

L'usine à antimatière

Aux premiers instants de l'Univers, en même temps que se formait la matière, apparaissait son symétrique presque parfait, l'antimatière. Mais celle-ci a presque totalement disparu : où est-elle passée ? Alors que les physiciens fêtaient en 2002 le centenaire de la naissance de son découvreur, Paul Dirac, deux équipes réussissaient pour la première fois à fabriquer de grandes quantités d'anti-atomes.

Cécile Michaut

Ce magazine, la chaise sur laquelle vous êtes assis, vous-même : toute la matière que nous connaissons est formée d'atomes, assemblages très structurés de protons, de neutrons et d'électrons. Mais notre Univers contient aussi des antiparticules : lorsqu'une particule, par exemple l'électron, rencontre l'antiparticule correspondante, le positon, elles s'annihilent mutuellement en libérant de l'énergie. Toutefois, les antiparticules sont à la fois beaucoup plus rares que les particules, et beaucoup moins organisées : on n'a jamais observé d'anti-atomes naturels, par exemple. L'étude de tels systèmes serait pourtant bien utile pour la compréhension des différences exactes entre matière et antimatière.

Neuf pour commencer

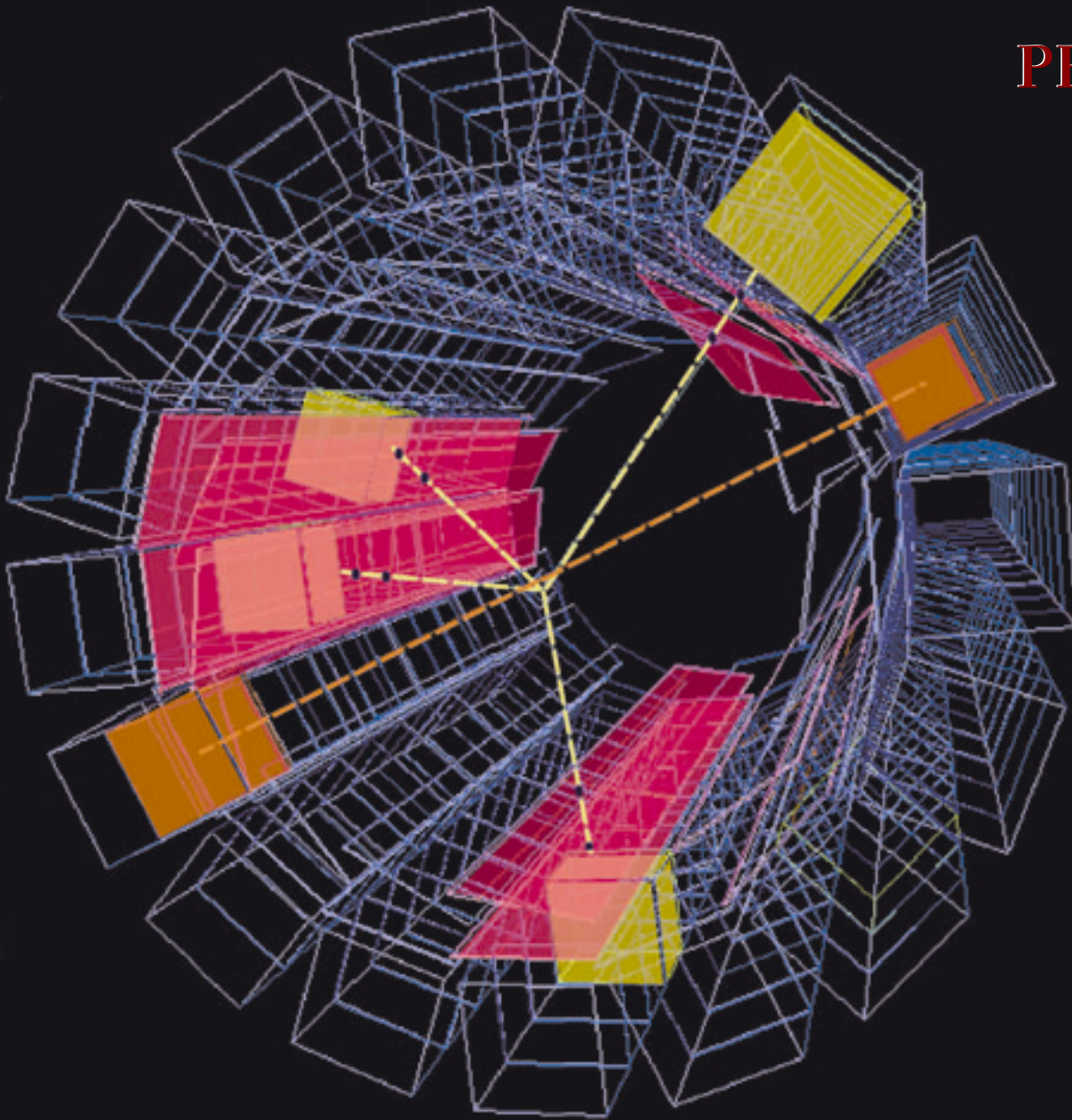
C'est pourquoi, dès les années quatre-vingt-dix, une équipe du Laboratoire européen pour la physique des particules (CERN) s'est attaquée à la fabrication de l'anti-atome le plus simple : l'antihydrogène. Comme l'hydrogène est formé d'un proton et d'un électron, l'antihydrogène contient seulement un antiproton et un positon. À la fin 1995, la grande première est annoncée : neuf atomes d'antihydrogène ont été fabriqués, et détectés [1].

Ces expériences ont été arrêtées en 1996. Mais l'intérêt pour l'antimatière est resté suffisant pour que le CERN

construise une nouvelle machine destinée à produire des antiprotons assez lents pour être utilisés dans la fabrication d'antihydrogène. Depuis cette date, une féroce compétition s'est installée entre deux équipes opérant sur cette machine : Atrap – dont quelques membres ont participé aux expériences de 1995 – et Athena. Cette dernière, longtemps en retard, a pris l'avantage le 18 septembre 2002, grâce à l'annonce, largement reprise dans la presse internationale, de la fabrication de 50 000 atomes d'antihydrogène [2]. L'événement est d'importance, bien entendu à cause du nombre, mais aussi parce que les anti-atomes produits par Athena vont environ cent mille fois moins vite que ceux de 1995 (ils frôlaient alors la vitesse de la lumière). La perspective de les conserver assez longtemps au même endroit pour étudier leurs propriétés physiques se rapproche.

Le 24 octobre, les membres de l'expérience Atrap, vexés de s'être fait voler la vedette, contre-attaquent. D'abord, ils surenchérisent quant au nombre. Selon eux, leur appareillage produit « *en une heure plus que tous les atomes d'antimatière qui ont été rapportés auparavant* » [3]. Sur-tout, ils présentent la première mesure d'une propriété interne de ces anti-atomes : l'énergie de liaison entre le positon et l'antiproton.

Ces annonces sont arrivées à point nommé pour la célébration du centenaire de la naissance du physicien anglais



L'ANNIHILATION D'UN ANTIPROTON ET D'UN POSITON AU MÊME POINT indique qu'ils étaient liés et formaient un atome d'anti-hydrogène. L'interception, par des détecteurs (en bleu), des particules produites lors de ces annihilations permet de reconstituer leur trajectoire (en jaune pour celles issues de l'antiproton et en orange pour celles issues du positon), donc leur point d'origine. C'est la méthode de détection choisie par l'expérience Athena, du CERN. © ATHENA/CERN

Paul Dirac, né en 1902 (et mort en 1984). C'est en effet lui qui, en quelque sorte, a « inventé » l'antimatière. En 1928, alors qu'il tente de décrire le comportement d'un électron en conjuguant les deux théories phare du XX^e siècle (la mécanique quantique et la relativité), deux solutions émergent de ses calculs. L'une correspond bien à l'électron, mais l'autre nécessite que l'énergie de la particule soit négative. Pour éliminer cette incongruité physique, et retrouver une énergie positive, Dirac change simplement le signe de la charge électrique : sa théorie impose donc l'existence d'une particule en tous points identique à l'électron mais portant une charge électrique positive, le positon. Cette proposition incongrue reçoit dès 1932 le soutien d'un résultat expérimental : aux États-Unis, Carl Anderson, qui ignorait la théorie de Dirac, observe en effet des positons dans des rayons cosmiques. Les deux physiciens recevront le



PAUL DIRAC, qui aurait eu 100 ans en 2002, a découvert l'existence de l'antimatière en résolvant des équations, avant que ce ne soit confirmé par l'expérience.

© SPL/COSMOS

prix Nobel pour ces travaux, mais séparément : en 1933 pour Dirac, en 1936 pour Anderson.

En généralisant, Dirac annonce ensuite que la théorie impose l'existence d'un monde « miroir » : chaque particule possède une antiparticule de même masse et de même durée de vie, mais de charge électrique opposée. Ce n'est toutefois qu'en 1955, grâce à un accélérateur de ⇒

[1] G. Baur *et al.*, *Phys. Lett. B*, 368, 251, 1996.

[2] M. Amoretti *et al.*, *Nature*, 419, 456, 2002.

[3] G. Gabrielse *et al.*, *Phys. Rev. Letters*, 89, 213401, 2002.

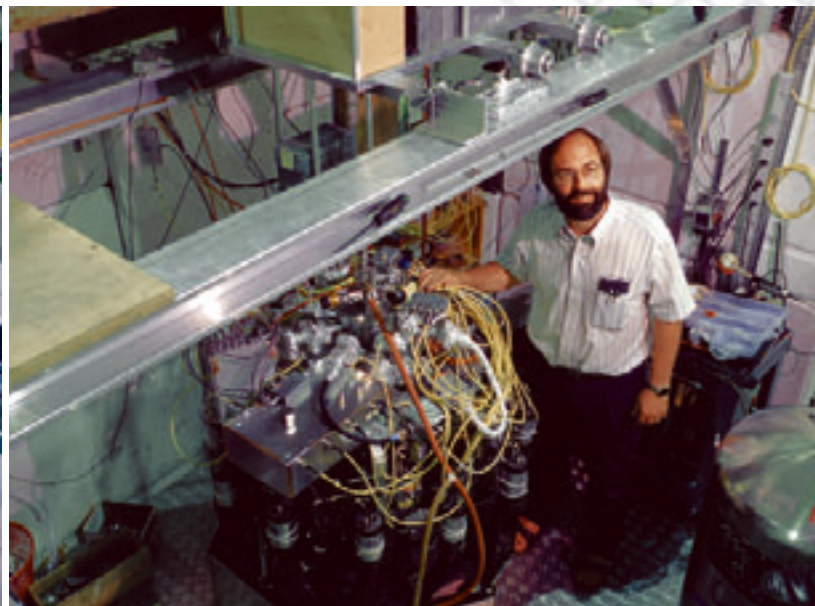
[4] Jean-Marie Frère, « La défaite de l'antimatière », *La Recherche Hors-Série* n° 1, avril 1998.

[5] Gérard Bonneau et David Hitlin, « Babar : sur la piste de l'antimatière », *La Recherche*, novembre 1999.

[6] Jacques-Olivier Baruch, « LHC, un défi technologique sans précédent », *La Recherche*, novembre 2002.

* **L'antineutron** est électriquement neutre, comme le neutron. Mais il est composé de trois antiquarks au lieu de trois quarks.

* **L'interaction faible** est, avec l'interaction électromagnétique, l'interaction forte et la gravitation, l'une des quatre interactions fondamentales de l'Univers. Elle est en particulier responsable de la désintégration radioactive du neutron.



DEUX EXPÉRIENCES UTILISENT LA MÊME SOURCE D'ANTI-PROTONS INSTALLÉE AU CERN. Athena (à gauche), a annoncé la première, à la fin septembre 2002, la fabrication de plus de 50 000 antiatomes. Quelques semaines plus tard, l'expérience Atrap, dirigée par Gerald Gabrielse (à droite), a répliqué en revendiquant 170 000 antiatomes et en présentant les premières mesures de leur énergie interne. © ATHENA/CERN - CERN/PHOTO LAB

TECHNIQUE

Piéger l'antimatière

■ **UN ATOME D'ANTIHYDROGÈNE SE FORME QUAND UN POSITON S'APPROCHE D'UN ANTI-PROTON,** et que leur vitesse relative est assez faible pour qu'ils aient une chance appréciable de s'associer en perdant leur trop-plein d'énergie. Or, les antiprotons sont produits, dans un accélérateur de particules, à des vitesses proches de celle de la lumière, tout comme les positons, issus de la désintégration radioactive d'atomes de sodium. La première difficulté surmontée par Athena et Atrap a donc été de ralentir ces deux types de particule. Les deux expériences ont en particulier utilisé le même « décélérateur d'antiprotons » installé au CERN.

Comment ensuite mettre en contact les positons et les antiprotons ? Seule une cage immatérielle peut capturer l'antimatière, puisque celle-ci s'annihile au contact de la matière. Le plus simple est donc d'utiliser des champs électromagnétiques. Mais, comme les deux types de particule portent une charge opposée, un champ électromagnétique

qui attire l'une repousse l'autre. Les physiciens du CERN ont donc mis au point un « piège dans le piège », formé d'une alternance de champs de signes différents. Il ne retient toutefois pas les antiatomes qui se forment : électriquement neutres, ils s'échappent dans toutes les directions.

Dernière étape, pour prouver que des atomes d'antihydrogène se sont formés, il faut... les détruire et détecter les rayonnements résultants. C'est là que les stratégies d'Athena et d'Atrap diffèrent le plus. Athena a en effet choisi de détecter l'annihilation de l'antiatome lui-même, c'est-à-dire la disparition simultanée d'un antiproton et d'un positon. Atrap, en revanche, récupère des atomes échappés du piège électromagnétique dans un « puits d'ionisation », où un fort champ électromagnétique les casse en deux. Les antiprotons seuls sont ensuite comptés. Avantage de cette méthode : elle permet de mesurer l'énergie nécessaire à la séparation des deux constituants de l'antiatome.

⇒ particules suffisamment puissantes (le Bévatron de Berkeley, aux États-Unis) qu'Owen Chamberlain et Emilio Segrè parviennent finalement à produire des antiprotons (ce qui leur vaudra, à eux aussi, un prix Nobel), puis des antineutrons* l'année suivante.

Parallèlement, les cosmologistes qui étudient les origines de l'Univers mettent au point un scénario cohérent dans lequel l'antimatière joue un rôle déterminant. Le Big Bang, expliquent-ils, est la matérialisation d'une grande partie de l'énergie présente en paires de particules et d'antiparticules. Mais dans le plasma primordial, au hasard des collisions, les particules ont rencontré à nouveau leurs antiparticules, et se sont recombinées en produisant de l'énergie.

Une interaction discriminante

Pourquoi ce processus n'a-t-il pas été total ? Matière et antimatière étant produites en quantités égales, elles devraient aussi disparaître au même rythme. Mais le simple fait que nous soyons là pour en discuter témoigne qu'une petite partie de la matière a survécu.

On sait depuis 1964 que matière et antimatière ne diffèrent pas que par la charge électrique, mais que l'interaction faible* les distingue aussi. Plusieurs expériences en ont observé des conséquences : certaines particules ne se désintègrent pas tout à fait de la même façon que les antiparticules correspondantes [4]. L'exacte compréhension de ce phénomène est encore en cours d'étude, notamment par une expérience nommée Babar, à Stanford, aux États-Unis [5].

L'étude des antiatomes permettra de vérifier l'existence ou non d'autres types de différence. Ainsi, l'antihydro-

PHYSIQUE

gène absorbe-t-il et émet-il de la lumière aux mêmes longueurs d'onde que l'hydrogène ? La majorité des physiciens pensent que oui. « *Les lois physiques qui gouvernent notre monde sont identiques à celles d'un monde d'antimatière observé dans un miroir et où le temps s'écoulerait à l'envers* », précise Étienne Klein, du Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Mais impossible d'avoir des certitudes absolues sans expérience. Pour mesurer le spectre de l'antihydrogène avec une aussi bonne précision que celui de l'hydrogène, dont les longueurs d'onde les plus grandes sont connues à un pour cent mille milliards près, il faudra produire beaucoup plus d'anti-atomes, les garder assez longtemps et réduire au minimum l'énergie du positon dans le champ électrique de l'antiproton. Atrap a certes mesuré l'énergie nécessaire à l'ionisation des anti-atomes, mais ceux-ci n'étaient pas, et de loin, dans leur état de plus basse énergie, le plus stable.

La gravitation à l'envers

L'autre grande interrogation à laquelle une production massive d'anti-atomes permettrait de répondre concerne l'action de la gravitation sur l'antimatière. S'ils réussissent à ralentir assez ces anti-atomes, les physiciens verront comment ils tombent sous l'effet du champ de gravitation de la Terre. À moins qu'ils ne les voient monter... « *La théorie de la relativité générale d'Einstein permet, et même prédit, l'antigravité, c'est-à-dire une gravité répulsive entre matière et antimatière* », envisage Gabriel Chardin, du CEA. En suivant cette piste, dans les années soixante-dix, des théoriciens (notamment Roland Omnès, de l'université Paris-Sud) ont émis l'idée que, très peu de temps après le Big Bang, la matière et l'antimatière se seraient suffisamment repoussées pour former deux zones dans l'Univers. Cette hypothèse, reprise périodiquement, n'a pas les faveurs de la majorité. Mais, là encore, seule l'expérience permettra de trancher définitivement.

Les physiciens d'Athena et d'Atrap auront-ils le temps de répondre à ces questions avant 2005 ? À cette date, en effet, le CERN arrêtera la production d'antiprotons lents pour un an au moins, comme la plupart des autres expériences, afin de concentrer les énergies – et les crédits – sur la construction du Grand Collisionneur de hadrons, le LHC [6]. La reprise des autres programmes à partir de 2006 est encore en suspens. Quelques autres annonces spectaculaires dans les deux ans qui viennent ne seraient pas négligeables pour convaincre la direction du CERN de l'importance de l'antimatière. ■■ C. M.

POUR EN SAVOIR PLUS

■ D.G. Fraser, *Antimatter : The Ultimate Mirror*, Cambridge, 2000.

■ F. Close, *Asymétrie : la beauté du diable*, EDP Sciences, 2002.

<http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/index-F.html>

<http://athena.web.cern.ch/athena/>

<http://hussle.harvard.edu/%7Eatrap/>