec aucune substance connue : comment pourrait-on l'identifier ? Peut-on même penser qu'elle existe ?

Ainsi la recherche des particules élémentaires se heurte-t-elle à deux difficultés : les particules qui se lient trop et celles qui ne se lient pas assez.

QU'EST DEVENUE L'ANTIMATIÈRE ?

Quand l'énergie se matérialise, il se crée des quantités égales de matière et d'antimatière. Près de l'instant zéro du Big Bang, la température était extrême-

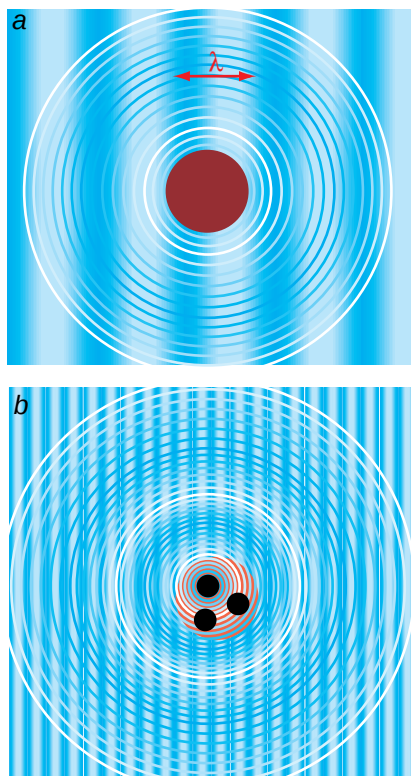
ment élevée et tout était énergie. Lorsque celle-ci s'est condensée matériellement, des masses égales de matière et d'antimatière se sont formées. Le problème est : où est l'antimatière ? Si elle n'est nulle part, pourquoi et comment a-t-elle disparu ?

Neuf atomes d'anti-hydrogène, grand miracle, viennent d'être fabriqués et observés au CERN. Cette réussite est le dernier épisode, en date, d'une longue histoire. Notre vision de l'antimatière est issue des équations : Paul Dirac, à la fin des années 1920, élabore une équation qui unifie, dans une certaine mesure, la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Les solutions de cette équation font apparaître la matière ordinaire, mais pour chaque particule de matière, il existe une solution symétrique, une antiparticule, c'est-à-dire une image dans le monde de l'antimatière. Ces antiparticules ont des caractéristiques «miroirs» des particules : elles ont la même masse, mais toutes les charges, les charges électriques ou les charges quantiques plus abstraites, sont opposées ; lorsqu'une particule et une antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent et leur matière se transforme en énergie. Aussi la matière, dont semble fait l'Univers, ne peut coexister avec l'antimatière sous peine d'annihilation.

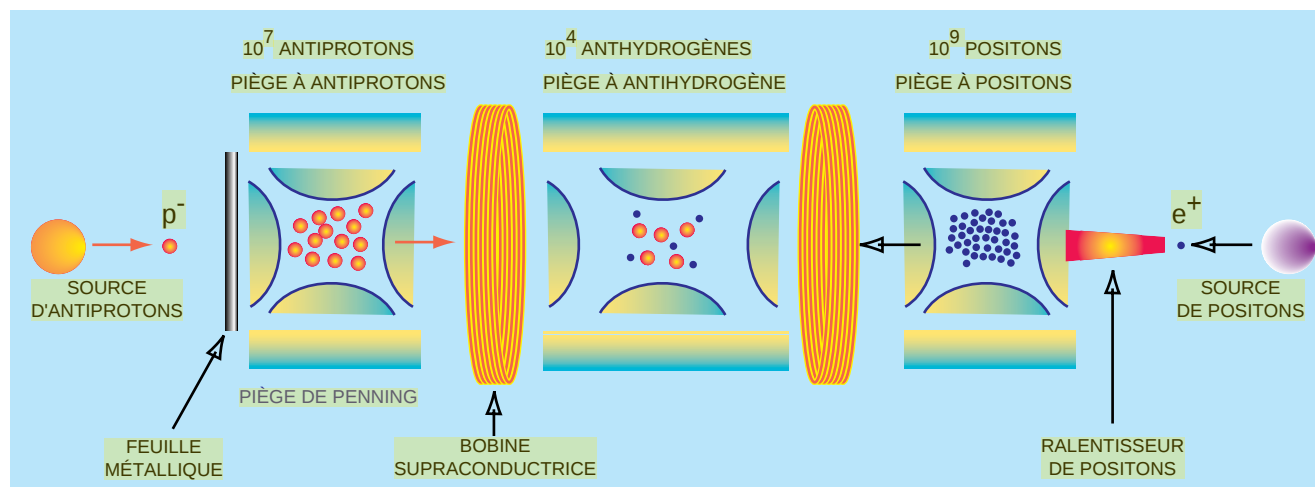
Les physiciens ont alors cherché si ces antiparticules existaient dans l'Univers. La recherche porte d'abord sur les rayons cosmiques, ces particules d'origine extragalactique : dans les années 1930, on y trouve des anti-électrons, baptisés positons, et leurs propriétés correspondent à ce que prévoit la théorie. En effet, placés dans un champ magnétique, les électrons des rayons cosmiques tournent dans un sens par rapport au champ magnétique ; les positons ont exactement les mêmes caractéristiques, sauf leur charge, et ils tournent dans l'autre sens.

Dans les années 1950, on détecte l'antiproton. Comme les physiciens ne le voient pas dans les rayonnements cosmiques, il faut le créer. Pour ce faire, ils envoient un proton de très grande vitesse sur un autre proton ; l'énergie de la collision se transforme en énergie, puis cette énergie se retransforme en matière à travers la relation d'Einstein $E = mc^2$, produisant un antiproton et un proton.

La course aux antiparticules se poursuit ensuite, et les physiciens repèrent l'antineutron, dans les années 1960, puis l'antidéutérium formé d'un antiproton et d'un antineutron, et bien d'autres antinoyaux. Les mesures indiquent que les forces nucléaires entre les constituants de l'antimatière sont les mêmes qu'entre les constituants de la matière.



À chaque particule on associe une onde, de longueur d'onde inversement proportionnelle à son énergie. On voit qu'une particule cible est «ponctuelle» par rapport à la longueur d'onde avec laquelle on l'éclaire si elle diffuse les ondes incidentes. Les quarks à l'intérieur du proton diffusent les ondes pénétrant dans le proton (b). Encore faut-il pour cela que les ondes soient suffisamment pénétrantes, sinon le proton fait écran (a).



Pour déceler les différences spectroscopiques entre la matière et l'antimatière, les physiciens du CERN proposent de stocker dans un piège à anti-hydrogène environ 10 000 atomes d'anti-hydrogène. Grâce aux techniques optiques ultrafines, les niveaux d'énergie du positon

en orbite autour de l'antiproton seraient mesurés à une précision de 10^{-18} , effet d'une éventuelle disparité matière-antimatière. Ces mesures, à la frontière du possible, élucideraient peut-être les énigmes liées à l'omniprésence de la matière dans l'Univers.

En est-il de même des lois de l'électromagnétisme ? Dans les atomes, des électrons orbitent autour du noyau. L'atome le plus simple, c'est l'atome d'hydrogène, avec un proton et un électron. Pouvait-on créer un anti-atome d'hydrogène fait d'un antiproton et d'un anti-électron ? La difficulté est qu'on ne sait fabriquer ces antiparticules qu'en très petit nombre, et la réalisation de neuf anti-atomes n'a été possible que grâce à toute la machinerie qui existe au CERN.

Cet exploit n'est-il qu'un premier pas vers la réalisation d'antimatière ? Un gramme d'antimatière correspond à 6.10^{23} atomes et le saut quantitatif est considérable, peut-être impossible. Les physiciens espèrent produire suffisamment d'anti-atomes d'hydrogène, quelques milliers, et les piéger dans des puits électromagnétiques avec des faisceaux laser pour étudier en détail les niveaux d'énergie de ces atomes d'anti-hydrogène. Alors nous verrons si les niveaux d'énergie des anti-atomes d'hydrogène sont les mêmes que ceux des atomes d'hydrogène.

L'énigme de l'antimatière créée au début de l'Univers est persistante : c'est une des plus importantes questions cosmologiques. Si dans l'Univers, il y a des anti-étoiles ou de la matière interstellaire faite d'antimatière, il y aurait des annihilations caractéristiques et on verrait les produits de ces annihilations ; on ne les a jamais observés.

Certains astrophysiciens pensent qu'il pourrait exister des antigalaxies «quelque part», totalement isolées des autres galaxies. Un satellite va être lancé : il verra si, dans les rayons cosmiques, il existe des traces d'anticarbone ou d'anti-oxygène. Comme ce sont les étoiles qui fabri-

quent le carbone et l'oxygène, ni le Big Bang ni les rayons cosmiques n'ont engendré de quantités appréciables de carbone et d'oxygène. Donc si l'on observait des rayons cosmiques faits d'anticarbone ou d'anti-oxygène, on saurait qu'ils ont été fabriqués par des anti-étoiles et cela serait la preuve de l'existence d'anti-étoiles.

La brisure de symétrie, une petite fluctuation initiale, qui aurait fait basculer l'Univers à sa création dans le camp de la matière, est inconnue. C'est pour cela qu'il est important de fabriquer des milliers et des milliers d'atomes d'anti-hydrogène ou d'anti-atomes pour voir s'il n'y a pas une petite différence dans les lois de physique entre l'antimatière et la matière ? Un tel écart constituerait une piste pour éclairer pourquoi l'Univers est fait de matière et non pas d'antimatière.

Il suffirait d'une toute petite dissymétrie, de l'ordre du milliardième, entre les quantités de matière et d'antimatière formées lors du Big Bang pour expliquer à la fois l'absence d'antimatière et la faible abondance de la matière par rapport au rayonnement. La majeure partie des protons et des antiprotons se seraient annihilés, donnant cet excès de photons et il ne resterait qu'un petit résidu de matière. Nous serions un résidu. S'il n'y avait pas ce tout petit excès de matière par rapport à l'antimatière, toute la matière et l'antimatière se seraient annihilées, et il n'y aurait que des photons dans l'Univers.

QU'EST-CE QUE VOIR UNE PARTICULE ?

Une particule élémentaire est une particule qui résiste à toute analyse en termes de sous-structures : même avec les micro-

scopes géants que sont les accélérateurs de particules, on ne distingue pas de sous-structures à l'intérieur. Les microscopes géants, au lieu d'utiliser des photons, utilisent des électrons ou d'autres particules ; ils ont permis dans les 30 dernières années de mettre en évidence les quarks au sein des protons et d'étudier leurs interactions. L'accélérateur d'électrons de 27 kilomètres de circonférence au CERN permettra de sonder les protons et leur intérieur, les quarks ; un jour ou l'autre on trouvera peut-être une sous-structure à ces quarks.

Le sens du mot «voir», en physique des particules, prend une extension à mesure que l'on diminue la longueur d'onde des particules, massives ou non, qui permettent d'éclairer la structure interne de la matière. On ne peut voir une particule que si on la sonde par une longueur d'onde de l'ordre de grandeur de sa taille. C'est ainsi que l'on voit les quarks à l'intérieur des protons : les électrons très énergétiques, produits dans les accélérateurs de particules, pénètrent à l'intérieur des protons et sont diffusés par les quarks. Cette diffusion dénote la présence de ces particules.

On ne voit pas les objets par eux-mêmes, mais ce qu'ils produisent lors de certains types d'impact. Les quarks peuvent être tellement secoués par les particules incidentes qu'ils produisent des jets de particules et «voir les quarks» signifie alors mesurer l'émission de particules issues de ces quarks. Le sens du mot «voir» devient plus abstrait.

L'idéal pour voir les quarks serait de constituer des jets de quarks et les précipiter sur d'autres quarks. Hélas cela semble impossible avec les théories actuelles de confinement des quarks : selon la chromodynamique quantique,