

L'ESSENTIEL

> Les particules d'antimatière présentent une charge électrique opposée à leur alter ego de matière. Leur masse est supposée identique.

> Si leur masse était négative, les antiparticules pourraient chuter à une vitesse différente dans un champ gravitationnel, voire « tomber vers le haut ».

> Des expériences au Cern, près de Genève, testeront bientôt cette hypothèse.

> La masse négative des antiparticules permet aussi de développer un modèle cosmologique original qui se passerait de la matière noire, de l'énergie noire et de la phase d'inflation.

L'AUTEUR



GABRIEL CHARDIN
directeur de recherche
au CNRS, où il préside le Comité
des très grandes infrastructures
de recherche

L'antimatière tombe-t-elle vers le haut?

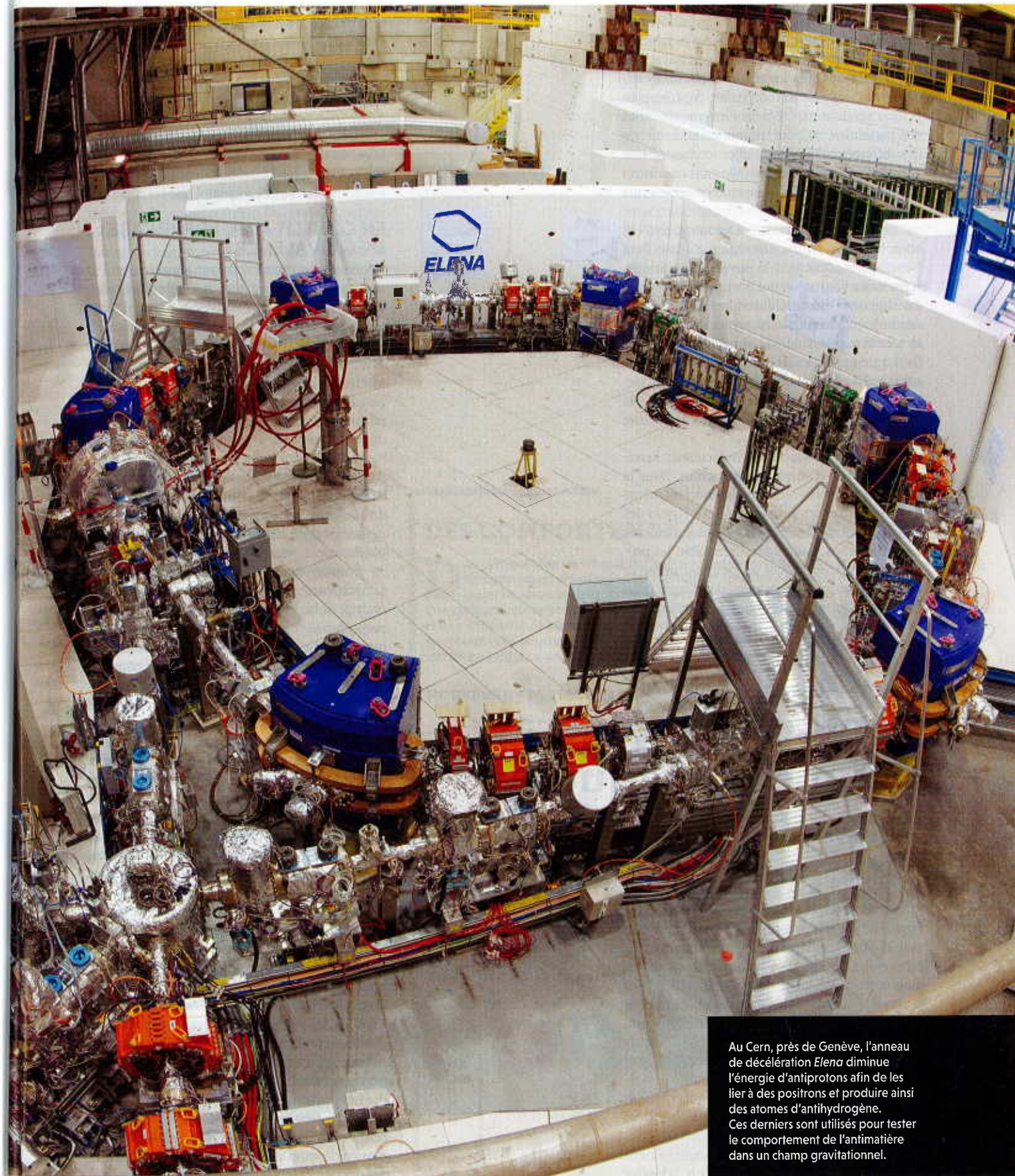
Et si l'antimatière était de masse négative? En faisant cette hypothèse, il est possible de construire un modèle cosmologique qui n'a besoin ni de matière noire, ni d'énergie noire, ni d'inflation. Une hypothèse osée que les physiciens pourraient bientôt tester au Cern.

Dans l'anneau de 27 kilomètres de circonférence du LHC, le grand collisionneur de hadrons du Cern, les physiciens projettent les uns contre les autres des protons à des vitesses proches de celle de la lumière. Dans les «déchets» de ces collisions à haute énergie, ils ont découvert le boson de Higgs et continuent d'explorer les lois qui régissent les interactions des particules. Ils ont ainsi mis à l'épreuve et validé avec une très bonne précision ce qu'on nomme le modèle standard de la physique des particules.

Mais à l'ombre du LHC, d'autres expériences, plus modestes par leur taille, explorent un pan encore mal connu du monde des particules, celui de l'antimatière. Celle-ci est en quelque sorte un >

© 2016-2019 Cern, Maximilien Brice; © Jean-François Dais/Photothèque CNRS (portrait)





Au Cern, près de Genève, l'anneau de décélération *Elena* diminue l'énergie d'antiprotons afin de les lier à des positrons et produire ainsi des atomes d'antihydrogène. Ces derniers sont utilisés pour tester le comportement de l'antimatière dans un champ gravitationnel.

> «miroir» de la matière qui compose tous les objets de notre quotidien, mais aussi la Terre, la Lune, le Soleil, etc. De nombreuses questions restent aujourd'hui sans réponse. Les antiparticules sont-elles un miroir parfait dont les propriétés seraient exactement l'inverse de celles des particules, ou peut-on mettre en évidence des différences? En particulier, comment une antiparticule se comporte-t-elle dans un champ gravitationnel? Tombe-t-elle exactement comme une particule de matière?

Le concept d'antimatière a émergé en 1928 sous l'impulsion du physicien anglais Paul Dirac, qui étudiait alors la physique quantique. À partir de l'équation qui porte son nom, il en a déduit que l'électron devait avoir un *alter ego*, nommé un peu plus tard positron, qui aurait la même masse, mais de charge électrique et d'énergie opposées. De fait, en 1932, l'Américain Carl Anderson a confirmé expérimentalement l'existence du positron en étudiant le passage de rayons cosmiques dans une chambre à brouillard.

Depuis, les physiciens ont découvert l'anti-proton et bien d'autres antiparticules. Dans le cadre d'expériences récentes, ils associent même des positrons et des antiprotons pour former des atomes d'antihydrogène. Au Cern, les membres de l'expérience *Alpha-2* mesurent ainsi les propriétés spectroscopiques de l'antihydrogène et montrent, qu'aux incertitudes de mesure près, elles sont équivalentes à celles de l'hydrogène.

La relativité générale n'impose pas que les masses soient positives

En revanche, aucune expérience n'a encore réussi à comparer le comportement d'une particule et d'une antiparticule dans un champ gravitationnel. Cette mesure serait intéressante car, dans certaines théories qui voudraient dépasser le modèle standard, les antiparticules tomberaient à une vitesse différente des particules, voire «tomberaient vers le haut»! C'est ce phénomène que les expériences *AEgIS*, *ALPHA-g* et *Gbar* testeront dans les années à venir.

La grande majorité des physiciens pensent que la matière et l'antimatière devraient se comporter de la même façon, et que si des différences existent, elles sont extrêmement faibles. Mais si l'on observait un tel effet

d'antigravitation au Cern, les conséquences seraient *a priori* très importantes pour la cosmologie. Dans ce contexte, en 2006, j'ai commencé à étudier, avec Aurélien Benoît-Lévy, les implications cosmologiques d'un modèle qui suppose que les antiparticules ont des masses négatives. C'est ce que nous avons nommé le modèle de Dirac-Milne. Nous avons montré qu'un tel scénario, bien que très exotique, propose des solutions intéressantes en cosmologie.

EN CONFLIT AVEC LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE?

Pour commencer, il faut s'intéresser à la notion de masse négative qui, *a priori*, semble incompatible avec la relativité générale d'Einstein et, en particulier, avec le principe d'équivalence. Ce principe stipule que la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont égales. La première est liée à l'accélération dans la loi de Newton et exprime une résistance à une mise en mouvement ou un changement de direction dû à une force; la seconde est celle qui intervient dans la loi de la gravitation. En 2018, le satellite *Microscope* a testé et confirmé le principe d'équivalence avec une précision de l'ordre de 10^{-14} . Est-il alors possible d'avoir des masses négatives et de construire des théories compatibles avec le principe d'équivalence?

Dans les années 1950, le physicien d'origine autrichienne Hermann Bondi a montré qu'il était possible d'avoir des masses négatives et respecter le principe d'équivalence (la masse inertielle et la masse gravitationnelle sont alors toutes deux négatives). Cependant, le comportement gravitationnel de ces particules était assez surprenant. Alors qu'une particule de masse positive attire les autres particules (qu'elles soient de masse positive ou négative), une particule de Bondi de masse négative repousse toutes les autres particules. Et en mettant en présence une particule de masse positive avec une particule de même masse mais négative, on obtient un mouvement de fuite en avant: les deux particules se poursuivent en accélérant tout en restant à distance (presque) constante. La plupart des physiciens considéraient ces configurations comme très exotiques, voire non physiques.

Par ailleurs, des théorèmes puissants semblaient exclure toute possibilité de modèle comprenant des masses négatives, ou plus généralement violant la positivité de l'énergie. En effet, si la relativité générale n'impose pas que les masses soient positives, l'introduction de masses négatives semble conduire à de graves problèmes d'instabilité.

Les physiciens ont longtemps pensé que ces théorèmes sur la positivité de l'énergie devaient être strictement respectés, mais plusieurs phénomènes ont mis en évidence des violations de ces énoncés. C'est le cas de l'effet Casimir, lié à

des fluctuations quantiques du vide, qui présente une densité d'énergie locale négative.

Mais c'est surtout la découverte de l'«énergie noire», en 1998, qui a remis en question les théories sur la positivité de l'énergie. En étudiant des supernovæ de type Ia – associées à l'explosion d'étoiles naines blanches –, deux équipes d'astronomes ont montré que l'Univers pourrait être en expansion accélérée. Les cosmologistes ont expliqué cette dynamique en faisant l'hypothèse que l'Univers contient une grande quantité d'énergie noire, dont la nature reste à préciser. Dans ce cas, on peut montrer que certaines conditions de positivité de l'énergie sont violées aux échelles les plus grandes, celles du cosmos.

Par ailleurs, en 2014, Manu Paranjape et Saoussen Mbarek ont montré qu'il était possible, dans certaines conditions, de construire une configuration mathématique stable, une «bulle» de masse négative dans un univers en expansion comme le nôtre. Les obstacles à l'antimatière de masse négative ne seraient donc peut-être pas réels.

POLARISATION DU VIDE

En 1993, Richard Price, de l'université de l'Utah, a poursuivi l'étude des masses négatives au sens de Bondi dans un champ gravitationnel. Il a noté qu'une masse négative isolée tombe exactement comme une masse positive. En effet, la force gravitationnelle s'exerçant sur cette particule pointe vers le haut, du fait que la masse gravitationnelle est négative; mais l'accélération pointe vers le bas, la masse inertielle étant elle aussi négative.

Cependant, une particule n'est jamais vraiment isolée, ce qui pourrait entraîner des différences dans le mouvement des particules et des antiparticules. Richard Price a aussi remarqué qu'un système lié composé de deux masses identiques, mais de signes opposés, lévite. Et l'ensemble se polarise (voir la figure ci-contre), la masse négative se plaçant légèrement au-dessus de la masse positive dans le système en lévitation.

Or l'espace, même considéré comme vide, est le siège d'une intense activité de formation et disparition de paires particule-antiparticule à très courte durée de vie et dites virtuelles, en accord avec les lois de la physique quantique. Dès lors, une particule n'est jamais vraiment isolée: elle est entourée, ou «habillée», de particules et antiparticules virtuelles. Cet habillement, qui se polariserait comme Richard Price l'a noté, influencerait sur la façon dont une particule et une antiparticule tombent réellement dans un champ gravitationnel. Par ailleurs, des théories qui explorent des scénarios au-delà du modèle standard de la physique des particules (supersymétrie, théorie des cordes, etc.) introduisent des asymétries entre les particules et les antiparticules. La gravitation exercerait

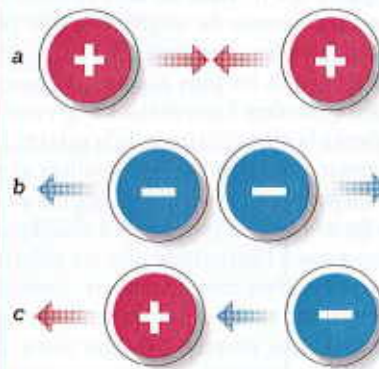
alors une force différente sur les unes et les autres. Si l'un de ces scénarios décrit correctement la nature, une antiparticule aurait un comportement inhabituel: elle tomberait à une vitesse différente d'une particule, voire vers le haut. Nous y reviendrons.

La polarisation du vide dans un champ gravitationnel, pointée par Richard Price, aurait aussi des conséquences à grande échelle, galactique et cosmologique. On s'attend à des effets importants surtout dans les régions où le champ gravitationnel est fort, comme au voisinage d'un trou noir. Mais il serait aussi possible de voir un effet dans les régions où le champ gravitationnel est plus faible, en particulier parce que cette polarisation modifie les lois de Newton pour les très faibles accélérations. Ce résultat n'est pas sans rappeler la théorie Mond (acronyme de *Modified Newtonian Dynamics*) proposée en 1983 par Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, pour résoudre le problème de la matière noire à l'échelle des galaxies. >

DES COMPORTEMENTS SURPRENANTS

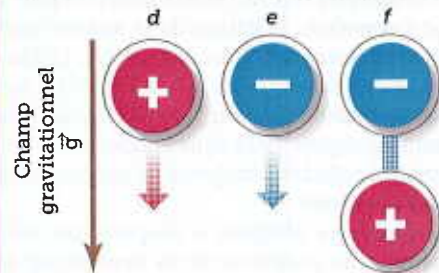
Dans l'hypothèse où les antiparticules ont une masse négative, leur comportement serait loin d'être intuitif. D'après les équations de la relativité générale, deux antiparticules se repousseraient tandis qu'une particule et une antiparticule se poursuivraient. Dans un champ gravitationnel, une particule et une antiparticule tomberaient *a priori* de la même façon. Mais certaines théories suggèrent qu'il pourrait en être autrement, et des expériences sont menées pour mettre en évidence une anomalie dans la chute des antiparticules.

MOUVEMENT DES MASSES DANS LA THÉORIE DE BONDI



En 1957, Hermann Bondi a montré que des masses négatives n'étaient pas exclues par la relativité générale. En revanche, si la force gravitationnelle entre deux masses positives est attractive (a, les deux masses se rapprochent), elle devient répulsive entre deux masses négatives (b, les deux masses s'éloignent). Et avec deux masses égales en valeur absolue, mais l'une positive et l'autre négative, les deux particules se poursuivent en maintenant toujours la même distance entre elles (c).

DANS UN CHAMP GRAVITATIONNEL



En 1993, Richard Price a montré qu'une masse positive et une masse négative tombent de la même façon dans un champ gravitationnel dans le cadre de la relativité générale (d et e). Si ces masses sont liées (comme dans une paire particule-antiparticule virtuelle du vide), l'ensemble lévite (f).

OÙ SE CACHE DONC L'ANTIMATIÈRE ?

Si l'Univers contient autant d'antimatière que de matière, comme le prévoit l'univers de Dirac-Milne proposé par Gabriel Chardin, où se cache donc l'antimatière ?

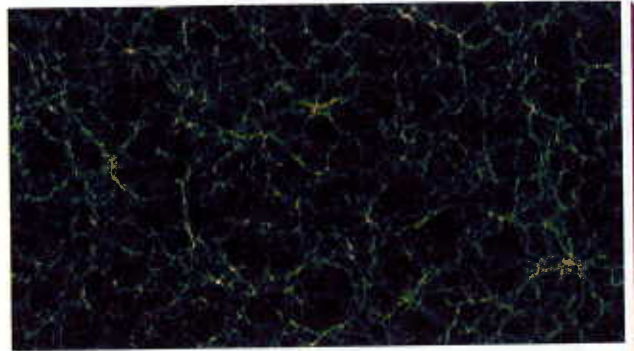
Dès les années 1970, Roland Omnès, de l'université Paris-Sud, et ses collègues s'étaient intéressés à des univers symétriques matière-antimatière. La motivation était alors d'expliquer la densité de matière ordinaire (baryonique) dans l'Univers, et pourquoi nous ne voyons que de la matière et pas d'antimatière.

Les cosmologistes ont constaté que la densité de matière ordinaire est environ un milliard de fois plus faible que celle des photons. L'explication de ce fait serait que la matière et l'antimatière

se seraient annihilées mutuellement en produisant des photons durant la jeunesse de l'Univers. Un infime excédent de matière (un milliard et une particules de matière pour un milliard de particules d'antimatière) expliquerait pourquoi nous ne voyons que de la matière aujourd'hui. Or, juste après le Big Bang, la température considérable imposait des proportions égales de matière et d'antimatière.

Le modèle standard de la physique des particules présente de petites différences entre matière et antimatière qui permettent de passer d'une configuration symétrique à une autre asymétrique. Mais les effets sont trop faibles pour expliquer les observations. Roland Omnès a alors étudié un mécanisme par lequel matière et antimatière se seraient séparées à la façon d'une émulsion, quand l'Univers était âgé d'environ 10 microsecondes.

Ce scénario n'est pas dénué de problèmes. Aux frontières des domaines, de fréquentes annihilations particule-antiparticule devraient se produire et



Cette simulation de la formation des grandes structures de l'Univers montre que la matière s'accumule en filaments (où se trouvent les galaxies) autour de vastes zones vides. Ces dernières sont-elles occupées par l'antimatière ?

émettre un rayonnement gamma, détectable par le télescope spatial Fermi. Mais cette émission n'a pas été observée.

Qu'en est-il du modèle de Dirac-Milne ? Au début, la matière et l'antimatière sont mélangées et s'annihilent. Ils forment progressivement des domaines distincts, qui restent encore en contact. L'annihilation aux frontières s'arrête lorsque l'Univers se refroidit et atteint une température d'environ 300 000 kelvins. Les domaines sont alors assez séparés. La matière s'effondre gravitationnellement et forme

les grandes structures (voir l'image ci-dessus). L'antimatière, avec sa masse négative, tend à s'étendre au maximum tout en étant repoussée par la matière. Elle occuperait aujourd'hui la très grande majorité du volume de l'Univers sous la forme de nuages de gaz froid dans les régions qui nous paraissent vides.

Reste que l'estimation de la densité baryonique dans les domaines de matière est loin d'être simple. Elle dépend de nombreux détails du modèle, comme la température où les quarks et les gluons s'associent en protons et neutrons.

> De quoi s'agit-il ? Dans les années 1970, en mesurant les vitesses de rotation au sein des galaxies spirales, les astrophysiciens ont remarqué que les objets les plus éloignés du centre galactique évoluaient à des vitesses trop élevées par rapport à la masse estimée de la galaxie. Le champ gravitationnel galactique semblait alors trop faible pour retenir ces objets, qui auraient dû être éjectés de leur galaxie. Des chercheurs ont alors avancé l'hypothèse que les galaxies sont entourées d'un halo de matière, invisible et interagissant peu ou pas du tout avec la matière ordinaire, nommée matière noire. La masse du halo de matière noire augmenterait l'intensité du champ gravitationnel de la galaxie et retiendrait alors les objets périphériques.

Cependant, la nature de la matière noire reste à déterminer. Et les efforts pour la détecter grâce à des expériences sur Terre (j'ai moi-même contribué à lancer l'une d'elles, *Edelweiss*, installée depuis 1993 dans le laboratoire souterrain de Modane, en Savoie) n'ont rien donné jusqu'à présent.

Mordehai Milgrom a proposé une autre solution au problème de la dynamique des galaxies : modifier la dynamique newtonienne

quand l'accélération est très faible, ce qui est le cas dans les régions les plus lointaines des galaxies. Cette approche restitue parfaitement les courbes de rotation des galaxies. Mais il reste à comprendre d'où proviendrait cette modification des lois de Newton.

En 2009, Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, et Alexandre Le Tiec, de l'observatoire de Paris, ont étudié un modèle de matière noire qui se polarise en présence d'un champ gravitationnel. Ils ont retrouvé un comportement équivalent à celui de la théorie Mond de Mordehai Milgrom, mais le modèle ne précise pas la nature exacte de cette matière noire. Or dans le scénario que j'étudie, où l'antimatière est de masse négative, on retrouve ce comportement de polarisation dans un champ gravitationnel. Les estimations de la densité de paires virtuelles dans le vide sont compatibles avec les contraintes du modèle de Luc Blanchet et d'Alexandre Le Tiec. Il reste cependant à réaliser des calculs plus précis pour s'assurer que l'on retrouve bien le comportement de Mond.

Nous n'en sommes qu'au début de l'étude des implications de ce scénario, mais l'hypothèse de la masse négative semble offrir des réponses

intéressantes à des questions encore ouvertes dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, comme celle de la matière noire.

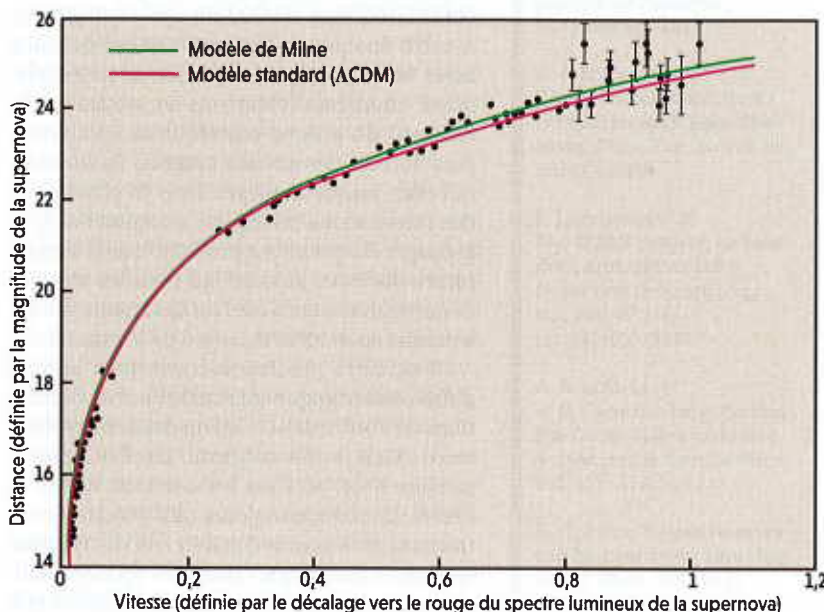
Celle-ci n'est pas tout: elle représente près de 25% du contenu de l'Univers, et s'y ajoutent 5% de matière ordinaire et environ 70% d'énergie noire (responsable de l'expansion accélérée de l'Univers). La nature de cette dernière reste à éclaircir et il en est de même de l'inflation, une phase d'expansion exponentielle subie par l'Univers dans ses premiers instants, que le modèle standard doit inclure pour expliquer certaines caractéristiques de l'Univers comme son homogénéité à grande échelle.

L'un des problèmes du modèle initial du Big Bang, jusqu'à la fin des années 1970, était que certaines régions distantes n'étaient pas causalement connectées, c'est-à-dire qu'elles n'avaient pas eu le temps d'interagir depuis la naissance de l'Univers. Or d'après les observations, ces régions ont presque exactement la même température, ce qui est difficile à expliquer si elles n'ont pas été en contact. L'inflation primordiale constitue une solution à ce problème. Elle assure que toutes les régions observées ont été causalement en contact. Mais aucune théorie fondamentale précise ne permet de comprendre comment on peut entrer dans cette dynamique inflationnaire, ni surtout comment en sortir.

NI MATIÈRE NOIRE, NI ÉNERGIE NOIRE, NI INFLATION

Il serait donc intéressant de voir si d'autres modèles cosmologiques sont capables de satisfaire les contraintes observationnelles actuelles en faisant l'économie d'hypothèses telles que la matière noire, l'énergie noire et l'inflation. Par exemple, en 2016, Subir Sarkar, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont analysé vingt ans de données obtenues à partir des supernovæ sur

Les supernovæ de type Ia sont des « chandelles standard »: il est possible de déterminer leur distance et de mesurer la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous. Ce qui permet d'étudier la dynamique d'expansion de l'Univers au cours du temps. En comparant les données sur les supernovæ et des courbes de modèles théoriques, il est difficile aujourd'hui de distinguer le scénario standard du modèle de Milne.



la dynamique d'expansion de l'Univers. Ils ont remarqué qu'elles ne permettent toujours pas de distinguer de façon indiscutable le scénario d'expansion du cosmos tel qu'il est décrit par le modèle standard et un autre, l'univers gravitationnellement vide proposé dans les années 1930 par le Britannique Edward Arthur Milne (voir la figure ci-dessous). Distinguer les deux modèles de façon probante avec les supernovæ nécessiterait d'observer des explosions de ce type bien plus lointaines, ce qui sera possible avec le futur télescope spatial *James-Webb* censé être lancé en 2022, ou les grands programmes de relevés galactiques comme *LSST*, qui démarrera en 2023.

Le modèle de Milne est une solution cosmologique des équations de la relativité générale pour un univers où la densité d'énergie est nulle. Cet univers apparaît alors gravitationnellement vide. Sa dynamique ne présente ni accélération de l'expansion cosmique ni décélération. Un tel univers reste dans une phase d'expansion que l'on pourrait caractériser d'inflation minimale. Ce comportement constant et simple est à comparer au modèle standard, qui suppose une phase d'inflation initiale suivie d'une phase d'expansion d'abord décélérée, puis accélérée.

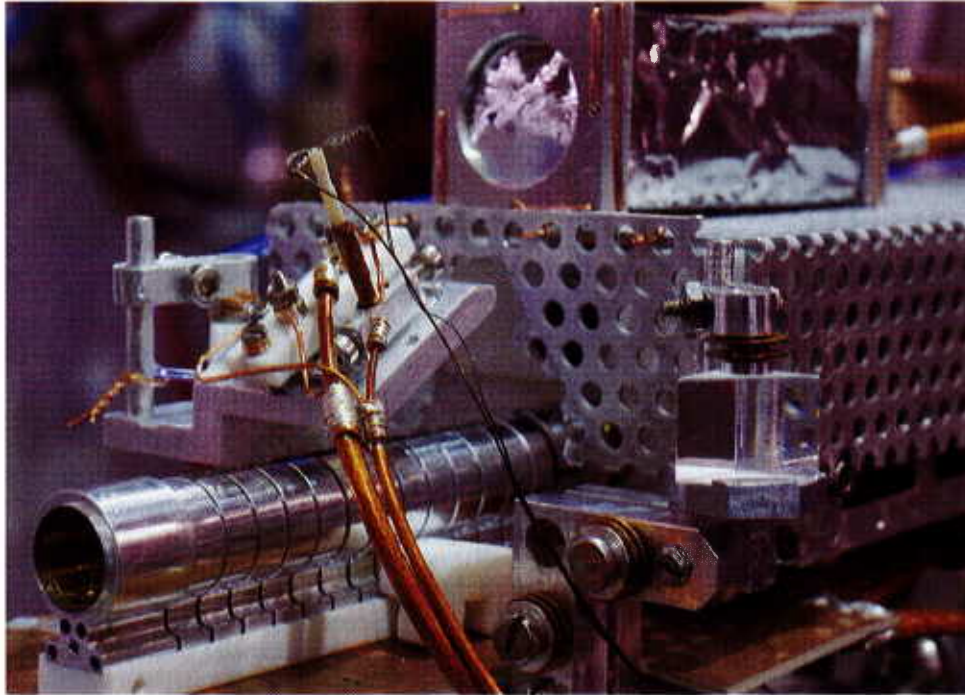
La dynamique particulière du modèle d'univers de Milne implique que toutes les régions observables du cosmos sont causalement connectées. L'Univers est alors naturellement uniforme à grande échelle, sans avoir besoin de faire appel au mécanisme d'une brève phase d'inflation initiale.

L'idée est intéressante. Cependant, la condition d'un univers de Milne gravitationnellement vide semble incompatible avec le fait que l'Univers où nous vivons contient de la matière. Mais elle serait satisfaite à grande échelle si le cosmos contient autant de matière de masse positive que d'antimatière de masse négative. C'est ce que nous avons nommé, avec Aurélien Benoît-Lévy, le modèle d'univers de Dirac-Milne. Il serait alors possible de se passer de l'énergie noire et de l'inflation... ainsi que de la matière noire, grâce à la polarisation du vide dans un champ gravitationnel.

DIRAC-MILNE À L'ÉPREUVE DES OBSERVATIONS

Il faut cependant souligner qu'une des forces du modèle standard est qu'il est en accord avec de nombreuses observations. Qu'en est-il du modèle de Dirac-Milne?

Premier pilier observationnel du modèle standard: la nucléosynthèse primordiale. Elle décrit, en accord raisonnable avec les observations, la production des éléments légers (hydrogène, hélium, deutérium, lithium) dans les premières minutes de l'Univers après le Big Bang. Ces éléments ont été produits en moins de vingt minutes, puis l'Univers est devenu trop froid et >



L'expérience *AEGIS*, au Cern, est conçue pour mesurer l'influence du champ gravitationnel sur des atomes d'antihydrogène. Le tube (à gauche) est un piège magnétique pour des antiprotons qui sont ensuite associés à des positrons arrivant par le haut. Les physiciens produisent alors un faisceau horizontal d'atomes d'antihydrogène qui traverse un détecteur (un déflectomètre de moiré), qui mesurera la déviation du faisceau sous l'influence du champ gravitationnel. La précision de l'expérience sera de l'ordre de 1%.

> dilué pour que les réactions se poursuivent. Dans l'univers de Dirac-Milne, la température a baissé plus lentement. La durée de la nucléosynthèse a donc été beaucoup plus longue: plus de 30 ans! Pourtant, en dépit de cette différence énorme – un facteur de cinq millions –, l'univers de Dirac-Milne produit l'hélium 4, le lithium et le deutérium avec un aussi bon accord observationnel que le modèle standard.

Le seul élément où les prédictions diffèrent notablement est l'hélium 3, avec un excès d'un facteur 5 à 10 dans le modèle de Dirac-Milne. Cependant, cela ne permet pas de conclure lequel des deux modèles décrit le mieux la nucléosynthèse primordiale. En effet, l'hélium 3 est fragile. Il est produit et détruit au sein des étoiles ou dans leur voisinage pendant toute l'histoire de l'Univers, d'où la difficulté d'en déterminer la production primordiale à partir des mesures observationnelles.

Un autre pilier du modèle standard est la formation des grandes structures (galaxies, amas de galaxies et autres superstructures). En 2018, avec Giovanni Manfredi, de l'université de Strasbourg, et ses collègues, j'ai étudié la formation des grandes structures dans le contexte de l'univers de Dirac-Milne. Nous voulions voir si les simulations numériques reproduisaient correctement la distribution statistique observée. Nous avons développé une simulation prenant en compte notamment des effets non linéaires, qui apparaissent dans les régions où la densité devient forte par rapport à la densité moyenne.

Ces simulations constituent un test important, car l'univers de Dirac-Milne ne comporte aucun paramètre libre. La formation des

structures y démarre beaucoup plus tôt que dans le modèle cosmologique standard: les premiers objets massifs se constituent quelques dizaines de millions d'années seulement après le Big Bang. La structuration se poursuit par effondrements successifs, en partant de nuages de gaz qui ont typiquement une masse de quelques masses solaires. Résultat: notre simulation est en bon accord avec les observations des grands relevés récents comme *SDSS* (*Sloane Digital Sky Survey*).

LE DÉFI DU FOND DIFFUS

L'un des grands succès de la cosmologie de ces dernières décennies est l'observation du fond diffus cosmologique. Ce rayonnement a été émis environ 380 000 ans après le Big Bang. À cette époque, la température est devenue assez faible pour que les particules électriquement chargées (électrons et noyaux atomiques) du plasma cosmique se combinent pour former des atomes neutres. La lumière, qui était jusque-là piégée dans le plasma par des interactions multiples, a commencé à se propager librement. La prédiction de la température observée aujourd'hui pour les vestiges de ce rayonnement a été l'un des arguments qui a permis au modèle standard de s'imposer.

Une autre prédiction concernant le fond diffus cosmologique était l'existence de fluctuations de l'ordre de 10^{-5} kelvin dans ce rayonnement. Cela a été confirmé en 1992 par le satellite *Cobe*, puis par les satellites *WMAP* et *Planck*. La mesure toujours plus précise de ces fluctuations a permis d'établir leur distribution spatiale et statistique (nommée spectre d'anisotropies du fond diffus cosmologique). Cette

analyse est une mine d'informations sur les conditions de l'Univers primordial, mais aussi sur celles qui ont prévalu tout au long de la propagation du rayonnement à travers le cosmos. Un modèle cosmologique se doit de reproduire correctement ce spectre, un test souvent fatal pour les modèles cosmologiques concurrents du modèle standard.

Dans le cas du modèle de Dirac-Milne, l'annihilation matière-antimatière dans le plasma primordial a provoqué des ondes acoustiques dont l'échelle spatiale est d'environ un degré, ce qui est justement l'échelle angulaire du pic principal du spectre d'anisotropies du fond diffus cosmologique. Cependant, nous sommes encore loin de pouvoir justifier la hauteur relative des pics suivants dans ce modèle. C'est probablement l'un des défis les plus importants du modèle de Dirac-Milne. Si nous parvenons à reproduire ces pics, il est certain que la communauté des cosmologistes s'intéressera de près à ce modèle.

Le chemin est encore long pour passer tous les tests cosmologiques, mais le modèle de Dirac-Milne offre déjà des pistes de réflexion intéressantes et encourageantes. Il est séduisant d'avoir un modèle qui permettrait de se dispenser de matière noire, d'énergie noire et de l'inflation, trois hypothèses essentielles au modèle standard, mais qui posent de nouvelles questions sans réponse. Un autre intérêt du modèle de Dirac-Milne est de pouvoir être testé dans des expériences de physique des particules.

UN MODÈLE EN TEST AU CERN

En particulier, la mesure d'un comportement anormal des antiparticules dans le champ gravitationnel de la Terre serait un indice fort. Dès la fin des années 1960, Fred Witteborn et William Fairbank, de l'université Stanford, se sont intéressés à la mesure de la masse gravitationnelle de l'électron, dans le but de réaliser ensuite la même mesure pour le positron, son antiparticule. Mais du fait de la très faible masse de l'électron, leur mesure était très perturbée par le bruit électromagnétique ambiant, occultant l'effet de la gravitation.

Après cette première tentative, Michael Holzschneider et ses collègues, au Cern, ont conçu l'expérience PS-200 pour réaliser une mesure similaire sur des antiprotons, bien plus lourds que les positrons. Mais malgré cela, à partir du milieu des années 1990, il était devenu clair que le bruit électromagnétique rendait très difficiles, pour ne pas dire impossibles, les expériences de mesure d'effets gravitationnels sur des particules chargées. C'est donc sur des atomes d'antihydrogène (électriquement neutre) que les expériences AEGIS, Gbar et ALPHA-g tentent aujourd'hui au Cern de mesurer l'effet du champ gravitationnel sur l'antimatière.

Ces expériences sont installées auprès d'un nouvel anneau de décélération du Cern, *Elena* (pour *Extremely low energy antiproton ring*, anneau d'antiprotons à extrêmement basse énergie) où des antiprotons (d'abord produits lors de collisions à haute énergie) sont ralentis pour atteindre des énergies de seulement 0,1 mégaélectronvolt. Il est alors possible de

Dans l'expérience Gbar, les antiprotons sont refroidis à quelques dizaines de microkelvins

les combiner avec des positrons (produits par un accélérateur linéaire qui bombarde d'électrons un bloc de tungstène) pour produire des atomes d'antihydrogène.

Notons que tout au long de leur vie, les anti-atomes produits doivent être isolés de tout contact avec la matière grâce à des pièges électromagnétiques, faute de quoi ils s'annihilent presque aussitôt. Dans l'expérience Gbar, les antiprotons sont d'abord dotés de deux positrons. Ainsi chargés, ces ions restent faciles à manipuler et à piéger dans un champ électromagnétique. Ils sont alors refroidis à une température de quelques dizaines de microkelvins, ce qui correspond à une vitesse de l'ordre de un mètre par seconde. Ensuite, grâce à un laser, on leur arrache un des deux positrons, ce qui fournit des atomes d'antihydrogène, électriquement neutres et soumis à la seule force de pesanteur. Lors d'une chute libre d'environ 20 centimètres, les chercheurs étudieront leur mouvement pour voir s'il diffère de celui des atomes de matière. Les trois expériences présentent des stratégies de mesures différentes (voir la figure page 42), ce qui permettra de comparer leurs résultats et de voir s'ils sont cohérents.

Depuis novembre 2018, les installations du Cern ont été fermées pour une période de 2,5 ans pour mettre à jour le LHC et y augmenter la fréquence des collisions et pour améliorer toutes les expériences. Il n'y aura donc pas de production d'antiprotons au cours de cette période. Mais dès 2021, les équipes de AEGIS, Gbar et ALPHA-g seront prêtes pour voir si oui ou non les atomes d'antimatière « tombent vers le haut ». ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Chardin, **L'insoutenable gravité de l'univers**, Le Pommier, 2018.

G. Manfredi et al., **Cosmological structure formation with negative mass**, *Phys. Rev. D.*, vol. 98, 023514, 2018.

P. Indelicato et al., **The GBAR project, or how does antimatter fall?**, *Hyperfine Interactions*, vol. 228, n° 1-3, pp. 141-150, 2014.

A. Benoît-Lévy et G. Chardin, **Introducing the Dirac-Milne universe**, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 537, A78, 2012.

R. H. Price, **Negative mass can be positively amusing**, *Am. J. Phys.*, vol. 61(3), pp. 216-217, 1993.