

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 ?

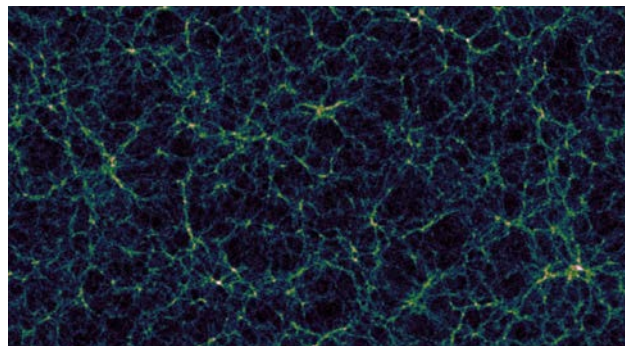
Dès les années 1970, Roland Omnès, de l'université Paris-Sud, et ses collègues s'étaient intéressés à des univers symétriques matière-antimatière. La motivation était alors d'expliquer la densité de matière ordinaire (baryonique) dans l'Univers, et pourquoi nous ne voyons que de la matière et pas d'antimatière.

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.

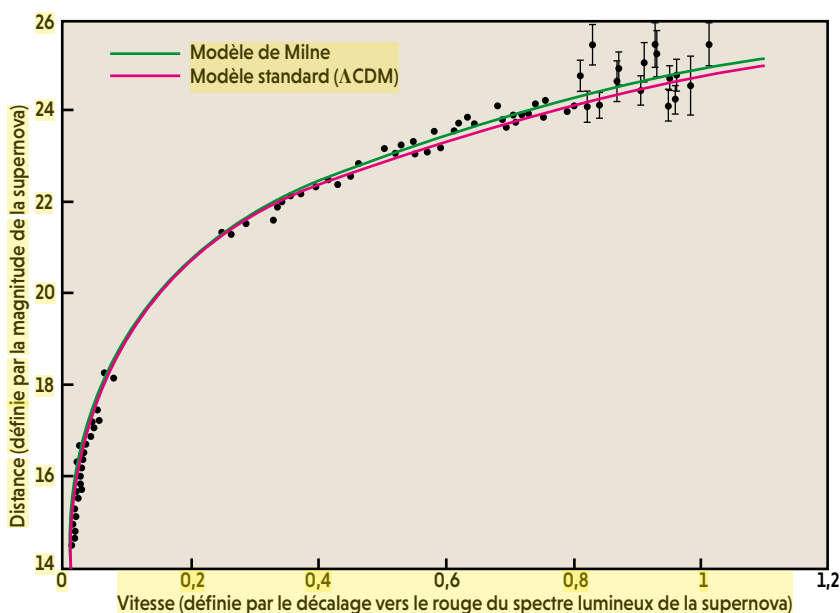
Celle-ci n'est pas tout: elle représente près de 25% du contenu de l'Univers, et s'y ajoutent 5% de matière ordinaire et environ 70% d'énergie noire (responsable de l'expansion accélérée de l'Univers). La nature de cette dernière reste à éclaircir et il en est de même de l'inflation, une phase d'expansion 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