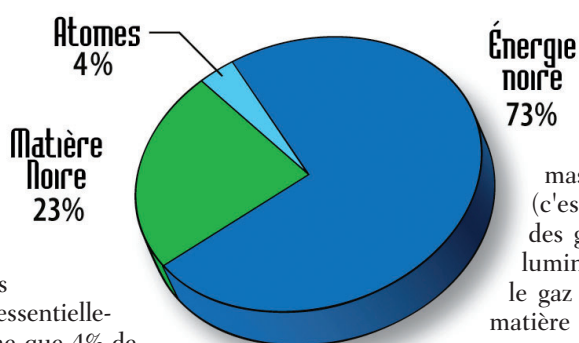


GRAVITÉ MODIFIÉE OU MATIÈRE MODIFIÉE?

Pour l'astrophysicien qui aborde le puzzle de la matière noire (voir l'article de Françoise Combes), celle-ci apparaît sous deux aspects différents : d'une part en cosmologie, c'est-à-dire à très grandes échelles, où elle semble être formée d'un bain de particules, et d'autre part à l'échelle des galaxies, où elle est décrite par un ensemble de phénomènes très particuliers, qui paraissent incompatibles avec sa description en termes de particules, et qui font dire à certains que l'on est en présence d'une modification de la loi de la gravitation. Réconcilier ces deux aspects distincts de la matière noire dans un même formalisme théorique représente un défi important qui pourrait peut-être conduire à une physique nouvelle en action aux échelles astronomiques

MATIÈRE NOIRE EN COSMOLOGIE

Dans le modèle cosmologique, dit de concordance car il est en conformité avec tout un ensemble de données observationnelles, la matière ordinaire dont sont constituées les étoiles, le gaz, les galaxies, etc. (essentiellement sous forme baryonique) ne forme que 4% de la masse-énergie totale, ce qui est déduit de la nucléosynthèse primordiale des éléments légers, ainsi que des mesures de fluctuations du rayonnement du fond diffus cosmologique (CMB) - le rayonnement fossile qui date de la formation des premiers atomes neutres dans l'Univers. Nous savons aussi qu'il y a 23% de matière noire sous forme baryonique et dont nous ne connaissons pas la nature. Et les 73% qui restent ? Et bien, ils sont sous la forme d'une mystérieuse énergie noire, mise en évidence par le diagramme de Hubble des supernovae de type Ia, et dont on ignore l'origine à part qu'elle pourrait être sous la forme d'une constante cosmologique. Le contenu de l'Univers à grande échelle est donc donné par le « camembert » de la figure 1 dont 96% nous est inconnu !



1. Le contenu en masse-énergie de l'Univers. © NASA

Des simulations numériques très précises permettent de confirmer cette hypothèse. Pour que cela soit possible il faut que la matière noire soit non relativiste au moment de la formation des galaxies. On l'appellera matière noire froide ou CDM selon l'acronyme anglais, et il y a aussi un nom pour la particule associée: un WIMP pour « weakly interacting massive particle ».

Un modèle à succès

La matière noire permet d'expliquer la différence entre la masse dynamique des amas de galaxies (c'est la masse déduite du mouvement des galaxies) et la masse de la matière lumineuse qui comprend les galaxies et le gaz chaud intergalactique. Mais cette matière noire ne fait pas que cela ! Nous pensons qu'elle joue un rôle crucial dans la formation des grandes structures, en entraînant la matière ordinaire dans un effondrement gravitationnel, ce qui permet d'expliquer la distribution de matière visible depuis l'échelle des amas de galaxies jusqu'à l'échelle cosmologique.

GRAVITÉ MODIFIÉE OU MATIÈRE MODIFIÉE?

Il n'y a pas d'explication pour la matière noire (ni pour l'énergie noire) dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Mais des extensions au-delà du modèle standard permettent de trouver des bons candidats pour la particule éventuelle de matière noire. Par exemple dans un modèle de super-symétrie (qui associe à tout fermion un partenaire super-symétrique qui est un boson et réciproquement) l'un des meilleurs candidats est le *neutralino*, qui est un partenaire fermionique super-symétrique d'une certaine combinaison de bosons du modèle standard. L'*axion*, qui fut introduit dans une tentative pour résoudre le problème de la violation CP en physique des particules, est une autre possibilité. Il y a aussi les états de Kaluza-Klein prédits dans certains modèles avec dimensions supplémentaires.

Quant à l'énergie noire, elle apparaît comme un milieu de densité d'énergie constante au cours de l'expansion, ce qui implique une violation des « conditions d'énergie » habituelles avec une pression négative. L'énergie noire pourrait être la fameuse constante cosmologique Λ qu'Einstein avait introduite dans les équations de la relativité générale afin d'obtenir un modèle d'univers statique, puis qu'il avait abandonnée lorsque l'expansion fut découverte. Depuis Zel'dovich on interprète Λ comme une énergie du vide associée à l'espace-temps lui-même. Le problème est que l'estimation de cette énergie en théorie des champs donne une valeur qui est 10^{123} fois plus grande que la valeur observée ! On ne comprend donc pas pourquoi la constante cosmologique est si petite.

Malgré l'énigme de l'origine de ses constituants, le modèle Λ -CDM est plein de succès, tant dans l'ajustement précis des fluctuations du CMB que dans la reproduction fidèle des grandes structures observées. La leçon est que la matière noire apparaît formée de particules (les WIMPs) à grande échelle.

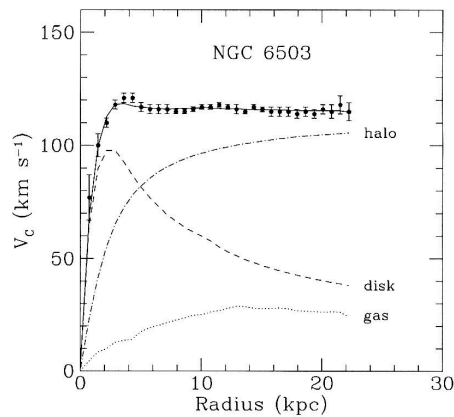
1. La formule MOND

Notre règle sera : $\mu(g/a_0) \mathbf{g} = \mathbf{g}_N$. Ici g désigne la norme du champ de gravitation g ressenti par les particules d'épreuves. Une formule encore plus opérationnelle est obtenue en prenant la divergence des deux membres ce qui mène à l'équation de Poisson modifiée* :

$$\nabla \cdot [\mu(g/a_0) \mathbf{g}] = -4\pi G \rho_b \quad (1)$$

dont la source est la densité de matière baryonique ρ_b (le champ gravitationnel est irrotationnel : $\mathbf{g} = \nabla U$). On appellera l'équation (1) la formule MOND pour *modified Newtonian dynamics*. •

*. L'équation de Poisson usuelle s'écrit : $\Delta U = -4\pi G \rho_b$, où Δ est le laplacien et U le potentiel newtonien local. L'opérateur ∇ appliqué à une fonction scalaire est le gradient, appliqué à un vecteur c'est la divergence : $\Delta U = \nabla \cdot \nabla U$. Par convention, on note les vecteurs en caractères gras.



2. Courbe de rotation de galaxie.

MATIÈRE NOIRE DANS LES GALAXIES

La matière noire se manifeste de manière éclatante dans les galaxies, par l'excès de vitesse de rotation des étoiles de ces galaxies en fonction de la distance au centre – c'est la célèbre courbe de rotation (fig. 2). Les mesures montrent qu'à partir d'une certaine distance au centre la courbe de rotation devient pratiquement plate, c'est-à-dire que la vitesse devient constante. D'après la loi de Newton la vitesse d'une étoile sur une orbite circulaire (keplerienne) de rayon r est donnée par $v(r) = (GM(r)/r)^{1/2}$ où $M(r)$ est la masse contenue dans la sphère de rayon r .

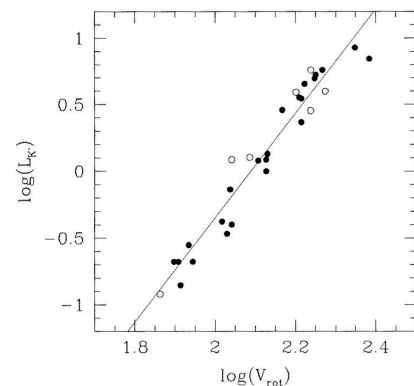
Pour obtenir une courbe de rotation plate il faut donc supposer que la masse croît proportionnellement à r (et donc que la densité décroît comme $1/r^2$), ce qui n'est certainement pas le cas de la matière visible. On est obligé d'invoquer l'existence d'un gigantesque halo de matière noire invisible (qui ne rayonne pas) autour de la galaxie et dont la masse dominerait celle des étoiles et du gaz.

Problèmes dans les halos

Cette matière noire peut-elle être faite de la même particule que celle suggérée par la cosmologie (un WIMP) ? Des éléments de réponses sont fournis par les simulations numériques de CDM en

cosmologie qui sont aussi valables à l'échelle des galaxies, et donnent un profil de densité universel pour le halo de matière noire. À grande distance ce profil décroît en $1/r^3$ soit plus rapidement que ce qu'il faudrait pour avoir une courbe plate, mais ce n'est pas très grave car on peut supposer que la courbe de rotation est observée dans un régime intermédiaire avant de décroître. Plus grave est la prédiction d'un pic central de densité au centre des galaxies, où les particules de matière noire tendent à s'agglomérer à cause de la gravitation, avec une loi en $1/r$ pour r petit. Or les courbes de rotation favorisent plutôt un profil de densité sans divergence, avec un cœur de densité constante.

D'autres problèmes sont rencontrés par les halos simulés de CDM comme la formation d'une multitude de satellites autour des grosses galaxies (voir l'article de Françoise Combes), et la loi empirique de Tully et Fisher qui n'est pas expliquée de façon naturelle. Cette loi montrée dans la figure 3 relie la luminosité des galaxies à leur vitesse asymptotique de rotation (qui est la valeur du plateau dans la fig. 2) : v est proportionnel à $L^{1/4}$. Noter que cette loi ne fait aucune référence à la matière noire ! La vitesse et la luminosité sont celles de la matière ordinaire, et la matière noire semble faire ce que lui dicte la matière visible.



3. La Loi de Tully-Fisher.

Mais le défi le plus important de CDM est de pouvoir rendre compte d'une observation étonnante appelée loi de Milgrom [1], selon laquelle la matière noire intervient uniquement dans les régions où le champ de gravitation (ou, ce qui revient au même, le champ d'accélération) est plus faible qu'une certaine accélération critique mesurée à la valeur "universelle" $a_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m.s}^{-2}$. Tout se passe comme si dans le régime des champs faibles $g \ll a_0$, la matière ordinaire était accélérée non par le

champ newtonien g_N mais par un champ g donné simplement par $g = (a_0 g_N)^{1/2}$. La loi du mouvement sur une orbite circulaire donne alors une vitesse constante et égale à $v = (GMa_0)^{1/4}$. Ce résultat nous réserve un bonus important : puisque le rapport masse-sur-luminosité M/L est approximativement le même d'une galaxie à l'autre, la vitesse de rotation doit varier comme la puissance 1/4 de la luminosité L , en accord avec la loi de Tully-Fisher !

Une formule puissante

Pour avoir une règle qui nous permette d'ajuster les courbes de rotation des galaxies il nous faut aussi prendre en compte le régime de champ fort dans lequel on doit retrouver la loi newtonienne. On introduit une fonction d'interpolation dépendant du rapport g/a_0 et qui se ramène à $\mu \approx g/a_0$ lorsque $g \ll a_0$, et qui tend vers 1 quand $g \gg a_0$, ce qui aboutit à la formule MOND (lire l'encadré 1)

Le succès de cette formule (ou plus exactement de cette "recette") dans l'obtention des courbes de rotation de nombreuses galaxies est impressionnant ; voir la courbe en trait plein dans la figure 2. C'est en fait un ajustement à un paramètre libre, le rapport M/L de la galaxie qui est donc mesuré par notre recette. On trouve que non seulement la valeur mesurée de M/L est de l'ordre de 1-5 comme il se doit, mais qu'elle est remarquablement en accord avec la couleur observée de la galaxie.

Beaucoup considèrent la formule MOND comme "exotique" et représentant un aspect mineur du problème de la matière noire. On entend même parfois dire que ce n'est pas de la physique. Bien sûr ce n'est pas de la physique fondamentale – cette formule ne peut pas être considérée comme une théorie fondamentale, mais elle constitue de l'excellente physique ! Elle capture de façon simple et puissante tout un ensemble de faits observationnels. Au théoricien d'expliquer pourquoi.

La valeur numérique de a_0 se trouve être très proche de la constante cosmologique : $a_0 \approx c^2 \Lambda^{1/2}$. Cette coïncidence cosmique pourrait nous fournir un indice ! Elle a alimenté de nombreuses spéculations sur une possible influence de la cosmologie dans la dynamique locale des galaxies.

Face à la « déraisonnable efficacité » de la formule MOND, trois solutions sont possibles.

1. La formule pourrait s'expliquer dans le cadre CDM. Mais pour résoudre les problèmes de CDM il faut invoquer des mécanismes astrophysiques compliqués et effectuer un

ajustement fin des données galaxie par galaxie.

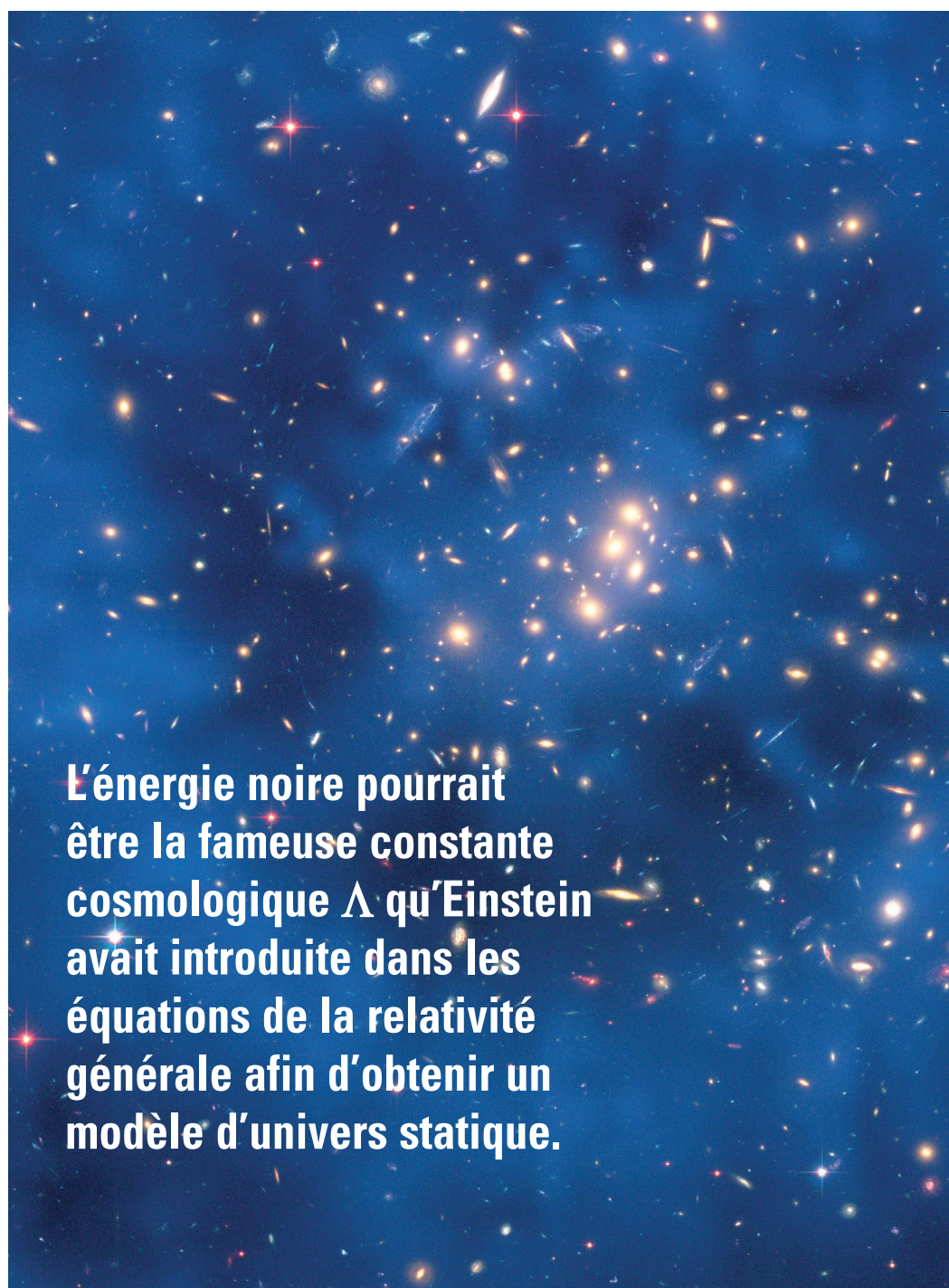
2. On est en présence d'une modification de la loi de la gravitation dans un régime de champ faible $g \ll a_0$. C'est l'approche traditionnelle de MOND et de ses extensions relativistes.

3. La gravitation n'est pas modifiée mais la matière noire possède des caractéristiques particulières la rendant apte à expliquer la phénoménologie de MOND. C'est une approche nouvelle qui se prête aussi très bien à la cosmologie.

La plupart des astrophysiciens des particules et des cosmologues des grandes

structures sont partisans de la première solution. Malheureusement aucun mécanisme convaincant n'a été trouvé pour incorporer de façon naturelle la constante d'accélération a_0 dans les halos de CDM. Dans la suite nous considérerons que la solution 1. est d'ores et déjà exclue par les observations.

Les approches 2. de gravitation modifiée et 3. que l'on peut qualifier de matière noire modifiée croient toutes deux dans la pertinence de MOND, mais comme on va le voir sont en fait très différentes. Notez que dans ces deux approches il faudra expliquer pourquoi la matière noire semble être constituée de WIMPs à l'échelle cosmologique.



L'énergie noire pourrait être la fameuse constante cosmologique Λ qu'Einstein avait introduite dans les équations de la relativité générale afin d'obtenir un modèle d'univers statique.

GRAVITÉ MODIFIÉE OU MATIÈRE MODIFIÉE?

THÉORIES DE LA GRAVITATION MODIFIÉE

Cette route, très développée dans la littérature, consiste à supposer qu'il n'y a pas de matière noire, et que (1) reflète une violation fondamentale de la loi de la gravitation. C'est la proposition initiale de Milgrom [1] – un changement radical de paradigme par rapport à l'approche CDM. Pour espérer définir une théorie il nous faut partir d'un lagrangien*. Or il est facile de voir que (1) découle d'un lagrangien, celui-ci ayant la particularité de comporter un terme cinétique non standard pour le potentiel gravitationnel, du type $f[(\nabla U)^2]$ au lieu du terme habituel $(\nabla U)^2$, où f est une certaine fonction que l'on relie à la fonction μ . Ce lagrangien a servi de point de départ pour la construction des théories de la gravitation modifiée.

On veut modifier la relativité générale de façon à retrouver MOND dans la limite non-relativiste, c'est-à-dire quand la vitesse des corps est très faible par rapport à la vitesse de la lumière c . En relativité générale la gravitation est décrite par un champ tensoriel à deux indices appelé la métrique de l'espace-temps $g_{\alpha\beta}$. Cette théorie est extrêmement bien vérifiée dans le Système solaire et dans les pulsars binaires, mais peu testée dans le régime de champs faibles qui nous intéresse (en fait la relativité générale est le royaume des champs gravitationnels forts).

Une première tentative

La première idée qui vient à l'esprit est de promouvoir le potentiel newtonien U en un champ scalaire (sans indices) et donc de considérer une théorie tenseur-scalaire dans laquelle la gravitation est décrite par le couple de champs $(g_{\alpha\beta}, \Phi)$. On postule, de manière *ad hoc*, un terme cinétique non standard pour le champ scalaire: $F(\partial_\alpha \Phi \partial^\alpha \Phi)$ où F est reliée à μ , et on choisit le lagrangien d'Einstein-Hilbert de la relativité générale pour la partie concernant la métrique $g_{\alpha\beta}$.

Tout va bien pour ce qui concerne le mouvement des étoiles dans une galaxie qui reproduit MOND. Mais notre théorie tenseur-scalaire est une catastrophe pour le mouvement des photons ! En effet ceux-ci ne ressentent pas la présence du champ scalaire censé représenter la matière noire. Dans une théorie tenseur-scalaire toutes les formes de matière se propagent dans un espace-temps de métrique physique $\hat{g}_{\alpha\beta}$ qui diffère de la métrique d'Einstein $g_{\alpha\beta}$ par un facteur de proportionnalité dépendant du champ scalaire, soit $\hat{g}_{\alpha\beta} = A(\Phi) g_{\alpha\beta}$. Une telle relation entre les métriques est dite conforme et laisse invariants les cônes de lumière de l'espace-temps. Les

trajectoires de photons seront donc les mêmes dans l'espace-temps physique que dans l'espace-temps d'Einstein (cela se déduit aussi de l'invariance conforme des équations de Maxwell). Comme on observe d'énormes quantités de matière noire grâce au mouvement des photons, par effet de lentille gravitationnelle, la théorie tenseur-scalaire est éliminée.

Théorie tenseur-vecteur-scalaire

Pour corriger cet effet désastreux du mouvement de la lumière on rajoute un nouvel élément à notre théorie. Puisque c'est cela qui cause problème on va transformer la relation entre les métriques $\hat{g}_{\alpha\beta}$ et $g_{\alpha\beta}$. Une façon de le faire est d'y insérer (encore de façon *ad hoc*) un nouveau champ qui sera cette fois un vecteur V^α avec un indice. On aboutit donc à une théorie dans laquelle la gravitation est décrite par le triplet de champs $(g_{\alpha\beta}, V^\alpha, \Phi)$. C'est ce qu'on appelle une théorie tenseur-vecteur-scalaire (TeVS).

La théorie TeVeS a été mise au point par Bekenstein et Sanders [2, 3]. Comme dans la théorie tenseur-scalaire on aura la partie d'Einstein-Hilbert pour la métrique plus un terme cinétique non standard $F(\partial_\alpha \Phi \partial^\alpha \Phi)$ pour le champ scalaire. Quant au champ vectoriel on le munit d'un terme cinétique analogue à celui de l'électromagnétisme, mais dans lequel le rôle du potentiel électromagnétique A^α est tenu par notre champ V^α . La théorie TeVeS résultante est très compliquée et pour l'instant non reliée à de la physique microscopique. Il a été montré que c'est un cas particulier d'une classe de théories appelées théories Einstein-*ether* dans lesquelles le vecteur V^α joue le rôle principal, en définissant un référentiel privilégié un peu analogue à l'éther postulé au XIX^e siècle pour interpréter la non-invariance des équations de Maxwell par transformations de Galilée.

Les neutrinos à la rescousse

Si elle est capable de retrouver MOND dans les galaxies, la théorie TeVeS a malheureusement un problème dans les amas de galaxies car elle ne rend pas compte de toute la matière noire observée. C'est en fait un problème générique de toute extension relativiste de MOND. Cependant ce problème peut être résolu en supposant l'existence d'une composante de matière noire chaude sous la forme de neutrinos massifs, ayant la masse maximale permise par les expériences actuelles soit environ 2 eV. Rappelons que toute la matière noire ne peut pas être sous forme de neutrinos: d'une part il n'y aurait pas assez de masse, et d'autre part les neutrinos étant relativistes auraient tendance à lisser

l'apparence des grandes structures, ce qui n'est pas observé. Néanmoins une pincée de neutrinos massifs pourrait permettre de rendre viables les théories de gravitation modifiée. De ce point de vue les expériences prévues qui vont déterminer très précisément la masse du neutrino (en vérifiant la conservation de l'énergie au cours de la désintégration d'une particule produisant un neutrino dans l'état final) vont jouer un rôle important en cosmologie. TeVeS a aussi des difficultés à l'échelle cosmologique pour reproduire les fluctuations observées du CMB. Là aussi une composante de neutrinos massifs peut aider, mais la hauteur du troisième pic de fluctuations, qui est caractéristique de la présence de matière noire sans pression, reste difficile à ajuster.

THÉORIE DE LA MATIÈRE MODIFIÉE

Une alternative logique à la gravité modifiée est de supposer qu'on est en présence d'une forme particulière de matière noire ayant des caractéristiques différentes de CDM. Dans cette approche on a l'ambition d'expliquer la phénoménologie de MOND, mais avec une philosophie nouvelle puisqu'on ne modifie pas la loi de la gravitation : on garde la relativité générale classique, avec sa limite newtonienne habituelle. Cette possibilité émerge grâce à l'analogie gravitationnel du mécanisme physique de polarisation par un champ extérieur et que l'on va appeler "polarisation gravitationnelle" [4].

Une interprétation de MOND

La motivation physique est une analogie frappante (et peut-être très profonde) entre MOND, sous la forme de l'équation de Poisson modifiée (1), et la physique des milieux diélectriques en électrostatique. En effet nous apprenons dans nos cours de physique élémentaire que l'équation de Gauss pour le champ électrique (c'est l'une des équations fondamentales de Maxwell), est modifiée en présence d'un milieu diélectrique par la contribution de la polarisation électrique (lire l'encadré 2).

De même, MOND peut être vu comme la modification de l'équation de Poisson par un milieu "digravitationnel". Explicitons cette analogie. On introduit l'analogie gravitationnel du coefficient de susceptibilité, soit χ qui est relié à la fonction MOND par $\mu = 1 + \chi$. La "polarisation gravitationnelle" est définie par $\mathbf{II} = -(\chi/4\pi G) \mathbf{g}$. La densité des "masses de polarisation" est donnée par la divergence de la polarisation, $\rho_{pol} = -\nabla \cdot \mathbf{II}$. Avec ces notations l'équation (1) prend la forme : $\nabla \cdot \mathbf{g} = -4\pi G (\rho_b + \rho_{pol})$ qui apparaît maintenant comme une

équation de Poisson ordinaire, mais dont la source est constituée non seulement par la densité de matière baryonique, mais aussi par la contribution des masses de polarisation ρ_{pol} . Il est clair que cette écriture de MOND suggère que l'on est en présence non pas d'une modification de la loi gravitationnelle, mais d'une forme nouvelle de matière noire de densité ρ_{pol} , c'est-à-dire faite de moments dipolaires alignés dans le champ de gravitation.

Des masses négatives ?

L'étape suivante serait de construire un modèle microscopique pour des dipôles gravitationnels. L'analogie gravitationnel du dipôle électrique serait un vecteur $\boldsymbol{\pi} = m\boldsymbol{\xi}$ séparant deux masses $\pm m$. On se heurte donc à un problème sévère : le milieu dipolaire devrait contenir des masses négatives ! Ici on entend par masse l'analogie gravitationnel de la charge, qui est ce qu'on appelle parfois la masse grave. Ce problème des masses négatives rend *a priori* le modèle hautement non viable. Néanmoins, ce modèle est intéressant car il est facile de montrer que le coefficient de susceptibilité gravitationnelle doit être négatif, $\chi < 0$, soit l'opposé du cas électrostatique. Or c'est précisément ce que nous dit MOND : comme la fonction μ interpole entre le régime MOND où $\mu \ll 1$ et le régime newtonien où $\mu \rightarrow 1$, on a $\mu < 1$ et donc bien $\chi < 0$. Il est donc tentant d'interpréter le champ gravitationnel plus intense dans MOND que chez Newton par la présence des masses de polarisation qui "anti-écrantent" le champ gravitationnel des masses ordinaires, et donc augmentent l'intensité effective du champ gravitationnel !

Une cinquième force

Dans le cadre de ce modèle on peut aussi se convaincre qu'un milieu formé de dipôles gravitationnels est intrinsèquement instable, car les constituants microscopiques du dipôle devraient se repousser gravitationnellement. Il faut donc introduire une force interne d'origine non-gravitationnelle, qui va supplanter la force gravitationnelle pour lier les constituants dipolaires entre eux. On pourrait qualifier cette nouvelle interaction de "cinquième force". Pour retrouver MOND, on trouve de façon satisfaisante que ladite force doit dépendre du champ de polarisation, et avoir en première approximation la forme d'un oscillateur harmonique. Par l'effet de cette force, à l'équilibre, le milieu dipolaire ressemble à une sorte d'"éther statique", un peu à l'image du diélectrique dont les sites atomiques sont fixes.

2. Champ électrique dans un diélectrique

Un diélectrique est un matériau isolant, qui ne laisse pas passer les courants, car tous les électrons sont rattachés à des sites atomiques. Néanmoins, les atomes du diélectrique réagissent à la présence d'un champ électrique extérieur : le noyau de l'atome chargé positivement se déplace en direction du champ électrique, tandis que le barycentre des charges négatives c'est-à-dire le nuage électronique se déplace dans la direction opposée. On peut modéliser la réponse de l'atome au champ électrique par un dipôle électrique $\boldsymbol{p} = q\boldsymbol{\xi}$ qui est une charge $+q$ séparée d'une charge $-q$ par le vecteur $\boldsymbol{\xi}$, et aligné avec le champ électrique. La densité des dipôles nous donne la polarisation : $\boldsymbol{P} = n\boldsymbol{p}$. Le champ créé par les dipôles se rajoute au champ extérieur (engendré par des charges extérieures) et a pour source la densité de charge de polarisation qui est donnée par la divergence de la polarisation, $\sigma_{pol} = -\nabla \cdot \boldsymbol{P}$. L'équation de Gauss, en présence d'un diélectrique devient, $\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \sigma_{ext}$ avec $\boldsymbol{D} = \epsilon_0 \boldsymbol{E} + \boldsymbol{P}$. On introduit un coefficient de susceptibilité électrique χ_e qui intervient dans la relation de proportionnalité entre la polarisation et le champ électrique : $\boldsymbol{P} = \epsilon_0 \chi_e \boldsymbol{E}$, ainsi : $\boldsymbol{D} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \boldsymbol{E}$. La susceptibilité est positive, $\chi_e > 0$, ce qui implique que le champ dans un diélectrique est plus faible que dans le vide. C'est l'effet d'écrantage de la charge par les charges de polarisation. Ainsi garnir l'espace intérieur aux plaques d'un condensateur avec un matériau diélectrique diminue l'intensité du champ électrique, et donc augmente la capacité du condensateur pour une tension donnée. •

Un modèle relativiste

Les arguments précédents nous laissent penser que MOND a quelque chose à voir avec un effet de polarisation gravitationnelle. Mais il nous faut maintenant construire un modèle cohérent, reproduisant l'essentiel de cette physique, et sans masses graves négatives, donc respectant le principe d'équivalence. Il faut aussi bien sûr que le modèle soit relativiste (en relativité générale) pour pouvoir répondre à des questions concernant la cosmologie ou le mouvement de photons.

On va décrire le milieu comme un fluide relativiste de quadri-courant $J^\alpha = \rho u^\alpha$ (où ρ est la densité de masse), et muni d'un quadri-vecteur ξ^α jouant le rôle du moment dipolaire. Le vecteur de polarisation est alors $\Pi^\alpha = \rho \xi^\alpha$. On définit un principe d'action pour cette matière dipolaire, que l'on rajoute à l'action d'Einstein-Hilbert, et à la somme des actions de tous les champs de matière habituels (baryons, photons, neutrinos, etc). On inclut dans l'action une fonction potentielle dépendant de la polarisation et censée décrire une force interne au milieu dipolaire. Par variation de l'action on obtient l'équation du mouvement du fluide dipolaire, ainsi que l'équation d'évolution de son moment dipolaire. On trouve que le mouvement du fluide est affecté par la force interne, et diffère du mouvement géodésique d'un fluide ordinaire.

Une bonne physique

Ce modèle (proposé dans [5]) reproduit bien la phénoménologie de MOND au niveau des galaxies. Il a été construit pour ! Mais il a été aussi démontré qu'il donne satisfaction en cosmologie où l'on considère une perturbation d'un univers homogène et isotrope. En effet cette matière noire dipolaire se conduit comme un fluide parfait sans pression au premier ordre de perturbation cosmologique et est donc indistinguable du modèle CDM. En

particulier le modèle est en accord avec les fluctuations du fond diffus cosmologique (CMB). En ce sens il permet de réconcilier l'aspect particulière de la matière noire telle qu'elle est détectée en cosmologie avec son aspect "modification des lois" à l'échelle des galaxies.

De plus le modèle contient l'énergie noire sous forme d'une constante cosmologique Λ . Il offre une sorte d'unification entre l'énergie noire et la matière noire à la MOND. En conséquence de cette unification on trouve que l'ordre de grandeur naturel de Λ doit être compatible avec celui de l'accélération a_0 , c'est-à-dire que $\Lambda \sim a_0^2/c^4$, ce qui est en très bon accord avec les observations.

Le modèle de matière noire dipolaire contient donc la physique souhaitée. Son défaut actuel est de ne pas être connecté à la physique microscopique fondamentale (via une théorie quantique des champs). Il est donc moins fondamental que CDM qui serait motivé par exemple par la supersymétrie. Ce modèle est une description effective, valable dans un régime de champs gravitationnels faibles, comme à la lisière d'une galaxie ou dans un univers presque homogène et isotrope. L'extrapolation du modèle au champ gravitationnel régnant dans le Système solaire n'est pas entièrement résolue. D'un autre côté le problème de comment tester (et éventuellement falsifier) ce modèle en cosmologie reste ouvert. **L. Blanchet ■**

- [1] M. Milgrom, *Astrophys. J.* 270, 365 (1983).
- [2] J.D. Bekenstein, *Phys. Rev. D* 70, 083509 (2004).
- [3] R.H. Sanders, *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.* 363, 459 (2005).
- [4] L. Blanchet, *Class. Quant. Grav.* 24, 3529 (2007).
- [5] L. Blanchet and A. Le Tiec, *Phys. Rev. D* 78, 024031 (2008); and submitted, arXiv:0901.3114 (2009).

* - Le lagrangien est une fonction des variables dynamiques d'un système (positions et vitesses, en mécanique classique) qui permet de décrire de manière concise les équations du mouvement du système. Ces dernières s'obtiennent par application du principe de moindre action (ou principe d'action extrême).