

ANTIMONDES

On la fabrique... en quantité infime. On la détecte... de façon furtive. Si elle est aujourd'hui devenue réalité, l'antimatière n'en reste pas moins l'une des énigmes les plus déroutantes de la cosmologie moderne. Défiant superbement la théorie du big bang, elle entraîne dans des contrées de plus en plus reculées de l'Univers les scientifiques lancés à sa poursuite.

par Jean-Marc BONNET-BIDAUD
astrophysicien au CEA

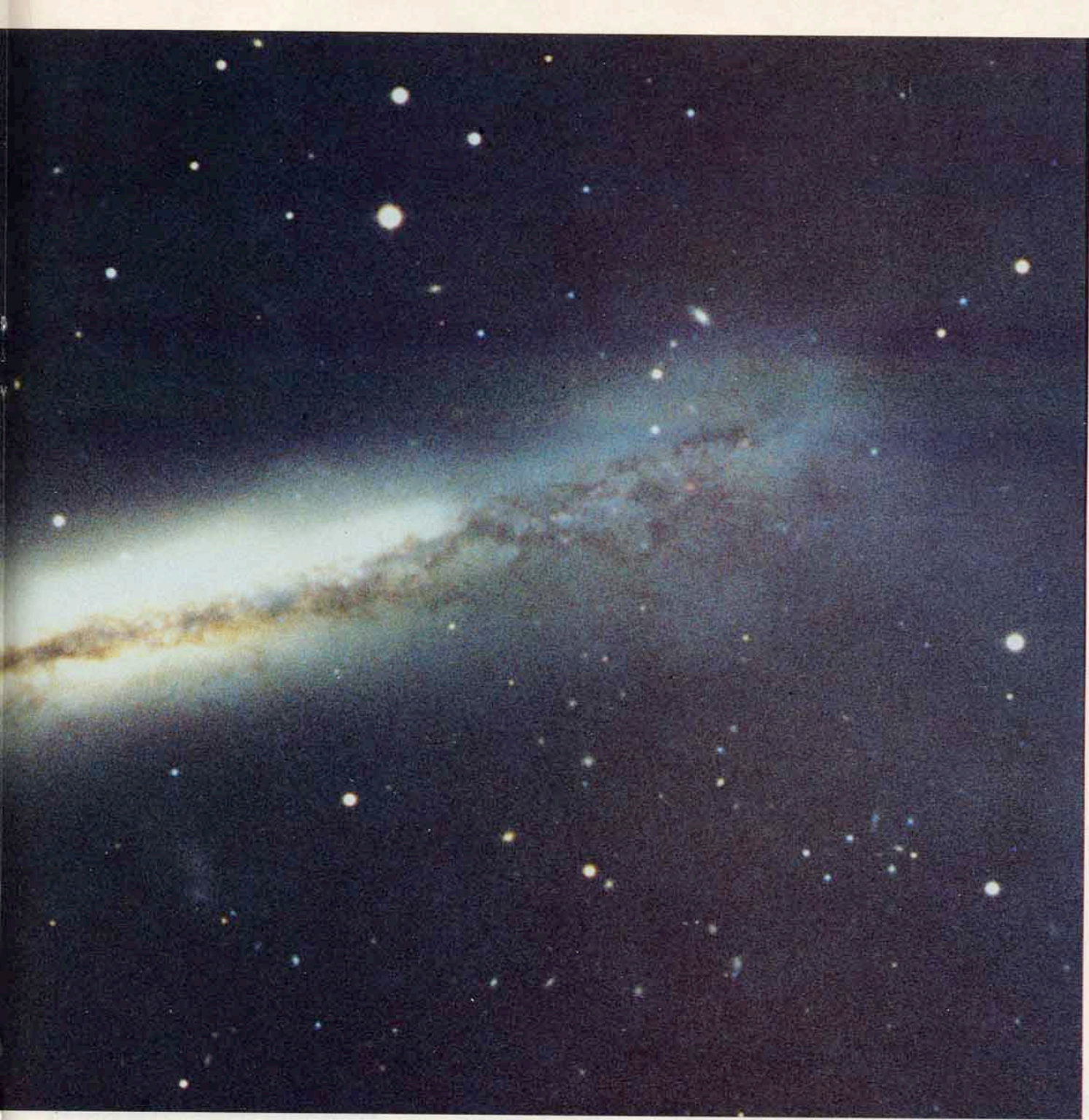
"TOUS deux sont un / Mais par leurs noms différent / Un qui est secret / Mystère du mystère." Le philosophe chinois Lao Zi qui, dans son *Dao De Jing* (La voie et la vertu), nous livrait ces vers énigmatiques ne pouvait imaginer, deux siècles avant notre ère, combien ils pourraient un jour qualifier jusqu'à la moindre parcelle de l'Univers qui nous entoure. Car, en dépit d'une apparence trompeuse, il n'y a pas une seule matière mais bien deux : matière et antimatière. Deux formes totalement symétriques de la même substance et qui ont pour propriété fondamentale de se détruire mutuellement.

Nos connaissances actuelles nous permettent d'affirmer qu'un monde d'antimatière serait en tout point semblable à son homologue de matière. Même structure, mêmes textures, formes, couleurs, et



ANTIMATIÈRE

L'UNIVERS A-T-IL UN DOUBLE ?



— pourquoi pas — mêmes paysages bucoliques faits de prés verts et de fleurs jaunes au contact desquelles... une abeille issue de l'autre monde serait immédiatement désintégrée. Mais que l'on ne s'y trompe pas : sous ses dehors de pur concept théorique, l'antimatière est bel et bien devenue une réalité physique pour les astronomes et les physiciens. Les résultats spectaculaires obtenus ces dernières années viennent en témoigner : de l'antimatière est aujourd'hui quotidiennement fabriquée, étudiée, stockée et transportée à la surface du globe. On s'interroge sur l'origine des antiparticules

qui bombardent en permanence la Terre et, pour la première fois, des sources cosmiques d'antimatière viennent d'être localisées dans notre galaxie. Tous ces résultats relancent la question essentielle qui est encore loin d'avoir obtenu une réponse satisfaisante : l'Univers a-t-il un double ? Existe-t-il un monde d'antimatière parallèle au nôtre ? Et si oui, comment le découvrir ?

L'antimatière est née en 1930, dans les années charnières de la physique, du mariage de la théorie de la relativité et de la mécanique quantique. Elle est même l'exemple parfait de la pure entité théo-

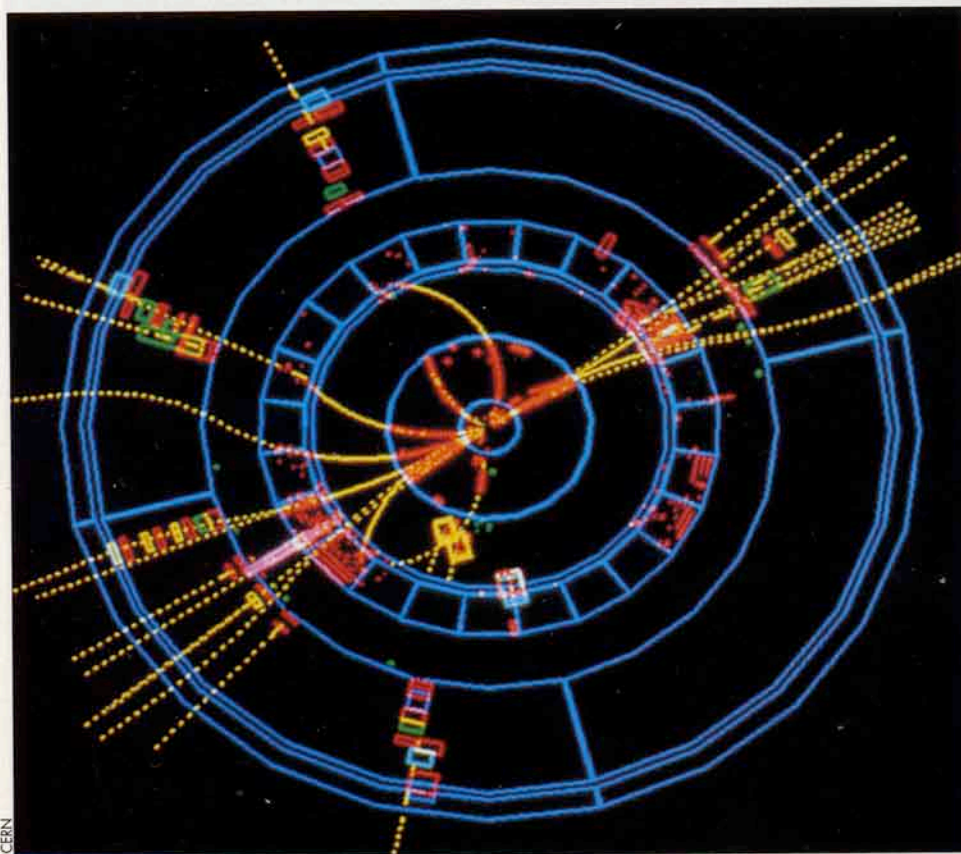
Dans quel univers parallèle, dans quelles galaxies lointaines pourrait se cacher l'antimatière ? Apparemment sortie tout droit d'un roman de science-fiction, cette question se pose pourtant en termes cruciaux pour les astrophysiciens. Car la théorie est formelle : si big bang il y a eu, matière et antimatière auraient dû se former en proportion égale au sein de la fournaise initiale...

rique, sortie du monde immatériel des équations mathématiques. En effet, lorsque le physicien anglais Paul Dirac écrit pour la première fois l'équation rela-

ANTIMONDES

tiviste de l'électron — qui détermine les propriétés quantiques de celui-ci lorsque sa vitesse approche celle de la lumière —, il n'est que partiellement satisfait. Il obtient deux solutions dont une qu'il se sent obligé d'éliminer car "cette solution à énergie négative semble n'avoir aucun sens physique". Un an après, il change radicalement d'avis en découvrant que cette solution peut correspondre à une particule de même masse que l'électron mais possédant une charge électrique opposée. Il postule alors de façon visionnaire que cette même symétrie doit être réalisée pour toutes les particules, chacune devant avoir dans la nature son anti-

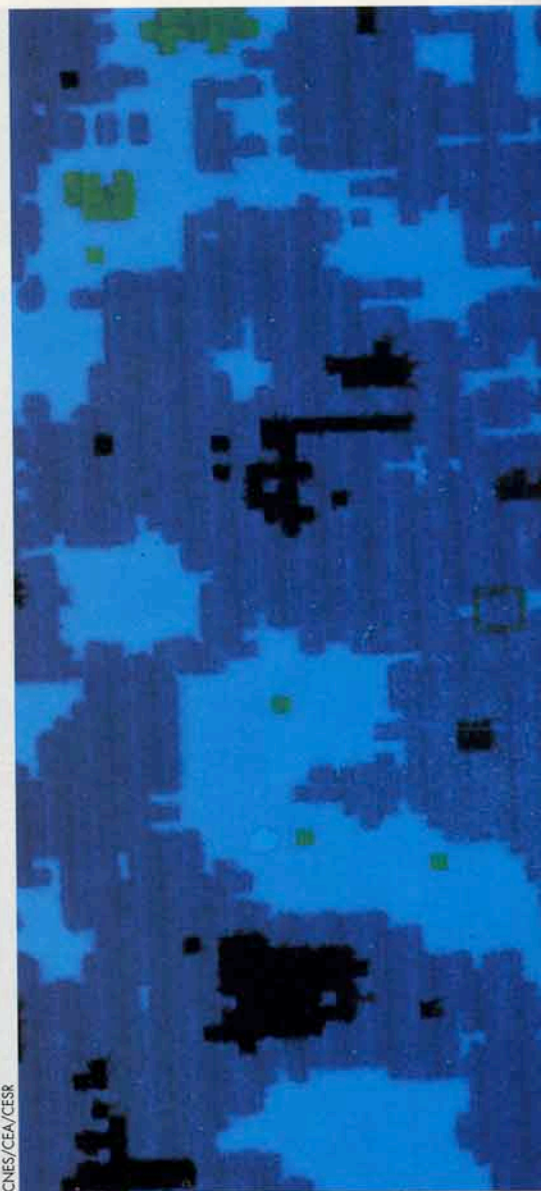
les mette en présence et elles s'annihilent mutuellement en énergie ou en particules plus fondamentales. Que l'on concentre suffisamment d'énergie en un point et l'on verra surgir, en une véritable génération spontanée, une paire de particules symétriques, la "vraie" et "l'anti". Annihilation et création de paires sont les deux manifestations de l'antimatière dans notre monde de matière. Pour en donner une illustration plus intuitive bien que très approximative, imaginons des motifs noirs sur une page blanche, figurant la matière, et des caractères blancs sur une page noire, l'antimatière. Si l'on découpe



particule, homologue mais de charge opposée. L'année suivante, l'anti-électron, ou positron (positon pour certains puristes), est découvert par Carl Davies. Il faudra attendre 1955 pour que l'antiproton le soit à son tour par Emilio Segre et Owen Chamberlain. Chaque étape, dont bien sûr la prévision de Dirac, sera ponctuée d'un prix Nobel. La fascination pour l'antimatière est en marche.

Particule et antiparticule forment, il est vrai, un couple bien étrange. Elles vivent intimement la relation " $E = mc^2$ " de la théorie de la relativité, prédisant l'équivalence de la masse et de l'énergie. Qu'on

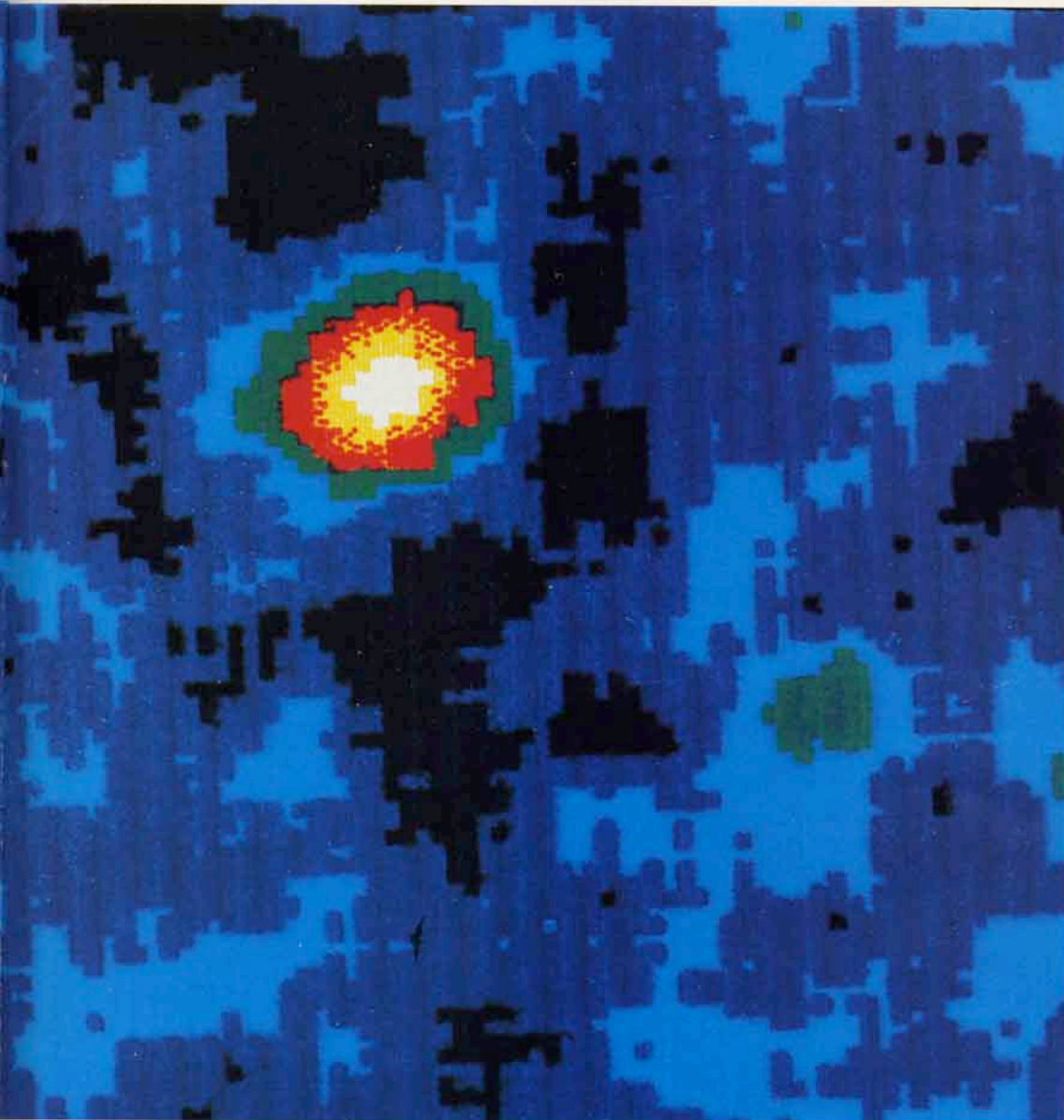
un caractère noir sur la page noire pour le placer sur la blanche, on crée en une seule opération deux caractères de couleur inversée, c'est-à-dire une paire. Si l'on opère maintenant en sens inverse, en replaçant le caractère sur la page noire, ce sont deux caractères qui disparaissent simultanément de notre vue : c'est l'annihilation. Mais cette dernière opération n'est possible que s'il existe au préalable un emplacement dans le fond noir à la dimension exacte du caractère. Au contraire, si la page noire est déjà pleine, l'antimatière n'a plus aucun moyen de manifester son existence. L'antimatière est ainsi virtuelle-



Aujourd'hui, chaque particule a trouvé son "double" dans les laboratoires de l'infiniment petit que sont les accélérateurs. Mais à l'échelle de l'Univers, la quête s'avère beaucoup plus ardue. Seuls indices indubitables : les rayons gamma caractéristiques produits par l'annihilation électron-positron, tels ceux détectés en 1990 par Granat-Sigma tout près du centre galactique...

ment présente partout et peut surgir à tout moment, tout en restant insaisissable.

Aujourd'hui, pour chaque particule connue, l'antiparticule a été observée dans ces laboratoires géants que sont les accélérateurs. La symétrie se poursuit jusqu'aux composants ultimes de la matière, les quarks, et bien que ceux-ci ne soient pas directement observables, chaque quark possède son antiquark. La notion de charge s'est désormais généralisée et, en dehors de la charge électrique, on parle également de charge baryonique, leptonique, etc., pour décrire les particules. Certaines d'entre elles, comme le pion



zéro (π_0) ou le photon, ayant toutes leurs charges nulles, sont leur propre antiparticule. Et c'est bien là le plus mauvais tour que pouvait nous jouer la nature. En effet, presque toute l'information que nous ayons concernant l'Univers est précisément véhiculée par ces photons, les particules de la lumière. Photons et antiphotons étant identiques, nous ne possédons donc aucun moyen de discerner parmi toute la lumière reçue du ciel celle qui provient de matière de celle qui provient d'antimatière, d'étoile ou d'anti-étoile, de galaxie ou d'antigalaxie...

Cette identité déroutante n'a pas pour autant découragé les scientifiques partis à la recherche des antimondes. En dehors des laboratoires, où trouver l'antimatière, se sont-ils demandé ? Tout simplement au-dessus de nos têtes. On sait depuis le début du siècle que la Terre est continuellement bombardée par un flux de particules de haute énergie, le rayonnement cosmique, provenant de régions éloignées de la Galaxie et essentiellement constitué de

noyaux d'hydrogène (protons), d'hélium et de métaux. Si antimatière il y a, ce rayonnement cosmique doit également

Sans le savoir vous êtes transpercés d'antiparticules tous les jours

contenir antiprotons et antihélium, reconnaissables à leurs charges électriques opposées qui, dans un champ magnétique, les font dévier dans une direction opposée à celle de leurs homologues de matière.

Les expériences s'avèrent difficiles à mettre au point, notamment parce qu'il faut avant tout s'affranchir de l'écran de l'atmosphère. Lorsqu'il percute cette dernière, le rayonnement cosmique déclenche en effet des gerbes de particules qui atteignent le sol, créant au passage des antiparticules secondaires. Sans que vous vous en doutiez, vous êtes ainsi tous les jours trans-

percés d'antiparticules ; parmi les six particules par seconde qui traversent la revue que vous lisez, deux sont des antiparticules produites par ces collisions.

En 1981, A. Buffington et ses collègues de l'Institut de technologie de Pasadena (USA) publient une série de mesures obtenues à l'issue de vols de ballons dans la stratosphère à plus de 30 000 m d'altitude. Leurs résultats font l'effet d'une bombe : si aucun noyau d'antihélium n'est découvert, les antiprotons répondent présents avec une proportion d'environ 1 pour 2000 protons ! La découverte de ces antiprotons cosmiques fait alors couler beaucoup d'encre. Pour les uns, elle signifie incontestablement qu'antimatière et matière coexistent dans le cosmos. Mais d'autres font aussitôt remarquer qu'une si faible quantité d'antiprotons pourrait très bien résulter de créations de paires temporaires, produites lors de collisions du rayonnement cosmique avec le milieu interstellaire. Cette dernière hypothèse semble aujourd'hui définitivement confortée, à la lumière de nouvelles mesures plus pré-

cises obtenues en 1988 lors du vol d'un ballon au-dessus du Saskatchewan (Canada). Celles-ci sont plutôt pessimistes : tout compte fait, il y aurait finalement moins d'un antiproton pour 20 000 protons. Véritablement trop peu pour changer la face du monde !

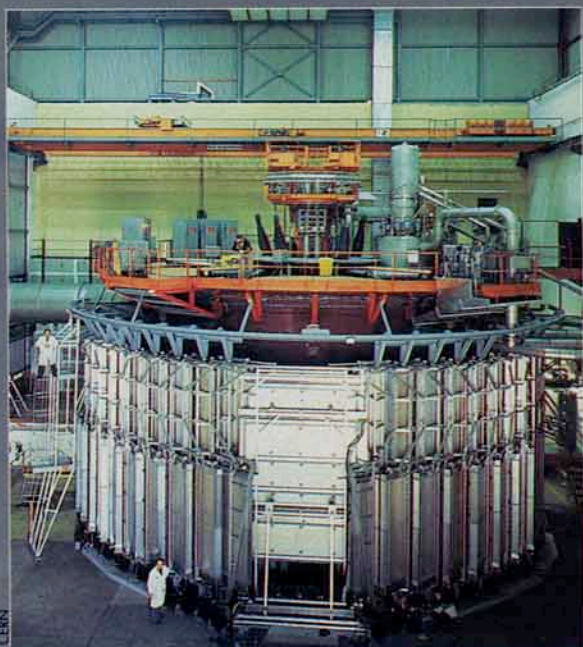
Avec le rayonnement cosmique qui provient de lointaines zones de la Galaxie, ce sont donc de vastes régions autour de nous qui semblent vides d'antimatière. Les astrophysiciens restent cependant en alerte car il suffirait de la découverte d'un seul antinoyau lourd, par exemple d'anticarbone ou d'anti-oxygène, pour tout remettre en cause : ces noyaux ne peuvent en effet se former qu'au cœur d'anti-étoiles !

L'antimatière pourrait effectivement être concentrée dans des planètes ou des étoiles mais, là aussi, très loin de nous. Dans le Système solaire, plus aucune chance. Pour preuve, aucune des sondes qui ont exploré planètes ou comètes de la "proche" banlieue solaire ne se sont désintégrées. Plus

LA COURSE À L'ANTIMATIÈRE

LA PREMIÈRE CHAÎNE terrestre de fabrication d'antimatière est entrée en service en 1983 au CERN près de Genève sous le nom de Lear (*Low Energy Antiproton Ring*, anneau d'antiprotons de basse énergie). Cette usine, unique au monde, pourrait fabriquer prochainement en série la première brique des mondes d'antimatière : l'anti-atome d'hydrogène, association d'un antiproton et d'un anti-électron. Pour l'instant, la plus grosse parcelle d'antimatière jamais vue est un noyau d'anti-hélium ^3He , fugitivement aperçu lors d'une collision dans l'accélérateur de Serpukhov en URSS.

Les plus grandes difficultés résident bien sûr dans la production en grande quantité et surtout dans le stockage de l'antimatière, procédures à la fois extrêmement complexes et coûteuses en énergie. Au Lear, les antiprotons sont produits en concentrant un intense faisceau de protons, préalablement accélérés à de très hautes énergies, sur une minuscule cible de cuivre de 3 mm de diamètre et 10 cm de long. Deux millions de protons sont nécessaires pour produire un seul antiproton ! Les antiparticules, patiemment collectées, sont ensuite ralenties avant d'être finalement injectées dans un anneau de stockage où elles tournent en rond, protégées des parois par un fort champ magnétique. Cette réserve d'antiprotons de basse énergie a ouvert des possibilités jusque-là insoupçonnées. En 1986, pour la première fois, il devient possible de prélever ces antiprotons pour les enfermer dans une "bouteille électrostatique" où ils peuvent être conservés pratiquement au repos pendant quelques minutes. Depuis lors, les progrès ont été fantastiques. Il y a quelques mois, dans le cadre d'une collaboration entre le CERN et l'université de Harvard, Gerald Gabrielse a définitive-



Grâce aux développements de la physique des hautes énergies, la production et le stockage d'antiprotons ont fait en quelques années un spectaculaire bond en avant. À quand la fabrication du premier atome d'antimatière ?

ment prouvé l'efficacité de la méthode en organisant sur plus d'un mois et à titre de publicité le premier transport d'antiprotons en camion à travers les États-Unis. Avec cette antimatière en conserve, les physiciens tenteront notamment de répondre à une étrange question : l'antiproton tombe-t-il vers le bas ou vers le haut ? La gravitation est en effet une force d'interaction beaucoup trop faible pour pouvoir être mesurée lors des collisions de noyaux. Est-elle la même pour l'antimatière ou est-elle opposée ? Gravité ou anti-gravité ? Pour tenter de répondre, l'expérience PS200 du CERN prévoit d'enfermer un antiproton dans une "bouteille" ultravide et refroidie pour observer à quelle vitesse et dans quel sens il tombe vers la Terre. D'autres expériences ultérieures seront encore beaucoup plus com-

plexes à mettre en œuvre, lorsqu'il s'agira par exemple de mélanger une "bouteille" d'antiprotons avec une "bouteille" de positrons pour obtenir de l'antihydrogène...

À supposer que l'antimatière soit prochainement manipulée comme un vulgaire composé chimique, à quoi pourrait-elle servir ? L'application première évidente concernerait bien sûr son utilisation en tant que combustible. L'annihilation peut convertir jusqu'à 100% de la masse en énergie, soit près de cent fois celle fournie par la fission de l'uranium dans les réacteurs nucléaires et, à masse égale, plusieurs milliards de fois celle du mélange hydrogène-oxygène utilisé dans les fusées. De plus, le stockage de l'antimatière, la forme la plus portable d'énergie, ouvrirait certainement des horizons nouveaux aux voyages interplanétaires. Mais chaque milligramme d'antimatière libérant l'équivalent de 44 t de TNT, elle pourrait également se révéler une redoutable arme de destruction. Il y a quelques

années, la revue scientifique *Nature* signalait d'ailleurs l'intérêt croissant des militaires de l'US Air Force pour cette arme d'un genre nouveau et précisait que les premières études étaient déjà financées. Certes, il y a encore loin de l'expérimentation aux applications. Le CERN produit ainsi aujourd'hui environ 100 milliards d'antiprotons par jour, ce qui ne représente que 6.10^{11} g par an, ou 1 mg tous les... dix millions d'années environ. Mais certains scientifiques ont d'ores et déjà réclamé l'interdiction d'exploiter les recherches sur l'antimatière à des fins militaires. Ils craignent sans doute de se retrouver un jour dans un nouvel Los Alamos, ce laboratoire américain cadencé où, en 1942, les plus grands scientifiques furent convaincus de construire en secret la bombe d'Hiroshima...

sérieusement, nous possédons à l'heure actuelle une limite très quantitative pour notre environnement proche. Déjà, en 1958, Geoffrey Burbidge et Fred Hoyle avaient calculé que l'énergie disponible dans le milieu interstellaire limitait le nombre d'antiparticules à moins d'une pour dix millions. Mais aujourd'hui c'est le rayonnement gamma, beaucoup mieux connu, qui fournit les plus fortes contraintes.

Pour la recherche de l'antimatière, en effet, les astronomes ont un moyen quasi infallible de détection : l'annihilation d'une paire électron-positron produit presque invariablement deux rayons gamma, photons d'une énergie très précise, 511 keV exactement. C'est grâce à ces témoins de l'annihilation que le satellite soviétique Granat, avec à son bord la caméra française Sigma, découvre en

1990, tout près du centre de la Galaxie, une source d'antimatière, véritable fontaine d'électrons et de positrons ! Certes la fontaine ne fonctionne que sporadiquement mais elle émet bien les rayons gamma caractéristiques qui lui ont déjà valu le nom de Grand Annihilateur. Grâce aux ondes radio, Félix Mirabel et ses collègues du CEA ont récemment pu suivre le sillage des positrons qui for-



ment deux jets avant d'aller finalement se désintégrer dans le milieu interstellaire, plus de trois années-lumière plus loin (voir *C&E* n° 273). Cette découverte d'une source de positrons en activité nous confirme donc indirectement que les positrons, même produits en grande quantité, ne peuvent avoir dans notre galaxie de matière qu'une durée de vie très limitée. De la même façon, une grande quantité de rayons gamma de plus haute énergie, au-delà de 100 millions d'électron-volts (100 MeV), devrait nous signaler l'existence d'antiprotons. Or le ciel de ces rayons gamma est beaucoup trop pâle. Il devient pratiquement exclu que dans notre galaxie ou dans celles qui nous entourent, existe un grand nombre d'antiprotons. Voilà la recherche de l'antimatière brutalement repoussée à de très grandes distances, sans doute plusieurs centaines de millions d'années-lumière, au-delà des grands amas de galaxies.

Or cette quête pourrait paraître vaine sans une prédiction catégorique de la cosmologie moderne : si l'Univers est né d'un big bang, c'est-à-dire d'une phase passée extrêmement chaude, alors matière et antimatière ont dû se former en quantités égales ! Dans la fournaise primordiale, l'énergie est suffisamment concentrée pour qu'apparaissent spontanément des paires particules-antiparticules. À une

température supérieure à 2 000 milliards de degrés, surgissent ainsi par paires protons et antiprotons.

Mais si notre monde est composé des premiers, où sont passés les seconds ? Autant l'avouer tout de suite, cette question n'a toujours pas de solution. Dans les années 70, d'ingénieux astrophysiciens tels le Suédois Hannes Alfvén ou le Français Roland Omnes ont proposé des recettes du type "mayonnaise ratée", dans lesquelles matière et antimatière du big bang se séparant comme l'huile de l'eau seraient aujourd'hui isolées en deux mondes distincts. Mais aucune confirmation n'est venue étayer leurs hypothèses.

Bien sûr, il est possible d'imaginer des conditions initiales particulières du big bang dans lesquelles la matière aurait au départ le dessus. Les spécialistes traduisent cela en parlant "d'Univers à charge baryonique non nulle", mais pour tout physicien élevé dans le respect de la symétrie, il s'agit là d'une vraie faute de goût.

La planche de salut paraissait encore récemment pouvoir sortir des théories de grande unification, baptisées GUT, ces tout derniers développements de la physique qui tentent d'unifier les lois d'interaction entre particules. L'idée avait été lancée en 1967 par le Soviétique Andreï Sakharov : l'Univers de départ pouvait garder sa symétrie et sa charge baryonique nulle si, par la suite,

En percutant l'atmosphère, le rayonnement cosmique fait naître des gerbes de particules. Les astronomes du Pic du Midi y ont, durant plusieurs décennies, traqué l'antimatière.

la symétrie n'était pas conservée entre particules et antiparticules, l'antiparticule se désintégrant plus facilement que la particule. Une telle violation de la symétrie n'a été découverte jusqu'ici que pour une seule particule, le kaon, en 1964. Mais, selon les GUT, comme chaque particule peut se transformer en une autre, cette violation pourrait également affecter le proton. Tels les frères ennemis Abel et Caïn, protons et antiprotons du début de l'Univers auraient apparemment eu les mêmes chances mais en réalité une espérance de vie différente. Malheureusement dans ce cas, les GUT prédisent que le proton lui-même devrait être instable avec une vie limitée à... 10^{31} ans, une propriété que refusent de mettre en évidence plusieurs expériences en cours qui lui donnent déjà plus de 10^{33} ans. Sauf à abandonner le big bang, nous n'avons donc actuellement aucun motif d'exclure totalement le constat de Dirac en 1930 : "Il se pourrait que ce soit par simple accident que la Terre (et nous par la même occasion) soit faite de matière plutôt que d'antimatière et l'inverse pourrait être vrai pour d'autres corps célestes." ■