



particules cosmiques qui bombardent la Terre), Anderson observe une traînée de gouttelettes laissée par une particule de même masse que l'électron, mais de charge électrique opposée (c'est-à-dire positive). Ce partenaire antimatériel de l'électron est le positon. Les antiprotons sont plus difficiles à trouver, mais, en 1955, les physiciens du Laboratoire Lawrence Berkeley en obtiennent dans un accélérateur de particules. Puis, en 1995, des physiciens du Centre européen de recherches nucléaires, près de Genève, synthétisent des atomes d'antihydrogène – de très courte durée de vie – en liant des positons et des antiprotons dans un accélérateur de particules.

Ces dernières années, les astrophysiciens ont construit des détecteurs de plus en plus complexes pour rechercher les antiparticules dans les rayons cosmiques. Comme ces dernières s'annihilent lors de collisions avec les noyaux des molécules d'air, les astrophysiciens ont placé leurs détecteurs dans les couches les moins denses de l'atmosphère. Ainsi le Télescope détec-

teur d'antimatière de haute énergie (HEAT, en anglais), embarqué dans un ballon de haute altitude, cherche les positons des rayons cosmiques. D'autres détecteurs aéroportés étudient les antiprotons, et certains détecteurs ont même été embarqués sur des satellites. Ces expériences devraient révéler les origines de l'antimatière cosmique et indiquer si des antiétoiles ou des antigalaxies existent réellement.

Les astrophysiciens pensent que la plupart des antiparticules présentes dans la haute atmosphère ont été créées lors de collisions violentes de particules subatomiques, dans l'espace interstellaire. Le processus commence lorsque les champs magnétiques d'une étoile sont propagés dans une onde de choc, au cours de l'explosion de l'étoile. Ces champs magnétiques accélèrent les protons interstellaires ou les noyaux atomiques à des vitesses considérables. Quand ces noyaux, devenus ainsi des rayons cosmiques de haute énergie, heurtent une particule interstellaire, une partie de l'énergie incidente est parfois transformée en une paire particule-antiparticule.

Un réservoir de rayons cosmiques

Certaines collisions produisent des paires de pions, particules instables qui se désintègrent rapidement en positons, électrons, neutrinos et antineutrinos. Les collisions les plus énergiques, entre des particules qui se déplacent presque à la vitesse de la lumière, engendrent des paires proton-antiproton. Ce processus est l'inverse de l'annihilation matière-antimatière : l'énergie se matérialise en particules.

Toutefois peu d'antiparticules sont ainsi produites par les collisions interstellaires. Dans les rayons cosmiques observés par le détecteur HEAT, les particules sont bien plus nombreuses que les antiparticules. Pour comprendre pourquoi on observe difficilement l'antimatière, imaginons un récipient rempli de vis. Une centaine de vis ont un filet droit normal (symbolisant les électrons du rayonnement cosmique), et dix vis ont un filet inversé (représentant les positons). Les rayons cosmiques contiennent aussi des protons, de charge positive comme les positons, mais beaucoup plus massifs. Représentons ces protons par 10 000 vis à filet gauche, plus lourdes que les vis correspondant aux positons. Im-

aginons maintenant que nous pesions chaque vis à filet gauche pour savoir si elle correspond à un proton ou à un positon ; la mesure exige une grande précision, car si une seule vis « protonique » sur 1 000 est confondue avec une vis « positonique », le nombre apparent de vis « positoniques » doublera.

L'instrument HEAT se caractérise par un taux d'erreur inférieur à 1 / 100 000. Le dispositif utilise un aimant supraconducteur et un ensemble de détecteurs pour identifier les positons. Les rayons cosmiques qui traversent l'ouverture du collecteur passent ensuite dans l'aimant supraconducteur, qui dévie les électrons dans une direction, et les positons et les positons dans la direction opposée. Les détecteurs mesurent la charge électrique et la direction de chaque particule incidente, ainsi que l'amplitude de la déviation subie dans le champ magnétique. Cette dernière information permet de séparer les positons des positons ; un proton, plus massif, suivra une trajectoire moins incurvée qu'un positon de même vitesse.

Le détecteur HEAT a été lancé pour la première fois en 1994, à partir du Centre des ballons scientifiques de la NASA, au Nouveau-Mexique. Un ballon géant, gonflé à l'hélium, a emporté ses 2,3 tonnes à une altitude de 37 000 mètres (au-dessus de 99,5 pour cent de l'atmosphère). Le détecteur a mesuré le rayonnement cosmique pendant 32 heures, puis s'est posé en douceur dans le Nord du Texas. La NASA l'a relancé en 1995, à partir du Manitoba : ce deuxième vol a permis l'observation de positons de faible énergie, qui ne traversent le champ magnétique terrestre que près des pôles magnétiques terrestres.

Ces deux vols ont livré des résultats troublants. Notamment, si le nombre de positons de faible énergie mesuré par le détecteur était proche du nombre prévu d'après l'analyse des collisions interstellaires, le détecteur trouvait plus de positons que prévu à haute énergie. L'excès observé pourrait résulter d'erreurs de mesures, mais, si le surplus est réel, il suggère l'existence d'une source inconnue de positons de haute énergie, dans le cosmos. Les particules massives qui interagissent peu, surnommées WIMP (d'après l'anglais *weakly interactive massive particles*), sont peut-être de telles sources.

Ces particules permettraient de résoudre le problème lancinant de la «matière invisible», encore nommée matière sombre ou matière cachée. Afin d'expliquer les rotations des galaxies, les astrophysiciens pensent que chaque galaxie est enveloppée d'un énorme halo de matière sombre, indétectable par les moyens classiques. Les WIMP pourraient constituer ces halos, parce qu'elles n'émettraient ni lumière ni aucun autre rayonnement électromagnétique. Si les WIMP existent et si leur densité est celle qui a été calculée, leurs collisions devraient engendrer un nombre notable de positons énergiques. Ainsi s'expliquerait l'excès détecté par HEAT... si nos mesures sont confirmées par d'autres détecteurs.

Alors que nous traquons les positons dans le rayonnement cosmique,

d'autres astrophysiciens chassaient des proies encore plus insaisissables : les antiprotons. Les antiprotons sont plus rares que les positons, parce que, comme ils sont environ 2 000 fois plus massifs, il faut une énergie supérieure pour les créer. Les protons interstellaires doivent entrer en collision à plus de 99 pour cent de la vitesse de la lumière pour produire une paire proton-antiproton.

À la recherche des antimondes

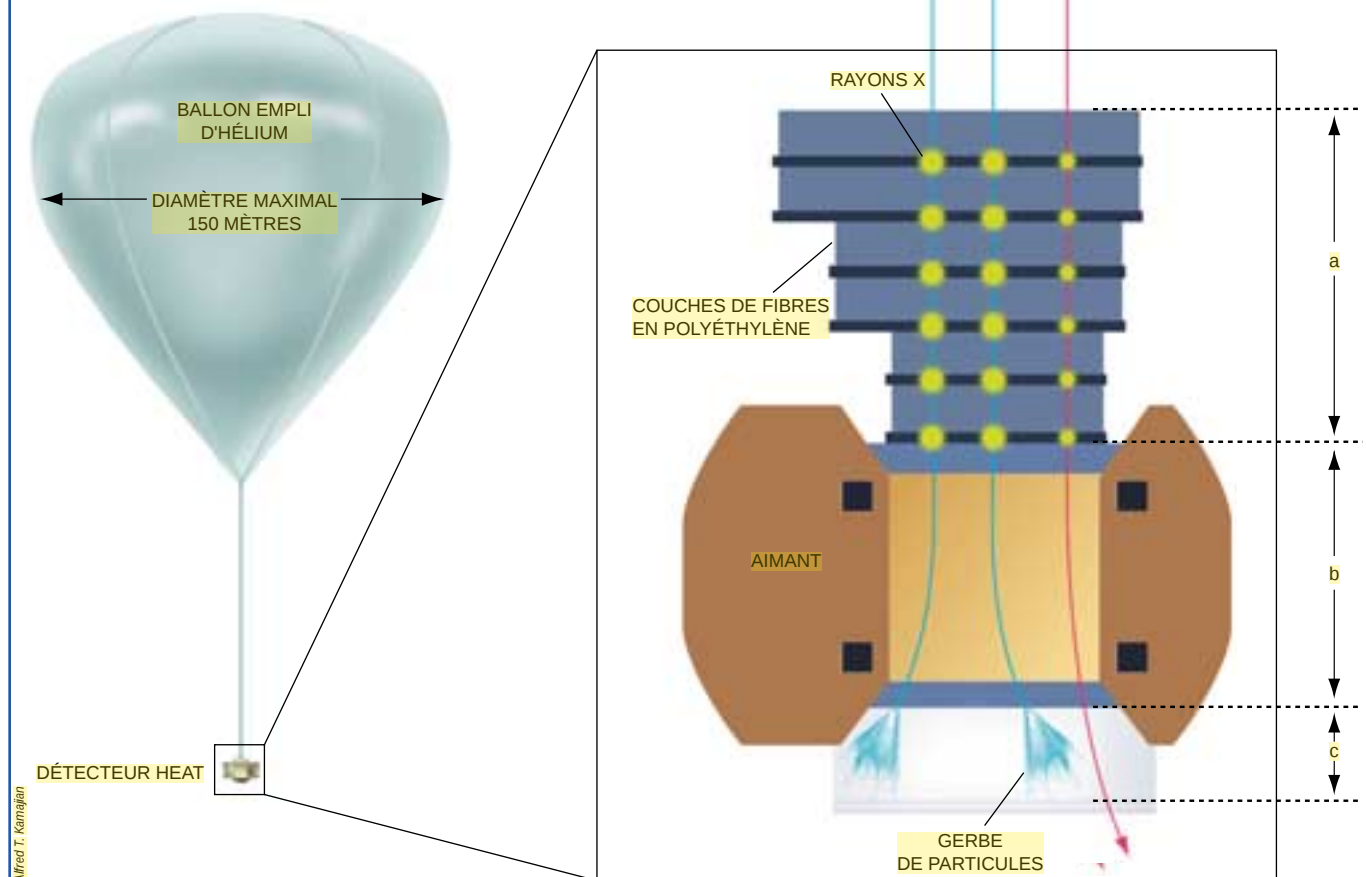
Les détecteurs d'antimatière, tel IMAX, qui recherche les isotopes de matière et d'antimatière, et BESS, qui est composé d'un spectromètre à solénoïde supraconducteur, ont déterminé une abondance maximale d'un antiproton pour 10 000 protons dans la pluie de

rayons cosmiques. Ces antiparticules sont si rares que les détecteurs doivent être extrêmement sensibles : le taux d'erreur doit être inférieur au millionième.

La quête systématique de l'antimatière commença dans les années 1960, avec les études du physicien Luis Alvarez : ce dernier cherchait des antiparticules lourdes, tels les noyaux d'antihélium, d'anticarbone ou d'antioxygène, dans les rayons cosmiques. Contrairement aux positons et aux antiprotons, ces antiparticules lourdes sont trop massives pour résulter de collisions entre particules interstellaires. La découverte d'un noyau d'antihélium prouverait que de l'antimatière a survécu au Big Bang, et la détection d'anticarbone ou d'antioxygène révélerait l'existence d'antiétoiles, parce que le carbone et les éléments chimiques plus lourds ne sont synthétisés que dans les étoiles.

Un détecteur de haut vol

Un ballon empli d'hélium emporte le Télescope détecteur d'antimatière de haute énergie (HEAT) dans la haute atmosphère (ci-dessous). Les rayons cosmiques qui entrent dans le détecteur sont identifiés ; un système spécial capte les positons. L'un des auteurs (G. Tarlé) pose auprès de l'instrument après son premier vol (extrême droite).



Alfred T. Kamajian

La plupart des astrophysiciens doutent de l'existence des antiétoiles, parce que la rencontre de particules de matière, provenant de l'espace interstellaire, et de ces antiétoiles engendrerait, lors des annihilations matière-antimatière, un flux considérable de rayons gamma. Des détecteurs en orbite ont bien observé des rayons gamma de basse énergie, résultant de l'annihilation de positons, au centre de notre Galaxie, mais les astrophysiciens ne croient pas que ces positons sont produits par une antiétoile, car une telle antiétoile serait une source intense et localisée de rayons gamma bien plus énergiques que ceux qui sont observés. Notre Galaxie n'abrite apparemment pas d'antiétoile, et notre amas local de galaxies ne contient vraisemblablement pas d'antigalaxie.



Georgia Delioffo

La section a montre le détecteur de rayonnement transitoire, une série de six feuilles en fibres de polyéthylène. Les positons et les électrons engendrent des rayons X en traversant les feuilles, tandis que les protons de même énergie produisent un signal beaucoup plus faible.

La section b représente le spectromètre magnétique, où un aimant supraconducteur dévie les rayons cosmiques. Les électrons sont déviés dans une direction, tandis que les protons et les positons sont déviés dans la direction opposée. Les protons et les positons peuvent être discernés parce que la trajectoire d'un positon se courbe beaucoup plus que celle d'un proton de même vitesse.

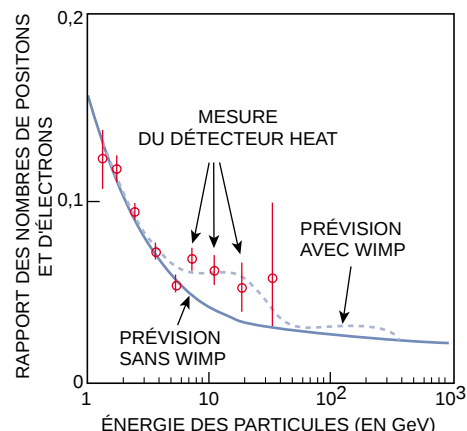
La section c montre le calorimètre électromagnétique, un empilement de feuilles de plastique et de minces couches de plomb. Quand les électrons et les positons heurtent les couches de plomb, ils produisent des gerbes de particules qui engendrent des impulsions lumineuses dans les feuilles de plastique. La plupart des protons traversent le détecteur sans modification.

Mais plus loin? L'Univers contient-il des antigalaxies isolées, très éloignées des galaxies? Au cours des dix dernières années, les astronomes ont effectué des recensements de galaxies jusqu'à un milliard d'années-lumière, mais ils n'ont pas trouvé d'antimatière cosmique : les amas de galaxies sont environnés d'immenses espaces vides. Si de grandes parties de l'Univers se composaient d'antimatière, les régions où matière et antimatière entreraient en contact auraient émis des quantités considérables de rayons gamma au début de l'Univers. Comme les astronomes n'ont pas détecté cette puissante lueur de fond, ils ont conclu que les antigalaxies, si elles existent, se trouvent hors de portée de nos télescopes ou, du moins, à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

De surcroît, la cosmologie moderne explique que l'Univers pourrait être composé quasi exclusivement de matière ordinaire. En raison d'une légère asymétrie des lois de la physique, la «violation CP», observée en laboratoire, le Big Bang aurait produit un léger excédent de matière : pour 30 milliards d'antiparticules créées, 30 milliards de particules plus une l'étaient. Un millionième de seconde après le Big Bang, particules et antiparticules ont commencé à s'annihiler, et il n'est finalement resté que la matière ordinaire. Ce léger excédent, qui correspond toutefois à un très grand nombre de particules, serait devenu l'Univers que nous connaissons.

Afin de tester cette théorie, des astrophysiciens recherchent les antiparticules lourdes. Certains croient à l'existence de vastes régions d'antimatière et ils supposent que des antinoyaux lourds, qui se déplaceraient presque à la vitesse de la lumière, pourraient nous parvenir. Dans les années 1960 et 1970, L. Alvarez et d'autres ont analysé des dizaines de milliers d'événements produits par des rayons cosmiques afin de déterminer si certains se composaient d'antiparticules lourdes. Des expériences plus récentes ont échantillonné des millions de rayons cosmiques. Malgré tous ces efforts, aucune antiparticule plus lourde que l'antiproton n'a été identifiée.

Ces résultats ne condamnent pas définitivement la théorie de l'antimatière cosmique : des antigalaxies lointaines pourraient émettre des antiparticules lourdes qui seraient bloquées par les champs magnétiques de



Laure Grace

2. UN LÉGER EXCÉDENT de positons de haute énergie a été enregistré par le détecteur HEAT. Ces positons proviennent-ils de particules massives qui interagiraient peu, les WIMP?

l'espace intergalactique. Des mesures récentes du rayonnement synchrotron traversant des amas de galaxies ont montré que le champ magnétique au sein de tels amas est environ un million de fois moins puissant qu'à la surface de la Terre. Comme l'intensité de ces champs a probablement augmenté d'un facteur 1 000 pendant la formation des amas, les astrophysiciens supposent que le champ entre des galaxies très éloignées est un milliard de fois plus faible que le champ terrestre.

De tels champs ne déviaient même pas l'aiguille d'une boussole, mais ils pourraient dévier des antiparticules qui parcourraient les vastes distances de l'espace intergalactique : la trajectoire des antiparticules s'enroulerait en une hélice de quelques années-lumière de diamètre autour des lignes de champ magnétique. Comment les champs magnétiques sont-ils orientés dans l'espace intergalactique? Sont-ils cohérents, comme le champ d'un barreau aimanté ordinaire? Ou les lignes de champ sont-elles enchevêtrées? Dans cette deuxième hypothèse, les antiparticules ne pourraient s'aventurer très loin : elles rebondiraient aléatoirement entre les lignes de champ, tels des ivrognes à la sortie d'un bar. Là où une personne sobre met quelques heures à parcourir les dix kilomètres qui la séparent de son domicile, l'ivrogne, qui se déplace au hasard, mettrait plusieurs années.

En revanche, si le champ magnétique intergalactique est cohérent, les lignes de champ peuvent s'étendre entre les galaxies : les antiparticules seraient alors canalisées entre des galaxies voisines, sur des autoroutes