

Dark Side Story

Dans le no man's land entre astrophysique et physique des particules, la matière noire est l'objet de toutes les passions et la bande des "mauviettes" affronte le clan des "machos"... Faut-il vraiment croire que 90% de l'univers nous reste invisible? Pourquoi les galaxies semblent-elles plus lourdes que toutes les étoiles réunies? Pourquoi les théoriciens tiennent-ils tellement à une densité de l'univers égale à la densité critique alors que toutes les observations confirment qu'elle est bien plus faible?

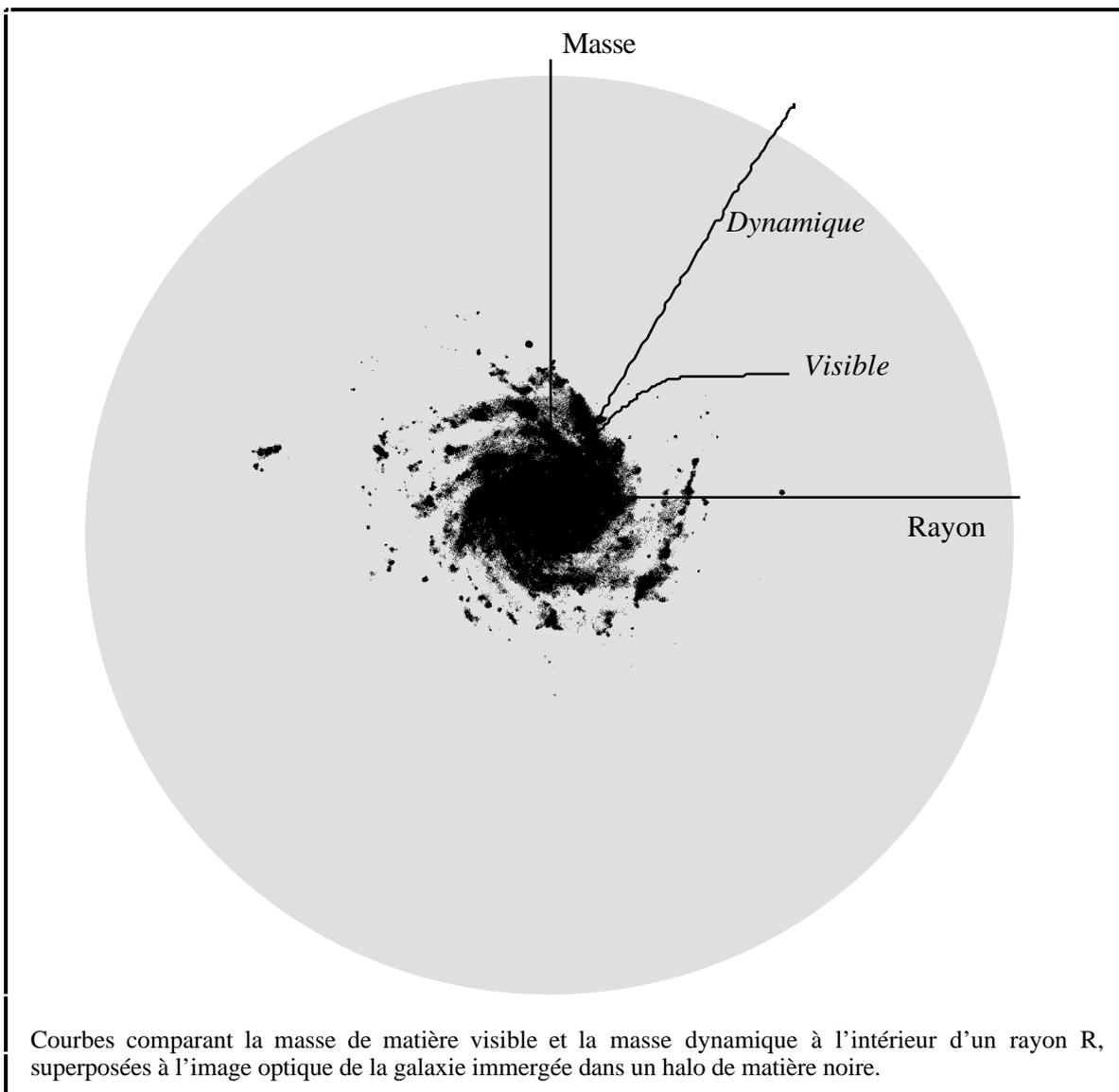
Galaxies

La masse des galaxies peut être estimée à partir de leur lumière: les modèles d'évolution stellaire permettent en effet de remonter de la couleur et de l'intensité de la lumière reçue à la masse des étoiles qui l'ont rayonnée, et d'estimer ainsi la contribution des étoiles à la masse d'une galaxie. La quantité de gaz (essentiellement l'hydrogène et l'hélium) et de poussières peut aussi s'estimer à partir de l'intensité de leurs raies d'émission et d'absorption. On observe ainsi que les galaxies elliptiques contiennent très peu de gaz (peut-être a-t-il été entièrement utilisé dans la formation des étoiles), que les galaxies spirales en contiennent encore une masse comparable à celle des étoiles, et que la masse de poussière est négligeable (ce qui ne l'empêche pas d'être très absorbante à certaines longueurs d'onde). La répartition des étoiles est à peu près la même que celle du gaz: très grande au centre des galaxies mais décroissant très vite vers la périphérie.

Dans une galaxie spirale, la matière ne tombe pas vers le centre car elle est maintenue en équilibre par une rotation autour du centre, comme les planètes autour du Soleil. Cette rotation concentre d'ailleurs les étoiles dans un plan, et les galaxies spirales ont la forme d'un disque très aplati. Kepler et Newton nous ont appris à calculer la masse du Soleil à partir du rayon de l'orbite d'une planète et de sa période de révolution. On fait exactement la même chose pour une galaxie spirale: la mesure de cette vitesse de rotation à une distance R du centre permet de calculer la masse $M_{\text{dynamique}}(R)$ intérieure à ce rayon R . Près du centre, cette masse dynamique est voisine de la masse M_{visible} obtenue à partir de la luminosité du gaz et des étoiles, mais elle continue à augmenter bien au-delà de la zone lumineuse! Apparemment il y a beaucoup de matière invisible dans une galaxie, et cette

matière invisible est beaucoup moins concentrée que celle que nous voyons.

On en déduit que le disque visible n'est que la partie émergée de l'iceberg, et qu'il est immergé dans un halo sombre 3 à 5 fois plus étendu, et 10 fois plus massif. Le comportement des amas globulaires et des galaxies satellites nous apprend de plus que le halo est grossièrement sphérique et que s'il tourne, c'est beaucoup moins vite que le disque. Un disque mince en rotation est d'ailleurs instable s'il n'est pas immergé dans un halo sphérique, dont l'existence est ainsi indirectement confirmée.



Il n'y a pas de rotation d'ensemble pour les galaxies elliptiques, et le raisonnement précédent ne s'applique pas. Mais les étoiles sont animées de vitesses importantes, et on peut estimer la masse nécessaire pour les retenir dans la galaxie. Là encore, la masse

requis est environ 10 fois plus grande que celle que l'on estime à partir de la quantité de lumière reçue. Ce résultat est confirmé par l'analyse du rayonnement X de ces galaxies: il est dû à du gaz chaud entre les étoiles, et la variation de son intensité du centre au bord reproduit la variation de la masse estimée par la cinématique des étoiles (il y a très peu de gaz et il n'est donc pas responsable de l'excédent de masse: il sert uniquement de traceur).

On en conclut que la densité moyenne^[1] des galaxies est $\rho_{\text{galaxies}} = 0,03 \pm 0,01$ alors que la densité des étoiles visibles dans l'univers ne dépasse guère $\rho_{\text{étoiles}} = 0,003$, et celle du gaz est du même ordre.

Mais est-ce bien de la matière noire? Il se pourrait que les étoiles soient bien là, mais que leur lumière soit absorbée par de grandes quantités de poussière: des galaxies opaques en quelque sorte. La question est controversée, car les observations sont contradictoires et sujettes à des biais difficiles à éliminer. Il semble néanmoins que l'absorption (réelle) due à la poussière ne suffit pas à expliquer l'écart considérable entre masse visible et masse dynamique. De plus cette poussière (comme les étoiles dont elle absorberait la lumière) se trouverait dans le plan du disque, et n'est donc pas équivalente à un halo sphérique.

La gravitation joue un rôle crucial dans toute cette affaire, mais la plus ancienne force connue est aussi la plus mal connue. A-t-on le droit d'appliquer les lois de la gravitation, établies par Newton pour le mouvement des planètes, au mouvement des galaxies, à une échelle des millions de fois plus grande? Certains pensent que l'extrapolation est injustifiée, et qu'en modifiant la loi de la gravitation à grande distance on réconcilie masse visible et masse dynamique. D'autres pensent que la gravitation n'est pas le seul acteur et que d'autres forces (magnétiques?) peuvent intervenir. Sans oublier qu'il est difficile de tenir compte de tous les biais dans des observations délicates.

Machos et mauviettes

Acceptons-donc l'idée que 90% de la masse des galaxies n'est pas due aux étoiles. De

¹ En unités de la densité critique: $\Omega = 1$ correspond à un espace plat, $\Omega > 1$ à un espace fermé, de courbure positive, voué à s'effondrer un jour, et $\Omega < 1$ à un espace ouvert éternel.

quoi s'agit-il? La liste des candidats est très longue, des plus naturels aux plus exotiques, mais les deux types principaux sont les "machos" et les "mauviettes". Une "mauviette" (traduction libre de l'américain "wimp", acronyme de Weakly Interacting Massive Particle, soit Particule Lourde Interagissant Faiblement) serait une nouvelle particule élémentaire, sensiblement plus lourde qu'un proton mais n'interagissant que faiblement avec la matière ordinaire (ce qui expliquerait qu'on ne l'ait jamais vue). Un tel objet trouve (parfois difficilement) une place dans certaines extensions du modèle standard de la physique des particules. Une particule élémentaire interagissant peu perd difficilement son énergie (pas de perte par rayonnement ni par collision), et cela expliquerait que le halo soit resté sphérique tandis que la matière ordinaire, perdant une grande partie de son énergie initiale, s'est condensée dans un disque.

Certains candidats au titre de "mauviette" sont morts-nés. Les premiers résultats de l'accélérateur LEP au CERN ont exclu la possibilité d'un nouveau neutrino, plus lourd qu'un proton. Le "cosmion", une "mauviette" qui résolvait en prime le problème des neutrinos solaires en refroidissant légèrement le cœur du Soleil, voit son territoire se réduire comme une peau de chagrin au fur et à mesure qu'expériences de physique des particules et amélioration des modèles solaires restreignent les possibilités pour sa masse et l'intensité de sa (faible) interaction. Le "CHAMP", sorte de proton superlourd, est exclu par les limites sur l'existence d'eau superlourde ou d'autres isotopes superlourds. Les physiciens explorent toutes les voies, mais ils sont prêts à enterrer leurs modèles les plus chéris s'ils se révèlent vraiment en contradiction avec l'observation. Il reste, provisoirement, quelques survivants comme les neutrinos très lourds (plus de 1000 fois la masse du proton), ou les neutralinos (une rustine inventée par des théoriciens pour boucher un trou du modèle standard). Reste à trouver le coupable, autrement dit à détecter en laboratoire la particule responsable de la matière noire (si elle existe), et plusieurs groupes tentent actuellement de le faire en rivalisant d'ingéniosité. La tâche est difficile puisque cette particule est extrêmement discrète, par définition!

Mais il n'est pas exclu que la matière noire soit en fait composée de particules très légères et très nombreuses. Le candidat rêvé est alors le neutrino léger bien connu, qui possède un énorme avantage sur ses concurrents: il existe! Mais sa masse est inconnue. Les astrophysiciens ne l'aiment pas beaucoup, car sa présence en grande quantité rendrait encore plus difficile la formation des galaxies. Une alternative est l'axion, autre rustine

qui bouche un autre trou du modèle standard: en choisissant bien sa masse, il pourrait constituer la matière noire, aider la formation des galaxies, et rester indétectable encore quelques années.

Si toutes ces particules vous semblent douteuses, alors tournez-vous vers les “machos”. Un “macho” (pour MAssive Compact Halo Object, soit Objet Massif Compact du Halo) désigne de la matière normale (d’honnêtes protons, neutrons et électrons) sous une forme inhabituelle. Il ne peut s’agir de gaz ni d’étoiles normales, qui sont bien vus, ni d’étoiles peu lumineuses car certaines seraient assez proches pour être vues. Par contre un trou noir est... noir, et permet de dissimuler beaucoup de masse. Un halo rempli de trous noirs ferait bien notre affaire! Mais les trous noirs résultent de l’effondrement d’une étoile massive après son explosion en supernova, explosion qui disperse des éléments lourds dans le milieu interstellaire. Beaucoup de trous noirs implique beaucoup de supernovas, donc beaucoup d’éléments lourds, trop en fait. A moins que l’étoile soit si grosse que l’explosion ne puisse avoir lieu et qu’elle arrive directement à l’étape du trou noir. Un trou noir très massif, $10^{4\pm 2}$ masses solaires, serait un bon “macho” capable de dissimuler beaucoup de matière dans le halo.

Le second type de “macho” est au contraire une très petite étoile: une étoile de moins de 0,1 masse solaire est trop froide pour que des réactions thermonucléaires s’y allument, et elle ne brille pas, c’est une “naine brune”. Une naine brune très légère ressemblerait assez à la planète Jupiter, d’où le nom de “Jupiters” parfois donné à de tels objets. On ne sait pas bien ce qui détermine la masse des étoiles au moment de leur formation, et si les conditions régnant dans la proto-galaxie (*avant* la condensation du disque) favorisaient la formation de naines brunes plutôt que d’étoiles plus massives, ces naines brunes pourraient bien remplir le halo. Les conditions différentes régnant au centre des galaxies elliptiques, et surtout dans le disque des galaxies spirales y favoriseraient au contraire la formation d’étoiles plus massives, celles que nous voyons.

Les naines brunes ne brillent pas en lumière visible, mais elles rayonnent quand même faiblement en infra-rouge. Etant plus nombreuses que les étoiles normales, certaines devraient être relativement proches et donc avoir un grand mouvement apparent (ce qui les distingue d’autres sources infra-rouges), et on espère pouvoir les détecter avec un télescope infra-rouge comme ISO dans un avenir proche. Une seconde technique consiste à détecter le passage d’une naine brune devant une étoile, non parce qu’elle occulte la

lumière de l'étoile mais au contraire parce qu'elle l'intensifie par effet de lentille gravitationnelle. Le calcul montre que pour détecter le passage d'une naine brune du halo de notre Galaxie, il "suffit" de surveiller un million d'étoiles dans le Grand Nuage de Magellan pendant quelques années, de repérer celle dont la luminosité aura augmenté de 20 à 30% pendant quelques heures, et de vérifier que cette variation n'est pas due à autre chose. Cette expérience est en cours en France, et une expérience similaire est projetée aux Etats-Unis.

Au delà des galaxies

Il n'y a pas que les galaxies pour dissimuler de grandes quantités de matière invisible! Apparemment il y en a encore plus *entre* les galaxies, et celle-là n'est probablement pas due aux naines brunes ni aux trous noirs. Les "mauviettes" reviennent en force.

Prenons l'exemple d'Andromède: elle se rapproche si vite de nous que l'on estime qu'il y a 2 ou 3 fois plus de masse entre notre Galaxie et Andromède que dans les galaxies elles-mêmes (compte-tenu bien entendu du halo "vu" dans chacune d'elles). Autrement dit, les halos semblent s'étendre bien plus loin que la région où ils se manifestent sur la vitesse des étoiles et du gaz): sans doute se rejoignent-ils.

La situation est encore plus surprenante pour les amas de galaxies: dès 1933, Zwicky remarquait que les galaxies de l'amas de la Vierge ne pouvaient pas être retenues les unes par les autres tant elles étaient rapides. Tous les amas semblent dans ce cas: ou bien ce sont tous des réunions accidentelles de galaxies qui ne font que se croiser, ce qui semble statistiquement difficile à admettre, ou bien ils sont stables, mais pour cela il leur faut réunir 5 à 10 fois plus de masse qu'on en voit dans les galaxies, halo compris. Les mesures se sont multipliées et précisées, mais la situation n'a pas changé et le facteur 10 est toujours là, et il faut admettre la présence de matière noire diffuse entre les galaxies. Comme dans les galaxies elliptiques, la mesure du rayonnement X du gaz chaud s'accorde avec la masse dynamique. Par ailleurs l'observation d'arcs lumineux géants dans certains amas de galaxies s'interprète comme un effet de lentille gravitationnelle, la lumière d'une galaxie éloignée étant déviée par la concentration de masse de l'amas. On peut calculer la distribution de masse responsable de la déviation: la quantité totale est aussi en accord avec la masse dynamique, et elle est répartie de façon diffuse. Tout cela converge vers une densité $\rho_{\text{amas}} = 0,2 \pm 0,1$.

Photographie de l'arc géant dans Abell 370

La question de la structure de l'univers à grande échelle (filaments, bulles, etc.) évolue rapidement. La mesure des mouvements propres des galaxies (déduction faite du mouvement général d'expansion) permet de retrouver les grandes concentrations de matière qui les attirent (les grands attracteurs ou grands murs observés directement) mais indique aussi que la densité moyenne de l'univers est nettement plus grande que celle qui serait due aux seuls amas et proche de $0,7 \pm 0,3$. Notons que la ségrégation entre matière ordinaire et matière noire semble augmenter avec la taille de l'échantillon.

La matière noire présente à l'échelle des amas et des superamas ne semble pas pouvoir être formée de "machos", ou de toute autre forme de matière ordinaire. En effet un des grands succès du Big-Bang est d'expliquer que les abondances des éléments légers (hydrogène, hélium et lithium) sont dues à une nucléosynthèse primordiale au cours des 3 premières minutes. Mais l'accord remarquable entre théorie et observations n'est obtenu que pour une fourchette étroite de la densité de matière ordinaire, normale:

$$0,010 < \text{normal} < 0,040$$

Cela a deux conséquences fort intéressantes:

- il y a plus de matière ordinaire qu'on en voit, puisque étoiles+ gaz 0,005 seulement. Une partie importante de cette matière est donc sombre: recherchons les "machos"!
- mais cela implique aussi qu'amas et superamas sont essentiellement formés d'autre chose. Recherchons les "mauviettes"! Les "mauviettes" dominant-elles l'univers, et les "machos" en particulier?

La cosmologie (ou plus exactement les cosmologistes) préfère $\Omega = 1$. En effet, le modèle standard du Big-Bang explique mal pourquoi l'univers semble si plat et si uniforme (à grande échelle). Une brève période d'expansion accélérée juste après le Big-Bang, qu'on appelle l'inflation, rendrait compte de cette uniformité et de cette platitude mais implique une densité moyenne de l'univers exactement égale à la densité critique. Une telle densité fait d'ailleurs bien l'affaire des théoriciens qui tentent de décrire la formation des galaxies par accroissement de fluctuations de densité initiales: l'isotropie du rayonnement à 3 K impose des fluctuations initiales de très faible ampleur, et si $\Omega \ll 1$ l'univers est trop jeune pour que ces fluctuations aient eu le temps de former des galaxies.

De plus, les fluctuations de densité de la matière ordinaire (protons, neutrons et électrons) restent longtemps “gelées”, jusqu’au moment où elles se découplent du rayonnement (qui évolue alors indépendamment pour devenir aujourd’hui le rayonnement à 3 K). Elles ont donc encore moins de temps pour croître. Une matière noire différente, comme les “mauviettes”, n’a pas cette contrainte: le scénario dit de la matière noire froide [2] est le moins mauvais des scénarios de formation des galaxies (mais il explique difficilement la présence de structures à très grande échelle).

Conclusion

Le problème de la matière noire reste très ouvert, et montre l’interférence de l’infiniment petit avec l’infiniment grand. Il semble à peu près acquis que les galaxies sont sombres à 90%. Le halo sombre pourrait être formé de matière ordinaire sous une forme inhabituelle, les “machos”, ou de particules inconnues, les “mauviettes” par exemple. Les deux possibilités peuvent coexister, la nucléosynthèse suggérant qu’il y a plus de matière ordinaire qu’il n’en brille, mais l’existence d’une nouvelle particule élémentaire est plus probable à l’échelle de l’univers et elle n’a a priori aucune raison d’éviter les galaxies...

² “Froide” signifie qu’elle est formée de particules non-relativistes, parce que massives, au moment où les fluctuations commencent à croître. Un neutrino très léger serait de la matière noire chaude, et sa grande vitesse au moment de la formation des galaxies lui permettrait d’effacer les fluctuations de taille galactique, ce pourquoi il n’est pas très aimé.