

Gravitation Modifiée et Matière Noire

Benoit Famaey
Institut d'Astronomie et d'Astrophysique - ULB

ABSTRACT

Sous l'effet de la gravitation, le gaz et les étoiles se sont assemblés dans l'Univers en milliards de structures similaires à notre Voie Lactée, appelées les galaxies, elles-mêmes composées de centaines de milliards d'étoiles. La force qui retient les étoiles dans les galaxies devrait a priori être uniquement la gravité engendrée par le gaz et les étoiles qui composent ces galaxies, mais ce n'est apparemment pas le cas. En effet les étoiles se déplacent trop vite, et devraient donc s'échapper des galaxies comme les fusées s'échappent de la terre. Il faudrait plus de force pour les y retenir, donc plus de matière que ce qu'on observe, beaucoup plus de matière, à un point tel que neuf dixièmes de la masse des galaxies serait composée de ce qu'on appelle la *matière noire* ; à moins que ce ne soit la loi de la gravitation telle que formulée par Newton puis Einstein qui doit être révisée de manière à engendrer une plus grande force gravitationnelle à l'échelle galactique et extra-galactique. Dans cette contribution, après une description succincte de la gravitation Newtonienne et Einsteinienne, nous présentons les faits observationnels en faveur et en défaveur du paradigme de la matière noire. Nous discutons ensuite la possibilité de modifier la loi de la gravitation comme alternative à la matière noire, et envisageons les fondements théoriques possibles d'une telle modification.

I. Introduction

Le philosophe Thomas Kuhn, dans *La Structure des Révolutions Scientifiques*, décrit la Science comme « une série d'interludes paisibles ponctués de révolutions intellectuelles violentes ». Pour Kuhn, le progrès scientifique ne se fait pas par accumulation graduelle des connaissances mais par un combat constant entre les paradigmes dominants de l'époque et leurs jeunes cousins. En vieillissant, les paradigmes dominants se voient confrontés à des anomalies expérimentales, qu'ils tentent d'expliquer par des retouches successives. La plupart du temps, ils finissent par succomber face à une série de faits expérimentaux qu'un de leurs jeunes cousins avait été capable de prédire avant eux, et face à l'élégance de l'explication proposée par celui-ci. On assiste alors à un changement de paradigme menant à un nouvel interlude paisible, jusqu'à ce que le scénario se reproduise. Le passage de la vision Aristotélicio-Ptoléméenne (avec ses retouches successives sous la forme d'épicycles) à la vision Galileo-Newtonienne du monde, ou celui du passage de la physique Newtonienne à la physique quantique et à la physique relativiste, sont de bons exemples de telles ruptures.

La loi de la gravitation fut déjà sujette à de tels changements de paradigme par le passé, notamment lors de la révision radicale proposée par Einstein pour décrire les accélérations gravitationnelles extrêmement *fortes*. Or il n'est pas impossible qu'une révolution scientifique soit à nouveau en train de se préparer aujourd'hui, cette fois pour décrire les conditions extrêmes d'accélérations excessivement *faibles* des étoiles dans les galaxies.

Il y a un peu plus de vingt ans, le physicien israélien Mordehai Milgrom [1] fit l'hypothèse que lorsque l'accélération gravitationnelle devient cent milliards de fois plus faible que sur terre, comme c'est le cas à la périphérie des galaxies, la gravitation devient inversement proportionnelle à la

distance, plutôt qu'au carré de la distance comme enseigné dans les manuels scolaires. Cette hypothèse, tenue pour farfelue à l'origine, n'a pas été prise en défaut depuis, et a fait une série de prédictions inattendues qui se sont vérifiées [2,3,4]. Si l'hypothèse se voit néanmoins infirmée dans les années à venir, il faudra dès lors comprendre pourquoi les prédictions de celle-ci à l'échelle galactique s'avèrent correctes. Si l'hypothèse n'est pas infirmée rapidement, tous les ingrédients d'une révolution scientifique imminente seront alors réunis.

Cette modification de la loi de la gravitation permettrait en effet d'élucider le mystère le plus ténébreux de la physique moderne, celui de la matière noire. Les étoiles se déplaçant trop vite dans les galaxies, elles devraient donc s'échapper de celles-ci comme les fusées s'échappent de la terre. Il faudrait plus de force pour les y retenir, le paradigme d'Einstein-Newton impliquant donc qu'il faudrait plus de matière que ce qu'on observe : beaucoup plus de matière, à un point tel que 90% de la matière qui nous entoure serait de nature sombre, une matière non-observée à ce jour (si ce n'est par ses effets gravitationnels), une matière dont la nature est totalement inconnue ! A moins évidemment que ce ne soit la loi de la gravitation telle que formulée par Newton puis Einstein qui doive être révisée.

Après une description succincte de la gravitation Newtonienne (Sect.II) et Einsteinienne (Sect.III), nous présenterons les faits observationnels en faveur et en défaveur du paradigme de la matière noire (Sect.IV). Nous présenterons ensuite la modification de la gravitation proposée par Milgrom et les fondements théoriques possibles de celle-ci (Sect.V).

II. La gravitation Newtonienne

Le mot gravitation vient du latin *gravis* signifiant *lourd, pesant*. La gravitation est donc ce qui fait se mouvoir les objets pesants. Plus précisément, la gravitation est la force qui perturbe le mouvement inertiel des objets massifs par l'action à distance d'autres corps massifs. En effet, Newton, dans les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, a introduit le principe d'inertie contrevenant à la vision Aristotélicienne du monde dans laquelle le mouvement était nécessairement lié à une force motrice. Il nous stipule qu'en l'absence de force, tout corps persévère dans l'état de mouvement rectiligne uniforme dans lequel il se trouve, et que les changements qui arrivent dans le mouvement sont proportionnels à la force motrice et inversement proportionnels à la masse de l'objet. Ceci se résume par la seconde loi de Newton, donnant l'accélération d'un corps de masse m sous l'action d'une force F :

$$a = F/m$$

Newton a également été le premier à énoncer la loi de la gravitation, qui nous dit que la force exercée sur un corps de masse m par un corps de masse M situé à une distance r s'exprime sous la forme :

$$F = G M m/r^2$$

où G est la constante de la gravitation.

On sait aujourd'hui que la gravitation est l'une des quatre forces fondamentales de la nature, avec la force nucléaire forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), la force nucléaire faible (responsable de la radio-activité), et la force électro-magnétique (responsable de quasiment tous les phénomènes auxquels nous sommes confrontés dans la vie de tous les jours, des lampes aux moteurs, en passant par la chimie et la biologie). La gravitation est de loin la plus faible de ces quatre forces, mais comme l'équivalent gravitationnel de la charge électrique est la masse, aucun corps massif n'est neutre gravitationnellement (alors que la charge électrique a tendance à être nulle à grande échelle), ce qui veut dire que la gravitation est la seule force qui agit à grande distance, et donc la force qui gouverne la dynamique de l'Univers.

La loi de la gravitation de Newton a permis d'unifier les phénomènes célestes, tels l'orbite des planètes du système solaire, avec les phénomènes terrestres comme la chute des corps. C'est avec cette unification que la conception moderne de ce qu'est la physique est née, à savoir une quête d'unification des phénomènes naturels par un minimum de lois et principes. Ainsi, après l'unification des phénomènes électriques et magnétiques, il a été montré au XX^{ème} siècle que force électromagnétique et force nucléaire faible pouvaient être décrites par une seule théorie électro-faible. Le *graal* de la physique moderne serait d'unifier à présent cette force électro-faible avec la force nucléaire forte ainsi qu'avec la gravitation dans une « théorie du tout ». Cependant il semblerait, selon la théorie de la relativité d'Einstein, que la gravitation ne soit pas une force comme les autres, ce qui présente aujourd'hui l'obstacle le plus important sur la voie de l'unification. C'est cette vision Einsteinienne de la gravitation que nous allons présenter dans la section suivante.

III. Le principe d'équivalence et la relativité générale

Une particularité (déjà évoquée ci-dessus) de la gravitation avait déjà sauté aux yeux de Newton : la *charge gravitationnelle* d'un corps est équivalente à sa masse. C'est donc la seule force dont la charge est également présente dans l'équation du mouvement donnée par la seconde loi de Newton. La question philosophique qui se pose alors est la raison de cette équivalence entre la masse *inertielle* m_i dans l'équation du mouvement et la masse *gravitationnelle* m_g dans la loi de la gravitation. Est-ce une coïncidence numérique ou une véritable équivalence ? L'hypothèse du *principe d'équivalence faible* stipule qu'il s'agit précisément de la même quantité, ce qui implique l'universalité de la chute des corps avec la même accélération, indépendamment de leur masse ou de tout autre paramètre. Ce principe est aujourd'hui vérifié avec une très grande précision. Cependant, il lui manquait une explication théorique cohérente. C'est Einstein qui va l'apporter en généralisant ce principe : Einstein stipule que toutes les lois de la physique seront les mêmes pour différents observateurs en chute libre dans des champs gravitationnels constants, ce qu'on appelle le *principe d'équivalence fort*. Cela implique qu'un observateur non-inertiel se mouvant avec une accélération constante en l'absence de champ gravitationnel *ne peut pas* distinguer les effets de son accélération sur son propre référentiel d'un champ gravitationnel externe constant auquel il s'opposerait pour garder un mouvement rectiligne uniforme. En pratique, les effets d'une accélération constante pourront cependant être distingués en raison de la variation intrinsèque de tout champ gravitationnel, donnant lieu à des effets de marée.

Pour s'accommoder de ce principe d'équivalence fort, la seule solution est d'admettre que la gravitation *n'est pas* une force ! En considérant le mouvement des objets dans l'espace-temps, la théorie de la relativité générale stipule que la présence de masse courbe cet espace-temps selon l'équation d'Einstein. En l'absence d'une des trois autres forces fondamentales, les objets se déplacent le long des *géodésiques* de l'espace-temps (l'équivalent de la ligne droite dans un espace non-courbe), en mouvement « rectiligne » uniforme. Les orbites des planètes sont donc simplement des géodésiques dans l'espace-temps courbé par la masse du soleil. Les repères en chute libre sont appelés inertiels, et les accélérations de type $F=a/m$ sont liées aux trois autres forces fondamentales. Au repos sur terre, nous sommes donc au sens de la relativité générale des observateurs accélérés par la force électromagnétique (qui nous empêche de passer au travers du sol).

Einstein montre que dans la limite de champ gravitationnel faible, sa théorie de la relativité générale est équivalente à la loi de la gravitation de Newton, à savoir que l'accélération gravitationnelle est du type $a = G M / r^2$. Par contre, dans le cas des accélérations gravitationnelles extrêmement fortes, des variations importantes sont prédites par Einstein. En particulier, dès le XIX^{ème} siècle l'astronome français Leverrier avait observé un déplacement anormal du périhélie de Mercure de 1/2 seconde d'arc par an. Les astronomes avaient alors postulé l'existence d'une nouvelle planète appelée Vulcain pour perturber l'orbite de Mercure : les propositions relatives à la taille et à l'orbite de Vulcain variaient beaucoup d'un astronome à l'autre, une situation pas très éloignée de celle que nous rencontrons

aujourd'hui avec la matière noire. En fait cette avance du périhélie de Mercure fut expliquée naturellement par la modification de l'accélération gravitationnelle prédite par Einstein.

Une autre conséquence de la description de la gravitation comme déformation de l'espace-temps est que les rayons lumineux suivent eux aussi des géodésiques et sont donc eux aussi influencés par le champ gravitationnel. Ainsi la présence d'une galaxie massive peut jouer le rôle de lentille gravitationnelle, et déformer l'image d'une galaxie éloignée, voire la diviser en plusieurs images, comme dans le cas de la croix d'Einstein (Figure 1).

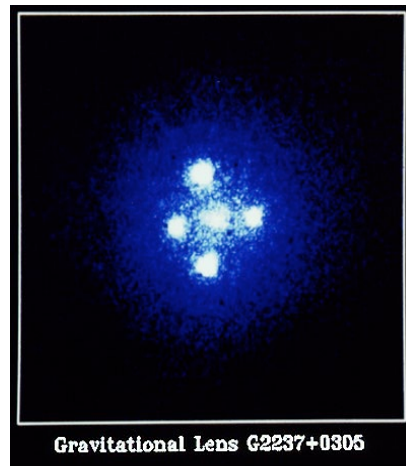


Figure 1 : La croix d'Einstein, une multiplication visuelle de l'image d'un quasar lointain due à la présence d'une galaxie massive à l'avant-plan. (Crédit : Hubble Space Telescope)

Il est intéressant de noter qu'Einstein, dans le développement de ses idées, avait été particulièrement influencé par les idées de Ernst Mach. Celui-ci avait fortement critiqué l'espace et le temps absolus inhérents à la mécanique Newtonienne, et stipulé que l'inertie d'un corps ne pouvait être déterminée que par rapport aux autres corps de l'Univers. C'est ce qu'on appelle le *principe de Mach*. Le référentiel de la mécanique doit donc selon ce principe être déterminé par la distribution de matière dans l'Univers tout entier : la gravitation doit donc être *relationnelle*. Einstein a poussé le raisonnement plus loin en supposant avec son principe d'équivalence fort qu'il n'y avait aucun référentiel privilégié. Ce faisant, il n'a pas réussi à développer une théorie Machienne de la gravitation puisque, notamment, il existe des solutions de l'équation d'Einstein en l'absence de masse.

Par ailleurs, la nature particulière de la gravitation dans la théorie de la relativité générale la rend difficilement conciliable avec la description quantique des autres forces de la nature. Ceci implique que la relativité générale devra sans aucun doute être légèrement modifiée à l'avenir, essentiellement afin de rendre compte d'effets quantiques pour les grandes densités de masse à petite échelle. Peut-être que d'autres modifications en découleront à plus grande échelle.

Quoi qu'il en soit, il est acquis que la relativité générale surpasse largement la gravitation Newtonienne. La théorie d'Einstein est aujourd'hui testée avec une grande précision, mais seulement à l'échelle du système solaire. A l'échelle galactique, ses prédictions sont fausses si la masse des galaxies est contenue dans la seule matière visible. On doit donc recourir à la présence massive de matière noire pour maintenir les galaxies liées gravitationnellement, une situation pas très éloignée de celle rencontrée avec Vulcain au XIX^{ème} siècle. A l'heure actuelle, même le système solaire externe semble fournir de mystérieuses observations en contradiction avec la relativité générale, notamment avec l'anomalie Pioneer (voir Sect. V et [17]). Serait-ce là la marque de l'éternel recommencement des révolutions scientifiques chères à Kuhn ? Le principe d'équivalence fort peut-il être remis en cause ? Le principe de Mach n'a-t-il pas dit son dernier mot ? Ces questions sont aujourd'hui en suspens, mais méritent de s'y attarder quelque peu.

IV. La matière noire

IV.1. Les indices de l'existence de la matière noire

Dans les années 1970, l'astronome Vera Rubin et ses collaborateurs ont montré avec certitude que la vitesse des étoiles et du gaz au sein des galaxies ne satisfaisaient pas aux prédictions de la gravitation d'Einstein-Newton si les galaxies n'étaient composées que de matière visible. En effet, la grande majorité de la masse visible M d'une galaxie se situe dans les quelques kiloparsecs centraux, et l'accélération centripète donnant lieu à la vitesse circulaire observée V devrait donc obéir à l'équation :

$$V^2 / r = G M / r^2$$

c'est-à-dire

$$V = (G M / r)^{1/2}$$

Or la vitesse circulaire observée, plutôt que de décroître comme la racine carrée de la distance, a tendance à rester constante. La même anomalie avait été détectée dès 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky dans l'amas de galaxies *Coma*. Afin d'expliquer ce phénomène, les astronomes et physiciens de l'époque ont supposé que les galaxies sont entourées d'un halo de matière noire de nature inconnue.

Le même problème est apparu dans les profils de température du gaz des amas de galaxies, trop chaud, et dans l'angle de déviation des rayons lumineux dont la trajectoire est courbée par les galaxies et amas de galaxies jouant le rôle de lentilles gravitationnelles, impliquant une plus grande masse pour ces lentilles que ce que l'on observe.

Il est aujourd'hui démontré que, au moins dans notre Voie Lactée, le halo de matière noire n'est pas constitué d'objets compacts de type naines brunes, naines blanches, naines rouges, étoiles à neutrons, ou trous noirs. En effet, ces objets se comporteraient comme des microlentilles gravitationnelles et amplifieraient régulièrement la luminosité d'étoiles des Nuages de Magellan, ce qui n'est pas observé. Il est donc acquis que la matière noire ne peut être composée de matière ordinaire.

Notons que dans le modèle standard de physique des particules, les quatre forces fondamentales sont transmises par des particules appelées *bosons*, tandis que la matière ordinaire est composée de particules appelées *fermions*. Les fermions se décomposent en deux types, les très peu massifs *leptons* (par exemple les électrons) et les *quarks*. Les particules composées de trois quarks sont appelées *baryons*, parmi lesquels les neutrons et les protons qui composent la vaste majorité de la matière ordinaire qui nous entoure, la matière baryonique. On dit donc que la matière noire doit être *non-baryonique*.

Le problème de la matière noire coïncida, par chance ou par malchance, avec un problème décorrélié de physique des particules. A la fin des années 1960, les travaux de Glashow, Salam et Weinberg avaient permis d'obtenir une description unifiée à haute énergie (10^{15} K) de la force électromagnétique et de la force faible en une interaction unique appelée électro-faible. Dans la continuité, les physiciens proposèrent d'unifier la force électro-faible avec la force nucléaire forte dans un modèle appelé GUT, pour *Grand Unified Theory*. Selon cette théorie, les leptons et les quarks sont des particules équivalentes dans un milieu de température supérieure à 10^{28} K. Une conséquence de cette théorie est que les protons sont des particules instables et doivent se désintégrer en une paire de quarks et un positron (en un temps caractéristique très long). En observant un nombre considérable de protons, cette désintégration aurait dû pouvoir être observée mais ne l'a jamais été, au grand dam des partisans de la théorie GUT.

Afin de pallier à ce problème, les physiciens se sont attaqués à la construction d'une théorie, dite *supersymétrique*, dans laquelle plus rien ne distingue les fermions des bosons dans un milieu de

température supérieure à 10^{32} K. Une première conséquence importante de cette hypothèse est de diminuer la probabilité de désintégration du proton en une paire de quarks et un positron. Une autre est d'associer aux particules fermioniques ordinaires des particules bosoniques créées lors de la brisure de la supersymétrie (lorsque la température de l'Univers est descendue sous 10^{32} K). Ces hypothétiques particules massives et n'interagissant que via la force faible sont appelées les *Weakly Interacting Massive Particles*, ou WIMP. On faisait ainsi d'une pierre deux coups, et l'on proposait une solution toute faite au problème de la matière noire.

Notons néanmoins que l'énergie caractéristique de cette théorie supersymétrique correspond à l'énergie gravitationnelle d'une grande densité de masse à petite échelle, donc une énergie à laquelle des effets de gravitation quantique devraient se faire sentir. Etant donné qu'aucune formulation satisfaisante de la gravitation quantique n'existe à ce jour, la théorie supersymétrique reste très spéculative.

Cependant, dans le même temps, les observations du rayonnement fossile du Big Bang fournirent un argument supplémentaire en faveur de l'existence de grandes quantités de matière non-baryonique. Lors de la recombinaison des protons et des électrons de l'Univers en atomes d'hydrogène neutre (300.000 ans après le Big Bang) l'Univers est devenu transparent au rayonnement électro-magnétique, et le rayonnement de cette lointaine époque est parvenu jusqu'à nous avec une formidable isotropie. Les fluctuations dans ce rayonnement sont extrêmement faibles, de l'ordre de quelques millièmes de pourcents. Ces fluctuations sont associées aux fluctuations de la densité de matière baryonique à l'origine des structures de l'Univers (amas de galaxies et galaxies), mais auraient dû être de l'ordre de quelques pourcents pour pouvoir former les structures observées à ce jour. Là encore, c'est la présence de grandes quantités de matière non-baryonique qui peut expliquer ce phénomène : les WIMP n'interagissant pas avec les photons, elles ont pu présenter des inhomogénéités plus marquées que ce qu'indiquent les anisotropies du rayonnement fossile, et former d'importants grumeaux à l'origine des galaxies que l'on observe aujourd'hui.

Afin de se conformer aux observations de formation hiérarchique des galaxies (les plus petites structures se forment d'abord), on a pu déduire que ces particules de matière noire devraient être très massives, de l'ordre de $10^{12} \text{eV}/c^2$ (à titre de comparaison la masse du proton s'élève à $10^9 \text{eV}/c^2$). Ces particules devraient néanmoins pouvoir être créées par collisions de faisceaux de protons accélérés à grande vitesse (jusqu'à une énergie cinétique de l'ordre de 10^{13}eV) dans le *Large Hadron Collider* (LHC) du CERN qui sera mis en route dès cette année.

IV.2. Les problèmes du paradigme de la matière noire

Le paradigme dominant est donc que la matière noire est composée de particules WIMP très massives, qui devraient être détectées dans le LHC d'ici 15 à 20 ans au plus tard. Cependant, si l'on regarde le problème sous l'angle des observations astronomiques, on se rend compte que ce paradigme est loin de rendre compte de toutes les observations.

Le problèmes sont les suivants :

- (1) Les simulations de formation des galaxies prédisent une pléthore de galaxies satellites qui ne sont pas observées [5].
- (2) Les simulations de formation des galaxies prédisent trop de matière noire au centre des galaxies, en total désaccord avec les observations! En fait les observations des effets de microlentilles vers le centre galactique tendent à montrer qu'il y a suffisamment d'étoiles au centre de la Voie Lactée pour expliquer la dynamique des 5 kiloparsecs centraux. Il n'y a donc pas (ou presque pas) de matière noire au centre de notre Galaxie ! [6]
- (3) Il existe une relation étonnante, appelée *relation de Tully-Fisher*, qui stipule que la quantité

de matière baryonique M_b d'une galaxie est directement proportionnelle à la quatrième puissance de la vitesse circulaire V des étoiles à grande distance du centre [7]. Or la vitesse circulaire asymptotique V est censée être entièrement déterminée par la masse totale de la galaxie, et donc pas uniquement par la masse baryonique comme observé. Ceci est difficile à comprendre dans le cadre du paradigme de la matière noire.

- (4) Une relation univoque est observée entre la distribution de matière baryonique et de matière noire à l'intérieur des galaxies, et ce à un point tel que les irrégularités des courbes de vitesse de rotation se produisent précisément là où la distribution de lumière (c'est-à-dire de matière baryonique) présente les mêmes irrégularités [8,9]. Cette correspondance est difficile à comprendre dans le cadre du paradigme de la matière noire, puisque celle-ci est censée interagir peu avec la matière baryonique. Cela pourrait indiquer qu'une mystérieuse interaction existe entre matière noire et matière baryonique, ou bien qu'à l'échelle des galaxies c'est la loi de la gravitation qu'il faut remettre en question.
- (5) Pour ne rien arranger, le modèle cosmologique standard basé sur le paradigme de la matière noire n'a pu se contenter d'invoquer une seule composante inconnue, mais bien deux. En effet la confrontation de la vitesse de récession des galaxies lointaines avec leur distance basée sur l'observation des supernovae de type Ia (dont l'éclat intrinsèque est supposé connu et comparé à l'éclat apparent) semble indiquer que l'expansion de l'Univers accélère [10]. En effet, ces distances sont plus grandes que ce à quoi on s'attend pour un Univers en expansion constante, signifiant qu'il faut remonter plus loin dans le passé pour trouver une vitesse d'expansion donnée, et donc que l'expansion de l'Univers était plus lente à l'origine. Introduite puis rejetée par Einstein, la *constante cosmologique* se révèle bien utile pour expliquer cette accélération. Cette constante traduit dans l'équation d'Einstein l'effet d'une « énergie noire », engendrant une répulsion entre galaxies, et qui de surcroît ne se dilue pas dans l'expansion (ou est créée en continu). La nature de cette énergie noire reste entièrement énigmatique : il ne peut s'agir de l'énergie du vide quantique car elle est trop faible de 120 ordres de grandeur. Tout cela semble plutôt indiquer que quelque chose de fondamental nous échappe à propos de la gravitation.

V. Modifier la gravitation pour sortir du noir ?

Il y a un peu plus de vingt ans, le physicien israélien Mordehai Milgrom [1] s'est demandé si le problème des courbes de rotation des galaxies pourrait être résolu en modifiant la loi de la gravitation de Newton. Comme à grande distance, la vitesse circulaire des étoiles est indépendante du rayon de l'orbite, et qu'un corps en orbite circulaire à vitesse V possède une accélération centripète V^2/r , l'accélération gravitationnelle devrait dès lors suivre une loi en $1/r$. Afin d'obtenir un tel comportement, il postule que, lorsque l'accélération gravitationnelle est plus petite qu'une constante a_0 de l'ordre de l'angström par seconde au carré, elle est donnée par

$$g = (g_N a_0)^{1/2}$$

où $g_N = G M / r^2$ est l'accélération gravitationnelle Newtonienne subie par une particule située à une distance r d'une masse M . Si M ne dépend pas de r , nous voyons que cette équation prédit une accélération gravitationnelle proportionnelle à $1/r$. Notons que si l'on considère le rayon de courbure R associé à la constante cosmologique, on a que a_0 est de l'ordre de c^2/R où c est la vitesse de la lumière. Ceci suggère que cette modification de la gravitation pourrait être liée à l'accélération de l'expansion de l'univers, et que a_0 ne serait pas nécessairement une nouvelle constante de la nature.

Contrairement au paradigme de la matière noire, l'hypothèse de Milgrom permet d'expliquer naturellement la relation de Tully-Fisher liant la quantité de matière baryonique M_b d'une galaxie à la quatrième puissance de la vitesse circulaire V des étoiles à grande distance du centre :

$$V^4/r^2 = g_N a_0 \Leftrightarrow V^4 = G M_b a_0$$

En 1983, Milgrom proposa plusieurs possibilités d'accélération gravitationnelles g possédant les conditions aux limites souhaitées, à savoir $g = (g_N a_0)^{1/2}$ aux faibles accélérations ($g \ll a_0$), et $g = g_N$ aux fortes accélérations ($g \gg a_0$). Une possibilité est :

$$g = (g_N/2) [1 + (1+4a_0/g_N)^{1/2}]$$

où l'on voit que si $g_N \gg a_0$ la fraction en a_0/g_N est négligeable par rapport à 1, et donc $g = g_N$, tandis que si $g_N \ll a_0$, la fraction en a_0/g_N est dominante par rapport à 1 et la racine qui la contient est elle-même dominante par rapport à 1 ce qui donne $g = g_N (a_0/g_N)^{1/2} = (g_N a_0)^{1/2}$.

Plus généralement, les conditions aux limites sont respectées si dans un système à symétrie sphérique g est liée à g_N par l'équation :

$$g_N = \mu(g/a_0) g$$

où la fonction d'interpolation $\mu(x)$ tend vers x pour $x \ll 1$ et vers 1 pour $x \gg 1$. L'exemple ci-dessus correspond à la fonction $\mu(x) = x/(1+x)$.

Des équations de la même forme se retrouvent dans d'autres domaines de la physique. Par exemple, dans un matériau diélectrique (c'est-à-dire qui ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer sur des distances macroscopiques), les atomes présentant des dipôles électrostatiques réagissent à la présence d'un champ électrique extérieur en s'alignant les uns avec les autres de manière à former un dipôle macroscopique. A l'intérieur d'un tel matériau diélectrique, le module du champ électrique E engendré par la charge externe Q située à une distance r du diélectrique est alors donné par l'équation :

$$Q / 4\pi r^2 = D = \varepsilon(E) E$$

où D est le champ de déplacement électrique, et ε est la permittivité du matériau diélectrique (dépendante du champ E). Dans la formulation de Milgrom, la gravitation Newtonienne g_N joue donc le rôle du déplacement électrique D , et la constante de la gravitation G joue le rôle de $1/4\pi$. D'autre part la gravitation réelle g joue le rôle du champ électrique réel E à l'intérieur du diélectrique, tandis que la fonction μ joue le rôle de la permittivité diélectrique ε . Ceci pourrait servir de base à la recherche d'une origine physique pour la gravitation de Milgrom, où le vide pourrait par exemple jouer le rôle d'un milieu « digravitationnel » de permittivité μ .

Cette formulation Newtonienne modifiée de la gravitation est connue sous l'acronyme MOND (Modified Newtonian Dynamics). Elle permet de reproduire les courbes de rotation de toutes les galaxies spirales sans recourir à la matière noire (Figure 2).

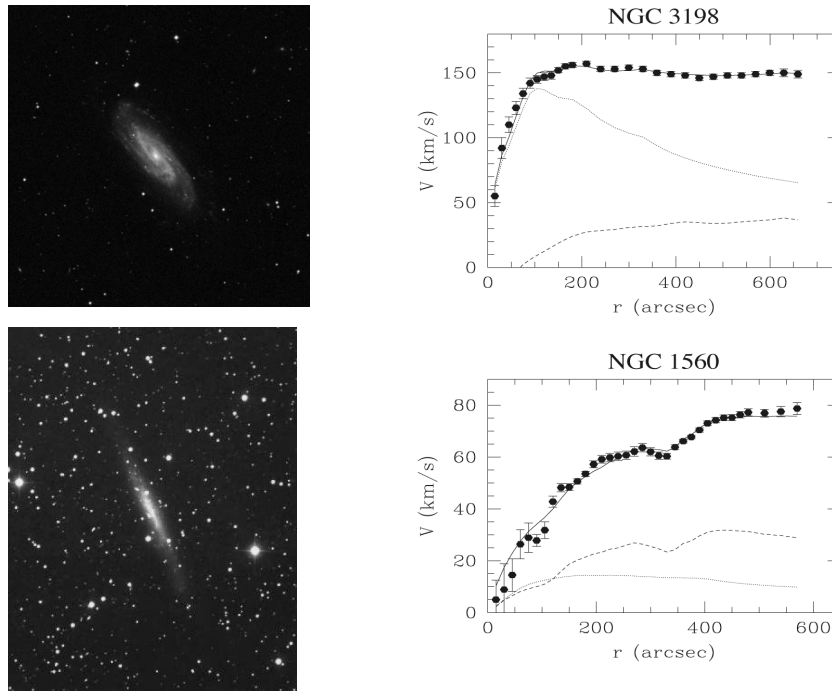


Figure 2 : Image en lumière visible et courbe de rotation de deux galaxies. Au-dessus NGC 3198 dans la constellation de la grande Ourse et en dessous NGC 1560 dans la constellation de la Girafe. Les lignes en traits continus sont les courbes prédites par MOND, celles en traits pointillés et discontinus correspondent aux contributions Newtoniennes du disque stellaire et gazeux respectivement (Crédit: [9])

Notons sur la Figure 2 que les irrégularités des courbes de rotation se produisent précisément là où la distribution de lumière présente les mêmes irrégularités, et que ceci s'explique parfaitement dans le cadre de l'hypothèse MOND [9]. De plus, l'absence d'effets non-Newtoniens au centre des galaxies s'explique par le fait que les accélérations y sont typiquement supérieures à a_0 et que la dynamique y est donc purement Newtonienne. Enfin, nous avons déjà vu que la relation de Tully-Fisher [7] était une conséquence naturelle de MOND. Par conséquent, trois des cinq problèmes évoqués plus haut dans le cadre du paradigme de la matière noire sont résolus grâce à l'hypothèse MOND. La théorie prédit également une formation des barres galactiques statistiquement plus en accord avec les observations que ce qui est prédit dans le paradigme de la matière noire [3], et reproduit la dynamique des petits groupes et des superamas de galaxies sans recourir à la matière noire [2].

Cependant, afin de reproduire les succès du paradigme de la matière noire, une théorie relativiste était nécessaire, notamment pour prédire les effets de lentille gravitationnelle et l'évolution cosmologique de l'Univers. En 2004, un autre physicien israélien, Jacob Bekenstein, célèbre pour sa découverte de l'entropie des trous noirs, a proposé une extension de la relativité générale donnant MOND dans la limite des faibles champs gravitationnels [11], et satisfaisant naturellement au principe d'équivalence faible, mais pas au principe d'équivalence fort puisqu'il y existe un référentiel privilégié (celui du rayonnement de fond cosmologique). L'élément clef qui est adjoint à la relativité générale est un champ de vecteurs, dont Bekenstein suggère qu'il pourrait être la conséquence d'une réduction dimensionnelle d'une théorie gravitationnelle dans un espace-temps à plus de quatre dimensions, comme généralement supposé dans les théories supersymétriques. La dynamique de ce champ de vecteurs est déterminée par une fonction libre qui joue le rôle de la fonction d'interpolation $\mu(x)$ en MOND. De cette manière l'inclinaison des rayons lumineux déviés par les galaxies-lentilles est en accord avec la masse baryonique de ces galaxies. De plus le champ de vecteurs engendre une instabilité qui est suffisante pour créer les structures de l'Univers actuel (galaxies et amas de galaxies) à partir des simples fluctuations baryoniques du rayonnement de fond cosmologique [12]. Enfin, ce champ de vecteurs pourrait naturellement engendrer une accélération de l'Univers, et permettre à la théorie de se passer de l'énergie noire.

Le problème phénoménologique principal de MOND et de sa version relativiste est leur inaptitude à expliquer la dynamique et les effets de lentille gravitationnelle des amas riches en galaxies [13]. Cependant ce problème pourrait être résolu par la présence d'une composante de neutrinos de masse $2\text{eV}/c^2$, sans recourir aux WIMP supersymétriques. Une autre possibilité est que de grandes quantités de matière baryonique (par exemple sous la forme d'objets compacts) soit en fait présente dans le cœur des amas riches. En effet, dans le modèle cosmologique standard basé sur le paradigme de la matière noire, la proportion de baryons dans ces amas par rapport à la quantité de matière noire est beaucoup plus faible que leur proportion à l'échelle cosmologique [14]. Or les simulations ne semblent pas indiquer que ces baryons auraient dû s'échapper des amas, ce qui signifie que, même dans le paradigme de la matière noire, ces baryons pourraient toujours être présents dans ces amas sous une forme peu visible, et être exactement la composante qui manque à MOND pour expliquer la dynamique des amas sans recourir à la matière noire.

Un autre problème de fond pour MOND et sa version relativiste est l'absence de principe de base pour expliquer la valeur de a_0 et la forme de la fonction μ . Rappelons-nous que la relativité générale a quant à elle été entièrement dérivée sur base de l'acceptation du principe d'équivalence fort. Existe-t-il un tel principe qui pourrait servir de fondement théorique pour MOND ? Pour sûr, le principe de Mach est plus en accord avec MOND qu'avec la relativité générale car la dépendance de la fonction μ en l'accélération implique l'existence d'un référentiel privilégié défini par la distribution de matière dans l'Univers tout entier. Un exemple concret d'application du principe de Mach en MOND est le calcul de la vitesse d'échappement galactique pour une étoile dans le voisinage du soleil. En l'absence de matière entourant la Voie Lactée, cette valeur serait infinie en MOND car la vitesse circulaire asymptotiquement plate implique un potentiel gravitationnel logarithmique dont il est impossible de s'échapper. Cependant ce potentiel est régularisé par l'effet du champ externe qui s'applique sur la Voie Lactée, engendré par l'ensemble de la distribution de matière de l'Univers. Ce champ externe, dominé par la gravité du Grand Attracteur (un ensemble d'amas de galaxies situé à plusieurs centaines de millions d'années-lumière de la Voie Lactée), est de l'ordre de $a_0/100$. De manière assez incroyable, nous avons montré que cela mène à une vitesse d'échappement galactique de l'ordre de 550 km/s, à savoir précisément la vitesse maximale observée pour les étoiles du voisinage solaire [4].

Cependant, le principe de Mach en tant que tel est trop vague pour servir de fondement à une théorie de type MOND. Une nouvelle définition rigoureuse de l'inertie pourrait par contre servir de base à cette théorie. Une telle définition pourrait faire intervenir la radiation de Unruh, le rayonnement quantique du vide perçu par un observateur accéléré, qui peut servir de traceur de l'accélération gravitationnelle pour un observateur en chute libre, en contradiction avec le principe d'équivalence fort. De manière intéressante, Milgrom [15] a montré que la radiation liée à l'accélération de l'Univers lui-même ne se ferait sentir que pour des observateurs se déplaçant avec des accélérations inférieures à c^2/R , où R est le rayon de courbure lié à la constante cosmologique. Ceci pourrait donc élégamment expliquer la valeur de $a_0 = c^2/R$. Une version quantique de la gravitation et une modélisation des interactions gravitationnelles avec le vide serait nécessaire pour mener à bien une telle théorie. Ceci n'est bien sûr pas pour demain.

D'un autre côté, si les théories de gravitation modifiées nous mènent à une impasse théorique ou à une infirmation observationnelle, il faudra comprendre les succès actuels de MOND dans le cadre du paradigme de la matière noire. Celle-ci pourrait par exemple être constituée de particules possédant un dipôle gravitationnel [16], dans l'esprit de l'analogie avec l'électro-magnétisme évoquée ci-dessus.

Quoi qu'il en soit, le débat pourrait bientôt être tranché plus près de nous. En effet, depuis 1980, la NASA s'est aperçue que sa sonde *Pioneer 10* affichait une infime décélération de l'ordre de

$$a_p = 6 a_0$$

Si il se confirme que cette décélération [17] est dirigée dans la direction du Soleil, cela voudra plus que probablement dire que pour la première fois la relativité générale aura été prise en défaut dans le système solaire (on sait en effet qu'il ne peut y avoir de matière noire à si petite échelle). La proximité

de cette accélération anormale avec la constante a_0 de MOND ne serait alors peut-être pas un hasard. Il semble aujourd'hui que la même anomalie ait été détectée pour les sondes *Galileo* et *Ulysse*. De plus, les comètes, après leur périple séculaire autour du Soleil arrivent presque toujours avec quelques jours d'avance à leur périhélie. Cette avance a longtemps été imputée à des fuites de gaz, mais l'idée qu'elle pourrait être liée à l'effet Pioneer mériterait de plus amples investigations.

VI. Conclusion

La gravitation, cette force qui nous retient les pieds sur terre en raison de la masse de notre planète, a ouvert la voie de l'unification des phénomènes terrestres (comme la chute des corps) et célestes (comme l'orbite des planètes) lorsque, selon la légende, une pomme est tombée sur la tête de Newton. Cette même gravitation a ensuite révolutionné notre conception de l'espace et du temps lorsqu'Einstein l'a insérée dans sa théorie de la relativité générale et l'a liée à la géométrie de l'espace-temps. Mais cette gravitation *Einsteinienne* est bien différente de ses consœurs, la force nucléaire forte, la force faible et la force électro-magnétique qui ne sont pas définies en terme de géométrie de l'espace-temps. C'est pour cela que la gravitation résiste encore et toujours aux efforts des physiciens qui tentent de l'unifier avec les autres forces dans une « théorie du tout ». La gravitation reste donc un mystère pour les physiciens théoriciens, mais elle présente aussi un mystère pour les astronomes et, comme nous l'avons montré dans cet article, porte peut-être en elle la clef qui permettra de comprendre les effets de « la matière noire » et de « l'énergie noire ». Il est plus que probable que quelque chose de fondamental nous échappe à propos de la gravitation, même au niveau macroscopique, et qu'une approche théorique radicalement neuve de cette force soit nécessaire à la fois pour sortir de la crise actuelle de la physique théorique (unification des forces) et de celle du modèle standard de la cosmologie (recourant à 95% de formes inconnues de matière et d'énergie). D'un autre côté, il est tout à fait possible que les particules de matière noire postulées par les théories supersymétriques existent bel et bien, mais il faudra alors élucider le secret qui se cache derrière leurs mystérieux effets gravitationnels dans les galaxies. En particulier, leur étroite corrélation avec la distribution de matière baryonique devra être comprise. Les dix à vingt prochaines années seront donc, quoi qu'il en soit, parmi les plus passionnantes que la physique et l'astronomie aient connues.

REFERENCES

Le lecteur désirant en savoir plus sur le sujet pourra consulter avec profit la brochure du Centre de Documentation Pédagogique (CeDoP) de l'ULB, rédigée par Laurent Zimmerman et Alain Jorissen, à l'adresse électronique : http://www-astro.ulb.ac.be/Publications/aj_Matsombre.pdf

D'autre part, le livre intitulé *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next* (ISBN-10: 0618551050), de Lee Smolin, présente une vulgarisation extrêmement claire (en anglais) de certains des thèmes les plus ardues évoqués dans cet article.

Les papiers scientifiques référencés dans cet article (ainsi que leur adresse électronique lorsque celle-ci est disponible) sont répertoriés ci-après par ordre d'apparition dans le texte:

[1] M. Milgrom, 1983, *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*, *Astrophysical Journal*, Vol.270, p.365-370

[2] R.H. Sanders, S.S. McGaugh, 2002, *Modified Newtonian Dynamics as an Alternative to Dark Matter*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Vol.40, p.263-317, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0204521>

[3] O. Turet, F. Combes, 2007, *Evolution of spiral galaxies in modified gravity*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol.464, p.517-528, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0701011>

- [4] B. Famaey, J.-P. Bruneton, H.S. Zhao, 2007, *Escaping from modified Newtonian dynamics*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, in press, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0702275>
- [5] B. Moore, S. Ghigna, F. Governato, et al., 1999, *Dark Matter Substructure within Galactic Halos*, Astrophysical Journal, Vol.524, p.L19-L22, <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/9907411>
- [6] B. Famaey, J. Binney, 2005, *Modified Newtonian dynamics in the Milky Way*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.363, p.603-608, <http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/0506723>
- [7] S.S. McGaugh, 2005, *The Baryonic Tully-Fisher Relation of Galaxies with Extended Rotation Curves and the Stellar Mass of Rotating Galaxies*, Astrophysical Journal, Vol.632, p.859-871, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0506750>
- [8] A.H. Broeils, 1992, *The mass distribution of the dwarf spiral NGC 1560*, Astronomy and Astrophysics, Vol.256, p.19-32
- [9] B. Famaey, G. Gentile, J.-P. Bruneton, H.S. Zhao, 2007, *Insight into the baryon-gravity relation in galaxies*, Physical Review D, Vol. 75, id. 063002, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0611132>
- [10] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, et al., 1998, *Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae*, Astrophysical Journal, Vol.517, p.565-586, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9812133>
- [11] J. Bekenstein, 2004, *Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm*, Physical Review D, Vol. 70, id. 083509, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0403694>
- [12] S. Dodelson, M. Liguori, 2006, *Can Cosmic Structure Form without Dark Matter?*, Physical Review Letters, Vol. 97, id. 231301, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0608602>
- [13] G.W. Angus, H.Y. Shan, H.S. Zhao, B. Famaey, 2007, *On the Proof of Dark Matter, the Law of Gravity, and the Mass of Neutrinos*, Astrophysical Journal, Vol.654, p.L13-L16, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0609125>
- [14] A. Blanchard, M. Douspis, 2005, *Evidence for new physics from clusters?*, Astronomy and Astrophysics, Vol.436, p.411-416, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0405489>
- [15] M. Milgrom, 1999, *The modified dynamics as a vacuum effect*, Physics Letters A, Vol.253, p.273-279, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9805346>
- [16] L. Blanchet, 2007, *Dipolar Particles in General Relativity*, Classical and Quantum Gravity, in press, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0609121>
- [17] S.G. Turyshev, V.T. Toth, L.R. Kellogg, et al., 2006, *The Study of the Pioneer Anomaly: New Data and Objectives for New Investigation*, International Journal of Modern Physics D, Vol.15, p.1-56, <http://www.arxiv.org/abs/gr-qc/0512121>