



© Shutterstock.com/Nasa Images

INSAISSABLE MATIÈRE NOIRE

Mais de quoi est-elle donc constituée ? Axions ? Wimps ? Neutralinos ? Neutrinos stériles ? Trous noirs primordiaux ? Les physiciens rivalisent d'imagination pour proposer des candidats à la matière noire, cette entité inconnue, mais nécessaire pour expliquer la dynamique observée des étoiles dans les galaxies, et celle des galaxies dans les grandes structures de l'Univers. Pour trancher, plusieurs options : produire cette matière noire dans des accélérateurs de particules, la détecter directement ou bien en déduire l'existence à travers des phénomènes astrophysiques. À ce jour, aucun résultat, quelle que soit la piste suivie. Mais il en faut plus pour décourager les cosmologistes qui, sans cesse, repoussent les limites de leurs théories. Ne serait-ce alors pas l'occasion de changer de modèle standard, en cosmologie ou en physique des particules ?

BENOÎT FAMAHEY



« La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pense. Quelque chose de profond nous échappe »

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

Benoît Famaey : 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...

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

BENOÎT FAMAHEY
est chargé de recherche au CNRS et travaille à l'observatoire astronomique de Strasbourg, où il est responsable de l'équipe Galhecos.

tenu de la distribution de masse de matière ordinaire (dite 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 ?

Benoît Famaey : 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.

Ainsi, la forme du champ gravitationnel de la Voie lactée, 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 ?

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...