

MOND avec ou sans matière noire *

Luc BLANCHET

Institut d'Astrophysique de Paris, GRECO, 98^{bis} boulevard Arago, 75014 Paris, France

Françoise COMBES

Observatoire de Paris, LERMA, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Dans le modèle cosmologique, l'Univers est constitué principalement de matière noire et d'énergie noire dont nous ne connaissons pas la nature, et pour lesquelles il n'y a pas d'explication dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Comment incorporer matière et énergie noires dans l'ensemble des lois fondamentales? Toutes les observations peuvent aussi bien être expliquées soit par l'addition de composants de l'Univers inconnus, avec la relativité générale comme théorie de la gravitation, soit par une modification fondamentale de cette théorie. Ne serait-il pas plus simple de la modifier? C'est le cas de l'hypothèse MOND (pour MODified Newtonian Dynamics) proposée par Milgrom en 1983, qui est pleine de succès pour décrire la cinématique et la dynamique des galaxies. Il serait cependant possible d'obtenir le même succès grâce à une nouvelle forme de matière, la matière noire dipolaire, tout en gardant la relativité générale comme loi de la gravitation.

Durant la dernière décennie, la cosmologie observationnelle a fait d'énormes progrès : à l'aube de l'an 2000, nous ne connaissions ni l'âge de l'univers, ni sa géométrie, ni son contenu avec la moindre précision. La constante de Hubble, qui mesure l'expansion de l'Univers à partir du Big-Bang, était encore incertaine, pouvant varier d'un facteur 2. Aujourd'hui, tous les scientifiques reconnaissent que la cosmologie est devenue une science de précision. Grâce à l'étude détaillée du fond de rayonnement cosmologique, vestige du Big-Bang, et de ses irrégularités, grâce à l'observation précise de supernovæ comme indicateurs de distance, et grâce à l'observation de la déviation des rayons lumineux par la matière, nous avons pu déterminer au moins à 10% près tous les paramètres de l'Univers, âge, courbure, et composition, cf. la Figure 1. Une conclusion fascinante est que la matière ordinaire ne compte que 4% dans ce recensement, et même une grande partie de la matière ordinaire sous forme d'atomes qui ne rayonnent pas n'a pas été identifiée.

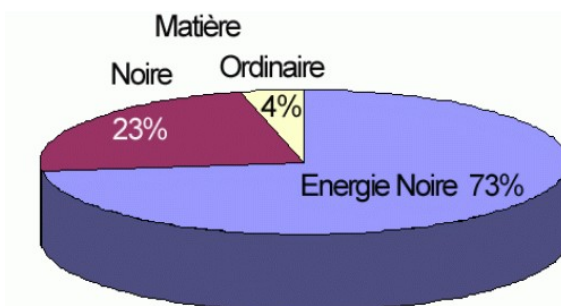


FIG. 1: Contenu de l'Univers à grande échelle.

DEUX NUAGES SOMBRES À L'HORIZON

Les avancées considérables de ces dernières années mettent donc en évidence une grande tension dans notre vision de l'Univers : celui-ci est constitué essentiellement de matière noire et d'énergie noire dont nous ne connaissons pas la nature, et pour lesquelles il n'y a pas d'explication dans le cadre actuel de la physique des particules. La matière noire, de nature exotique, pourrait être formée de particules prédites par certaines extensions du modèle standard comme

* Version plus détaillée d'un article paru dans : *La Recherche*, no. 435, p. 44 (novembre 2009).

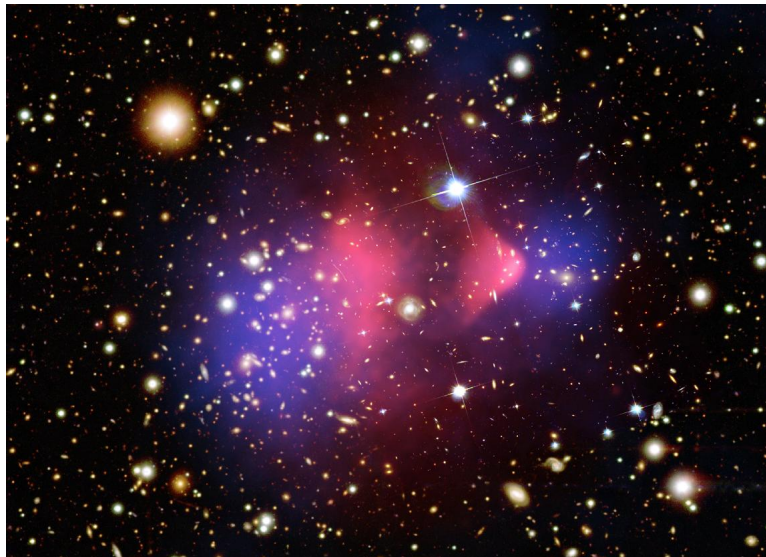


FIG. 2: L'amas de galaxies dit "du boulet". Il s'agit en fait de deux amas de galaxies en collision. À la photo optique du système (qui montre les deux amas de galaxies comme une concentration de tâches blanches) est superposée en rouge l'émission X du gaz chaud, et en bleu la masse totale projetée. La distribution de masse projetée sur le ciel correspond à la masse des amas reconstruite par lentilles gravitationnelles. Le plus petit amas de galaxies à droite semble avoir traversé comme un boulet le gros amas à gauche. La pointe de couleur rouge à droite montre clairement une onde de choc en forme de cône, qui permet de mesurer la vitesse supersonique de cette collision (ici 4700 km/s, ou Mach 3). Tous les composants de l'amas ne réagissent pas de la même façon dans la collision : les galaxies et la matière noire peuvent s'interpénétrer sans presque se voir. En revanche, le gaz chaud est freiné, si bien que les deux composants gazeux des deux amas sont plus rapprochés que les deux masses totales. Le comportement différent dans la collision du gaz chaud, des galaxies et de la matière noire permet de les séparer, et de tester les modèles. D'après Clowe et al. (2006).

dans les théories supersymétriques. Mais ces particules n'ont toujours pas été mises en évidence de manière directe, malgré de nombreuses expériences ayant tenté de les détecter (peut-être que le LHC va bientôt nous en dire plus). Quant à l'énergie noire, c'est un nouveau composant mystérieux qui accélère l'expansion de l'Univers, et qui pourrait être la fameuse constante cosmologique Λ qu'Einstein avait introduite dans les équations de la relativité générale, pour des raisons maintenant disparues. Le problème est que toutes les tentatives pour interpréter Λ en termes de physique fondamentale ont pour l'instant échoué.

Matière noire et énergie noire sont comme deux nuages qui se profilent à l'horizon du ciel radieux de la physique. Sommes-nous à l'aube d'une révolution fondamentale ? Plusieurs satellites, comme Euclid en Europe, ou JDEM aux États-Unis, vont mesurer plus précisément les caractéristiques des composantes noires, mais on peut argumenter que le problème est plutôt d'ordre théorique : comment incorporer matière et énergie noires dans un ensemble de lois fondamentales ?

Toutes les observations peuvent aussi bien être expliquées soit par l'addition de composants inconnus, en restant dans le cadre de la relativité générale comme théorie de la gravitation, soit par une modification fondamentale de cette théorie. Ne serait-ce pas plus simple de la modifier ? Au XIX^{ème} siècle l'astronome français Le Verrier avait découvert une rotation anormale (dite précession) de l'orbite de la planète Mercure. On pouvait l'expliquer soit par de la "matière noire", en l'occurrence une nouvelle planète intérieure à l'orbite de Mercure (dénommée Vulcain par Le Verrier), soit par une modification des lois de Newton. C'est cette deuxième option qui s'est finalement avérée correcte, lorsque la gravitation newtonienne a été remplacée par celle d'Einstein, et que l'excès de précession de Mercure a été expliqué par un effet relativiste.

PROBLÈME DE LA MASSE MANQUANTE

La matière noire est un composant connu depuis les années 1930, quand l'astronome suisse F. Zwicky avait besoin de 100 fois plus de masse que la matière visible, pour expliquer la dynamique des amas de galaxies. Depuis, nous avons découvert le gaz très chaud, émetteur de rayons X, qui représente l'essentiel de la matière visible dans les amas, mais la matière noire est encore dominante, et égale à environ 6 fois la matière visible dans ces environnements.

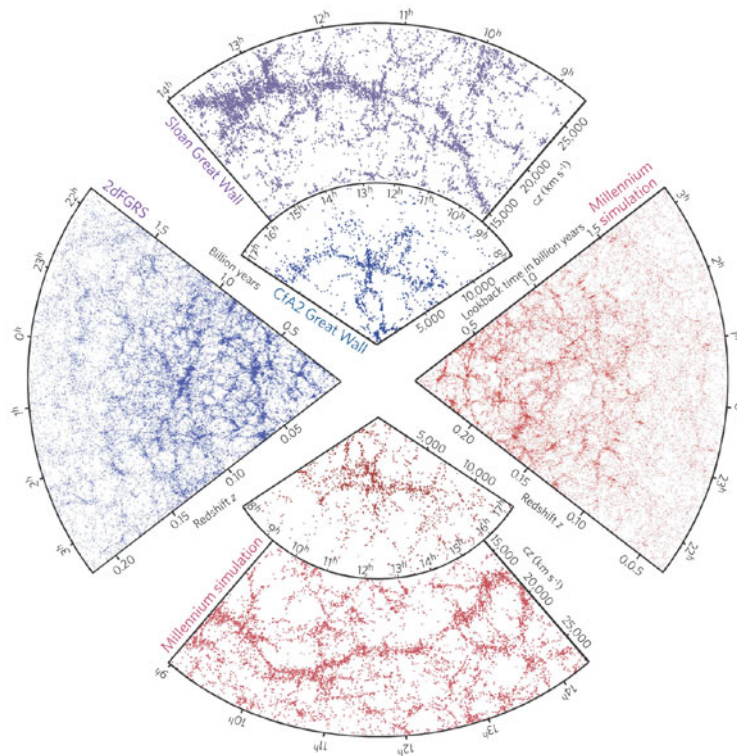


FIG. 3: Comparaison entre les cartographies de galaxies à grande échelle (en bleu), et les simulations numériques (en rouge). En haut et à gauche sont montrées des tranches d’univers, où chaque point est une galaxie, dont la distance est obtenue par le décalage vers le rouge, mesuré sur son spectre (catalogues SDSS et 2dF). En bas et à droite, présentées de la même façon, les prédictions des simulations de matière noire Millenium. D’après Springel et al. (2006).

Dans les années 1980, les courbes de rotation des galaxies spirales, très bien établies par les observations, ont aussi mis en évidence la matière manquante au niveau des galaxies, et depuis une dizaine d’années, l’outil des lentilles gravitationnelles permet de cartographier la matière noire, au voisinage des grandes structures : les galaxies de fond envoient des rayons lumineux qui sont déviés par la matière sur la ligne de visée avant d’arriver à l’observateur. La déformation des images, due à ces “lentilles”, est mesurée et traitée statistiquement pour reproduire la distribution de matière totale, comme par exemple sur la Figure 2.

La matière noire est aussi corroborée par les pics de fluctuations du fond de rayonnement cosmologique, ou rayonnement de corps noir à 2,7 degrés Kelvin, émis peu de temps après le Big-Bang. La position et la hauteur des pics indiquent la présence de matière noire sous forme d’un fluide de particules froides (“Cold Dark Matter” ou CDM) sans interactions.

Le modèle cosmologique actuel Λ -CDM rencontre beaucoup de succès à grande échelle, comme le montrent les simulations numériques de la formation des grandes structures (cf. Figure 3). Dans ce modèle la matière noire joue un rôle crucial car c’est elle qui entraîne la matière ordinaire dans un effondrement gravitationnel et permet d’expliquer la formation des structures.

PROBLÈMES DE CDM À L’ÉCHELLE DES GALAXIES

Si le modèle CDM est correct il doit pouvoir aussi expliquer les halos observés de matière noire autour des galaxies. Malheureusement, les prédictions des simulations à l’échelle des galaxies posent de nombreux problèmes.

La matière noire CDM se concentre beaucoup trop dans les galaxies, et une spirale comme la Voie Lactée par exemple devrait être dominée par la matière noire, même dans sa partie centrale, ce qui n’est pas observé. D’autre part, les simulations suggèrent un profil de densité de matière noire autour des galaxies où la distribution radiale de matière noire doit monter très vite vers le centre, et y former un pic de densité, alors que les courbes de rotation indiquent plutôt la présence de plateaux de densité constante au centre.

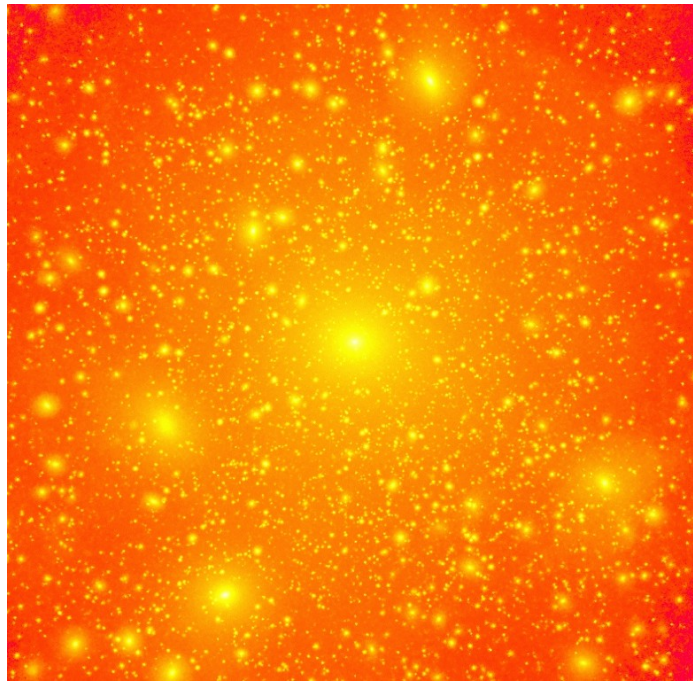


FIG. 4: Simulation de la formation de la Voie Lactée, dans le modèle standard de matière noire CDM : plus d’un millier de satellites devrait orbiter autour du centre, alors que nous en observons une douzaine. D’après Diemand et al. (2007).

La formation de galaxies s’effectue en grande partie par fusions de galaxies plus petites, dans le scénario dit “hiérarchique”. Les fusions entre galaxies sont accélérées par la perte d’énergie orbitale au profit des halos de matière noire. La matière ordinaire spirale très vite vers le centre des halos, en perdant une grande partie de sa rotation. Ainsi, dans le modèle standard, la taille des disques simulés est près de dix fois plus petite par rapport à la taille des galaxies spirales observées. De plus, comme le montre la Figure 4, le scénario prédit un grand nombre de satellites autour d’une galaxie géante typique, comme la Voie Lactée. Ces compagnons ne sont pas observés, et devraient donc avoir perdu toutes leurs étoiles et leur gaz.

Un autre problème, qui semble de plus en plus fondamental, est l’évidence observationnelle de l’existence d’une nouvelle constante “universelle” d’accélération a_0 mesurée à la valeur $a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$. Selon la loi de l’israélien Moti Milgrom, la matière noire ne se manifeste que dans les régions où le champ de gravitation est plus faible que a_0 . Cette loi étrange mais très bien vérifiée est inexplicable dans le cadre CDM.

Plus généralement, on observe une surprenante et mystérieuse régularité dans la distribution de matière noire autour des galaxies, qui se traduit par une sorte de “conspiration” entre la matière noire et la matière visible pour rendre compte des observations. Dans le modèle CDM, il faut ajuster finement la proportion et la distribution de matière noire dans chaque galaxie, alors que l’on s’attendrait à une dispersion plus grande des propriétés des halos de matière noire, à cause du hasard de l’histoire de chaque galaxie et de son environnement.

Ne sommes-nous pas en train de faire une erreur en extrapolant le modèle standard de l’échelle cosmologique à l’échelle galactique ?

LA GRAVITÉ NEWTONIENNE MODIFIÉE (MOND)

Cette “régularité” des halos galactiques s’exprime par une formule purement empirique qui permet d’ajuster avec grande précision les courbes de rotation des galaxies, et de reproduire la célèbre relation des astronomes américains Brent Tully et Richard Fisher, qui relie la vitesse de rotation des galaxies et leur luminosité (celle-ci varie comme la puissance 4^{ème} de la vitesse), et qui est mal comprise dans le modèle CDM.

Dans une région où le champ de gravitation est plus faible que la constante a_0 , tout se passe comme si le champ

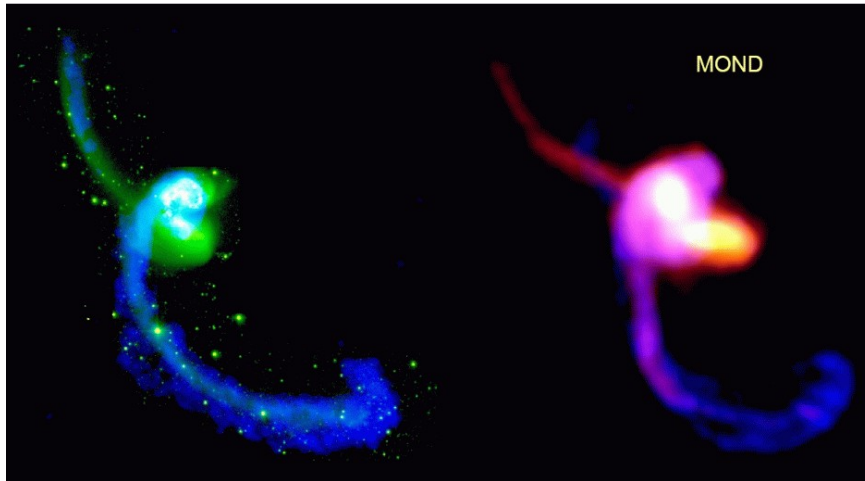


FIG. 5: Comparaison entre l’observation des “Antennes” à gauche, galaxies de masses semblables en interaction, et développant deux queues de marée, et les simulations dans le cadre de MOND, de deux galaxies de masse égale. D’après Tiret & Combes (2008).

changeait de régime, passant de la valeur newtonienne g_N , qui décroît comme $1/r^2$ loin de la galaxie, à la valeur $g = \sqrt{g_N a_0}$. Donc, selon cette formule, g va décroître loin de la galaxie en $1/r$, soit moins rapidement que le champ newtonien, et on “explique” pourquoi les étoiles tournent plus vite autour de la galaxie sans avoir recours à la matière noire. Celle-ci ne serait donc qu’une apparence, et c’est la loi de la gravitation qui serait modifiée. C’est l’hypothèse MOND (pour MODified Newtonian Dynamics) proposée par M. Milgrom en 1983.

Dans le scénario MOND, les courbes de rotation sont remarquablement reproduites pour tous les types de galaxies, des géantes peu concernées par le problème de la masse manquante, jusqu’aux galaxies naines, entièrement dominées par la matière noire.

Des simulations numériques de la dynamique des galaxies dans le cadre du formalisme de MOND ont été effectuées par O. Tiret et F. Combes dans les trois dernières années, pour essayer de discriminer les deux modèles. Est-ce que les galaxies présentent le même taux d’instabilités? Forment-elles également des barres, des spirales, qui sont le moteur de l’évolution et de la concentration de la masse? Les disques sous MOND sont plus instables, et forment des barres plus vite, mais lorsque les barres sont détruites il est plus difficile de les former. Globalement, on peut obtenir la fréquence des barres observées dans les deux modèles. Toutes les simulations démontrent qu’il est possible de reproduire les observations avec MOND, même dans le cas d’interactions entre galaxies, comme le montre la Figure 5, illustrant la fusion entre deux galaxies, les “Antennes”.

Si le formalisme MOND parvient à résoudre les problèmes du modèle CDM à l’échelle des galaxies, il rencontre en revanche ses propres problèmes à l’échelle des amas de galaxies. Dans cet environnement, l’accélération n’est pas toujours très faible par rapport à l’accélération critique a_0 , et l’amplification de la gravité n’est pas aussi forte qu’au niveau des galaxies. MOND rend compte d’une partie de la masse manquante, mais il en reste encore! Ce problème pourrait être résolu par la présence soit de neutrinos, particules très nombreuses dans l’Univers, et dont la masse a été longtemps supposée nulle, mais serait de l’ordre de un électron-Volt en équivalent énergie, soit de baryons noirs, ou matière ordinaire, faite d’atomes qui ne rayonnent pas, dans les amas. Ceci est encore possible, car la majeure partie des baryons n’ont pas encore été identifiés. Nous savons, par les expériences rappelées au début, que les baryons constituent 4% du contenu de l’Univers, et pourtant la matière visible (étoiles et gaz) ne recense que environ 10% de ces baryons, soit 0,4% du total. Les amas ne représentent qu’une très faible partie de la masse de l’Univers, et aucune contrainte n’existe alors sur la quantité de baryons sombres qu’ils peuvent contenir.

GRAVITÉ MODIFIÉE OU MATIÈRE MODIFIÉE ?

La formule MOND a montré une performance étonnante pour les halos de galaxies, mais a clairement un domaine d’application limité. D’autre part ce n’est qu’une “recette” qui ne rentre pas dans le cadre théorique actuel. Et

pourtant, elle semble dire quelque chose d'important sur le problème de la matière noire, et peut-être même de l'énergie noire car la constante a_0 se trouve être du même ordre de grandeur que la valeur associée à la constante cosmologique Λ .

Une possibilité est qu'un jour la formule MOND soit expliquée par une série de phénomènes physiques qui n'ont pas encore été pris en compte dans les simulations de CDM, tels que l'effet des supernovæ sur la distribution de matière noire ou l'interaction de la matière noire avec les baryons. Cela semble néanmoins improbable car on imagine difficilement pouvoir résoudre ainsi le problème de la conspiration entre la matière noire et la matière visible. D'autre part, aucun mécanisme convainquant n'a été trouvé pour incorporer l'accélération a_0 dans le modèle CDM.

La seconde solution est la gravité modifiée MOND sans matière noire, décrite plus haut. On cherche une modification de la relativité générale d'Einstein de façon à reproduire MOND dans la limite non-relativiste. Il n'est pas facile de modifier les équations de la relativité générale à cause de leur parfaite cohérence mathématique! On suppose donc que la relativité générale est valable, mais on rajoute des nouveaux champs associés à la gravitation, qui vont obéir à de nouvelles équations, et vont aussi se coupler à la métrique de l'espace-temps de la relativité générale. Jacob Bekenstein (2004) a montré qu'il est possible de construire une telle théorie, basée sur des champs vectoriel et scalaires en plus du champ tensoriel habituel. Cette théorie TeVeS (pour Tenseur-Vecteur-Scalaire) est le premier exemple de théorie relativiste reproduisant MOND.

Une troisième alternative est proposée par L. Blanchet et A. Le Tiec depuis deux ans: la matière modifiée. On suppose que la matière noire est munie d'une propriété qui la fait se comporter différemment de CDM, et permet d'expliquer la phénoménologie de MOND, sans modifier la théorie de la gravitation qui reste la relativité générale. Cette approche a donc la couleur de MOND, mais ce n'est pas du MOND!

LA MATIÈRE NOIRE DIPOLAIRE

L'approche de matière modifiée est basée sur une analogie remarquable avec la physique des dipôles électrostatiques. Dans un milieu diélectrique, les atomes sont modélisés par des dipôles électriques qui se polarisent en présence d'un champ électrique extérieur. Le champ total est alors la somme du champ extérieur et du champ dipolaire induit par la polarisation. Or MOND apparaît exactement comme l'analogue gravitationnel d'un effet de polarisation (Blanchet 2007). Dans le cas gravitationnel la polarisation tend à augmenter l'intensité du champ (au contraire du cas électrique où le champ est "écranté" par les charges de polarisation), et c'est bien ce qu'il nous faut pour expliquer la matière noire.

Se pourrait-il que la matière noire soit constituée d'un milieu de dipôles gravitationnels? Si l'on poursuit l'analogie avec l'électrostatique, le dipôle gravitationnel devrait être constitué d'une masse négative associée à une masse positive. La présence de masses négatives conduit à une violation du principe d'équivalence, difficilement réconciliable avec le formalisme de la relativité générale. Néanmoins, il est possible de décrire le dipôle gravitationnel de manière "effective", sans lui donner une interprétation microscopique fondamentale. On peut alors construire un modèle de matière noire dipolaire en relativité générale (Blanchet & Le Tiec 2008, 2009). Ce modèle reproduit naturellement la phénoménologie de MOND grâce au mécanisme de polarisation gravitationnelle, et d'autre part on trouve que la matière noire dipolaire se comporte comme CDM aux grandes échelles cosmologiques, et est donc en accord avec les fluctuations du fond cosmologique. Le modèle est viable! Il permet d'unifier les deux facettes antagonistes de la matière noire, son aspect "particulaire" en cosmologie, et son aspect "modification des lois" dans les galaxies.

On le voit, les modèles alternatifs ne manquent pas, et la question est ouverte: les expériences menées par les télescopes au sol et les satellites dans le futur, ainsi que peut-être des développements théoriques nouveaux, permettront de trancher.

-
- [1] Bekenstein, J. 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 083509.
 - [2] Blanchet, L. 2007, *Class. Quant. Grav.* **24**, 3529.
 - [3] Blanchet, L. & Le Tiec, A. 2008, *Phys. Rev. D* **78**, 024031; *ibid.* 2009, *Phys. Rev. D* **80**, 023524.
 - [4] Clowe, D., et al., *Astrophys. J.* **648**, L109 (2006).
 - [5] Diemand, J., Kuhlen, M. & Madau, P. 2007, *Astrophys. J.* **667**, 859.
 - [6] Milgrom, M. 1983, *Astrophys. J.* **270**, 365.
 - [7] Tiret, O. & Combes, F. 2008, *Astron. Soc. Pac. Conf.* **396**, 259.
 - [8] Springel, V., Frenk, C. & White, S. 2006, *Nature* **440**, 1137.