

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

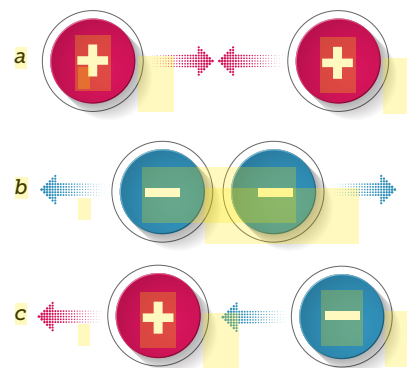
alors une force différente sur les unes et les autres. Si l'un de ces scénarios décrit correctement la nature, une antiparticule aurait un comportement inhabituel: elle tomberait à une vitesse différente d'une particule, voire vers le haut. Nous y reviendrons.

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

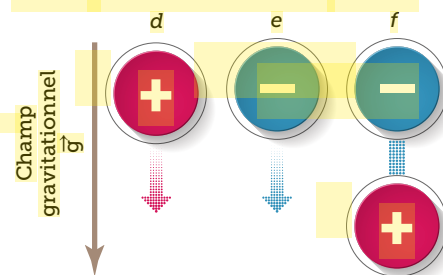
Dans l'hypothèse où les antiparticules ont une masse négative, leur comportement serait loin d'être intuitif. D'après les équations de la relativité générale, deux antiparticules se repousseraient tandis qu'une particule et une antiparticule se poursuivraient. Dans un champ gravitationnel, une particule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