



Patrick David/Musée de Normandie, Caen

7. LE MOBILIER DE LA TOMBE DE MUNDOLSHEIM est notamment constitué de plaques d'or décorant une selle de cheval qui a été reconstituée (ci-contre) et de deux passe-courroie en or (ci-dessus).

enfants de bandages, les os, mal-léables, se développent dans les directions laissées libres et adoptent une forme qui dépend de la position du bandeau ; dans certains cas, elle est en pain de sucre. Comme l'a montré Luc Buchet, du Centre de recherches archéologiques de Sophia-Antipolis, cette coutume était répandue parmi les Barbares, surtout les Alano-Sarmates et les Huns, et Attila a contribué à sa diffusion ; la présence d'individus au crâne déformé artificiellement ne prouve pas l'appartenance à un groupe spécifique.

La déformation des crânes

Les femmes qui vivaient à la fin du V^e siècle à Saint-Martin-de-Fontenay étaient vraisemblablement des descendantes de deuxième, voire de troisième génération, des populations barbares d'origine orientale. Elles avaient conservé les pratiques de leurs ancêtres : elles posaient des bandages sur le crâne de leurs enfants et elles portaient encore des fibules de type danubien. À l'autre extrémité de l'empire, la nécropole de Loutchistoe a aussi livré plusieurs cas de crânes déformés de femmes, enterrées au début du VI^e siècle.

Les Barbares ont été le principal vecteur de cette mode en Europe occidentale, du Nord de la mer Noire jusqu'à la Basse-Normandie. On a trouvé que la pratique de la déformation volontaire du crâne, importée par les Alains et les Germains orientaux, a emprunté le même chemin que les autres vestiges de la mode hunnique, la même route qui les a menés de l'Est vers l'Ouest.

Pour les anthropologues, les nécropoles, monde des morts, sont un accès au monde des vivants. La connaissance des pratiques funéraires et du mobilier associé illustre la relation de la population avec la mort, voire son organisation sociale. L'étude de l'âge, du sexe, de la taille, de la morphologie et des pathologies des squelettes mis au jour renseigne les anthropologues non seulement sur l'individu, mais sur la population.

D'après les études anthropologiques menées sur les nécropoles de la période des grandes migrations, les Barbares sont peu nombreux dans les communautés qui les reçoivent. À la première génération, ils sont regroupés dans un enclos funéraire qui leur est propre. Deux générations plus tard, les spécificités disparaissent. Les Barbares sont assimilés d'autant plus facilement par la population indigène

qu'ils n'ont plus aucun lien avec leur pays d'origine.

Quelle fut l'ampleur de ces migrations et de ces intégrations pacifiques ? Ni l'archéologue ni l'anthropologue n'ont la réponse. Ils ne peuvent identifier l'origine ethnique des personnes enterrées par la seule présence d'objets orientaux. Les objets d'origine barbare ont été largement diffusés en Europe du Nord, du Centre et de l'Est, parce qu'ils appartenaient aux aristocraties militaires qui se déplaçaient, changeaient de camp et emportaient leurs objets avec eux.

Ils ont été imités par les populations du monde romain qui étaient en contact avec ces représentants de l'autorité. Les archéologues et les anthropologues restent aujourd'hui confrontés à un défi : comment identifier, d'après les objets mortuaires ou l'examen des os, l'origine des Barbares qui se sont installés en Gaule ?

Michel KAZANSKI est directeur-adjoint de l'unité CNRS du Musée des antiquités nationales, à Saint-Germain-en-Laye. Christian PILET dirige l'Unité CNRS UMR 6577, à l'Université de Caen.

Attila, les influences danubiennes dans l'Ouest de l'Europe au V^e siècle, textes réunis par Jean-Yves MARIN, Publications du Musée de Normandie, Caen, 1990.

M. KAZANSKI, *Les Goths (I^{er}-VII^e siècles ap. J.-C.)*, éditions Errance, Paris, 1991.

A. ALDUC-LEBAGOUSSE, J. BLONDIAUX et C. PILET, *La dame de Hochfelden*, in *Cahiers alsaciens d'archéologie d'art et d'histoire*, tome XXV, pp. 74-90, 1992.

C. PILET et al., *La nécropole de Saint-Martin-de-Fontenay. Recherches sur le peuplement de la plaine de Caen du V^e siècle avant J.-C. au VII^e siècle après J.-C.*, éditions du CNRS, 1994.

M. KAZANSKI, *Les tombes « princières » de l'horizon Untersiebenbrunn, le problème de l'identification ethnique*, in *L'identité des populations archéologiques*, Sophia-Antipolis, pp. 109-126, 1996.

A. AIBABINE et E. KHAIEDINOVA, *La nécropole de Loutchistoe*, in *Archéologie de la mer Noire. La Crimée à l'époque des grandes invasions, IV^e-VII^e siècle*, Musée de Normandie, Caen, pp. 67-78, 1997.

V. KOUZNETSOV et I. LEBEDYNSKY, *Les Alains*, éditions Errance, 1997.

L'antimatière cosmique

GREGORY TARLÉ • SIMON SWORDY

Les astrophysiciens traquent les antiparticules afin de comprendre le mouvement des galaxies. L'existence d'un antimonde semble exclue, mais pas celle de particules «sombres», abondantes dans l'Univers bien qu'invisibles.

En 1928, le physicien britannique Paul Dirac prédit l'existence de l'antimatière : à chaque particule de matière ordinaire correspond une antiparticule de même masse, mais de charge opposée. Ces antiparticules pourraient se lier en antiatomes, et les antiatomes pourraient former les contreparties antimatérielles de tous les objets de l'Univers : antiétoiles, antigalaxies et, même, antihumains. La rencontre d'une particule de matière et d'une particule d'antimatière conduirait à leur annihilation, accompagnée de la libération d'une bouffée de rayons gamma énergiques. De même, un humain et un antihumain qui se serreraient la main s'annihileraient, libérant une énergie égale à celle de 1 000 explosions nucléaires d'une mégatonne chacune.

La proposition de Dirac est osée, mais elle est confirmée quatre ans plus tard, lorsque Carl Anderson, de l'Institut de technologie de Californie, détecte la première antiparticule. En utilisant une chambre à brouillard pour étudier les rayons cosmiques (ces

1. DES COLLISIONS VIOLENTES entre des protons accélérés par l'onde de choc d'une supernova créent l'essentiel de l'antimatière découverte jusqu'ici. Certaines collisions produisent une gerbe de positons, d'électrons et d'autres particules (*en haut*), tandis que les impacts les plus énergétiques engendrent des antiprotons (*en bas*).



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

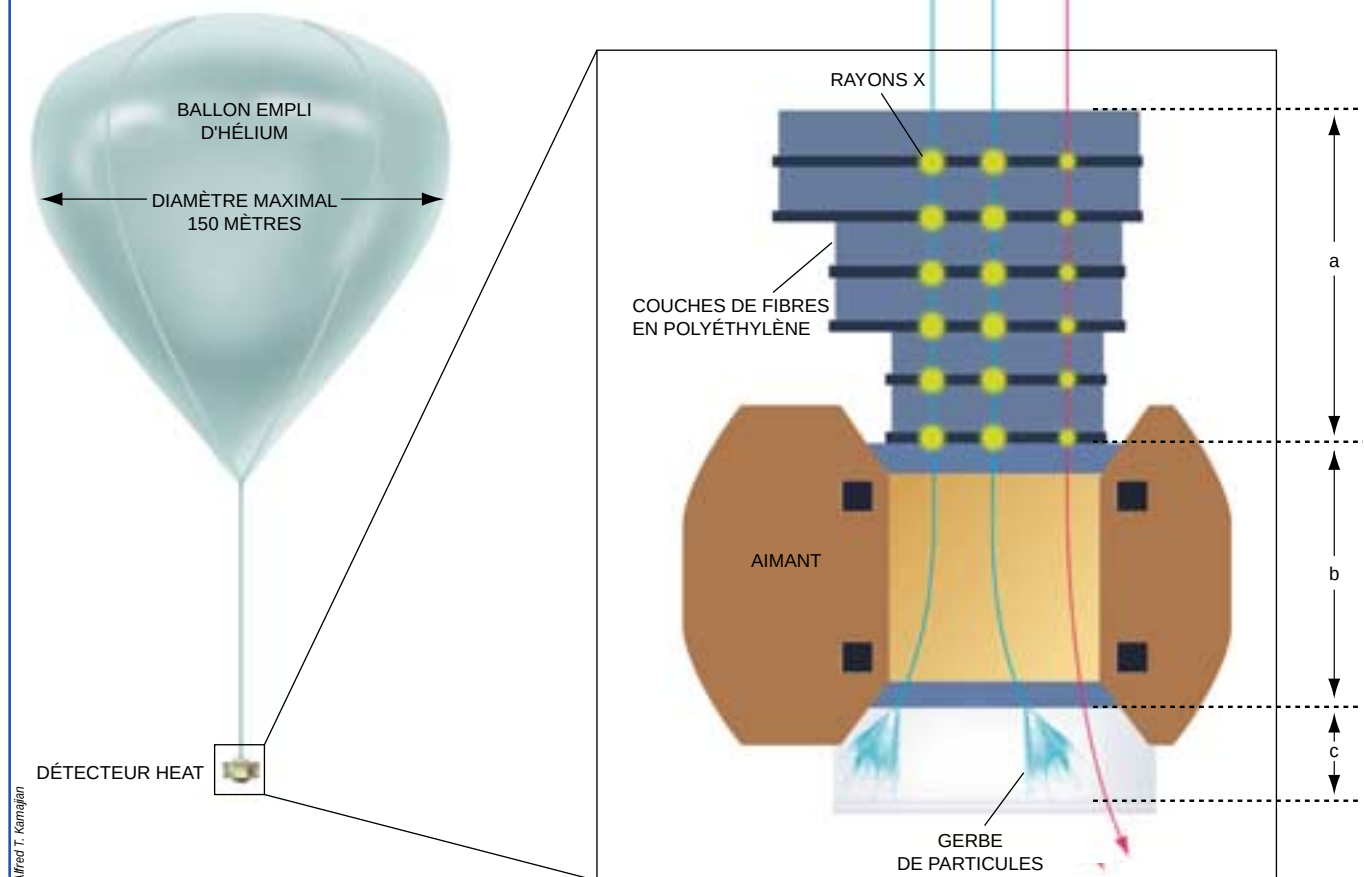
Les détecteurs d'antimatière, tel IMAX, qui recherche les isotopes de matière et d'antimatière, et BESS, qui est composé d'un spectromètre à solénoïde supraconducteur, ont déterminé une abondance maximale d'un antiproton pour 10 000 protons dans la pluie de

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'anti-hélium, 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'anti-hélium 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*).



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.

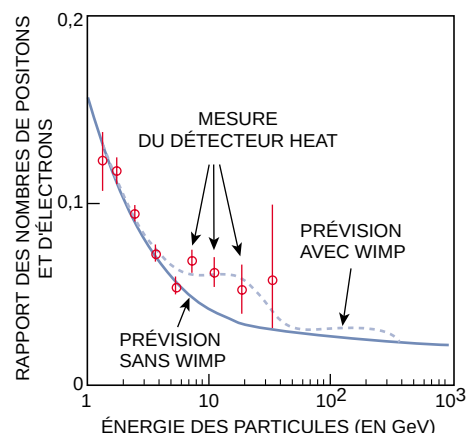
La section c montre le calorimètre électromagnétique, un empilement de feuilles de plastique et de minces couches de plomb. Quand les électrons et les positons heurtent les couches de plomb, ils produisent des gerbes de particules qui engendrent des impulsions lumineuses dans les feuilles de plastique.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

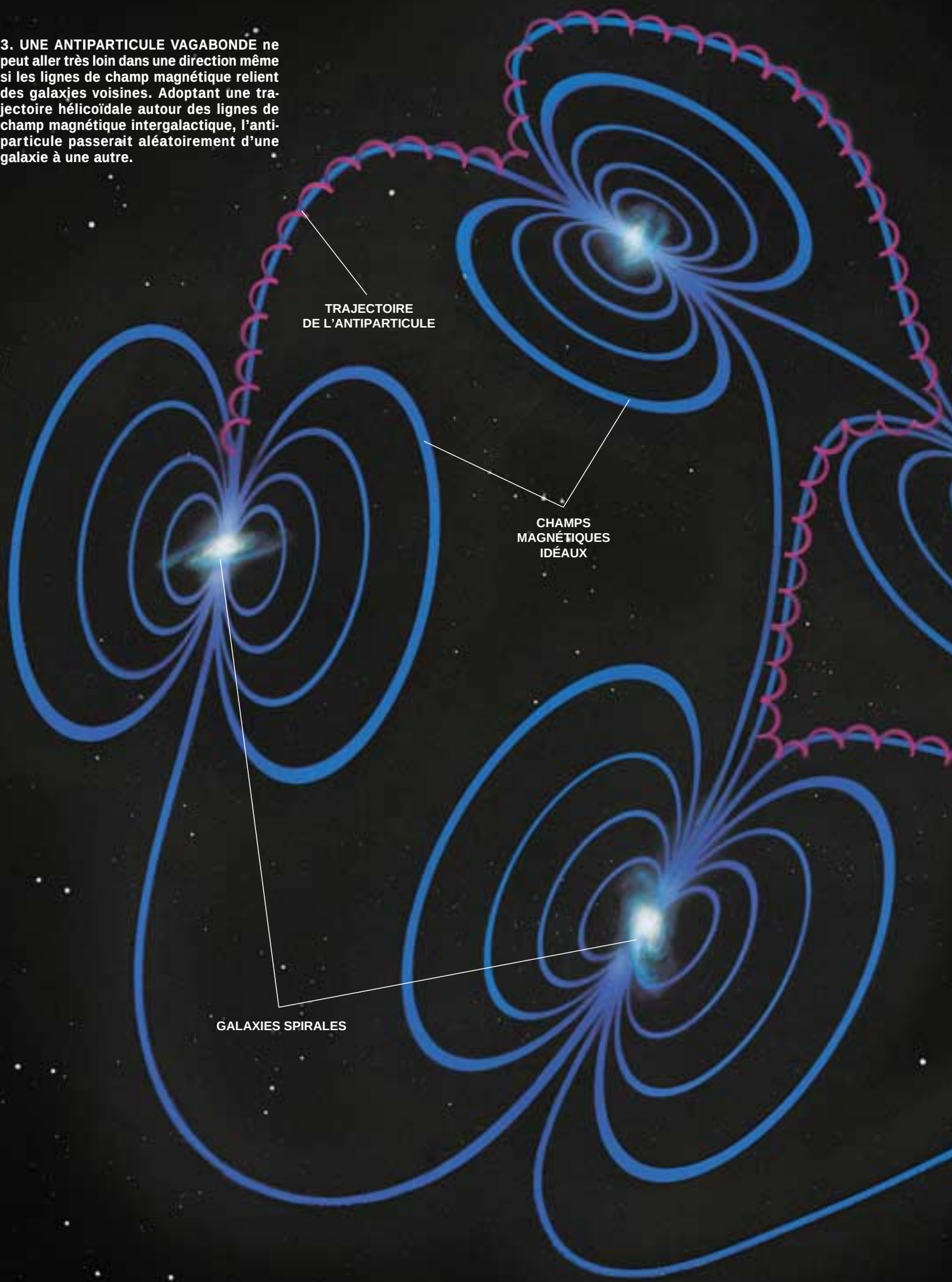
2. UN LÉGER EXCÉDENT de positons de haute énergie a été enregistré par le détecteur HEAT. Ces positons proviennent-ils de particules massives qui interagiraient peu, les WIMP?

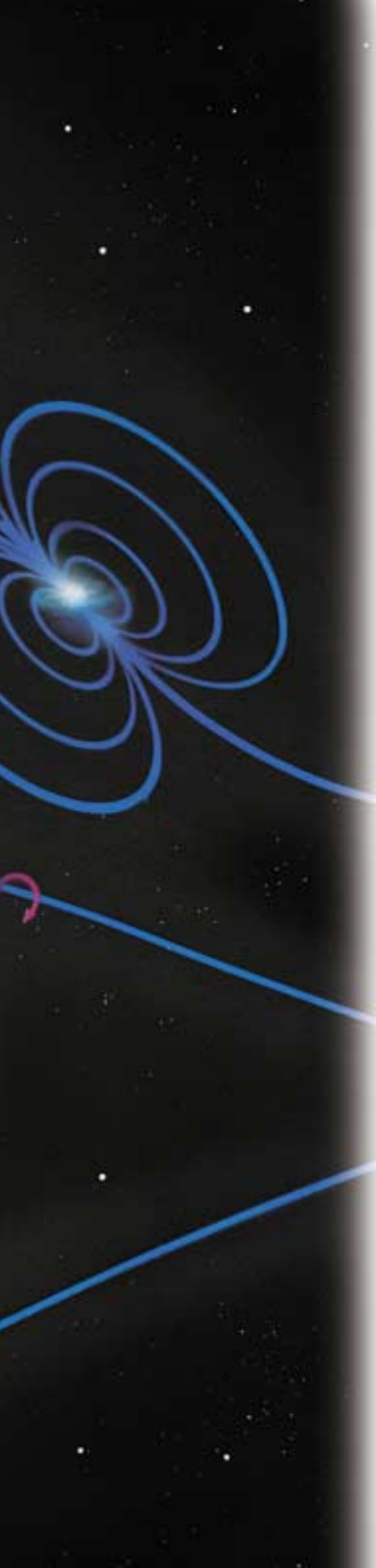
l'espace intergalactique. Des mesures récentes du rayonnement synchrotron traversant des amas de galaxies ont montré que le champ magnétique au sein de tels amas est environ un million de fois moins puissant qu'à la surface de la Terre. Comme l'intensité de ces champs a probablement augmenté d'un facteur 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

3. UNE ANTIPARTICULE VAGABONDE ne peut aller très loin dans une direction même si les lignes de champ magnétique relient des galaxies voisines. Adoptant une trajectoire hélicoïdale autour des lignes de champ magnétique intergalactique, l'antiparticule passerait aléatoirement d'une galaxie à une autre.





cosmiques longues de plusieurs millions d'années-lumière. Les antiparticules sauteraient ainsi de galaxie en galaxie, tout comme un ivrogne qui suivrait les pâtés de maison, choisissant les directions au hasard, aux croisements. Les antiparticules pourraient ne couvrir que quelques centaines de millions d'années-lumière à partir de leur source, même si elles voyageaient pendant un temps comparable à l'âge de l'Univers. Cette distance est bien plus courte que les milliards d'années-lumière nous séparant de l'antigalaxie la plus proche.

Même si, par hasard, une antiparticule approchait de notre Galaxie, rien n'indique qu'elle atteindrait la Terre : le champ magnétique de l'intérieur de la Galaxie, bien plus intense que le champ intergalactique, dévie la grande majorité des antiparticules incidentes ; l'ivrogne enfin arrivé chez lui ne trouve plus les clefs pour ouvrir la porte.

Les prochains vols

La recherche d'antiparticules lourdes dans notre Galaxie continue. Le Ministère américain de l'énergie finance aujourd'hui le projet d'envoi d'un détecteur d'antimatière dans un satellite. Le dispositif, nommé spectromètre magnétique alpha (AMS) cherchera principalement des antiprotons et des antineutrons. La NASA prévoit de tester le détecteur AMS à bord de la navette spatiale au cours de l'année 1998. Si tout se passe bien, le détecteur sera ensuite envoyé dans la station spatiale pour une durée de trois ans, à partir de 2002.

Sur une durée de fonctionnement aussi longue, AMS devrait avoir une sensibilité 100 fois supérieure à celle des précédents détecteurs d'antimatière. Saura-t-on toutefois distinguer les particules des antiparticules ? Pour identifier une antiparticule lourde parmi 100 millions de particules, un détecteur doit déterminer correctement la déviation de chaque particule dans un champ magnétique. Les instruments

les plus précis qui ont été embarqués dans des ballons font parfois plus de 15 mesures pour déterminer la déviation des particules rapides, mais le détecteur AMS n'en fera que six.

Un autre détecteur d'antimatière cosmique, PAMELA, doit également être lancé à Baïkonour, en l'an 2000. Plus complexe que AMS, il cherchera les positons, les antiprotons et les antineutrons lourds. En raison de sa petite taille, il collectera moins de rayons cosmiques, de sorte que sa recherche d'antiparticules lourdes risque de ne pas être assez minutieuse.

D'autres recherches d'antimatière cosmique par ballon sont prévues. Par exemple, nous construisons aujourd'hui une nouvelle version du détecteur HEAT afin d'observer les antiprotons de haute énergie, au cours de vols plus longs. En Antarctique, la NASA a testé des ballons de haute altitude qui ont volé jusqu'à 20 jours autour du pôle Sud, et l'équipe NASA des îles Wallops met au point des enveloppes de ballon allégées afin d'obtenir des vols qui dureraient jusqu'à 100 jours ; les vols d'essai de ces ballons auront lieu dans les prochains mois.

La recherche de l'antimatière cosmique bat son plein. Avec les premières expériences, les astrophysiciens voulaient prouver que matière et antimatière existent en quantités égales dans l'Univers, mais ils ont détecté une asymétrie de l'Univers. Puis les détecteurs d'antimatière ont trouvé très peu de positons et d'antiprotons dans les rayons cosmiques, et aucune antiparticule lourde. Les physiciens conservent l'espoir que des antiétoiles et des antigalaxies se cachent quelque part dans l'Univers, à des milliards d'années-lumière de notre Galaxie, mais les antiparticules lourdes de ces régions lointaines atteignent-elles la Terre ? L'enjeu de la quête est considérable : c'est l'identification de la nature de la matière sombre, qui semble composer les halos des galaxies.

Gregory TARLÉ et Simon SWORDY sont respectivement professeurs de physique à l'Université du Michigan et à l'Université de Chicago.

Edward W. KOLB et Michael S. TURNER, *The Early Universe*, Addison-Wesley, 1990.

James W. CRONIN, Thomas K. GAISER et Simon P. SWORDY, *Les rayons cosmiques*, in *Pour la Science*, mars 1997.

Fred C. ADAMS et al., *Constraints on the Intergalactic Transport of Cosmic Rays*, in *Astrophysical Journal*, vol. 491, pp. 6-12, 10 décembre 1997.
