

Pour commencer, pouvez-vous nous rappeler comment le problème de la matière noire est apparu ?

On attribue la découverte des premiers indices à Fritz Zwicky, un astronome suisse émigré aux États-Unis. Au début des années 1930, en étudiant la dynamique des galaxies dans l'amas de Coma, il a constaté que la contribution gravitationnelle de la matière visible était très insuffisante pour expliquer les mouvements de ces galaxies. Il a alors parlé du problème de la masse manquante. Mais à l'époque, les astrophysiciens n'ont pas pris cette idée très au sérieux... pour de bonnes raisons.

Lesquelles ?

D'une part, les données sur la distribution de vitesse des galaxies étaient très lacunaires. D'autre part, on connaissait mal le contenu en matière des amas. La matière ordinaire composée d'atomes, ou « matière baryonique », n'est pas toujours visible et peut échapper au recensement. On pense aujourd'hui que près de 80% de la matière baryonique d'un amas galactique est sous la forme d'un gaz chaud, qui n'émet que des rayons X. À l'époque de Zwicky, les instruments d'observation n'étaient pas sensibles à ce rayonnement. De l'avis général des astrophysiciens, l'idée de Zwicky était prématurée. Cependant, même si on prend en compte le gaz chaud, il faudrait cinq fois plus de matière pour expliquer la dynamique des galaxies au sein des amas. Zwicky avait donc eu une bonne intuition, même si la confirmation n'est venue que bien plus tard.

Jusqu'à quand le problème de la masse manquante est-il resté ignoré ?

La question est revenue sur le tapis à la fin des années 1970 avec l'avènement de la radioastronomie. Les chercheurs ont commencé à mesurer la vitesse de rotation du gaz dans les galaxies spirales. Les travaux d'Albert Bosma, aux Pays-Bas, et de Vera Rubin, aux États-Unis, ont été pionniers. Ils ont clairement montré que le gaz a une vitesse trop élevée dans les parties externes des galaxies compte tenu de la distribution de masse de matière baryonique de la galaxie : la force gravitationnelle exercée par la matière ordinaire est insuffisante pour retenir au sein de la galaxie un gaz qui se déplace aussi vite. Le gaz devrait s'échapper, alors que ce n'est pas le cas.

L'explication pouvait-elle encore invoquer de la matière baryonique cachée ?

Tout à fait. À cette époque, on n'avait pas la preuve formelle que la masse manquante n'est pas de la matière baryonique. Même aujourd'hui, si l'on sait détecter les gaz chauds, l'hydrogène moléculaire (H_2) reste très difficile à observer et pourrait contribuer en partie à la masse manquante. Mais nous avons des arguments pour

conclure que l'hydrogène moléculaire ne constitue pas une grande part de la masse manquante et qu'il faut chercher ailleurs.

Quels sont ces arguments ?

Ils viennent de l'étude des galaxies naines en orbite autour de la Voie lactée. Ces petites galaxies satellites sont soumises aux forces de marée de la Voie lactée. Elles sont progressivement détruites par ces effets gravitationnels et laissent derrière elles une traînée de matière, qu'on nomme un courant de marée. En analysant la forme de ces courants de marées, les astrophysiciens ont montré que la forme du champ gravitationnel de la Galaxie, plus précisément le potentiel gravitationnel, qui est directement relié à la distribution de toute la matière qu'elle contient (visible et 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 ?

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 (voir l'article de J. García-Bellido et S. Clesse, pages 26 à 33) 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.

>

➤ Finalement, comment les astrophysiciens en sont venus à écarter la piste baryonique ?

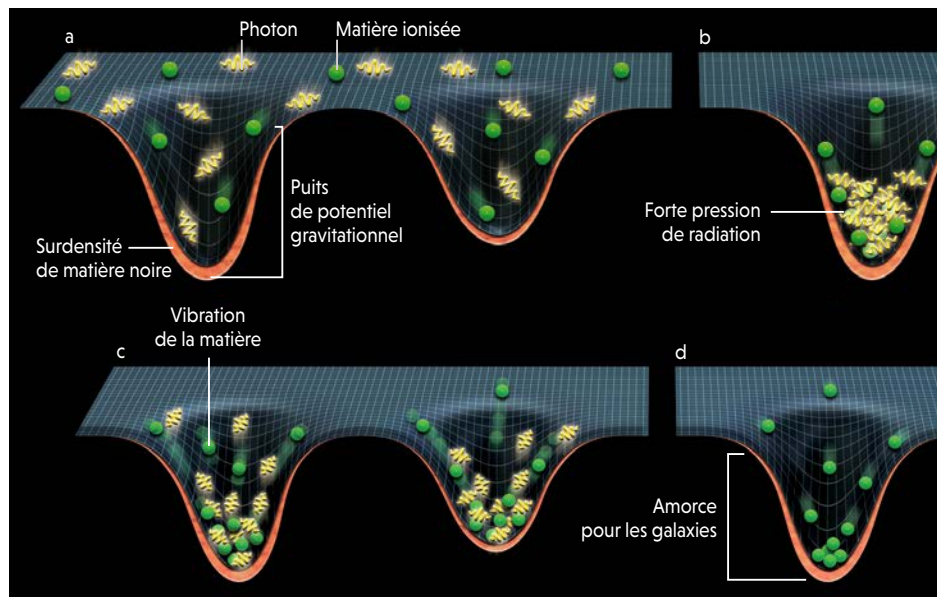
Les observations cosmologiques de ces dernières décennies ont montré que la masse manquante devait prendre la forme d'une matière noire non baryonique. Pour comprendre pourquoi, il faut rappeler l'état de l'Univers quand il était âgé d'environ 380 000 ans. Il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux atomiques et d'électrons. Les photons, les particules de lumière, étaient piégés, car ils interagissaient en permanence avec les particules chargées du plasma. 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 porte beaucoup d'information 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} . Ces fluctuations de température 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.

Y a-t-il d'autres arguments cosmologiques ?

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 (voir la figure ci-dessus). 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 n'est pas possible 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.

Avec d'autres observations, celles du fond diffus cosmologique décrivent un scénario de l'histoire de l'Univers cohérent et convaincant, d'après lequel le cosmos se compose alors de 4,9% de matière baryonique, 26,6% de matière noire et 68,6% d'énergie sombre (responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers).

En quoi consiste cette matière noire non baryonique ?

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 ?

En théorie, il était possible de les produire dans les accélérateurs de particules tels que le LHC, de les détecter directement dans des

À l'âge d'environ 380 000 ans, l'Univers contenait un plasma de matière ordinaire et de la matière noire qui formaient des zones de surdensité (a). La compétition entre la pression de radiation des photons (b) et l'accumulation de la matière ordinaire dans les zones de surdensité (c) engendrait des vibrations dans le plasma. Après recombinaison des ions et des électrons, les photons se sont échappés, créant le fond diffus cosmologique, tandis que les atomes se sont accumulés et ont peu à peu formé les grandes structures (d).