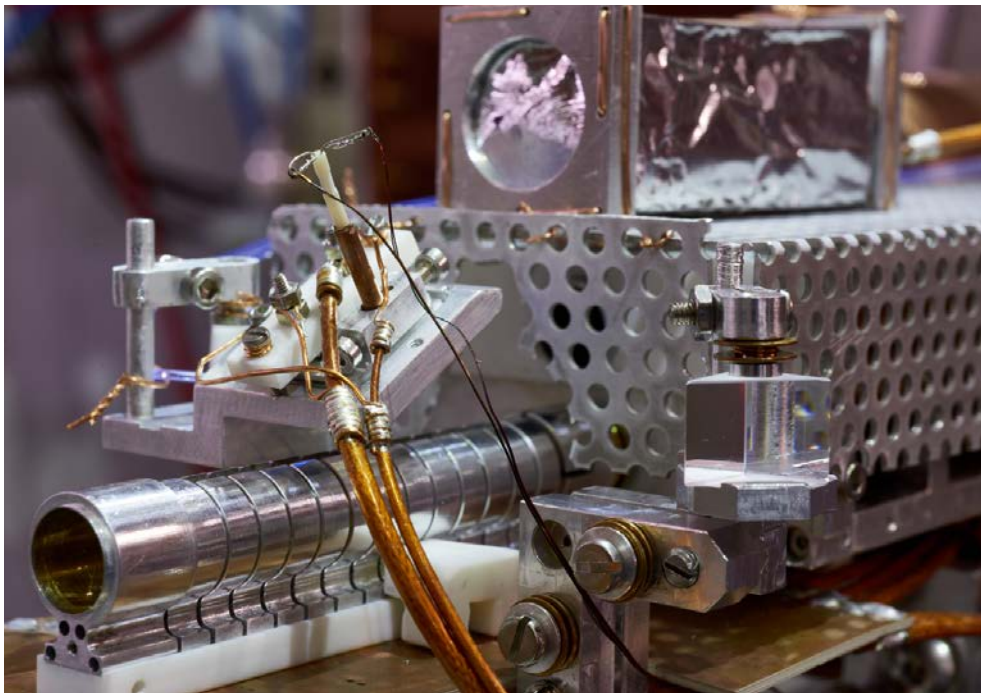




L'expérience AEGIS, au Cern, est conçue pour mesurer l'influence du champ gravitationnel sur des atomes d'antihydrogène. Le tube (à gauche) est un piège magnétique pour des antiprotons qui sont ensuite associés à des positrons arrivant par le haut. Les physiciens produisent alors un faisceau horizontal 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 Holzschteier 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 mégaelectronvolt. 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.