

## Matière noire et gravité modifiée

Le problème de la masse manquante dans l'Univers nous accompagne depuis près de 80 ans. Les astronomes ont réalisé à partir de 1985, il y a 35 ans, que cette matière manquante ne pouvait pas être faite de particules ordinaires, mais devait être constituée de particules exotiques, dont nous n'avons toujours pas la moindre idée de la nature, ni de la masse. Ces particules font l'objet de recherches actives dans les tunnels comme le Grand Sasso depuis 35 ans, mais il n'existe toujours pas d'évidence de leur interaction avec les noyaux des détecteurs, même par des collisions élastiques [I]. Dans les accélérateurs et collisionneurs de particules, comme le LHC (Large Hadron Collider) du CERN, des énergies considérables sont produites, jusqu'à 10 000 fois l'énergie de masse du proton : mais là encore, l'espoir de voir cette énergie se concrétiser en matière/antimatière pour faire apparaître ces nouvelles particules est resté vain. Et si ces particules n'existaient pas ? Comme nous allons maintenant le développer, l'existence de ces particules a été postulée uniquement pour renforcer l'attraction gravitationnelle de la matière ordinaire dans certaines circonstances, lorsque le champ de gravité est faible. Mais ces particules ne participent à aucune autre force, elles n'interagissent pas avec la lumière notamment, et les photons traversent cette matière complètement transparente. La piste d'une gravité modifiée est alors séduisante.

### Comment la matière noire s'est imposée dans le modèle cosmologique standard

Peut-être le premier à parler de matière noire fut Henri Poincaré au début du XX<sup>e</sup> siècle, lorsqu'il s'interroge sur la quantité de matière obscure dans notre Galaxie, la Voie lactée. « Il y a des étoiles que nous voyons, parce qu'elles brillent, mais n'y aurait-il pas des étoiles obscures qui circulent dans l'espace? », il appelle cela la matière noire, par opposition à la matière qui brille, dans son article : *The Milky Way and Theory of Gases*, en 1906. Jan Oort en 1932 parle aussi de matière noire au voisinage du Soleil dans la Voie lactée, pour expliquer le mouvement trop important des étoiles perpendiculairement au plan, pensant que cette masse manquante provient des poussières, gaz, ou astres morts.

Fritz Zwicky en 1937 fut le premier à remarquer l'existence d'une énorme quantité de masse manquante dans l'amas de galaxies de Coma : en appliquant le théorème du Viriel, qui compare l'énergie cinétique des galaxies entre elles, avec leur énergie potentielle, liée à la masse totale de l'amas, il s'aperçoit que cette dernière doit être cent fois plus grande que la masse visible sous forme de galaxies. Curieusement, il ne pense pas possible de déterminer la masse des galaxies avec l'aide de leur vitesse de rotation : il prétend que la viscosité entre étoiles au centre des galaxies est si forte qu'elle impose une courbe de rotation solide. Il a l'idée de mesurer la masse des galaxies par lentille gravitationnelle [II], mais remarque qu'aucun effet n'a pu être observé encore, attendant une plus haute résolution des télescopes. À cause de grosses incertitudes sur les grandeurs mesurées, ce problème de masse manquante n'a pas vraiment été pris au sérieux jusque dans les années 1970, où enfin les courbes de rotation des galaxies spirales [III] se précisent. Vera Rubin a beaucoup œuvré pour établir le caractère général des courbes de rotation des galaxies proches, selon leur type morphologique, et la plupart des courbes étant plates à grand rayon, au lieu de tomber de façon képlérienne loin de la source de masse, essentiellement les étoiles. Ceci a été encore plus solidement établi dans les années 1980 avec les courbes de rotation observées avec le gaz d'hydrogène atomique, à 21cm de longueur d'onde, en radioastronomie. À cette époque, l'idée que toutes les galaxies étaient entourées d'un halo de matière noire était bien établie. En ce qui concerne les amas de galaxies, la fin des années 1960 a vu la découverte par les satellites en rayons X

d'un composant diffus, un gaz très chaud et ionisé, à 100 millions de degrés, dont la masse est bien supérieure à toute la masse visible des galaxies. Il peut y avoir jusqu'à 10 fois plus de masse dans ce gaz chaud que dans les galaxies, et ce plasma représente une grande partie de la masse manquante qu'avait vue F. Zwicky dans l'amas de Coma. On sait aujourd'hui qu'il reste tout de même de la masse invisible, correspondant au moins à 83% de la masse totale.

### **Le contenu de l'Univers**

Aujourd'hui, nos connaissances sur la répartition des divers contenus de l'Univers a beaucoup progressé, et l'on parle de la cosmologie comme d'une science de précision. La matière ordinaire qui nous entoure, formée d'atomes et de molécules, et en fin de compte de noyaux composés d'un nombre variable de neutrons et de protons, les baryons, n'est qu'une très faible partie du contenu de l'Univers, de l'ordre de 5%. Ce pourcentage de 5% pour la matière ordinaire était déjà connu dans les années 1950, car il permet d'expliquer la nucléosynthèse primordiale des éléments légers, comme le deutérium, l'hélium, le lithium. Ces éléments se forment essentiellement dans les premières minutes après le Big-Bang, et seule cette fraction de 5% de baryons conduit aux abondances observées. En revanche, ce n'est qu'en 1998 que la mesure d'un précieux indicateur de distance, les supernovae de type Ia (SNIa), révèle que l'expansion de l'Univers s'accélère. Alors que l'on croyait jusque-là que la seule force contrôlant l'expansion de l'espace était la gravité, et donc que l'expansion de l'Univers ne pouvait que se ralentir, à cause de l'attraction gravitationnelle de toute sa masse, les SNIa agrandissent encore notre Univers. L'expansion s'accélère sous l'effet d'une force répulsive, une densité d'énergie à pression négative, appelée l'énergie noire. Cette énergie représente 70% du contenu de l'Univers, comme l'a confirmé un faisceau d'observations, de nature indépendante. L'observation du fond de rayonnement cosmologique microonde, vestige du Big-Bang, a permis de montrer que les photons qui s'échappent du Big-Bang nous parviennent en ligne droite après leur long voyage de 13,4 milliards d'années : la courbure de l'Univers est nulle. Les lentilles gravitationnelles et les déformations des images des galaxies de l'arrière-plan, sont maintenant cartographiées sur de très grandes échelles, et la densité de matière de l'Univers peut être mesurée avec précision. Il existe donc 25% de matière non-baryonique, 5% de matière ordinaire et 70% d'énergie noire.

C'est au milieu des années 1980 que la mesure des fluctuations primordiales dans le fonds cosmologique a donné des valeurs d'amplitude si petite, qu'il n'était plus possible de former des galaxies et des grandes structures avec de la matière ordinaire seulement. Celle-ci interagit avec le rayonnement, elle est ionisée [IV] dans les premières époques de l'Univers et la pression des photons empêche l'effondrement gravitationnel, jusqu'à sa recombinaison. La matière noire, sans interaction avec les photons, peut s'effondrer plus tôt, et forme les embryons de galaxies, dans lesquels les baryons vont former les étoiles. Dès cette époque, certains candidats pour la matière noire sont éliminés : les neutrinos et toutes les particules de faible masse qui vont à une vitesse proche de la lumière lors de la formation de ces embryons, et qui empêcheraient les structures de petite taille de s'effondrer. Ces particules « chaudes » ne conviennent pas, et le modèle standard devient la matière noire « froide ».

### **Un candidat privilégié**

Un candidat pour cette matière noire est très vite trouvé. Une extension du modèle standard des particules fait l'hypothèse qu'il existe toute une série de particules élémentaires « miroir » des particules connues, et super-symétriques : à chaque fermion correspond un boson et réciproquement. Le meilleur candidat pour la matière noire est donc la particule la plus stable de cet ensemble : c'est un fermion, le neutralino. Il est neutre et constitue lui-même sa propre antiparticule. Il interagit uniquement par l'interaction faible, d'où son nom WIMP (Weakly

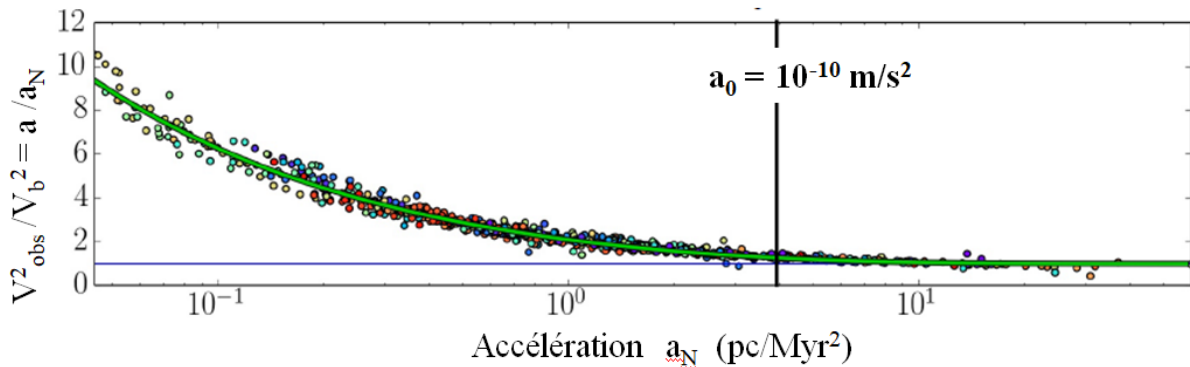
Interacting Massive Particle). Lorsque le rayonnement domine au début de l'Univers, il peut créer ces particules, qui s'annihilent et se recréent. Puis avec l'expansion, l'énergie n'est plus disponible pour recréer ces particules, dont la densité décroît par annihilation jusqu'à ce que le milieu soit si dilué que le temps d'annihilation devient supérieur à l'âge de l'Univers. La densité restante de matière noire est alors de 25%, compatible avec les observations, si la masse du neutralino fait environ 100 fois la masse du proton. Des particules dans ce domaine de masse auraient pu être formées au LHC, mais n'ont pas été détectées. De même, dans les accroissements de densité, comme dans le Soleil, ou au centre de la Voie lactée, la densité des particules pourraient redevenir assez forte pour permettre des annihilations, mais aucun rayon gamma en résultant n'a été observé. Les recherches par collision élastique avec des noyaux de détecteurs ont toutes été vaines. La plus performante actuellement est l'expérience Xénon1t, contenant plusieurs tonnes de xénon liquide dans le tunnel du Grand Sasso. Elle a permis récemment la mesure de la plus grande demi-vie ( $1,8 \cdot 10^{22}$  ans) d'un des isotopes quasi-stables du xénon, le  $^{124}\text{Xe}$ .

### **D'autres candidats outsiders**

Si la supersymétrie ne se révèle pas finalement, il faut alors chercher des candidats dans d'autres directions. Dans le modèle standard de particules élémentaires, il existe trois neutrinos, de différentes saveurs : électronique, muonique et tauique. Tous sont de chiralité gauche, correspondant au sens de la projection de leur spin par rapport à leur vitesse. Ils ont une masse très faible, de l'ordre du millionième de la masse d'un électron, et ne pèsent pas lourd dans le bilan total. Par des considérations de symétrie, il est possible d'introduire 3 autres neutrinos, appelés neutrinos stériles, car ils n'interagissent aucunement avec le reste des particules, et de chiralité droite. Ces neutrinos seraient d'autant plus lourds, que les neutrinos « actifs » sont légers. Ces neutrinos lourds seraient en nombre suffisants pour rendre compte de la matière noire, et ne seraient soumis qu'à la force de gravitation. Des contraintes sur leur masse ne peuvent être fournies que par l'astrophysique, et la probabilité de trouver des structures de petite taille dans la toile cosmique. L'étude du gaz en absorption devant les quasars lointains donne une limite inférieure de l'ordre de 5 keV [V], soit  $1/100^e$  de la masse d'un électron.

Une autre particule est en vogue ces dernières années, l'axion, ou ALP (Axion Like Particle). L'axion est un boson [VI], inventé dans les années 1970 pour expliquer une violation de symétrie CP, avec une masse déjà petite, milli ou micro eV. Celui qui nous intéresse comme candidat de matière noire, a une masse encore bien plus petite, de l'ordre de  $10^{-22}$  eV. Cette masse est choisie pour avoir une longueur d'onde de de Broglie, i.e. longueur quantique inversement proportionnelle à la masse, de l'ordre de 3000 années-lumière, afin de correspondre à la taille des cœurs [VII] de matière noire observés au centre des galaxies. Par construction, la particule satisfait déjà une contrainte observationnelle, qui est un des problèmes du modèle standard, avec la matière noire : les simulations montrent que les halos de matière noire froide faite de WIMPS, devraient tous former des pics de densités au centre des galaxies, alors que des cœurs sont observés.

Si l'ALP se comporte comme de la matière noire froide à grande échelle, et satisfait à la formation de cœurs au centre des galaxies, son aspect quantique entretient des fluctuations de densité importante, sans cesse renouvelées. Ces fluctuations dans le potentiel gravitationnel créent des perturbations dans un disque d'étoiles, qui l'échauffe et l'épaissit. Cela pose des contraintes sur la masse de la particule ALP, en particulier une valeur minimum. Ces contraintes conduisent à des tensions pour satisfaire toutes les observations.



**Figure 1 :** Rapport entre la masse dynamique et la masse visible des galaxies, en fonction de l'accélération Newtonienne  $a_N$ . Lorsque le champ de gravité est fort ( $a_N \gg a_0$ ), ce rapport est égal à 1, et la masse visible suffit. En champ de gravité faible ( $a_N \ll a_0$ ), la masse manquante croît, c'est le régime où MOND doit amplifier la gravité. D'après Mc Gaugh (2020, Galaxies, vol. 8, issue 2, p. 35).

### Une solution sans matière noire

Si aucune particule ne parvient à remplir toutes les contraintes, et surtout si aucune particule n'est découverte dans les accélérateurs ou dans les tunnels, il est alors séduisant de considérer sérieusement l'autre solution, consistant à modifier la gravité. Dans le contenu de l'Univers, seulement 5% sont de la matière ordinaire, et 95% sont complètement inconnus, et représentent le « secteur noir ». Mais ce secteur n'est là que pour rendre compte d'effets gravitationnels surprenants dans le cadre de notre théorie standard de la gravité. Il est encore possible que ce secteur noir ne soit que le reflet de notre ignorance de cette loi.

Dès 1983, Moti Milgrom proposait un changement de loi, pour rendre compte sans matière noire des courbes de rotation de toutes les galaxies. Il avait remarqué judicieusement que la matière noire était nécessaire uniquement en champ de gravité faible. Lorsque l'accélération de gravité (ou la force par unité de masse) est supérieure à une valeur critique  $a_0$ , onze ordres de grandeur ou cent milliards de fois plus faible que le champ de gravité terrestre, la gravité est celle de Newton. Notamment dans tout le Système solaire, c'est le cas. Par contre, en champ plus faible que  $a_0$ , la dynamique des galaxies nécessite de la masse invisible. Le rapport entre masse dynamique et masse visible est de plus en plus grand lorsque le champ de gravité décroît, alors que ce rapport reste égal à 1 en champ fort (cf fig. 1). Dans les galaxies massives, comme la Voie lactée, le champ n'est faible que loin du centre, d'où le halo de matière noire entourant la Galaxie. Pour une galaxie naine, c'est dès le centre de la galaxie que la gravité est faible, et que la matière noire domine. La modification de la gravité revient à remplacer le champ faible par sa racine carrée, comme indiqué dans l'encadré 1. Ainsi, loin d'une source ponctuelle, la force de gravitation ne décroît plus comme le carré de la distance, mais comme la distance. Asymptotiquement, les courbes de rotation dans les parties externes des galaxies vont tendre vers un plateau, comme le montrent les observations. De plus, la remarquable loi d'échelle qui relie la masse de matière ordinaire (étoiles+gaz) au plateau de vitesse de rotation dans les galaxies, la loi de Tully-Fisher, est satisfaite automatiquement dans ce modèle (cf Encadré 1, et fig. 2)

===== ENCADRE 1

L'ordre de grandeur de l'accélération de gravité  $g$ , ou la force par unité de masse  $F/m = g$  qui s'exerce sur les étoiles en rotation dans un disque galactique est plusieurs ordres de grandeur inférieure à ce qui nous est familier sur Terre ou dans le Système solaire. Cette accélération est voisine de  $a_0 = 10^{-10} \text{m/s}^2$ . La modification MOND revient à modifier cette accélération  $g$ , lorsque la valeur Newtonienne  $g_N$  devient plus petite que l'accélération critique  $a_0$ . En quelque sorte, l'accélération serait :

$$g = g_N \text{ pour } g_N \gg a_0$$

$$g = \sqrt{a_0 g_N} \text{ pour } g_N \ll a_0$$

avec une valeur de transition entre les deux régimes, donnée par la fonction d'interpolation  $\mu(g/a_0)$ . Cette fonction entre dans la construction de l'action et du Lagrangien, qui garantit toutes les conservations (énergie, moment cinétique..), et permet de déduire l'équation de Poisson modifiée, reliant le potentiel gravitationnel  $\Phi$  à la densité de matière  $\rho$  :

$$\nabla \cdot \left[ \mu \left( \frac{|\nabla \Phi|}{a_0} \right) \nabla \Phi \right] = 4\pi G \rho$$

où  $G$  est la constante de gravitation.

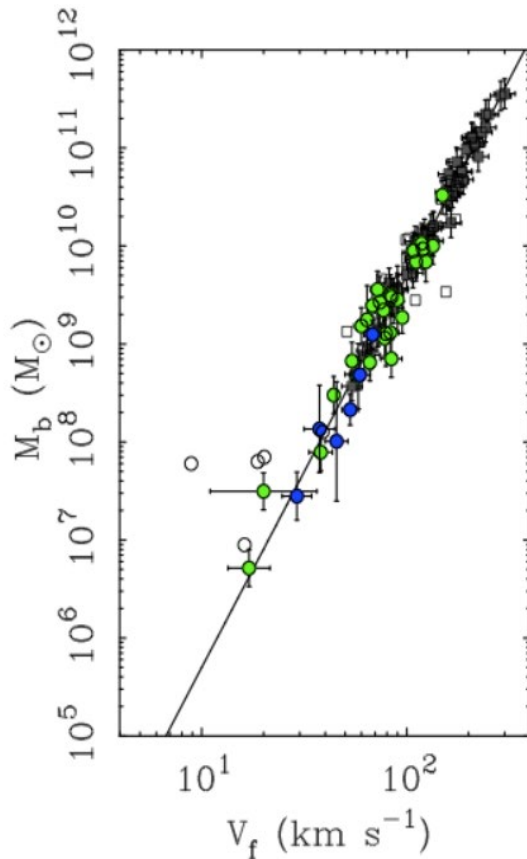
Pour une masse ponctuelle  $M$  par exemple, la vitesse de rotation circulaire  $V_c$  d'une particule-test à la distance  $R$  est dans le cas Newtonien donné par la relation

$$V_c^2/R = g_N = GM/R^2.$$

Lorsque cette accélération  $g_N$  devient très faible devant  $a_0$ , elle devient

$V_c^2/R = g = \sqrt{a_0 GM/R^2}$ . Les termes en  $R$  s'annulent, et  $V_c^4 = a_0 GM$ , ce qui explique le plateau de vitesse asymptotique aux bords des galaxies. La même relation correspond exactement à la loi de Tully-Fisher, où la masse totale de baryons des galaxies spirales varie comme la puissance 4 de leur vitesse asymptotique observée (fig. 2).

La théorie a été étendue à une version relativiste et covariante, permettant le calcul des lentilles gravitationnelles, avec un champ tensoriel, vectoriel et scalaire TeVeS, par Bekenstein en 2004.



**Figure 2 :** Relation de Tully-Fischer entre la masse baryonique  $M_b$  (étoiles+gaz) des galaxies et la vitesse  $V_f$  du plateau asymptotique aux bords des galaxies, un indicateur de la quantité de matière noire. D'après Mc Gaugh (2020, Galaxies, vol. 8, issue 2, p. 35

Une accélération varie comme une densité de surface  $M/R^2$  à une constante près, et la valeur critique de  $a_0$  correspond à une densité de surface critique  $\Sigma_0 = 150 M_\odot/\text{pc}^2$ . Pour les galaxies massives comme la Voie lactée, la densité de surface est supérieure à cette valeur jusqu'à la distance au centre où se trouve le Soleil environ, et l'on conçoit que la nécessité de matière noire ne se fasse sentir que vers l'extérieur. Pour les galaxies naines par contre, toute la galaxie est dans ce domaine. Cette modification de la gravité parvient à reproduire toutes les courbes de rotation, qu'elles soient encore montantes, comme pour les naines, ou descendantes comme dans les géantes. Ce n'est qu'asymptotiquement qu'est atteint le plateau de vitesse.

### Tests de MOND

Rendre compte des vitesses de rotation sans matière noire ne suffit pas. Est-ce que les galaxies peuvent se former et sont-elles stables en gravité modifiée ? Un des arguments qui avaient convaincu les astronomes de l'existence de halos de matière noire dans les années 1970 était précisément que ces halos stabilisaient les galaxies envers la formation de barres stellaires. Avec mon étudiant Olivier Tiret, nous avons effectué des simulations de l'évolution des galaxies à disque avec MOND, et comparé avec des simulations avec matière noire, en gardant exactement le même état initial (positions et vitesses). Le test est concluant, les galaxies évoluant sans matière noire correspondent tout à fait aux observations, et la

fréquence des barres et spirales au cours de leur vie est comparable dans les deux modèles. Ceci prend en compte la dynamique du gaz, de la formation d'étoiles, et l'intermittence des barres qui peuvent s'affaiblir, puis renaître au cours de la vie d'une galaxie. L'interaction entre galaxies est un test plus critique : le temps de fusion entre les deux galaxies est considérablement raccourci par la présence des halos noirs qui absorbent l'énergie et le moment cinétique du mouvement orbital relatif. En gravité modifiée, le temps de fusion est beaucoup plus long, et il faut s'attendre à moins de fusions au cours de l'évolution. Mais le nombre observé de paires de galaxies en interaction peut être interprété aussi bien par un grand nombre de fusions rapides que par un petit nombre de fusions lentes, et les deux modèles ne peuvent pas être départagés.

MOND a des problèmes dans les amas de galaxies : les régions où le champ de gravité est plus faible que  $a_0$  ne sont pas assez nombreuses, et la gravité modifiée ne peut rendre compte que d'une partie de la matière noire. Toutefois, le recensement de tous les baryons n'est pas encore terminé, et il est possible de se servir des baryons obscurs pour résoudre le problème. Ceci est mis en lumière lors de la collision entre amas de galaxies, comme dans le cas du célèbre boulet (cf fig. 3). Dans la collision, le gaz chaud émetteur de rayons-X est freiné, alors que les galaxies et la matière noire se traversent sans se voir, il y a séparation de la matière ordinaire et exotique. La séparation en soi n'est pas le problème principal (dans une galaxie comme la Voie lactée, les baryons sont au centre et le halo noir autour).



**Figure 3 :** La collision entre deux amas, appelée le Boulet. En rouge est représentée l'émission en rayons X du gaz chaud intra-amas, et en bleu la cartographie de masse totale, déduite des lentilles gravitationnelles faibles. Le tout est superposé sur une image optique du ciel, les galaxies des amas sont des taches blanches concentrées à gauche dans l'amas le plus massif, et à droite dans le petit amas, qui vient de traverser le gros. Noter le cône rose à droite,

qui indique une onde de choc, la vitesse relative des amas étant supersonique à Mach 3 (soit  $V=4700\text{km/s}$ ). D'après Clowe et al (2006, A&A 451, 395)

Récemment un type de galaxies a fait couler beaucoup d'encre : les galaxies ultra-diffuses ou UDG. Ce sont des galaxies de grande taille, comme la Voie lactée, mais de masse stellaire très faible. Leur densité de surface est donc très faible, d'où le nom d'ultra-diffuse. Certaines sont dominées par la matière noire, et d'autres ont une dynamique qui porte à croire qu'elles en sont dépourvues. Cette grande différence est un défi pour n'importe quel modèle. Beaucoup de ces galaxies sont en groupe ou dans les amas. Est-ce l'interaction entre galaxies la cause ? Comment vider une galaxie de sa matière noire, en gardant le gaz et les étoiles ? En ce qui concerne MOND, la solution a été facile à trouver. Ces galaxies en isolation doivent en effet avoir une gravité très amplifiée, du fait de leur densité de surface inférieure à la densité critique  $\Sigma_0$ . Par contre, lorsqu'elles sont entourées de galaxies voisines, le champ de gravité extérieur crée l'effet EFE (External Field Effect) qui réduit significativement l'amplification de MOND. Il est alors possible d'expliquer la dynamique de ces galaxies sans matière noire apparente.

Lors de la formation des galaxies, les fluctuations de densité sont très faibles, de même le champ de gravité, et l'amplification de MOND permet l'effondrement rapide des structures. Toutefois, il n'est pas possible de reproduire correctement la répartition spatiale des fluctuations primordiales dans la carte du fond cosmique microonde. D'autres théories devront prendre le relais.

### **De nombreuses autres théories de gravité modifiée**

La théorie de relativité générale jouit d'un très grand succès sur Terre et dans tout le Système solaire, où des expériences précises ont pu être effectuées. Mais est-il toujours possible de l'utiliser par extrapolation, quelles que soient les circonstances, en champ de gravitation très faible ou très fort, au-delà de son domaine de validité ? Déjà il est bien connu que le domaine de la gravitation, qui contrôle l'évolution de l'Univers, n'a pas encore été unifié avec le domaine quantique. Que se passe-t-il près d'un trou noir ? Certainement la singularité au centre et la densité infinie devront être remplacées par une théorie adéquate. La gravitation quantique est un domaine de recherche fondamentale en plein travaux.

Du côté des champs faibles, seule l'astrophysique aux échelles galactiques permet de faire des expériences, et nous révèle l'existence du secteur noir (matière et énergie noires), qu'il est tentant d'essayer de résoudre par un changement de la loi de gravité. C'est ainsi qu'un grand nombre de théories sont proposées, faisant intervenir des champs supplémentaires, impliquant donc une cinquième force, à côté des quatre autres connues (forces nucléaires forte et faible, force électromagnétique, gravitation). Certaines théories aimeraient entraîner dans leurs modifications de la gravité la solution à la fois de la matière noire et de l'énergie noire. Jusqu'à présent, bien que séduisantes, aucune de ces tentatives n'a réussi à résoudre tous les problèmes tout en restant compatibles avec toutes les observations. Certaines de ces théories font appel à la mécanique quantique, comme le phénomène contre intuitif de l'intrication. Lorsque deux particules ont interagi pendant un certain temps, et qu'elles s'éloignent à grande distance, elles restent intriquées, connectées, si bien qu'un changement d'état sur une particule se répercute sur l'autre immédiatement. L'impossibilité pour tout signal de se déplacer plus vite que la lumière semble alors violée. Une interprétation de la gravitation comme phénomène émergent basé sur l'intrication a été proposé par Erik Verlinde en 2016.



Dans cette théorie, la gravité n'est pas une force à proprement parler, mais émerge de la maximisation de l'entropie. Il existe des phénomènes à petite échelle, qui correspondent à un très grand nombre de degrés de liberté. Tous ces degrés de liberté se retrouvent à l'échelle macroscopique dans des variables qui donnent l'impression d'une force, comme l'agitation brownienne des atomes d'un gaz parfait donne l'impression d'une température à l'échelle macroscopique. Il est possible de définir à l'échelle microscopique une entropie qui serait maximum lorsque deux systèmes seraient complètement imbriqués dans leur fonction d'onde quantique, et minimum lorsqu'ils seraient isolés. Les variations de l'entropie d'intrication, dues à la présence de la matière baryonique peut expliquer l'émergence de la gravité, selon Verlinde. Le lien avec la relativité générale est que la géométrie de l'espace-temps représente la structure de l'intrication au niveau microscopique. L'entropie est diffuse dans l'Univers comme une énergie noire. En exploitant la maximisation de l'entropie, dans les régions de densité faible, il est possible de retrouver les équations du champ de gravité équivalent. Dans le domaine des galaxies, les équations de MOND sont retrouvées. Dans les amas de galaxies, l'amplification de la gravité est supérieure à ce qu'elle était avec MOND, et cette théorie permet d'expliquer aussi les amas, ce qui a été testé sur les cartographies de masse totale, faites grâce aux lentilles gravitationnelles faibles. Il reste encore beaucoup de travaux à faire pour tester ce modèle en toutes circonstances.

### Où en sommes-nous ?

Ces dernières années, le mystère de la matière noire s'est épaissi, et nos principaux candidats de matière non-baryonique, basés sur la supersymétrie, se sont éloignés. La nature des particules est de plus en plus obscure, leur masse allant de  $10^{-22}$  eV pour des axions à  $10^{12}$  eV (les WIMPS). Il est possible que la matière noire soit « tiède », avec des neutrinos stériles de masse de l'ordre de 5 keV ou plus. Les divers candidats n'ont pas tous les mêmes succès, dans leur comparaison avec les observations astrophysiques. Le modèle standard présente des difficultés à l'échelle des galaxies, qui pourront peut-être se résoudre lorsque la physique des baryons sera mieux comprise.

En parallèle, les théories de gravité modifiée se développent, et si aucune ne parvient à représenter totalement les observations, l'espoir est d'étendre la relativité générale dans les domaines de l'astrophysique, où elle n'est pas encore validée, et de l'unifier à la théorie quantique.

### Notes

[I] Collisions sans dissipation d'énergie.

[II] Déviation des rayons lumineux par une masse, conduisant à une amplification/déformation des images comme pour une lentille optique.

[III] Les galaxies spirales sont des disques, où les étoiles et le gaz tournent autour du centre : la courbe de rotation est l'évolution de cette vitesse en fonction de la distance au centre.

[IV] Juste après le Big-Bang, la température est bien supérieure à 3000K, et la matière est composée d'électrons et de protons. Dans l'expansion, la température descend en-dessous de 3000K, où protons et électrons se recombinent en atomes d'hydrogène.

[V] eV (electron-Volt) est une unité d'énergie, mais aussi de masse (à la constante  $c^2$  près), égale à  $1,8 \cdot 10^{-36}$  kg.

[VI] Les particules élémentaires se divisent en fermions et bosons, ces derniers peuvent s'accumuler dans le même état d'énergie contrairement aux premiers.

[VII] La distribution de matière noire, observée grâce aux courbes de rotation, montre un plateau de densité au centre, alors que les simulations du modèle standard prévoient un pic de densité au centre.