

invisible), est plutôt sphérique. Or la matière visible de la Voie lactée est répartie dans un disque. L'hydrogène moléculaire a sans doute une distribution aplatie elle aussi, et ce gaz ne peut donc pas conférer au potentiel gravitationnel de la Galaxie sa sphéricité.

Peut-on imaginer d'autres candidats de matière ordinaire pour expliquer la masse manquante ?

Benoît Famaey : Dans les années 1980, les astrophysiciens ont aussi envisagé que la masse manquante corresponde à une importante population de petites étoiles froides et peu lumineuses, des naines brunes, mais aussi des planètes flottantes ou des trous noirs, dont la distribution ne suivrait pas nécessairement celle de la matière visible. Cependant, divers programmes d'observation, tel *Eros* mené par le CEA et le CNRS, ont permis d'écarter cette hypothèse. L'idée d'*Eros* était d'observer les nuages de Magellan et de recenser les effets de microlentille gravitationnelle : lorsqu'une naine brune (de la Voie lactée) passe devant une étoile lointaine (des nuages de Magellan), elle en amplifie la luminosité, comme le prévoit la théorie de la relativité générale. On a observé trop peu de tels effets pour soutenir que les petits objets sombres puissent constituer la masse manquante galactique.

Il restait encore une fenêtre ouverte, pour des trous noirs d'environ 30 masses solaires. La détection, par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, de coalescences de paires de trous noirs dans cette gamme de masse a relancé récemment cette piste. L'un des grands tests sera le recensement des systèmes binaires à grande séparation, où les deux étoiles liées gravitationnellement sont encore loin l'une de l'autre. Si les trous noirs sont assez nombreux pour constituer la masse manquante, ils devraient fréquemment passer à proximité de ces systèmes binaires et les déstabiliser. Les données de *Gaia*, satellite spécialisé dans l'observation des étoiles, nous indiqueront bientôt si c'est le cas.

Comment les astrophysiciens en sont-ils venus à écarter la piste baryonique ?

Benoît Famaey : Grâce aux observations cosmologiques. Pour comprendre, il faut remonter aux débuts de l'Univers, quand il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux atomiques et d'électrons. Les photons étaient piégés, car ils interagissaient en permanence avec les particules chargées du plasma. Puis vers 380 000 ans, la

température, qui diminuait avec l'expansion de l'Univers, est devenue assez basse pour que les noyaux et les électrons se combinent en atomes neutres. Les photons ont alors pu se propager et constituer un rayonnement encore détectable aujourd'hui, le fond diffus cosmologique.

Ce fond diffus est riche d'informations sur l'Univers primordial. Bien que la température associée à ce rayonnement soit globalement homogène sur l'ensemble du ciel, les satellites *WMAP* et *Planck* ont détecté de petites fluctuations thermiques, d'amplitude relative atteignant 10^{-5} . Elles correspondent à des zones plus ou moins denses dans le plasma primordial. Les zones de surdensité ont attiré de plus en plus de matière au cours du temps et ont donné naissance aux grandes structures, les amas et les galaxies.

Cependant, vu la faiblesse des fluctuations initiales, et si l'on ne prend en compte que la matière baryonique, l'effet d'accumulation n'a pas été assez fort et rapide pour produire les grandes structures observées aujourd'hui. Il faut donc ajouter au plasma primordial un autre ingrédient, une composante qui n'interagit pas avec la matière ordinaire autrement que par ses effets gravitationnels, mais qui contribue à augmenter l'efficacité de formation des grandes structures : la matière noire non baryonique.

Un deuxième argument est également lié au fond diffus. Le plasma primordial est le siège d'une compétition entre la matière baryonique, qui tend à s'accumuler dans les zones de surdensité, et les photons, qui s'opposent à ce mouvement par leur pression de radiation. Il s'ensuit des mouvements d'oscillation dans le plasma qui influent sur la taille et les propriétés des fluctuations de température.

Une courbe, dite du spectre de puissance, met en évidence de nombreuses caractéristiques du fond diffus. Cette courbe contient notamment de nombreux pics. Or, en ne considérant que de la matière baryonique, il est impossible de reproduire correctement l'amplitude de ces pics. Il faut supposer qu'une composante supplémentaire dans le plasma primordial aide à engendrer les oscillations par une contribution gravitationnelle, sans interagir avec les baryons. Encore une fois, cela ne peut être que de la matière noire non baryonique.

En quoi consiste-t-elle ?

Benoît Famaey : Les travaux en physique des particules ont suggéré de nombreuses possibilités. Depuis son

élaboration dans les années 1960, le modèle standard de la physique des particules a été expérimentalement très bien confirmé. Mais divers indices suggèrent qu'il n'est qu'une approximation à basse énergie d'un modèle plus fondamental. Et les modèles d'extension du modèle standard s'accompagnent souvent de candidats à la matière noire. Dans le cadre de la supersymétrie, une piste d'extension particulièrement en vogue, il existerait des particules électriquement neutres n'interagissant que rarement avec la matière ordinaire : les « wimps » (acronyme de *weakly interacting massive particles*). L'argument le plus attrayant en faveur de ces candidats est qu'ils seraient produits dans l'Univers primordial dans des proportions qui correspondent à ce qu'on attend pour la matière noire. C'est le « miracle des wimps » !

A-t-on détecté de tels wimps ?

Benoît Famaey : En théorie, il était possible de les produire dans les accélérateurs de particules tels que le LHC, de les détecter directement dans des expériences dédiées ou d'en voir une signature indirecte dans l'étude des rayons cosmiques. Mais toutes les tentatives ont échoué.

Ces résultats négatifs permettent d'éliminer les wimps ayant certaines caractéristiques de masse et de probabilité d'interaction avec la matière ordinaire. Les contraintes les plus sévères proviennent des expériences de détection directe. Il s'agit par exemple de grandes cuves remplies de xénon liquide, où les physiciens cherchent à repérer la trace d'une (rare) collision entre une particule de matière noire et un atome de xénon. Si ces physiciens ne voient rien, ils peuvent alors conclure que la probabilité d'interaction des wimps avec la matière ordinaire est inférieure à une certaine limite.

Ces expériences sont aujourd'hui si sensibles que les limites trouvées nous éloignent de plus en plus des paramètres qui correspondent au miracle des wimps. À tel point que l'enthousiasme des physiciens pour cette hypothèse est en train de diminuer, s'il n'est pas déjà sérieusement entamé. Bien sûr, il y a encore des expériences en cours, car il faut être sûr d'avoir éliminé toutes les possibilités. Et même si l'on ne trouve rien, ces expériences auront permis de tester l'hypothèse des wimps.

On ne peut pas non plus écarter l'hypothèse de particules de matière noire dont la probabilité d'interaction avec la matière ordinaire serait quasi nulle. Mais cette hypothèse est un peu désespérante...

> **Qu'en est-il du scénario des wimps pour expliquer la dynamique des galaxies ?**

Benoît Famaey : Comme on l'a vu, l'étude des galaxies a donné le premier indice sérieux de l'existence de la matière noire, dès la fin des années 1970. Il est ironique que ce soient les galaxies qui, actuellement, posent le plus de problèmes à l'hypothèse de la matière noire.

Ces difficultés sont liées à la distribution supposée de la matière noire dans une galaxie spirale. Les simulations numériques de formation des galaxies et de leur halo de matière noire montrent que ce dernier présente une densité sphérique et inversement proportionnelle à la distance r au centre de la galaxie, c'est-à-dire un profil de densité en $1/r$. En toute rigueur, la densité ne devient pas infinie au centre : elle est remplacée par un petit cœur de densité constante. En supposant ce halo de matière noire doté d'un petit cœur et d'un profil en $1/r$, on obtient le bon profil de vitesse du gaz dans certaines galaxies.

Mais cette distribution de matière noire ne fonctionne pas pour un grand nombre de galaxies, notamment celles dites à faible brillance de surface. Ces galaxies sont très diffuses et le gaz y prédomine ; très peu d'étoiles s'y forment. Pour reproduire la dynamique de ces galaxies, il

noire nécessaire pour obtenir la bonne dynamique de rotation du gaz et la taille du disque de matière baryonique. En d'autres termes, plus la galaxie est diffuse et étendue, plus son cœur de densité constante de matière noire est lui-même étendu. Il semble donc y avoir une relation directe entre la distribution de la matière ordinaire et celle de la matière noire. Or une corrélation aussi forte est difficile à expliquer si la matière noire et la matière baryonique n'interagissent que par la gravitation ou d'autres forces très faibles.

Comment expliquer cette corrélation ?

Benoît Famaey : On peut envisager une rétroaction gravitationnelle de la matière baryonique sur la distribution de matière noire. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose en supernova, elle déplace de grandes quantités de matière. Cela modifie le potentiel gravitationnel localement. La matière noire va alors suivre ce nouveau potentiel. On peut montrer qu'avec une rétroaction efficace, la partie centrale d'une distribution en $1/r$ peut se lisser et donner un cœur de densité constante.

C'est pourquoi la plupart des astrophysiciens ne voient pas dans la corrélation des distributions de matière un danger mortel pour l'hypothèse de la matière noire. Mais dans les galaxies à

galaxies, certains chercheurs, dont moi-même, continuent d'explorer une piste totalement différente, qui consiste à modifier les lois de la gravitation. En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne (on parle de théorie Mond, pour *Modified newtonian dynamics*) pour les plus petites accélérations, bien en dessous de ce qu'on peut mesurer en laboratoire. On a alors deux régimes, le régime normal puis, lorsque l'accélération passe sous un certain seuil, la relation qui relie l'accélération à la force gravitationnelle est modifiée. Ce régime se manifeste sur les parties externes des galaxies comme la nôtre, mais dès le centre des galaxies à faible brillance de surface.

Par cette approche, on reproduit très bien le profil de vitesse au sein des galaxies. Et il n'y a plus de problème de corrélation entre la distribution de la matière ordinaire et le cœur de matière noire, puisqu'il n'y a plus de matière noire.

Comment se comportent ces modèles à plus grande échelle ?

Benoît Famaey : Si on applique la théorie Mond dans les amas de galaxies, le résultat n'est pas aussi satisfaisant. On trouve qu'il manque encore de la masse baryonique pour coller aux observations. Pour rappel, avec une dynamique newtonienne classique, le facteur de masse manquante est d'environ 5, la matière noire représentant cette masse manquante. Dans le cadre de Mond, il reste un facteur 2 environ. Il y a donc une partie de la matière des amas qui nous échappe. En outre, ce facteur 2 se manifeste principalement dans la partie centrale de l'amas. Mordehai Milgrom a proposé qu'il pourrait s'agir de nuages très froids d'hydrogène moléculaire, qui sont très difficiles à détecter.

Mais cette grande quantité d'hydrogène n'entre-t-elle pas en conflit avec les contraintes cosmologiques sur les baryons ?

Benoît Famaey : Eh bien non. En réalité, sur la quantité de matière ordinaire prévue par le modèle cosmologique (notamment la nucléosynthèse primordiale), il reste 30 % de baryons que nous n'avons pas détectés. Dans le scénario standard, on suppose qu'ils se cachent dans le milieu intergalactique. Il y aurait donc largement assez de matière pour compenser la dynamique des amas dans le cadre de la théorie Mond.

L'hypothèse de Mordehai Milgrom reste malgré tout assez alambiquée. Il existe d'autres possibilités, comme des neutrinos

L'enthousiasme des physiciens pour l'hypothèse des wimps est en train de diminuer

faut modifier la distribution de matière noire et supposer que le cœur est très étendu, sur plusieurs kiloparsecs (un kiloparsec correspond à environ 3 200 années-lumière). Or ce n'est pas ce que prévoient les simulations de formation galactique.

Est-ce le seul problème ?

Benoît Famaey : Non, il en existe un autre, plus subtil mais peut-être plus intéressant, avec ces galaxies à faible brillance de surface. C'est d'ailleurs, selon moi, le plus gros souci actuel avec la matière noire. On a remarqué, depuis une quinzaine d'années, une corrélation entre la taille du cœur de densité constante de matière

faible brillance de surface, il y a très peu d'étoiles pour obtenir une rétroaction efficace. Et c'est dans ces galaxies que les cœurs sont les plus étendus. Le vrai problème est la force de cette corrélation, comme si les processus de rétroaction « connaissaient » avec précision l'étendue de la galaxie pour ajuster leur intensité. Et ça, on ne sait pas l'expliquer.

Le bilan des wimps est donc mitigé. Ils sont parfaits pour la cosmologie, mais posent de nombreux problèmes à l'échelle galactique...

Benoît Famaey : Tout à fait. Et c'est pour cette raison qu'à l'échelle des