

plus massifs que ceux du modèle standard. Mais 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 simulé la 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 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...

Benoît Famaey : 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.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: de la matière sur le trajet ralentirait les ondes gravitationnelles et lumineuses. 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 ?

Benoît Famaey : 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

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

Benoît Famaey : Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la

En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne

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 cette dernière ?

Benoît Famaey : 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.

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 ?

Benoît Famaey : 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**