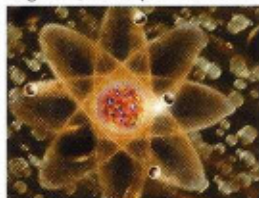




L'antimatière

DE LA MATIÈRE À L'ANTIMATIÈRE

Tout ce qui nous entoure, la matière en général, est composé d'**atomes**.



Au début du ^{xx} siècle, les physiciens découvrent que les atomes sont eux-mêmes constitués de particules plus petites. Ainsi, les électrons portent une charge négative et gravitent autour d'un noyau formé de protons, chargés positivement, et de neutrons qui, comme leur nom l'indique, sont électriquement neutres. Plus tard encore les scientifiques révéleront que ces trois particules sont elles-mêmes composées de quarks. À chaque particule correspond une antiparticule de masse identique. On ne peut distinguer les jumelles que parce qu'elles possèdent des nombres quantiques opposés. Et le plus familier d'entre eux est celui définissant la charge électrique. Ainsi l'antielec-tron ou positron, chargé positivement, est l'antiparticule de l'électron. Le neutron, bien qu'électriquement neutre, possède lui aussi son antiparticule. Elle est formée des antiquarks correspondants aux quarks constituant le neutron. Lorsqu'une particule et son antiparticule se rencontrent, il se

produit une réaction d'annihilation hautement énergétique. L'antimatière est donc très instable dans ce monde fait de matière.

UNE SPÉCULATION THÉORIQUE

L'idée de l'existence d'antiparticules est née de la volonté des scientifiques de décrire les mouvements des électrons rapides. En 1929, Paul Dirac, un physicien anglais, se penche sur la question. L'équation qu'il établit le mène à deux solutions liées. La première décrit parfaitement l'évolution des électrons relativistes, électrons dont les vitesses approchent celle de la lumière. La seconde suggère l'existence d'une particule de même masse que l'électron mais chargée positivement. Il vient de donner théoriquement naissance au positron. En 1933, il se verra décerner le prix Nobel de physique.

LA PREUVE PAR L'OBSERVATION

En 1932, Carl Anderson, un physicien suédois installé aux États-Unis, étudie le rayonnement cosmique. La Terre baigne dans ce flux de particules de très hautes énergies, des protons pour la plupart. Leur collision avec les molécules de l'atmosphère libère une énergie à l'origine de l'émission de gerbes de particules. Dans les détecteurs du physicien, des champs

magnétiques dévient les trajectoires des particules dans un sens ou dans un autre suivant leurs charges électriques. Carl Anderson observe des électrons mais aussi un certain nombre de particules aux caractéristiques semblables à celles des électrons mais qui tournent dans le sens inverse. Il vient de photographier les premiers positrons, confirmant les spéculations théoriques de Paul Dirac. À partir de là, les scientifiques vont postuler l'existence d'autres antiparticules. Les clichés de Carl Anderson lui vaudront le prix Nobel de physique en 1936.

OÙ TROUVER DE L'ANTIMATIÈRE ?

À l'heure actuelle, les scientifiques ne connaissent pas d'endroit où l'antimatière se trouverait à l'état naturel. Pour la plupart d'entre eux, l'antimatière originelle aurait été entièrement détruite par des collisions avec la matière dans les tous premiers instants de l'Univers. Et, les observations confirment ces spéculations. Elles éliminent de façon fiable l'existence d'antimatière dans notre amas local de galaxies et jusqu'à une distance d'environ 50 millions d'années lumière. Les physiciens savent par exemple de façon certaine que la Lune est faite de matière. Sinon l'alunissage du premier module lunaire aurait donné lieu à un fantastique dégagement d'énergie. Il en va de même pour le Soleil. Ce sont des

particules qui arrivent sur Terre, transportées par le vent solaire, et pas des antiparticules. En fait, les chercheurs ont de fortes raisons de penser que les étoiles qui composent une galaxie et les galaxies qui composent un amas sont toutes faites du même type de matière. Certains scientifiques suggèrent toutefois que nous pourrions habiter dans une région particulière de l'Univers. Il existerait alors d'autres zones dans lesquelles régnerait l'antimatière. En effet, les galaxies lointaines ne sont connues



que par le rayonnement qu'elles émettent. Or lumière et antilumière sont indiscernables car le photon, la particule qui transporte la lumière, est sa propre antiparticule. Sur Terre, nous sommes donc presque exclusivement entourés de matière. Seulement presque car une petite quantité d'antimatière subsiste malgré tout. Lorsque des antiparticules sont créées, elles ne disparaissent pas instantanément mais seulement lorsque leur vitesse devient suffisamment faible et qu'elles rencontrent des particules de matière sur leur chemin. C'est ce qui se passe dans l'atmosphère par exemple où les positrons ont été découverts. Les rayons cosmiques sont donc une source naturelle d'antimatière : directement lorsqu'ils entrent en contact avec les molécules de l'atmosphère mais aussi indirectement lorsque les réactions induites donnent naissance à des noyaux radioactifs. La désintégration de certains d'entre eux s'accompagne d'une émission de positrons. Notre galaxie contient également des antiparticules car des éléments radioactifs sont créés à chaque fois qu'une explosion a lieu. Ils peuvent aussi être produits par des phénomènes de haute énergie. Les chocs entre rayons cosmiques et gaz interstellaires peuvent produire des antiprotons et en principe, des noyaux plus complexes, comme des antideutrons, formés d'un antineutron et d'un antiproton, des antinoyaux d'hélium, des antinoyaux de carbone... Dans la pratique, la probabilité d'un tel événement décroît quand on va vers les noyaux plus lourds et les seuls antiparticules que ce processus produit en quantité détectable sont les antiprotons et les antideutrons. Des phénomènes tels que les éruptions solaires sont aussi

à l'origine de créations de paires électrons-positrons.

LA FABRIQUE D'ANTIMATIÈRE

Deux phénomènes physiques peuvent conduire à la production d'antimatière.

LA RADIOACTIVITÉ

Au cours du processus de désintégration d'un noyau atomique, il y a émission de particules. Il existe plusieurs types de



Radioaktiv
Radioactive
Radioactif
Radioactief

radioactivité et l'un d'entre eux entraîne la production de positrons. C'est la radioactivité dites B⁺. Elle concerne les noyaux atomiques qui présentent un déficit en neutrons. Un proton se transforme alors en neutron pour rééquilibrer le tout en émettant un positron.

LES COLLISIONS DE HAUTE ÉNERGIE

Pour produire de l'antimatière, on peut aussi avoir recours à des collisions de haute énergie comme l'indique la célèbre formule d'Einstein, $E=mc^2$. Au cours d'un choc entre particules, une partie de l'énergie peut se convertir en masse, c'est-à-dire en production de particules et d'antiparticules. Pour que cela arrive, il faut que l'énergie du choc soit supérieure à l'énergie de masse du couple particule-antiparticule créé. Il faut beaucoup moins d'énergie pour donner naissance à une paire électron-positron qu'à une paire proton-antiproton, la première ayant une masse environ 2000 fois plus faible que la seconde. Si des antiparticules sont aujourd'hui fabriquées en laboratoire tous les jours, il est encore difficile de former de l'antimatière. En 1955, l'antiproton est découvert grâce à un accélérateur américain, le Bevatron. Un an plus tard, c'est au tour de l'antineutron. Mais, ce n'est qu'en 1996 que sont fabriqués, au cœur des accélérateurs de particules



du Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (CERN) à

Mystère sur l'antimatière

500 g
Production d'antiparticules par une éruption solaire en 2002.

30 millions

Les réactions d'annihilation proton-antiproton fournissent 30 millions de fois plus d'énergie que les réactions chimiques classiques soit 1 000 fois plus d'énergie que les réactions de fission nucléaire dans les centrales.

10¹⁵

Le satellite Integral a détecté un puissant signal d'annihilation électron-positron de 10¹¹ annihilations par seconde soit 10 milliards de tonnes de matière évaporées par seconde.

90 jours

Nombre de jours pour aller sur Mars avec un engin propulsé par l'antimatière contre 180 jours avec un engin à moteur nucléaire.

9x10⁻³¹ kg

Masse d'un électron ou d'un positron.

1x10⁻²⁷ kg

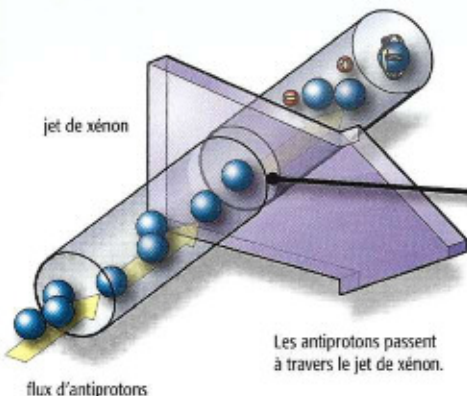
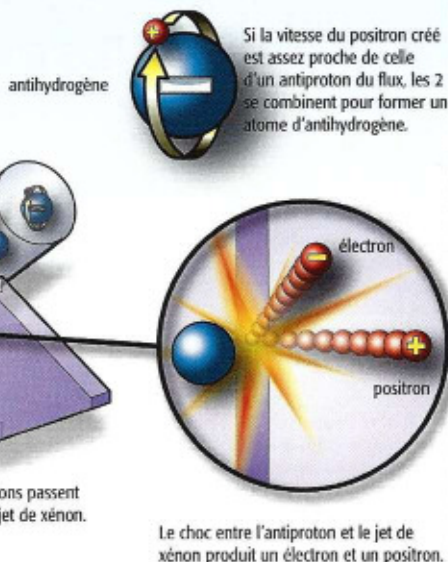
Masse d'un proton ou d'un antiproton soit environ 2000 fois plus que l'électron.

Les anti-protons sont



4 fois plus efficaces que les protons sur les cellules cancéreuses

La production de l'antimatière



Genève, les neuf premiers atomes d'antihydrogène. L'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron, est l'atome le plus simple que les physiciens connaissent. Pour faire un antiatome d'antihydrogène, il faut donc parvenir à faire tourner un positron autour d'un antiproton. Un résultat obtenu grâce à des collisions entre antiprotons créés au préalable et atomes de xénon. Il arrive en effet, très occasionnellement, qu'un antiproton convertisse une petite fraction de son énergie en un électron et en un positron, en traversant un atome de xénon. Il arrive aussi, encore plus rarement, que la vitesse du positron soit suffisamment proche de celle de l'antiproton pour que les deux particules s'unissent et qu'un atome d'antihydrogène soit créé. Chaque atome d'antihydrogène ainsi produit au CERN a subsisté pendant environ quarante milliardièmes de seconde en se déplaçant à une vitesse voisine de celle de la lumière sur une distance de dix mètres avant de s'annihiler au contact de la matière ordinaire. Une annihilation qui a d'ailleurs produit le signal apportant la preuve de la création des atomes d'antimatière. De quoi ouvrir la porte à l'exploration systématique de l'antimatière. Malheureusement, ces antiatomes n'ont pas pu être étudiés par les scientifiques qui n'avaient pas à leur disposition à ce moment de « bouteilles » dans lesquelles enfermer l'antihydrogène. Aujourd'hui, ils savent fabriquer des sortes de pièges à antiparticules. Grâce à des champs magnétiques très forts, ils font tourner les antiparticules et les confinent à l'intérieur d'une sorte de tube. Pour les empêcher de sortir, par le haut ou par le bas, ils appliquent un champ électrique. Ces pièges électromagnétiques permettent d'étudier l'antimatière.

DÉTECTER L'ANTIMATIÈRE

Les scientifiques détectent parfois directement les **antiparticules** en les



laissant traverser un dispositif qui enregistre leur trace et en déduit leur masse et leur charge. Ces vingt dernières années, plusieurs missions en ballon ont ainsi mesuré le flux d'antiprotons qui arrive de l'espace au niveau de la haute atmosphère terrestre. Ces expériences sont coûteuses et difficiles à mettre en œuvre. Plus récemment, les physiciens ont décidé d'installer des expériences sur des satellites. En 1998, par exemple, un détecteur de particules de haute énergie appelé spectromètre magnétique (AMS) a été embarqué dans la navette spatiale *Discovery* pour une mission de dix jours. En orbite autour de la Terre, au-dessus de l'atmosphère, l'un de ses buts était de mesurer les flux d'antiparticules et d'antinoyaux à la recherche de toute forme d'antimatière cosmique. La détection d'un seul de ces antinoyaux serait suffisante à conclure à l'existence

d'antimondes issus du Big Bang. La sensibilité d'AMS est cent à mille fois supérieure à celle des expériences précédentes. Mais, durant les dix jours passés dans l'espace, aucun antinoyon n'a été détecté parmi les trois millions de noyaux qui ont traversé l'expérience. En 2007, une nouvelle version d'AMS, encore plus sensible, sera installée sur la station spatiale internationale. Elle sera exposée au rayonnement cosmique pendant trois ans. Pour déceler des antiparticules, les scientifiques emploient également une méthode indirecte. Lorsque positrons et électrons se rencontrent, leur annihilation est à l'origine de l'émission d'une radiation que les instruments des physiciens peuvent détecter. D'autant mieux que l'énergie de cette radiation est bien déterminée ce qui la rend très caractéristique. De telles mesures ont déjà permis d'établir des cartes de positrons dans la galaxie.

POURQUOI NOTRE MONDE EST-IL FAIT DE MATIÈRE ?

Un des grands mystères de la physique actuelle est l'écrasante prépondérance de la matière sur l'antimatière dans l'Univers observable. En effet, si les lois de la physique ne font pas de différence entre particules et antiparticules, il n'y a a priori aucune raison pour que les unes dominent sur les autres. Ainsi, il devrait exister dans l'Univers, par exemple, autant de neutrons que d'antineutrons. Mais, ce n'est pas le cas, du moins sur la Terre et dans son environnement proche. Une théorie suggère toutefois que l'antimatière créée lors du Big Bang pourrait encore exister de nos jours dans des antimondes suffisamment éloignées de notre pour éviter des annihilations mutuelles. Difficile à vérifier ! La solution la plus probable selon les scientifiques reste celle de l'existence d'une infime différence de comportement entre matière et antimatière au niveau microscopique. Une sorte de « brisure de symétrie » qui fascine les physiciens depuis plusieurs décennies. En 1967, Andreï Sakharov, père de la bombe à hydrogène soviétique et prix Nobel de la paix, suggère que trois conditions doivent être réunies pour expliquer la dominance de la matière sur l'antimatière. La première est que les quarks et les antiquarks puissent se désintégrer en des non-quarks. Bien qu'il ne soit pas encore confirmé expérimentalement, un tel processus est possible selon les théories. La deuxième condition est l'existence d'une dissymétrie matière-antimatière. Celle-ci a déjà été observée. Ainsi il existe des antiparticules, les antikaons, qui se transforment spontanément en leurs particules jumelles, les kaons. L'inverse aurait dû être vrai si matière et antimatière fonctionnaient de la même manière. Or, les physiciens ont constaté qu'un petit nombre de kaons ne se retransforment pas en antikaons. Au fil des transformations, les kaons en viennent à prendre le dessus sur les antikaons et du même coup, la matière sur l'antimatière. Cette observation ne suffit pas à expliquer complètement la dominance de la matière mais, elle est au moins la preuve que matière et

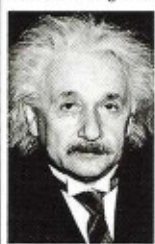
antimatière ne sont pas complètement symétriques. Des expériences sont actuellement en cours dans l'espoir d'observer le même type de brisure de symétrie pour des particules plus lourdes. La troisième condition posée par Sakharov est l'existence, au tout début de l'Univers, d'un déséquilibre thermodynamique. Au moment de la phase d'annihilation, un peu après le Big Bang, une particule sur un milliard aurait survécu. Les autres se seraient transformées en rayonnement en rencontrant leurs antiparticules jumelles. C'est effectivement ce que les chercheurs observent. L'Univers contient ainsi un milliard de fois plus de photons responsables du rayonnement que de protons par exemple. Quoi qu'il en soit, les conditions indispensables à la création du déséquilibre n'ont pu exister que quelques instants après le Big Bang, à une époque où l'énergie des particules était colossale. Ces conditions sont encore largement hors d'atteinte de celles recrées dans les accélérateurs de particules actuels même pour le *Large Hadron Collider* qui entrera en service au CERN en 2007. L'énergie prodigieuse qu'il fournira lui permettra malgré tout de mettre à l'épreuve certains aspects de ces théories.

L'ANTIMATIÈRE POUR VÉRIFIER LES LOIS DE LA PHYSIQUE

Si les physiciens s'intéressent tant à l'antimatière c'est d'abord qu'elle représente pour eux la possibilité de vérifier certaines des théories qu'ils ont établies au fil du temps. Les collisions particules-antiparticules sont en effet de formidables sources d'énergie qui leur permettent d'explorer le cœur de la matière. Ainsi, les collisions protons-antiprotons ont permis, en 1983, d'observer trois particules prévues par les théories. En 1995, c'est le petit dernier de la famille des quarks qui a ainsi pu être observé. Enfin, les collisions électrons-positrons pourraient permettre aux scientifiques de découvrir le fameux boson de Higgs : « une particule manquante » soupçonnée d'être responsable de la masse de toutes les autres particules. D'autre part, les trois quarts de notre Univers sont constitués d'hydrogène et pratiquement tout ce que les physiciens en savent a été découvert en étudiant cet atome. Si le comportement de l'antihydrogène venait à différer de celui de l'hydrogène, les physiciens seraient amenés à repenser un grand nombre des idées établies sur la symétrie entre la matière et l'antimatière. Ainsi, la prochaine étape consistera à vérifier si l'antihydrogène se comporte bien comme l'hydrogène ordinaire. Il est possible de faire des comparaisons d'une précision incroyable, atteignant le milliardième de milliard et même une asymétrie à cette échelle infime aurait d'énormes conséquences sur notre compréhension de l'Univers. Pour vérifier cette asymétrie, il faudrait immobiliser les antiatomes pendant un certain nombre de secondes, de minutes, de jours ou même de semaines. C'est pourquoi les techniques requises pour stocker de l'antimatière font l'objet de travaux de développement intensifs au CERN.

LES APPLICATIONS, ENTRE RÊVE ET RÉALITÉ

La collision d'une particule et de son antiparticule recèle un immense potentiel énergétique. La conversion de masse en énergie selon la célèbre



formule d'Einstein, $E = mc^2$, est en effet d'une grande efficacité. L'ennui, c'est qu'il faut au préalable produire et stocker des antiparticules. Or en l'état actuel

des recherches, il faudrait faire fonctionner à plein temps un accélérateur pendant 100 000 ans pour parvenir à stocker un milligramme d'antiprotons. Un bilan énergétique désastreux car la quantité d'énergie à fournir pour créer l'antimatière serait bien supérieure à celle récupérée grâce aux réactions d'annihilation.

Qui dit énergie colossale dit aussi malheureusement, perspectives d'applications militaires. Un gramme d'antimatière suffirait à rayer la ville de Paris de la carte. Heureusement, les techniques de stockage de l'antimatière ne sont pas encore au point et les bombes à antimatière ne sont pas pour demain. Une autre application envisageable de cette énergie d'annihilation est la propulsion de fusées : une méthode employée par de nombreux vaisseaux spatiaux de la science-fiction. Dans la réalité, la mise en application se heurte à quelques difficultés. Certaines réactions induites par l'utilisation d'antiprotons produisent des rayons gamma de haute énergie. Ils pénètrent la matière, brisent les molécules des cellules vivantes et peuvent rendre les moteurs radioactifs. Ainsi la NASA a constitué une équipe de chercheurs pour travailler à la conception de fusées propulsées par antimatière qui permettent d'éviter ces fâcheux effets secondaires. Cette étude repose sur des positrons qui génèrent des rayons gamma 400 fois moins énergétiques. Un autre défi à relever pour qu'un vaisseau spatial à positrons devienne une réalité est le coût de production de ces derniers. Les experts estiment à quelque 250 millions de dollars, la somme nécessaire à la production des 10 milligrammes de positrons requis pour une mission vers Mars. Un coût élevé, mais qui est à comparer au surcoût induit pour lancer une fusée chimique plus lourde ou au coût pour remplir de combustible et pour assurer la sécurité d'un propulseur nucléaire. La dernière difficulté mais pas des moindres à surmonter est le stockage des positrons dans un espace réduit. Comme ils annihilent la matière normale, ils doivent être confinés à l'aide de champs électriques et magnétiques. Si ces difficultés sont surmontées, il est possible que les premiers êtres humains qui atteindront Mars le fassent à bord de vaisseaux spatiaux propulsés par la même source d'énergie que celle des spatonaux de science-fiction. Car les avantages de ce type de propulsion sont importants : temps de parcours réduit et du même coup plus

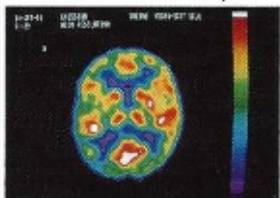
grande sécurité pour l'équipage, moins exposé aux rayons cosmiques nocifs, masse réduite, fonctionnement plus simple que celui du moteur nucléaire, pas de radioactivité résiduelle et plus de sûreté au lancement. En cas d'accident au décollage, les rayons gamma émis par l'explosion disparaîtraient en l'espace d'un instant dans un rayon d'un kilomètre alors qu'un moteur nucléaire pourrait disséminer des particules radioactives dans toute l'atmosphère. Mais, il n'y a pas que l'énergie produite par l'annihilation matière-antimatière qui soit exploitable. La raie d'annihilation est déjà utilisée en imagerie médicale, dans les scanners à tomographie par émission de positrons (**PETscann**). Par



voie intraveineuse, les médecins injectent au patient un mélange de molécules susceptibles de se fixer à l'organe qu'ils souhaitent observer et de composés radioactifs β^+ dont la demi-vie (temps nécessaire pour que l'élément perde la moitié de son activité) est de quelques heures seulement. En quelques jours, ils auront totalement disparu de l'organisme. Les plus utilisés sont le carbone 11, l'azote 13, l'oxygène 15, le fluor 18, le cobalt 55 et le brome 76. Leur désintégration conduit à l'émission d'un positron qui va rencontrer un électron et s'annihiler avec production d'une paire de photons gamma décelée par le PETscann. Après avoir détecté un grand nombre de paires, l'appareil fournit une image en trois dimensions de la zone de fixation du composé radioactif. La méthode permet de réaliser de beaux **clichés**



d'organes mous auxquels la radiographie ne donne pas accès. Elle est très sensible et réagit très vite. Les médecins peuvent donc aussi l'utiliser pour faire de la recherche sur le fonctionnement du **cerveau** par



exemple. Des volontaires effectuent une tâche et les scientifiques observent en direct quelle partie de leur cerveau se met en marche. Enfin, les médecins songent à des applications thérapeutiques : par exemple, l'utilisation des antiprotons pour traiter les tumeurs cancéreuses. Mais, la production d'antiprotons restent encore trop complexe et coûteuse pour que l'idée puisse être mise en place.