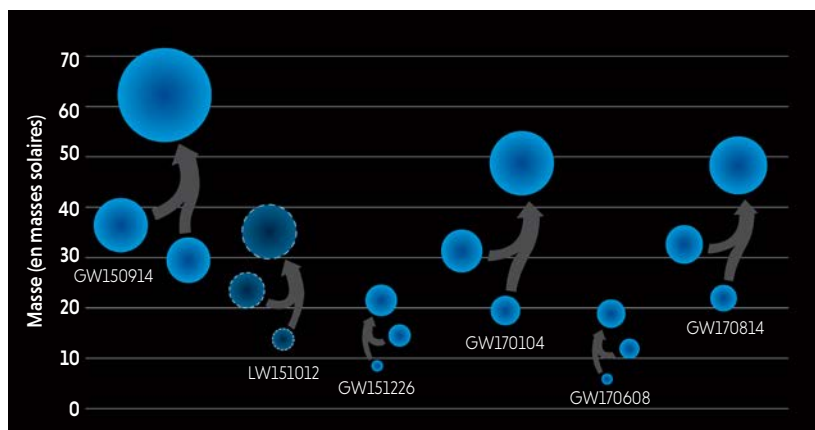




Les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté cinq coalescences de trous noirs (et peut-être une sixième, en pointillés). La masse des trous noirs progéniteurs est de l'ordre de la dizaine de fois celle du Soleil, ce qui suggère que ces corps ont une origine primordiale plutôt que stellaire.

les minihalos. De plus, même si ces minihalos formaient beaucoup d'étoiles, ces astres pourraient facilement être éjectés par des rencontres rapprochées avec des trous noirs primordiaux massifs. Ces deux effets réduiraient fortement la brillance des galaxies satellites et les rendraient très difficiles à détecter sans l'aide de caméras à grand champ d'une extrême sensibilité.

Heureusement, de telles caméras existent aujourd'hui, et les astronomes ont ainsi découvert des dizaines de galaxies naines extrêmement peu lumineuses autour de la Voie lactée. Ces objets semblent héberger jusqu'à des centaines de fois plus de matière noire que d'étoiles lumineuses, et notre modèle prédit qu'il devrait y en avoir des milliers supplémentaires en orbite autour de la Voie lactée.

Les simulations de formation des galaxies prédisent également une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les galaxies naines et les galaxies massives. De tels objets seraient assez gros pour former facilement des étoiles et seraient aisément visibles. Pourtant, ils n'ont pas été trouvés par les astronomes qui fouillent les environs de la Voie lactée. Ce problème a une solution semblable à celui des galaxies naines manquantes : les trous noirs primordiaux massifs présents au cœur des galaxies de taille intermédiaire bloqueraient la formation des étoiles en raison de l'accrétion du gaz et éjecteraient les astres formés. Ces galaxies intermédiaires seraient donc invisibles pour la plupart des relevés.

Les trous noirs primordiaux résoudraient également la question de l'origine des trous noirs supermassifs. Ces monstres pèsent des millions, voire des milliards, de masses solaires. On les trouve au centre des quasars et des galaxies massives très tôt dans l'histoire de l'Univers, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. Pourtant, si ces trous noirs supermassifs se sont formés et ont grossi à partir de trous noirs nés de l'explosion des premières étoiles de l'Univers et à la suite de leurs fusions

successives, ils n'ont pas pu acquérir une masse aussi gigantesque en un temps si court.

Dans notre scénario, même si la plupart des trous noirs primordiaux ne dépassent pas quelques dizaines de masses solaires, il en reste une petite fraction qui sont beaucoup plus lourds, entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers de masses solaires. Nés moins d'une seconde après le Big Bang, ces objets monstrueux agiraient comme des graines pour la formation des premières galaxies et quasars, et l'accrétion de matière ainsi que l'absorption de trous noirs moins massifs permettrait d'atteindre rapidement les caractéristiques des trous noirs supermassifs.

Ces trous noirs primordiaux pourraient aussi rendre compte de l'existence de trous noirs de taille intermédiaire (entre 1 000 et 1 million de masses solaires) dont on soupçonne l'existence au centre des galaxies naines et des amas globulaires d'étoiles. Ainsi, les trous noirs primordiaux pourraient être le chaînon manquant entre les trous noirs classiques de masse stellaire et les trous noirs supermassifs.

Les preuves observationnelles de ce scénario s'accumulent : des détections récentes de sources de rayons X étonnamment abondantes dans l'Univers primordial s'expliqueraient par de grandes quantités de trous noirs primordiaux produisant des rayons X tandis qu'ils se gavent de gaz, moins d'un milliard d'années après le Big Bang.

Ainsi, les trous noirs primordiaux massifs constituent des candidats prometteurs pour la matière noire et apportent des réponses à de nombreux autres problèmes qui tracassent les cosmologistes depuis longtemps. Mais il est trop tôt pour conclure. D'autres hypothèses sont encore possibles, et de nouvelles observations fort attendues pourraient en éliminer certaines. Dans les années à venir, plusieurs observations pourraient mettre à l'épreuve le scénario des trous noirs primordiaux (voir l'encadré page 30). Elles incluent la détection des galaxies naines d'ultrafaible luminosité, l'influence des trous noirs primordiaux massifs sur la position des étoiles dans la Voie lactée, la cartographie de l'hydrogène neutre au cours de la première époque de formation stellaire et l'étude des distorsions du fond diffus cosmologique.

Outre ces expériences, nous disposons désormais avec les interféromètres laser géants (*Virgo*, *Ligo*, mais aussi ceux en construction, *Kagra*, au Japon, *Ligo India*, en Inde, et le projet européen *Einstein Telescope*) d'un nouvel outil pour démêler les énigmes cosmiques. L'ensemble de toutes ces observations pourrait confirmer l'existence de trous noirs primordiaux et leur possible lien avec la matière manquante de l'Univers. D'ici à quelques années, nous leverons peut-être le voile sur le mystère de la matière noire. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Clesse et J. García-Bellido, **The clustering of massive primordial black holes as dark matter : measuring their mass distribution with Advanced LIGO**, *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, pp. 142-147, 2017.

N. Deruelle et J.-P. Lasota, **L'astronomie gravitationnelle est née**, *Pour la Science*, n° 481, novembre 2017.

S. Clesse et J. García-Bellido, **Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 023524, 2015.

BENOÎT FAMAHEY

est chargé de recherche au CNRS et travaille à l'observatoire astronomique de Strasbourg, où il est responsable de l'équipe Galhecos. Ses recherches portent sur la détermination du potentiel gravitationnel des galaxies et sur le problème de la masse manquante.



La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pensait

Peut-on se passer de l'hypothèse de la matière noire ? Sinon, de quoi celle-ci est faite ? Les récentes observations malmènent les principales pistes suivies pour résoudre cette grande énigme de l'astrophysique. Avec Benoît Famaey, tour d'horizon du problème et des issues possibles.

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 ?

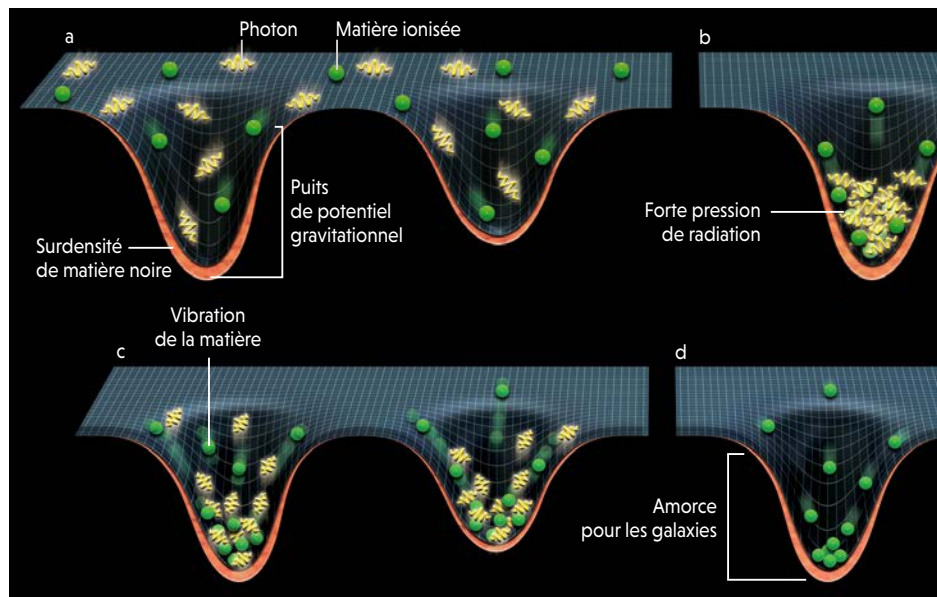
Les observations cosmologiques de ces dernières décennies ont montré que la masse manquante devait prendre la forme d'une matière noire non baryonique. Pour comprendre pourquoi, il faut rappeler l'état de l'Univers quand il était âgé d'environ 380 000 ans. Il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux 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).

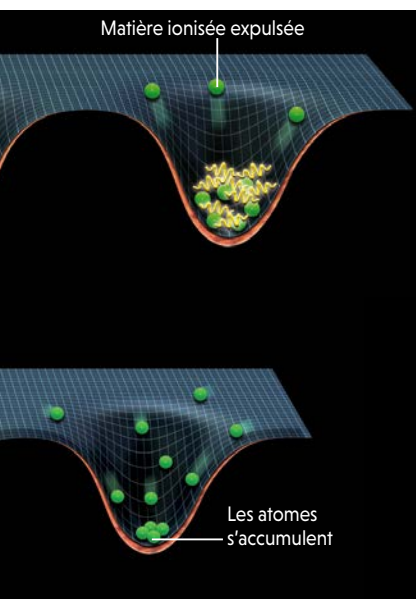
En quoi consiste cette matière noire non baryonique ?

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).



expériences dédiées ou d'en voir une signature indirecte dans l'étude des rayons cosmiques. Mais aucun de ces programmes n'a été couronné de succès.

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

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 (voir la photo page 39); très peu d'étoiles s'y forment. Pour reproduire la dynamique de ces galaxies, il faut modifier la distribution de matière noire et supposer que le cœur est très étendu, sur plusieurs kiloparsecs (un kiloparsec correspond à environ 3200 années-lumière). Or ce n'est pas ce que prévoient les simulations de formation galactique.

Est-ce le seul problème ?

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 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 alors expliquer cette corrélation ?

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 ➤

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

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...

Et qu'en est-il du scénario des wimps pour expliquer la dynamique des galaxies ?

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.

> distributions de matière un danger mortel pour l'hypothèse de la matière noire. Mais dans les galaxies à 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 devaient « connaître » 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...

Tout à fait. Et c'est pour cette raison qu'à l'échelle des 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 (estimé à environ 10^{-10} mètre par seconde au carré), la relation qui relie l'accélération à la force gravitationnelle est modifiée. Ce régime mondien 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 ?

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 ?

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. Mais il existe d'autres possibilités, comme des neutrinos plus massifs que ceux du modèle standard. Ce scénario ne reproduit pas correctement le spectre du fond diffus cosmologique, même en prenant des versions relativistes de Mond telles que le modèle TeVeS proposé en 2004 par Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem.

Avec Gary Angus, j'ai aussi examiné des scénarios à neutrinos dits stériles, c'est-à-dire qui n'interagissent par aucune des forces fondamentales, ayant une masse de 10 à 100 électronvolts. Nous obtenons la bonne dynamique dans les amas de galaxies mais, quand nous avons regardé des simulations de formation des structures dans ce scénario, nous avons remarqué qu'il se formait trop d'amas très massifs. Dans la théorie Mond, l'efficacité de la formation des amas est déjà



Les observations tendent aussi à exclure le scénario de la gravitation modifiée



grande; en ajoutant les neutrinos stériles, on augmente encore cette efficacité.

L'observation récente de la coalescence de deux étoiles à neutrons a aussi porté un coup dur à l'approche de gravitation modifiée...

Effectivement. Lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, il y a émission d'ondes gravitationnelles et d'ondes électromagnétiques. En août 2017, les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté les ondes gravitationnelles d'un tel événement et le satellite *Fermi* a observé un rayonnement gamma juste 1,7 seconde plus tard, provenant de la même source. Dans le cadre de la relativité générale, les deux types d'ondes se propagent à la même vitesse. On peut donc supposer que la lumière a été émise un peu après.



La galaxie naine IC 2574 est dite à faible brillance de surface. Elle contient beaucoup de gaz et très peu d'étoiles. Pour décrire correctement la dynamique de telles galaxies, il faut supposer qu'elles ont un cœur de densité de matière noire très étendu, ce qui est en désaccord avec les simulations de formation de galaxies.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: en raison de la présence de matière sur le trajet, les ondes gravitationnelles et lumineuses se propagent plus lentement. En relativité générale, l'effet de retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais il peut différer dans des théories de gravitation modifiée.

C'est le cas avec le modèle relativiste TeVeS. Sibel Boran, de l'université technique d'Istanbul, et ses collègues ont montré que, pour la coalescence d'étoiles à neutrons détectée en août 2017, le décalage entre l'arrivée des ondes gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours... Comme il n'était que de 1,7 seconde, on peut dire aujourd'hui que TeVeS est exclu et il en va de même pour de nombreux autres modèles relativistes. Il existe d'autres modèles de gravitation modifiée qui n'ont pas le problème de l'effet Shapiro, mais ils souffrent d'autres difficultés.

Quelles sont donc les perspectives pour expliquer la masse manquante ?

Quand on fait le bilan, on voit que la théorie Mond fonctionne bien à l'échelle des galaxies, et que les wimps conviennent à l'échelle des amas et sont compatibles avec les contraintes cosmologiques. On peut donc envisager des solutions hybrides, comme celles de la matière noire dipolaire de Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, ou de la matière noire superfluide de Justin Khoury, de l'université de Pennsylvanie.

En quoi consiste la matière noire superfluide ?

Cette matière noire serait composée de particules se comportant comme des wimps dans le plasma primordial et dans les amas. C'est dans le cœur des galaxies que le modèle devient original. Dans ces régions centrales, la densité de matière noire est assez élevée et la température relativement basse. Les particules de matière noire subiraient une transition de phase et se

comporteraient comme un condensat de Bose-Einstein (un état de la matière obtenu en laboratoire, où les atomes se retrouvent tous dans le même état quantique).

Justin Khoury a alors supposé que la matière baryonique se comporte comme des impuretés dans le condensat. Et ces impuretés interagissent avec le condensat de la matière noire par des échanges de phonons (des vibrations). On obtient ainsi le couplage qui reproduit précisément les effets de Mond. En dehors de la partie centrale de la galaxie, la densité de matière noire est trop faible pour produire un condensat. On a donc une zone de transition entre les deux régimes, à environ 60-100 kiloparsecs du centre galactique. Ce scénario pourrait donc prévoir des choses intéressantes sur la dynamique des traînes de marée des galaxies satellites de la Voie lactée qui traverseraient cette zone de transition.

La matière noire superfluide est une façon d'obtenir la bonne forme du potentiel galactique, mais peut-on l'obtenir autrement ?

Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la suivante. Pour expliquer la corrélation entre le cœur de matière noire et la distribution de matière ordinaire, il faut un couplage entre ces deux composantes de matière. Nous avons donc supposé que, dans les galaxies, les baryons et la matière noire entrent en collision et échangent de l'énergie. C'est le genre d'interaction que l'on cherche dans les expériences de détection directe de wimps et que l'on ne trouve pas. Pour échapper aux contraintes imposées par ces expériences, il faut supposer que la matière noire est composée de particules très légères (du type axions) ou très lourdes (comme des *quarks nuggets*).

Le modèle que nous avons esquissé indique que les collisions sont très rares dans un plasma dense comme celui de l'Univers primordial. Cette matière noire se comporte donc comme les wimps à l'échelle cosmologique. Et nous commençons seulement à explorer ce que ce modèle peut donner à l'échelle d'une galaxie. C'est un programme de recherche qui prendra encore des années.

Finalement, à quoi pourrait ressembler la matière noire ?

Ce qu'on appelle la matière noire pourrait être très différent de ce que l'on pensait jusqu'à présent. Les observations récentes tendent à exclure les scénarios en vogue, tels les wimps et la gravitation modifiée. Quelque chose de très profond et fondamental nous échappe peut-être. Ce qui est certain, c'est qu'il n'y a pas de solution simple à ce jour. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR SEAN BAILLY

BIBLIOGRAPHIE

B. Famaey et al., **Emergence of the mass discrepancy-acceleration relation from dark matter-baryon interactions**, en ligne, 4 décembre 2017. <https://arxiv.org/abs/1712.01316>

S. Boran et al., **GW170817 falsifies dark matter emulators**, en ligne, 17 octobre 2017. <https://arxiv.org/abs/1710.06168>

B. Dobrescu et D. Lincoln, **Les multiples visages de la matière noire**, *Pour la Science*, n°463, mai 2016.

L. Berezhiani et J. Khoury, **Theory of dark matter superfluidity**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 103510, 2015.

Cultiver les coraux pour les sauver

Le réchauffement océanique menace les coraux.
Des pépinières sous-marines de ces animaux
les aideront-elles à résister ?



L'ESSENTIEL

> Des biologistes essaient plusieurs approches pour aider les coraux à s'adapter au réchauffement climatique.

> Ils les poussent à se cloner plus vite et créent des larves en laboratoire pour accroître leur diversité génétique.

> Un stress thermique favorise l'activation de gènes qui

conduisent à des descendants plus résilients ; la stimulation des algues symbiotiques des coraux pourrait aussi renforcer leur santé.

> Ces techniques sont prometteuses à l'échelle locale, mais un sauvetage à l'échelle mondiale ne sera possible que si nous ralentissons le réchauffement océanique.

L'AUTEURE



REBECCA ALBRIGHT
biologiste marine
à l'Académie
des sciences
de Californie

Debout sur une plage australienne, je me prépare à plonger sur la Grande Barrière de corail. Ma précédente plongée en ce lieu remonte à dix ans. Mon émotion était grande ce jour-là. Il faut dire que le chemin avait été long avant que je puisse enfin découvrir cet immense récif : élevée dans l'Ohio, j'avais passé mon enfance à lire des livres sur la

biologie marine – du moins quand je n'avais pas les yeux rivés sur Discovery Channel. Et c'était dans les eaux troubles des carrières de calcaire de cet État, que j'avais passé mes niveaux de plongée avant de partir, un an plus tard, explorer la Grande Barrière. Mon amie Émilie, aujourd'hui une experte des algues marines, m'accompagnait. Nous avions fait des paris sur la durée de notre provision d'air. Elle nous offrit deux merveilleuses heures durant



Les coraux du genre *Acropora* se reproduisent une fois par an en été. Tout au long des milliers de kilomètres de la Grande Barrière de corail, ils émettent alors des paquets de sperme et d'ovules.