

> «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 Benoit-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'exerce sur cette particule pointée 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

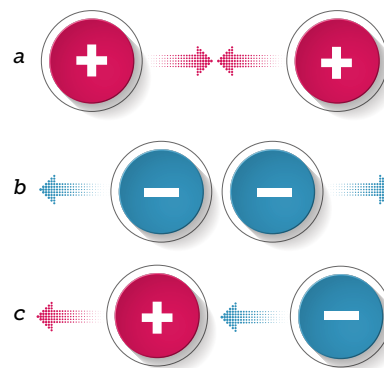
alors une force différente sur les unes et les autres. Si l'un de ces scénarios décrit correctement la nature, une antiparticule aurait un comportement inhabituel: elle tomberait à une vitesse différente d'une particule, voire vers le haut. Nous y reviendrons.

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

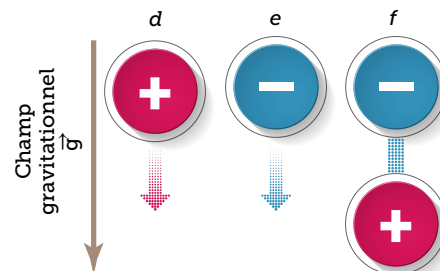
Dans l'hypothèse où les antiparticules ont une masse négative, leur comportement serait loin d'être intuitif. D'après les équations de la relativité générale, deux antiparticules se repousseraient tandis qu'une particule et une antiparticule se poursuivraient. Dans un champ gravitationnel, une particule 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).