

Matière noire

Un dialogue secret avec la matière ordinaire

David Fossé

Au sein des galaxies, là où il y a une forte densité de matière ordinaire, la matière noire est peu présente, et inversement. Une découverte étrange car les deux types de masse, par leur gravité, devraient plutôt s'attirer. Est-ce un argument de plus en faveur de la théorie Mond, qui suppose une modification de la loi de Newton ?

"C'EST sûr, il y a là quelque chose que nous ne comprenons pas !" Avec ses collègues Gianfranco Gentile, Hong Sheng Zhao et Paolo Salucci, l'astrophysicien Benoît Famaey oscille depuis quelques semaines entre enthousiasme et perplexité. En mesurant les quantités de matière noire (**Zoom**) et de matière ordinaire dans un large échantillon de galaxies, allant des naines sphéroïdales aux plus grandes spirales, l'équipe vient de découvrir un étrange phénomène. *"Dans les galaxies, il semble y avoir un effet de vases communicants entre la matière noire et la matière ordinaire"*, explique le jeune chercheur.

Lorsque la matière noire est dense au cœur d'une galaxie, la matière ordinaire y est au contraire très diluée. À l'inverse, les galaxies dont le cœur est très brillant, donc riches en matière ordinaire, sont celles possédant une faible densité centrale de matière noire. *"C'est surprenant car ces deux types de matière ne sont censés interagir que par la gravité, donc s'attirer"*, indique Benoît Famaey. Comment expliquer alors que, loin de se regrouper, l'une chasse l'autre ? Et surtout, comment expliquer que leur distribution relative s'ajuste si précisément ? Car Benoît Famaey et ses collègues ont quantifié le phénomène : tout se passe comme si matière noire et matière ordinaire agissaient de concert pour qu'à une

certaine distance du centre d'une galaxie⁽¹⁾, elles exercent toujours la même attraction gravitationnelle. Et ce, quels que soient le type de la galaxie et son histoire ! Existe-t-il un dialogue secret entre la matière ordinaire et la matière noire ?

Je t'attire, tu m'attires...

Dans le modèle actuel, on ne voit pas très bien comment. Le seul dialogue autorisé entre ces masses est celui de la gravité : "Je t'attire, tu m'attires..." Et pourtant, voilà des années que les astrophysiciens s'accommodent tant

bien que mal de certaines coïncidences troublantes — dites "relations d'échelle" — liant elles aussi l'hypothétique matière noire à la matière visible. En 1977, deux ans seulement après que l'Américaine Vera Rubin eut pointé l'existence d'une "masse manquante" dans la galaxie d'Andromède (en effet, compte tenu des lois de Kepler,

ses étoiles tournent trop vite pour sa masse lumineuse apparente), Brent Tully et Richard Fisher notent une relation entre la luminosité d'une galaxie spirale et sa vitesse de rotation maximale. Comme celle-ci est déterminée par sa masse totale, incluant la matière noire, leur loi de Tully-Fisher fait un premier pont entre matières visible et invisible !

D'autres relations de ce type ont été mises en évidence depuis⁽²⁾. Mais, tout comme celle que Benoît Famaey et ses collègues viennent de découvrir, leur signification profonde nous échappe encore. Est-ce parce que le modèle de la matière noire est incomplet ? Voire... faux ?

"Dans les simulations cosmologiques, la formation des galaxies à partir de la matière noire conduit inévitablement à de petites galaxies, où la matière noire est très dense vers le centre", reconnaît Benoît Famaey. Dans le ciel, pour une masse donnée, l'Univers fabrique systématiquement des galaxies dix fois plus vastes que les simulations. Et des galaxies dont la densité de matière noire ne varie pas, au moins sur une étendue du même ordre que leur disque stellaire ! Cependant, *"ces grandes simulations sont incomplètes car elles sont uniquement faites de matière noire. La matière ordinaire est ajoutée a posteriori"*, rappelle l'astrophysicien. Plutôt que de rejeter en bloc le modèle canonique, il faudrait donc travailler à rendre ces univers virtuels plus réalistes...

Qui sait si, en y ajoutant dès le départ quelques pincées de matière ordinaire, les simulations ne pourraient pas reproduire ce qui se passe dans le ciel, à commencer par le surprenant

> Zoom

Matière noire : 85 % de la matière de l'Univers échappent à nos télescopes. Nous ne détectons que les effets gravitationnels de cette masse dite "manquante" car invisible.



Courtesy B.Famaey

Benoît Famaey est chargé de recherche au CNRS, à l'observatoire de Strasbourg. Avec ses collègues Gianfranco Gentile, Hong Sheng Zhao et Paolo Salucci, il vient de mettre en évidence une curieuse relation entre la matière noire et la matière ordinaire.

+ **C** À écouter sur www.cieletespaceradio.fr

"Matière noire : à l'aube d'une révolution", une série pour mieux comprendre la matière noire et ses enjeux cosmologiques.



R. Jay Gabany/C&E Photos

ajustement mis en évidence par Gianfranco Gentile, Benoît Famaey et leurs collègues ? Ce type de simulation commence à être à la portée des supercalculateurs. En 2008, Sergey Mashchenko, James Wadsley et Hugh Couchman parviennent à intégrer l'effet des populations stellaires dans leur simulation. *“Les étoiles massives injectent de grandes quantités d'énergie dans leur environnement,*

via des vents stellaires et des explosions de supernovae”, soulignent les chercheurs ⁽³⁾. Ce faisant, elles favorisent des mouvements aléatoires du gaz interstellaire à grande échelle (sur plusieurs centaines d'années-lumière). Or, par simple effet de la gravitation, ce brassage perturbe le halo de matière noire ! C'est ainsi que l'existence même des étoiles massives conduit à diluer les cœurs

Sur l'image d'une galaxie (ici Messier 63), l'essentiel de la masse est invisible. En réalité, un gigantesque halo de matière noire enveloppe les disques stellaires. Ceux-ci ne sont que la partie émergée d'un gigantesque iceberg.

sombres des galaxies — en accord, cette fois, avec les observations. En réalité, le mécanisme ne fonctionne que pour les galaxies naines, moins massives et donc aussi plus faciles à perturber. Un autre phénomène de ce genre, provoqué par le comportement de la matière ordinaire, n'expliquerait-il pas la relation découverte par Gentile et consorts ? Selon Stacy McGaugh, de l'université du Maryland, c'est *“un vœu pieux”* : *“La plupart des astrophysiciens pensent que le lien entre la matière noire et la matière visible est dû aux mécanismes de formation des galaxies. Mais, pour moi, c'est l'hypothèse la moins probable !”* Pourquoi ? Tout simplement parce que *“ce que l'on observe, c'est ce que prédit Mond ⁽⁴⁾”,* répond l'astrophysicien. Proposée en 1983 par l'Israélien Moti Milgrom, cette théorie explique fort bien la vitesse de rotation des galaxies spirales en se passant de matière noire. L'astuce consiste à poser que, ●●●



Nasa



Nasa/ESA/ACS

Dans l'Univers local, aucune galaxie ne contient davantage de matière noire, en proportion, que NGC 3741 (ci-dessus). Pourtant, le cœur du halo sombre dans lequel elle baigne n'est pas aussi concentré que le prévoient les modèles. Idem pour la galaxie naine Fornax (ci-contre).

Courtesy M. Milgrom



Pour Moti Milgrom (à gauche), la matière noire n'existe pas. Et pour cause : sa théorie de la gravitation modifiée, *Mond*, explique parfaitement les relations d'échelle observée dans les galaxies. Stacy McGaugh (à droite) est aussi de cet avis.

●●● pour une accélération gravitationnelle inférieure à $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$ (valeur très faible comparée aux $9,81 \text{ m.s}^{-2}$ que nous subissons sur Terre), la loi de la gravitation est modifiée. En particulier, elle ne décroît plus qu'en proportion de la distance, et non du carré de la distance comme dans la loi de Newton.

Mond éclaire la matière noire

Bien sûr, la majorité des astrophysiciens est opposée à ce bricolage théorique. Et pourtant, "pour prédire comment varie le champ de gravitation d'une galaxie spirale, *Mond* est une recette simple, mais d'une précision diabolique", reconnaît Benoît Famaey. Au point qu'elle donne la valeur de l'attraction gravitationnelle universelle qu'il a mise en évidence avec Gianfranco Gentile et ses collègues...

Alors, évidemment, Moti Milgrom boit du petit lait. "Gianfranco et moi, nous savions que nous étions en train d'écrire un article sur le même sujet. Nous avons donc décidé de le publier en même temps, mais sans connaître ce qu'écrirait l'autre. Et nos deux articles sont complémentaires !" s'enthousiasme l'astrophysicien. Tandis que le travail observationnel établit une étroite corrélation entre matière noire et matière ordinaire, l'approche théorique de Milgrom, elle, explique son origine. Si la matière noire obéit si sagement à la matière visible, c'est qu'elle n'en est qu'un fantôme. "Dans le paradigme de la matière noire, une relation de ce genre (ou comme celle de Tully-Fisher) est inattendue, note Moti Milgrom. Car les galaxies évoluent par fusion, effondrement, cannibalisme et autres mécanismes dans lesquels matière noire et matière ordinaire ne sont pas censées être affectées de la même manière." Plutôt que de chercher dans



Courtesy S. McGaugh

la physique galactique une façon de reproduire exactement ce que prédit *Mond*, tout en sauvegardant l'hypothèse de la matière noire, pourquoi ne pas simplement accepter *Mond*... et jeter la matière noire aux orties ? Pour Stacy McGaugh, il ne s'agit que d'un problème épistémologique : accepter l'existence de la matière noire, qui n'est qu'un ingrédient supplémentaire dans la cuisine cosmique, c'est faire l'hypothèse "la plus conservatrice et la plus confortable". Donc celle vers laquelle ses collègues astronomes se tournent le plus facilement. Et pourtant, après avoir passé lui-même beaucoup de temps sur les simulations de formation de galaxies (incluant de la matière noire), il est persuadé qu'elles n'arriveront jamais à reproduire les observations. "Alors que lorsqu'on les envisage en acceptant *Mond*, tout devient beaucoup plus simple."

Tout ? Pas vraiment. "En cosmologie, certains problèmes se compliquent", reconnaît le cher-

ESO Visual & E-Prints

Le buzz du wimp

↘ La meilleure manière de s'assurer que la matière noire existe ? Ce serait évidemment de la détecter en laboratoire ! Diverses expériences sont ainsi consacrées à la traque des wimps⁽¹⁾, favorites pour le rôle. Mais comme justement ces hypothétiques particules interagissent très peu avec la matière ordinaire, la tâche est ingrate. Mi-décembre, la rumeur

Fermilab



d'une détection par l'expérience américaine CDMS a fait frissonner la blogosphère scientifique. Tenait-on enfin le wimp ? Le buzz est retombé lorsque l'équipe a finalement exposé ses résultats : la détection de deux possibles wimps (sur une année) pouvait tout aussi bien s'interpréter comme un "bruit de fond"... Autrement dit, la traque continue.

(1) Acronyme de Weakly Interacting Massive Particle, soit "particule massive interagissant faiblement".

Pour traquer les wimps, ces hypothétiques particules de matière noire, les physiciens ont conçu des détecteurs hypersensibles. Ils les placent dans des containers refroidis à $0,02 \text{ °C}$ au-dessus du zéro absolu, et à l'abri des particules et des vibrations.



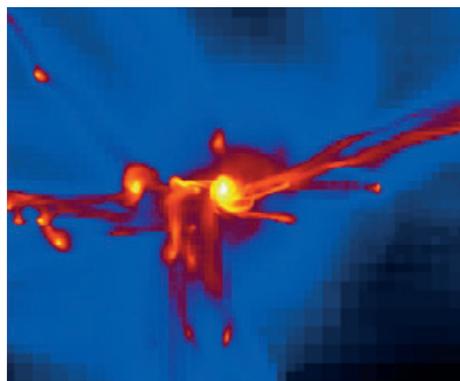
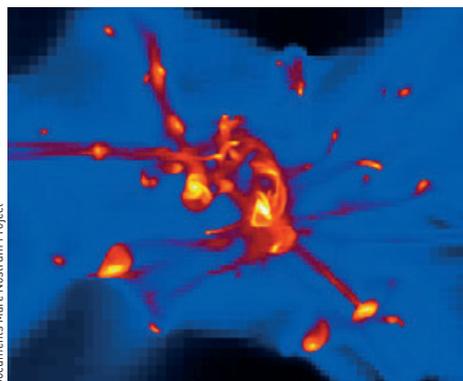
La plupart de la matière de l'Univers est-elle vraiment invisible ? Ou faut-il admettre que la loi de la gravitation telle que nous la connaissons n'est plus applicable à certaines échelles ? En effet, la recette de Mond fonctionne parfaitement dans les galaxies.

par Mond ne colle pas avec la carte du fond diffus cosmologique. Il ne prédit pas la bonne distribution des "grumeaux" de densité en fonction de leur taille. Enfin, pour beaucoup de théoriciens, modifier la loi de la gravitation n'a aucune justification profonde. Même dans sa version de 2004, relativiste (c'est-à-dire tenant compte du fait que la gravitation est mieux décrite par la théorie d'Einstein que par celle de Newton), il ne s'agirait que de "bricolage" ⁽⁵⁾.

Face à ces difficultés, pas étonnant que certains astrophysiciens cherchent une troisième voie... La recette Mond est efficace dans les galaxies, où elle réussit même à prévoir l'accélération universelle découverte par Gentile, Famaey, Zhao et Salucci ? Certes, mais le coût conceptuel d'une gravité modifiée est beaucoup trop lourd. La matière noire colle parfaitement aux observations en cosmologie ? Oui, mais au niveau des galaxies, elle est incapable de prédire les relations d'échelle qui s'accumulent. Alors, sans toucher à la gravitation, pourquoi ne pas modifier la matière noire elle-même ? Depuis deux ans, le Français Luc Blanchet creuse cette piste à l'Institut d'astrophysique de Paris. Son approche, fondée sur une analogie avec l'électrostatique et ses charges positives et négatives, reproduit effectivement la recette de Mond dans les galaxies. Elle s'accorde aussi avec les données de la cosmologie. En revanche, contrairement au modèle canonique de la matière noire, elle n'a aucune connexion avec la physique des particules (voir encadré). Grave inconvénient... Donc, décidément, la découverte de Gianfranco Gentile et de ses collègues enfonce le clou : il y a vraiment quelque chose que l'on ne comprend pas ! ●

cheur. Lui y voit la preuve "qu'on en sait beaucoup moins sur la cosmologie que l'on veut bien le croire". D'autres, plus nombreux, estiment que ces difficultés signent tout simplement l'échec de Mond, au profit de la matière noire. Par exemple, "la gravité modifiée ne fonctionne pas dans les amas de galaxies", souligne

Benoît Famaey. Car, dans les amas, contrairement aux galaxies (qui ont besoin d'un halo), c'est surtout au centre qu'il manque de la masse ! C'est-à-dire là où l'accélération est assez forte, bien supérieure à la fameuse valeur de $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$ en deçà de laquelle agit Mond. Par ailleurs, un Univers gouverné



(1) Plus précisément au rayon de cœur du halo de matière noire, défini dans un certain modèle (dit de Burkert), par la distance à laquelle le profil de densité est divisé par quatre. Pour la Voie lactée, ce rayon vaut 30000 années-lumière.

(2) Par exemple la loi de Faber-Jackson, pour les galaxies elliptiques, qui ne tournent pas, mais dont on peut mesurer l'agitation stellaire.

(3) Dans la revue Science 319, 174 (2008).

(4) Mond : Modified Newtonian Dynamics.

(5) Voir à ce propos l'interview de Thibault Damour, C&E n°458, p. 26 (juillet 2008).

Les grandes simulations de cosmologie (comme ici, le projet Mare Nostrum), à base de matière noire, parviennent à expliquer l'origine des galaxies. En revanche, ces modélisations ne prédisent ni les bonnes tailles, ni les vitesses de rotation.