

> distributions de matière un danger mortel pour l'hypothèse de la matière noire. Mais dans les galaxies à faible brillance de surface, il y a très peu d'étoiles pour obtenir une rétroaction efficace. Et c'est dans ces galaxies que les cœurs sont les plus étendus.

Le vrai problème est la force de cette corrélation, comme si les processus de rétroaction devaient « connaître » avec précision l'étendue de la galaxie pour ajuster leur intensité. Et ça, on ne sait pas l'expliquer.

Le bilan des wimps est donc mitigé. Ils sont parfaits pour la cosmologie, mais posent de nombreux problèmes à l'échelle galactique...

Tout à fait. Et c'est pour cette raison qu'à l'échelle des galaxies, certains chercheurs, dont moi-même, continuent d'explorer une piste totalement différente, qui consiste à modifier les lois de la gravitation. En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne – on parle de théorie Mond, pour *Modified newtonian dynamics* – pour les plus petites accélérations, bien en dessous de ce qu'on peut mesurer en laboratoire. On a alors deux régimes, le régime normal puis, lorsque l'accélération passe sous un certain seuil (estimé à environ 10^{-10} mètre par seconde au carré), la relation qui relie l'accélération à la force gravitationnelle est modifiée. Ce régime mondien se manifeste sur les parties externes des galaxies comme la nôtre, mais dès le centre des galaxies à faible brillance de surface.

Par cette approche, on reproduit très bien le profil de vitesse au sein des galaxies. Et il n'y a plus de problème de corrélation entre la distribution de la matière ordinaire et le cœur de matière noire, puisqu'il n'y a plus de matière noire.

Comment se comportent ces modèles à plus grande échelle ?

Si on applique la théorie Mond dans les amas de galaxies, le résultat n'est pas aussi satisfaisant. On trouve qu'il manque encore de la masse baryonique pour coller aux observations. Pour rappel, avec une dynamique newtonienne classique, le facteur de masse manquante est d'environ 5, la matière noire représentant cette masse manquante. Dans le cadre de Mond, il reste un facteur 2 environ. Il y a donc une partie de la matière des amas qui nous échappe. En outre, ce facteur 2 se manifeste principalement dans la partie centrale de l'amas. Mordehai Milgrom a proposé qu'il pourrait s'agir de nuages très froids d'hydrogène moléculaire, qui sont très difficiles à détecter.

Mais cette grande quantité d'hydrogène n'entre-t-elle pas en conflit avec les contraintes cosmologiques sur les baryons ?

Eh bien non. En réalité, sur la quantité de matière ordinaire prévue par le modèle

cosmologique (notamment la nucléosynthèse primordiale), il reste 30% de baryons que nous n'avons pas détectés. Dans le scénario standard, on suppose qu'ils se cachent dans le milieu intergalactique. Il y aurait donc largement assez de matière pour compenser la dynamique des amas dans le cadre de la théorie Mond.

L'hypothèse de Mordehai Milgrom reste malgré tout assez alambiquée. Mais il existe d'autres possibilités, comme des neutrinos plus massifs que ceux du modèle standard. Ce scénario ne reproduit pas correctement le spectre du fond diffus cosmologique, même en prenant des versions relativistes de Mond telles que le modèle TeVeS proposé en 2004 par Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem.

Avec Gary Angus, j'ai aussi examiné des scénarios à neutrinos dits stériles, c'est-à-dire qui n'interagissent par aucune des forces fondamentales, ayant une masse de 10 à 100 électronvolts. Nous obtenons la bonne dynamique dans les amas de galaxies mais, quand nous avons regardé des simulations de formation des structures dans ce scénario, nous avons remarqué qu'il se formait trop d'amas très massifs. Dans la théorie Mond, l'efficacité de la formation des amas est déjà



Les observations tendent aussi à exclure le scénario de la gravitation modifiée



grande; en ajoutant les neutrinos stériles, on augmente encore cette efficacité.

L'observation récente de la coalescence de deux étoiles à neutrons a aussi porté un coup dur à l'approche de gravitation modifiée...

Effectivement. Lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, il y a émission d'ondes gravitationnelles et d'ondes électromagnétiques. En août 2017, les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté les ondes gravitationnelles d'un tel événement et le satellite *Fermi* a observé un rayonnement gamma juste 1,7 seconde plus tard, provenant de la même source. Dans le cadre de la relativité générale, les deux types d'ondes se propagent à la même vitesse. On peut donc supposer que la lumière a été émise un peu après.



La galaxie naine IC 2574 est dite à faible brillance de surface. Elle contient beaucoup de gaz et très peu d'étoiles. Pour décrire correctement la dynamique de telles galaxies, il faut supposer qu'elles ont un cœur de densité de matière noire très étendu, ce qui est en désaccord avec les simulations de formation de galaxies.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: en raison de la présence de matière sur le trajet, les ondes gravitationnelles et lumineuses se propagent plus lentement. En relativité générale, l'effet de retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais il peut différer dans des théories de gravitation modifiée.

C'est le cas avec le modèle relativiste TeVeS. Sibel Boran, de l'université technique d'Istanbul, et ses collègues ont montré que, pour la coalescence d'étoiles à neutrons détectée en août 2017, le décalage entre l'arrivée des ondes gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours... Comme il n'était que de 1,7 seconde, on peut dire aujourd'hui que TeVeS est exclu et il en va de même pour de nombreux autres modèles relativistes. Il existe d'autres modèles de gravitation modifiée qui n'ont pas le problème de l'effet Shapiro, mais ils souffrent d'autres difficultés.

Quelles sont donc les perspectives pour expliquer la masse manquante ?

Quand on fait le bilan, on voit que la théorie Mond fonctionne bien à l'échelle des galaxies, et que les wimps conviennent à l'échelle des amas et sont compatibles avec les contraintes cosmologiques. On peut donc envisager des solutions hybrides, comme celles de la matière noire dipolaire de Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, ou de la matière noire superfluide de Justin Khoury, de l'université de Pennsylvanie.

En quoi consiste la matière noire superfluide ?

Cette matière noire serait composée de particules se comportant comme des wimps dans le plasma primordial et dans les amas. C'est dans le cœur des galaxies que le modèle devient original. Dans ces régions centrales, la densité de matière noire est assez élevée et la température relativement basse. Les particules de matière noire subiraient une transition de phase et se

comporteraient comme un condensat de Bose-Einstein (un état de la matière obtenu en laboratoire, où les atomes se retrouvent tous dans le même état quantique).

Justin Khoury a alors supposé que la matière baryonique se comporte comme des impuretés dans le condensat. Et ces impuretés interagissent avec le condensat de la matière noire par des échanges de phonons (des vibrations). On obtient ainsi le couplage qui reproduit précisément les effets de Mond. En dehors de la partie centrale de la galaxie, la densité de matière noire est trop faible pour produire un condensat. On a donc une zone de transition entre les deux régimes, à environ 60-100 kiloparsecs du centre galactique. Ce scénario pourrait donc prévoir des choses intéressantes sur la dynamique des traînes de marée des galaxies satellites de la Voie lactée qui traverseraient cette zone de transition.

La matière noire superfluide est une façon d'obtenir la bonne forme du potentiel galactique, mais peut-on l'obtenir autrement ?

Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la suivante. Pour expliquer la corrélation entre le cœur de matière noire et la distribution de matière ordinaire, il faut un couplage entre ces deux composantes de matière. Nous avons donc supposé que, dans les galaxies, les baryons et la matière noire entrent en collision et échangent de l'énergie. C'est le genre d'interaction que l'on cherche dans les expériences de détection directe de wimps et que l'on ne trouve pas. Pour échapper aux contraintes imposées par ces expériences, il faut supposer que la matière noire est composée de particules très légères (du type axions) ou très lourdes (comme des *quarks nuggets*).

Le modèle que nous avons esquissé indique que les collisions sont très rares dans un plasma dense comme celui de l'Univers primordial. Cette matière noire se comporte donc comme les wimps à l'échelle cosmologique. Et nous commençons seulement à explorer ce que ce modèle peut donner à l'échelle d'une galaxie. C'est un programme de recherche qui prendra encore des années.

Finalement, à quoi pourrait ressembler la matière noire ?

Ce qu'on appelle la matière noire pourrait être très différent de ce que l'on pensait jusqu'à présent. Les observations récentes tendent à exclure les scénarios en vogue, tels les wimps et la gravitation modifiée. Quelque chose de très profond et fondamental nous échappe peut-être. Ce qui est certain, c'est qu'il n'y a pas de solution simple à ce jour. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

B. Famaey et al., **Emergence of the mass discrepancy-acceleration relation from dark matter-baryon interactions**, en ligne, 4 décembre 2017. <https://arxiv.org/abs/1712.01316>

S. Boran et al., **GW170817 falsifies dark matter emulators**, en ligne, 17 octobre 2017. <https://arxiv.org/abs/1710.06168>

B. Dobrescu et D. Lincoln, **Les multiples visages de la matière noire**, *Pour la Science*, n°463, mai 2016.

L. Berezhiani et J. Khoury, **Theory of dark matter superfluidity**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 103510, 2015.