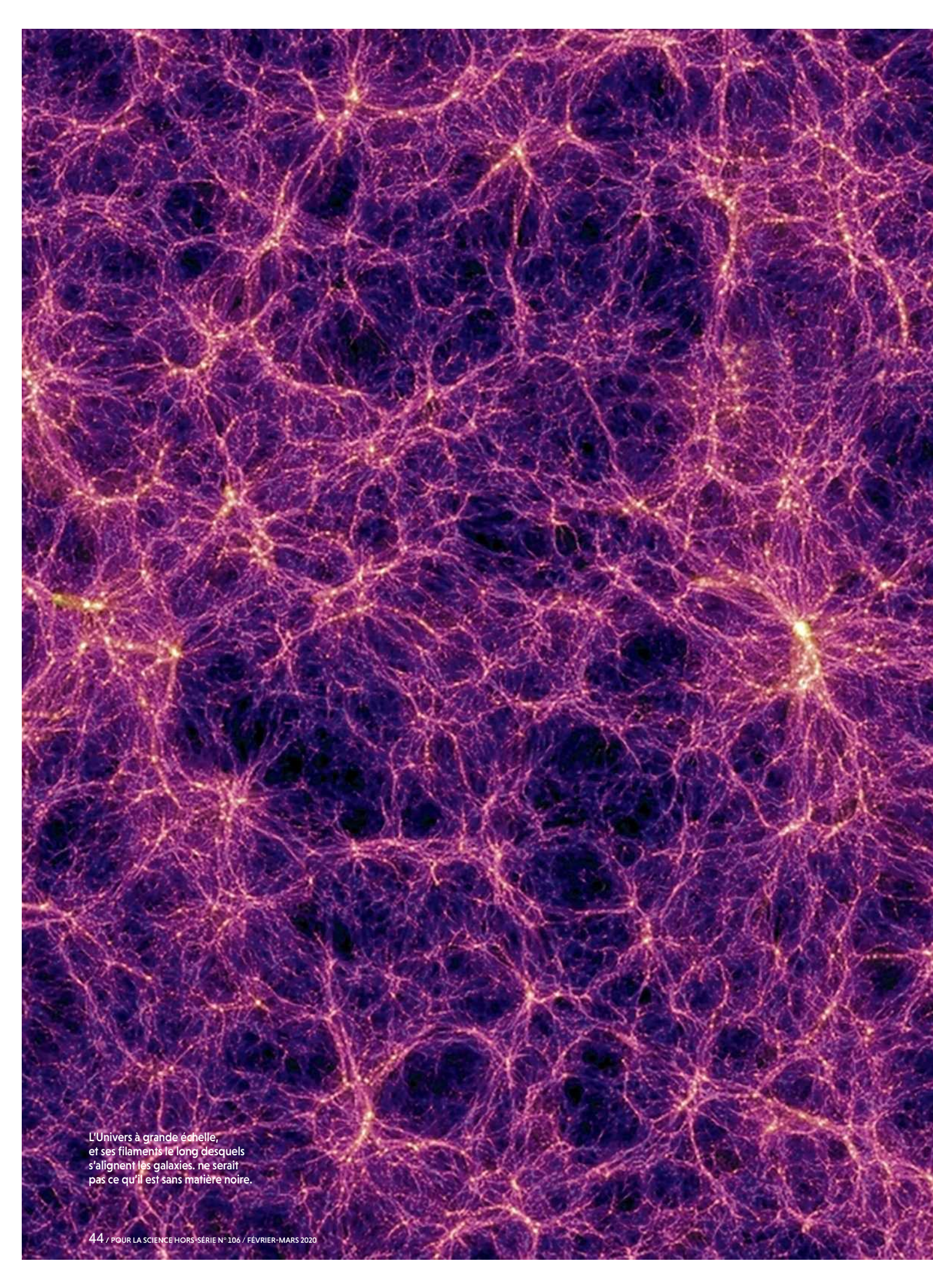
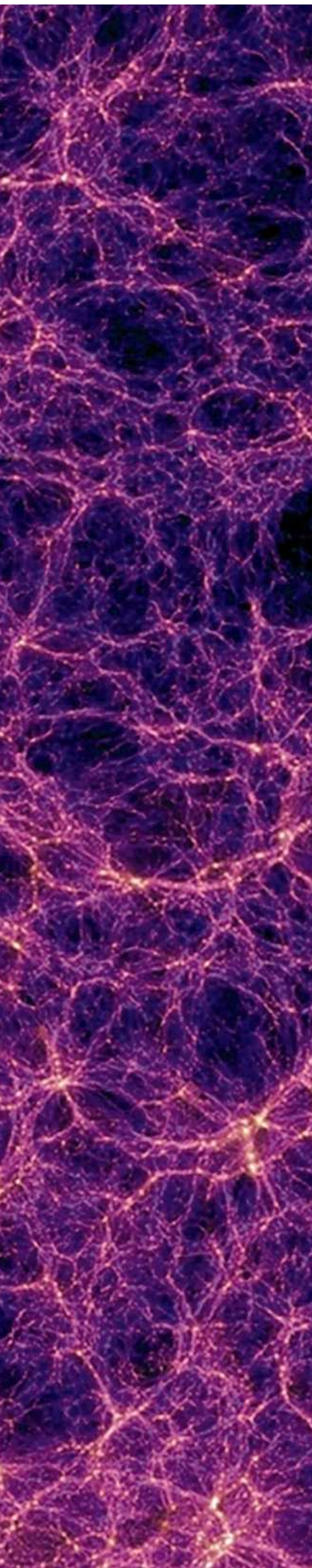




L'Univers à grande échelle,
et ses filaments le long desquels
s'alignent les galaxies. ne serait
pas ce qu'il est sans matière noire.



© 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... ➤

> **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

plus massifs que ceux du modèle standard. Mais 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 simulé la 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 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...

Benoît Famaey : 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 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.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: de la matière sur le trajet ralentirait les ondes gravitationnelles et lumineuses. 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 ?

Benoît Famaey : 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

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

Benoît Famaey : Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la

En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne

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 cette dernière ?

Benoît Famaey : 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.

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 ?

Benoît Famaey : 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**

L'ESSENTIEL

● La matière noire est omniprésente dans l'Univers, mais échappe à toute détection.

● On distingue trois types de méthodes pour y parvenir; la production dans les accélérateurs de particules,

la détection directe et la détection astrophysique.

● À plusieurs reprises, on a cru l'avoir repérée, mais en vain.

● La quête de la matière noire est-elle sans espoir?

L'AUTEUR



ALAIN RIAZUELO
est chargé de recherche
CNRS à l'institut
d'astrophysique de Paris.

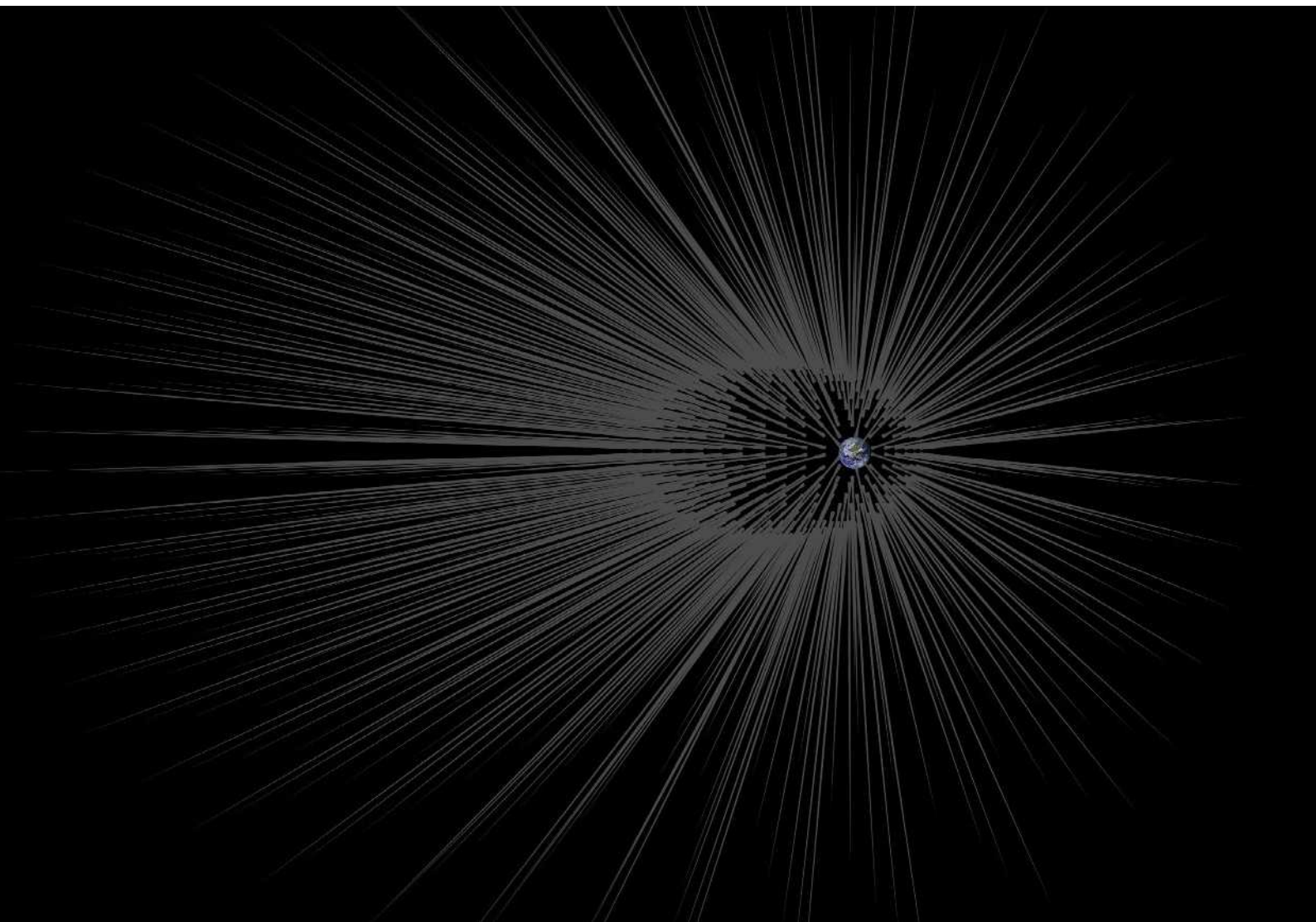
La grande quête inachevée

Évanescence à l'extrême, la matière noire résiste à toute tentative de détection, que ce soit celles des astronomes ou des physiciens des particules. Et pourtant cette matière noire est omniprésente. Peut-on résoudre ce paradoxe ?

Q

uelle que soit la direction vers laquelle vous pointerez votre télescope, vous verrez des galaxies. Et à y observer de plus près le mouvement des étoiles, vous serez convaincu: quelque chose ne tourne pas rond. En effet, l'étude de la dynamique des étoiles dans les galaxies, ou de celle des galaxies dans les amas de galaxies, indique qu'une mystérieuse entité

invisible, la «matière noire», y est omniprésente (*voir Repères, page 6*) pour rendre compte des observations. Elle représenterait même en masse plus de cinq fois plus que la matière ordinaire. On trouve cette matière noire dans le Système solaire (quoiqu'en faibles quantités), dans l'atmosphère terrestre, et même entre vous et ce magazine, qu'il soit sur papier ou sur écran. En fait, à chaque instant, vous êtes traversé par des myriades de ces particules. Mais vous ne le sentez pas, tout simplement parce que la matière noire n'interagit presque jamais avec quoi que ce soit, une propriété indispensable pour expliquer sa distribution. Étrange paradoxe que cette matière que l'on trouve partout... sauf dans les instruments où elle est activement recherchée. Et pourtant,



La matière noire est partout,
Elle traverse la Terre, et donc
nous-mêmes, à tout instant.

ce n'est pas faute d'avoir essayé! Petit panorama de la plus grande quête inachevée de la physique moderne.

TROIS MÉTHODES

Depuis trois ou quatre décennies, astronomes et physiciens des particules ont été amenés à échauffer plusieurs techniques, assez complémentaires, pour mettre en évidence cette matière noire autrement que par ses effets gravitationnels. On peut classer ces méthodes en trois grands groupes: la production dans les accélérateurs de particules, la détection directe, et la détection indirecte (on parle aussi de détection astrophysique).

La première méthode est sans doute la plus naturelle pour les physiciens des particules. Il

s'agit de détecter les particules de matière noire de la même façon que l'ont été la majorité des particules du modèle standard: en les produisant lors de collisions de haute énergie. On peut aussi imaginer détecter les conséquences de leur existence dans ces collisions, par exemple en constatant qu'une partie de l'énergie de la collision a disparu, emportée par une particule invisible. Pendant longtemps, s'est imposé un « candidat naturel » à la matière noire, lié à une hypothèse particulièrement séduisante, la supersymétrie. L'idée princeps de cette dernière rappelle celle de l'antimatière, qui à chaque particule connue associe un *alter ego* aux propriétés proches ou opposées. Par exemple, les antiparticules ont la même masse, mais une charge électrique opposée à >

- celle de leurs «sœurs». Avec la supersymétrie, c'est la nature de la particule qui change.

Toutes les particules connues se répartissent en deux groupes: les bosons (photon, boson de Higgs...) et les fermions (électrons, neutrinos...). En simplifiant beaucoup, les premiers sont plutôt grégaires, alors que les seconds semblent ne pas vouloir partager des caractéristiques trop semblables avec une particule voisine du même type. La supersymétrie, où le préfixe «super» renvoie à l'idée de «supplémentaire», associe à un fermion du bestiaire des particules connues une particule supersymétrique, une «sparticule», dont la principale différence est qu'elle est un boson, et *vice versa*. Cette hypothèse s'inscrivait dans la lignée de plusieurs découvertes en physique des particules fondées sur des principes de symétrie sous-jacentes.

Dans la version la plus simple du modèle, particules ordinaires et supersymétriques ont des masses identiques. Dans un tel cas, les sparticules auraient alors été facilement fabriquées dans les accélérateurs de particules. D'évidence, ce n'est pas advenu, et l'on en déduit que toutes les sparticules sont dotées d'une masse importante, une propriété qui tombe à point nommé pour la matière noire. En effet, à l'instar de beaucoup de particules ordinaires, une particule supersymétrique peut

d'annihilation massive quand la température de l'Univers diminuait. Mais dans un Univers en expansion, certaines auraient survécu à un tel Armageddon, l'expansion finissant par rendre nulles les chances de rencontre.

L'abondance en masse des particules supersymétriques restantes dépend, dans les cas les plus simples, de deux paramètres: la section efficace et leur masse, qui déterminent respectivement la probabilité d'interaction entre ces particules et l'époque où commence leur annihilation. Miracle! Si on imagine que la section efficace est celle des particules ordinaires les plus évanescences, les neutrinos, et que la masse est d'environ celle du boson de Higgs (de l'ordre d'un téraélectronvolt, ou TeV), alors la masse résiduelle sous la forme de matière noire coïncide avec ce qu'indiquent les observations astronomiques!

ÉLUSIVES MAUVIETTES

La matière noire serait donc, peut-être, composée de ces sparticules massives, regroupées sous le terme de «wimps», acronyme de *weakly interacting massive particles*. C'est aussi un clin d'œil à l'agaçante propriété évasive de ces particules, car le mot anglais *wimp* signifie «mauviette». Les détecter semblait, il y a une quinzaine d'années, n'être qu'une question de temps: la masse de ces wimps ne pouvait être trop élevée, sans quoi leur abondance, prédite par la supersymétrie, aurait été incompatible avec la quantité de matière noire déduite des observations, et les accélérateurs de particules, au premier rang desquels le LHC, allaient finir par les produire.

Cette idée prévalait en septembre 2008 lors de la mise en service du LHC. Où en sommes-nous dix ans plus tard? À l'évidence, le «candidat naturel» a perdu de sa superbe, une issue que quelques cassandres annonçaient depuis longtemps. De fait, les seuls arguments en faveur de la supersymétrie reposaient sur la sémantique utilisée précédemment: il semblait «naturel» qu'une théorie «élégante» fût certainement vraie. Des fondations bien faibles, pour ne pas dire naïves. À l'heure actuelle, le LHC est toujours à la recherche de particules de matière noire. Mais la supersymétrie ne s'étant pas manifestée aux échelles d'énergie du boson de Higgs, la motivation n'y est plus.

Faute d'arriver (pour l'instant?) à fabriquer la matière noire, pourrait-on tenter de détecter des particules existantes avec l'appareillage adéquat? Cette solution serait encore plus simple, car cette matière noire est *a priori* abondante. En imaginant que les particules qui la composent ont une masse comparable à celle d'un proton, alors on en trouve dans l'Univers en moyenne un peu plus d'une par mètre cube. Et au sein d'une galaxie comme la nôtre, sa densité est de plusieurs centaines de milliers

LE FLUX DE NEUTRINOS EN PROVENANCE DU SOLEIL FINIRA PEUT-ÊTRE PAR BROUILLER TOUTE TENTATIVE DE DÉTECTION DE MATIÈRE NOIRE DEPUIS LA TERRE

être instable, mais elle ne peut se désintégrer qu'en particules ordinaires. Cela signifie donc, en l'absence de détection des particules ordinaires issues de sparticules, qu'il existe au moins une particule supersymétrique stable. Dotée d'une masse non nulle, elle pourrait «naturellement» constituer la matière noire.

Cerise sur le gâteau, on peut calculer par des principes très généraux l'abondance envisageable de cette matière noire. De la même façon que les particules ordinaires, les particules supersymétriques coexistaient probablement avec leurs *alter ego* d'antimatière, des «antiparticules», très tôt dans l'histoire de l'Univers, et qu'elles connurent une période



Le détecteur de l'expérience *Cresst* est enterré sous la chaîne des Apennins, en Italie, dans le laboratoire Gran Sasso. Il guette la matière noire, à l'abri des parasites de la radioactivité naturelle et des rayons cosmiques.

de fois supérieure. Ajoutons que la vitesse de ces particules au sein de notre Galaxie est sans doute comparable à celle des étoiles (quelques centaines de kilomètres par seconde), et l'on obtient qu'à chaque seconde, une section de 1 mètre carré est traversée par 100 milliards de particules de matière noire !

Dès lors, même si la matière noire interagit peu, un détecteur dédié finira bien, s'il est suffisamment gros et opérationnel pendant longtemps, par détecter l'improbable interaction entre l'une de ces particules et un atome du détecteur. Ce principe n'est pas nouveau : c'est celui des détecteurs de neutrinos. En pratique, un tel détecteur est composé d'une vaste cuve remplie d'un liquide et tapissée de photomultiplicateurs qui vont patiemment attendre d'enregistrer un photon né de la collision entre un neutrino et un atome de la cuve. Le choc produit aussi une particule chargée, identifiée par diverses méthodes. La coïncidence des deux événements et leurs propriétés respectives trahissent l'interaction recherchée. Les problématiques pour les neutrinos ou la matière noire sont ainsi assez semblables : les événements rares que l'on cherche à détecter ne doivent pas être pollués par des phénomènes plus communs, mais sans intérêt. Lesquels ?

D'abord, la radioactivité naturelle, c'est-à-dire la désintégration spontanée de certains noyaux atomiques, se traduit parfois par des événements pouvant être confondus avec de possibles signaux de la matière noire. L'autre

source de nuisance vient des rayons cosmiques, ces particules très énergétiques qui heurtent la haute atmosphère en produisant quantité de particules secondaires. Parmi celles-ci, les muons (des cousins éloignés de l'électron) sont particulièrement gênants, car proches de la signature attendue de la matière noire. Produits à plusieurs kilomètres d'altitude, leur durée de vie relativement courte (2 microsecondes) ne devrait en principe pas les autoriser à parcourir plus de 600 mètres et donc d'atteindre le sol. C'est sans compter l'effet de dilatation des durées de la relativité restreinte, selon lequel une particule se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière voit sa durée de vie apparente augmenter pour un observateur immobile, par exemple situé sur Terre. Les muons peuvent donc rejoindre la surface terrestre.

SIX (MILLE) PIEDS SOUS TERRE

Et plus encore... car leur caractéristique la plus nocive est leur fort pouvoir pénétrant. Ils peuvent traverser plus d'un kilomètre de roche avant d'interagir avec la matière. Tout détecteur de matière noire (ou de neutrinos, du reste) se doit d'être enterré afin de s'affranchir des muons. Ces dispositifs sont donc hébergés dans des puits de mine ou des tunnels routiers. Un des hauts lieux de la recherche de matière noire est le laboratoire national du Gran Sasso, en Italie. Il a été aménagé à partir du tunnel autoroutier du même nom, sous environ 1 400 mètres de roches de la chaîne des Apennins.

> Qu'ont révélé ces expériences? Malgré des détecteurs de plus en plus gros, de plus en plus sensibles, avec des durées de fonctionnement de plus en plus longues, tous les espoirs d'une possible détection ont été douchés. Au début des années 2000, l'expérience *Dama* repérait un signal présentant une modulation annuelle, comme ç'aurait pu être le cas si, du fait de son déplacement autour du Soleil, la Terre voyait sa vitesse varier par rapport au courant local de matière noire.

Des années après, c'est l'expérience *Cresst* qui semblait détecter un autre signal du même type, confirmant le résultat d'une autre expérience, *CoGeNT*, mais au final aucun de ces espoirs ne résista à l'épreuve du temps. On ne doit pas en conclure que la matière noire est hors de portée. Peut-être même sa détection sera-t-elle annoncée d'ici un an ou deux, mais le temps commence à presser.

UN DÉTECTEUR SUR MARS OU SUR PLUTON

Car s'il reste encore possible de tenter l'aventure avec des détecteurs plus grands, plus profonds, mieux protégés de la radioactivité ambiante..., un moment viendra où la traque deviendra inutile, car les particules recherchées auront alors des caractéristiques telles qu'on ne pourra pas échapper à une autre source de nuisance que rien ne pourra écarter: les neutrinos issus du Soleil, qui n'ont aucune difficulté à traverser la Terre entière. Quand ce « plancher des neutrinos » sera atteint, il n'y aura guère d'espoir de détecter la matière noire, sauf à imaginer limiter le flux de neutrinos reçus par le détecteur, par exemple en l'enterrant sous la surface de... Mars ou, qui sait, Pluton. Un beau projet... pour le *xxi^e* siècle!

Faute de pouvoir mettre en évidence la matière noire sur Terre, il reste un dernier atout dans la manche des astrophysiciens: détecter dans le cosmos la trace de cette matière noire au-delà de sa seule présence gravitationnelle. L'idée est de supposer que la matière noire, même si elle est distribuée de façon très diffuse, comporte des zones suffisamment denses et étendues pour que des particules de matière noire puissent parfois interagir. Le centre des galaxies est la cible de choix. À quoi peut ressembler la signature d'une interaction de deux particules de matière noire?

En postulant que la matière noire est composée d'une particule qui est aussi sa propre antiparticule (comme c'est le cas du photon), alors une collision entre deux particules de matière noire produit une paire de photons ou bien une autre paire particule-antiparticule, par exemple un électron et un positon. Dans le premier cas, l'objectif est de chercher un excès de photons. Or comme les particules de



**CHERCHER LA MATIÈRE
NOIRE S'APPARENTE AUJOURD'HUI
À CHERCHER UNE AIGUILLE
DANS PLUSIEURS BOTTES DE FOIN
SANS AVOIR D'IDÉE PRÉCISE
SUR LA FORME DE L'AIGUILLE,
NI MÊME S'IL Y EN A VRAIMENT
UNE À TROUVER**



On a cru un temps que le télescope spatial *XMM-Newton* avait détecté de la matière noire via la désintégration de particules la composant. Mais non.

matière noire sont sans doute dotées d'une vitesse faible, on s'attend que leur annihilation mutuelle donne naissance à des photons situés dans une bande d'énergie relativement étroite. C'est à la recherche d'une sorte de raie d'émission plus ou moins marquée que se consacrent de nombreux astrophysiciens, mais là encore, la difficulté est d'extraire un signal de matière noire du «bruit» de haute énergie produit par des processus astrophysiques bien plus conventionnels.

On s'attend que le signal dû à de la matière noire soit relativement homogène en direction du centre galactique, puisque la distribution de matière noire a des chances de l'être également. À l'inverse, une origine astrophysique de photons de haute énergie serait plus probablement un ensemble de sources individualisées comme les pulsars. Distinguer entre ces deux hypothèses nécessite donc de pouvoir cartographier un éventuel excès de photons de haute

énergie avec une bonne résolution angulaire, mais malheureusement les télescopes qui pourraient convenir comptent parmi les plus myopes qui soient, même pour le plus performant d'entre eux, le télescope spatial américain *Fermi*. La recherche d'un excès de photons de haute énergie est à ce jour elle aussi une succession d'espoirs plus ou moins lucides douchés les uns après les autres. Depuis le début des années 2010, plusieurs annonces ont été faites, principalement par l'américain Dan Hooper. Si sa première annonce fut accueillie avec un prudent enthousiasme, son invalidation, suivie de plusieurs autres annonces toutes aussi infondées ont peu à peu convaincu la communauté que Dan Hooper ne voyait probablement que ce qu'il avait envie de voir.

PLUSIEURS ESPOIRS DOUCHÉS

Plus récemment, un autre résultat a été obtenu dans une bande d'énergie jusque-là assez peu explorée, dans le domaine du kiloelectronvolt. Là encore un possible excès à une énergie précise (3,5 keV) avait, pensait-on, été détecté par plusieurs télescopes X, l'europpéen *XMM-Newton* puis le japonais *Hitomi*, entre 2014 et 2016. Était-ce dû à des particules de matière noire de faible masse ou bien à des processus atomiques faisant intervenir du phosphore, du soufre ou du chlore fortement ionisés? Les analyses ont depuis tranché... pas de matière noire.

Qu'en est-il des potentielles paires particule-antiparticule nées de la collision entre deux particules de matière noire? Là encore, n'oublions pas que de l'antimatière peut être produite en faibles quantités par des processus conventionnels. Comme pour la détection de photons énergétiques, celle de l'antimatière ne peut se faire que dans l'espace. En quelques occasions, avec le détecteur PAMELA puis plus récemment avec l'expérience AMS, un début de semblant d'excès d'antimatière sembla se manifester, mais l'information ne fut pas plus confirmée que les autres.

Que penser de tous ces résultats négatifs? Du temps où les wimps apparaissaient, de loin, comme le candidat le plus prometteur, chercher la matière noire s'apparentait à chercher une aiguille dans une botte de foin. Avec la diversification des candidats et des méthodes de détection, il s'agit désormais de chercher une aiguille dans plusieurs bottes de foin, et sans avoir d'idée précise sur la forme, la taille, la composition et la couleur de l'aiguille... et sans même savoir s'il y en a vraiment une à trouver. Une quête vaine et sans espoir? L'optimisme est certainement moins de mise qu'il y a dix ou quinze ans. Que ce soit là un simple passage à vide ou les prémices de l'abandon d'une quête trop ardue pour notre époque reste une question ouverte. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. POUNDS ET AL., An ultrafast inflow in the luminous Seyfert PG1211+143, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 481(2), pp. 1832-1838, 2018.

L'ESSENTIEL

- Parmi les candidats à la «matière noire», ce composant invisible de l'Univers, l'axion est une particule hypothétique à laquelle les physiciens s'intéressent de plus en plus.
- Son existence résoudrait aussi un problème lié à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques.
- L'expérience ADMX tente de détecter cet axion *via* les photons microondes issus de leur désintégration.
- Ce dispositif a récemment atteint un niveau de sensibilité suffisant pour tester les versions les plus plausibles des axions.

L'AUTEUR



LESLIE ROSENBERG est professeur de physique à l'université de Washington, à Seattle, aux États-Unis.

L'axion, une idée qui a la cote

Imagines pour résoudre un conflit entre la théorie et les expériences en physique des particules, les axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire. Reste à les détecter. C'est le sens de l'expérience ADMX, dont la sensibilité permet désormais de traquer ces particules invisibles.

L

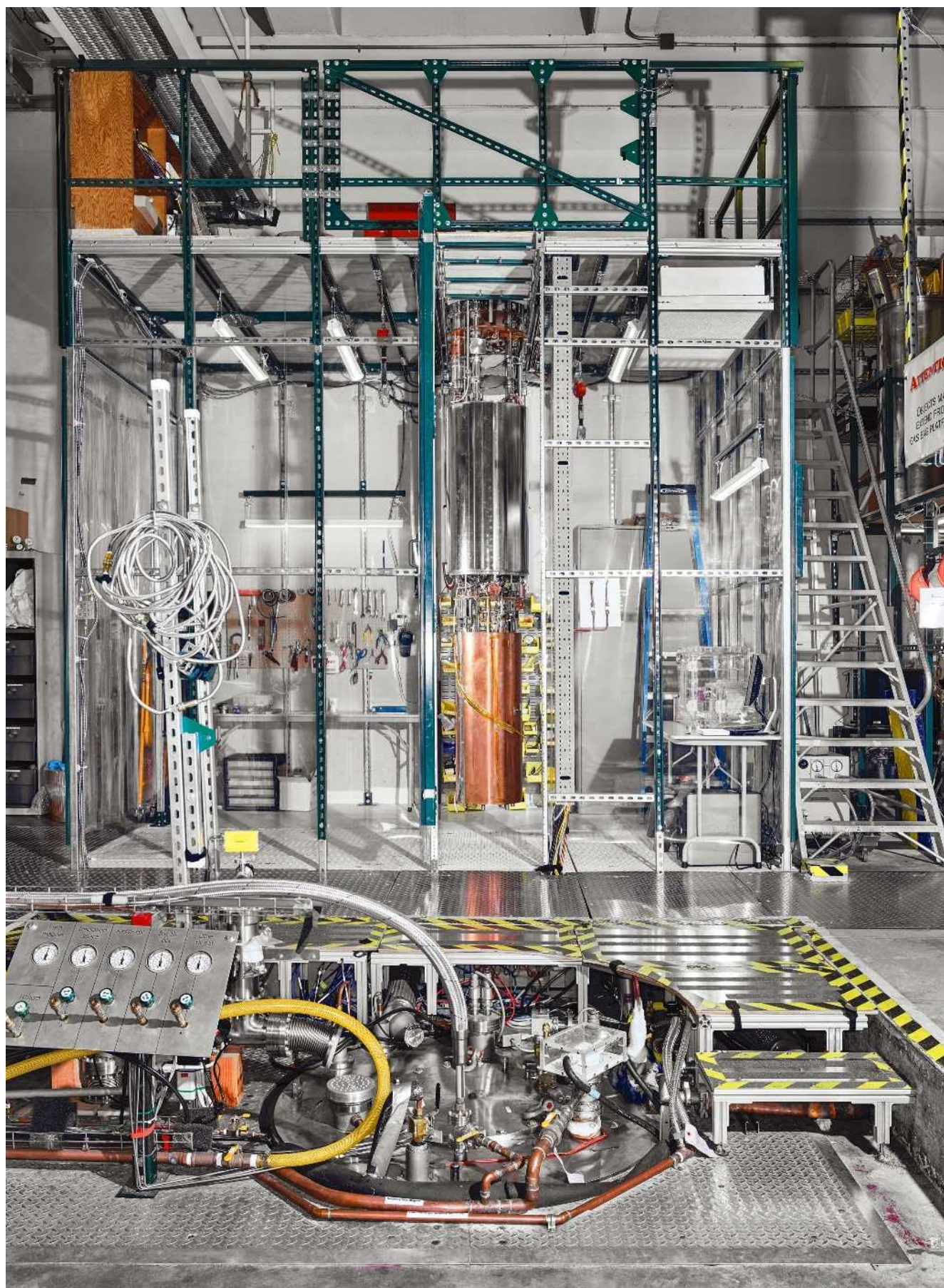
e cosmos est constitué en majeure partie de quelque chose que nous ne pouvons pas voir. Telle est la conclusion qui s'est imposée aux astronomes depuis les années 1930 et les premières observations d'amas de galaxies dont la cohésion ne pouvait être assurée que par un supplément de matière qui échappait à la détection. L'idée de «matière noire» s'est renforcée à partir des années 1970, quand les astronomes qui étudiaient la rotation des galaxies sont parvenus à la même conclusion.

Désormais, il est quasiment certain que plus de 90% de la matière qui s'aggrave sous l'effet de la gravité est un matériau exotique, probablement des particules vestiges du Big Bang et dont la nature reste à préciser.

Pendant longtemps, les physiciens avaient un candidat favori pour la matière noire: le «wimp» (acronyme de *weakly interacting massive particle*, particule massive interagissant faiblement), qui s'inscrit dans une théorie populaire mais spéculative, celle de la supersymétrie. Cependant, au terme de plusieurs décennies de recherche aucune trace de ces wimps n'a été trouvée. Il est trop tôt pour enterrer les wimps, mais ces résultats négatifs ont incité les physiciens à considérer d'autres candidats au titre de la matière noire.

L'un d'eux est l'axion, une particule hypothétique beaucoup moins massive que le wimp, mais qui interagirait aussi peu avec la matière ordinaire. Si la matière noire est effectivement constituée d'axions, nous baignerions dans un océan de ces particules à raison de dizaines, voire de centaines de billions par centimètre cube. Leur seul effet sur le reste de l'Univers ➤

Le cœur de l'expérience ADMX est à l'abri dans une salle blanche (en arrière-plan), pour le protéger des poussières. Lors d'une prise de données, le dispositif est descendu dans un trou (ici recouvert et au premier plan) pour le protéger des perturbations extérieures.



- serait gravitationnel – leur masse cumulée serait assez importante pour expliquer le mouvement des étoiles dans les galaxies ainsi que celui des galaxies dans les amas.

Depuis plus de vingt ans, je participe à la recherche de ces particules dans le cadre de l'expérience ADMX (*Axion dark matter eXperiment*) dont le détecteur est sans cesse amélioré. Le dispositif est désormais assez sensible pour être en mesure, d'ici cinq à dix ans, de détecter des axions ou d'exclure les scénarios d'axions les plus plausibles. Mais en quoi consiste plus précisément ces axions ?

UN PROBLÈME DE CP

Dans les années 1980, l'idée des axions a été émise pour répondre à un problème soulevé par la chromodynamique quantique (QCD). La QCD est la théorie de l'interaction forte, qui assure la cohésion des composants du noyau atomique et du noyau lui-même. Les expériences de physique des particules sont en accord remarquable avec les prédictions de cette théorie, sauf en ce qui concerne le « problème de la violation de CP pour l'interaction forte » (CP signifiant « charge-parité »).

Selon la QCD, si vous inversez la charge et la parité d'une particule (c'est-à-dire si vous inversez sa charge électrique et si vous la regardez dans un miroir), elle ne suivrait plus exactement les mêmes lois physiques. Pourtant, rien dans les résultats expérimentaux n'indique que c'est le cas. Ce conflit entre la théorie et les expériences constitue une fissure dans le bel édifice du modèle standard, notre meilleur modèle de la physique des particules. Cette énigme est le « problème CP fort ».

En 1977, alors à l'université Stanford, Helen Quinn et Roberto Peccei se sont rendu compte qu'ils pouvaient aborder le problème CP fort de façon simple et élégante en utilisant l'idée des symétries brisées. Ce concept, l'une des idées récurrentes de la physique, se résume ainsi : les lois de la nature ne sont parfois pas invariantes lorsqu'on applique certaines opérations de symétrie, alors qu'on pense qu'elles devraient l'être. Par exemple, si vous posez un crayon verticalement sur sa pointe, la symétrie de rotation fait qu'il a autant de chances de tomber dans une direction que dans une autre. Mais le crayon finit par tomber dans une direction particulière, et la symétrie est donc « brisée ». Quand une telle brisure se produit dans le contexte de la physique des particules, elle implique l'existence d'une particule qui préserve d'une certaine façon la symétrie sous-jacente, même si elle semble, en surface, avoir été brisée. La symétrie n'est pas nécessairement évidente ; il peut s'agir d'une symétrie mathématique abstraite.

Avec une intuition brillante, Helen Quinn et Roberto Peccei ont appliqué cette idée à

l'interaction forte. Ils ont supposé qu'une symétrie cachée liée à cette force a été brisée. Si tel était le cas, cela annulerait les effets de la symétrie CP attendus par la théorie et que l'on n'observait pas dans les expériences. Problème résolu. Peu après, grâce à une autre intuition brillante, Steven Weinberg, à l'université du Texas à Austin, et Frank Wilczek, à l'institut de technologie du Massachusetts, ont remarqué que le mécanisme de Peccei-Quinn implique l'existence d'une nouvelle particule : l'axion. D'après une légende, ce nom reprend celui d'une marque de lessive parce que la particule fait disparaître la tache que constitue le problème CP fort. Dès le milieu des années 1980, les physiciens ont suggéré que des axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire.

La théorie ne nous renseigne pas sur la masse des axions ni sur leur probabilité d'interagir avec la matière ordinaire. Mais nous savons qu'ils doivent très peu interagir avec la matière ordinaire, parce que les collisionneurs de particules et d'autres expériences n'en ont

LE NOM D'AXION REPREND CELUI D'UNE LESSIVE PARCE QUE LA PARTICULE FAIT DISPARAÎTRE LA TACHE QUE CONSTITUE LE PROBLÈME CP FORT

encore jamais repéré. S'ils sont extrêmement inertes, la théorie indique qu'ils sont aussi extrêmement légers.

En 1987, un événement cosmique majeur a fourni aux physiciens des contraintes sur la masse de l'axion : la supernova qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la nôtre. Presque toute l'énergie de l'effondrement gravitationnel de l'étoile sur elle-même s'est échappée sous forme de neutrinos, dont certains ont été détectés. Si les axions avaient une masse d'au moins quelques milliélectronvolts, en unités d'énergie (un peu plus d'un milliardième de la masse de l'électron), ils auraient été produits en grandes quantités lors de l'explosion et auraient modifié le temps mis par les neutrinos pour s'échapper de l'astre. Mais puisque

les observatoires et les détecteurs de neutrinos n'ont enregistré aucune distorsion de ce genre, nous savons que les axions doivent être de masse inférieure.

Des axions aussi légers ont des interactions extrêmement faibles avec la matière ordinaire et la lumière. Par exemple, une particule relativement banale, le pion neutre, est instable et se désintègre en deux photons en environ 10^{-16} seconde. Un axion léger pourrait subsister 10^{45} ans avant de se désintégrer en deux photons, une durée bien supérieure à l'âge de l'Univers (un écart d'environ 35 ordres de grandeur). L'axion serait, parmi toutes les particules connues, celle qui interagit le moins avec les autres (et de loin).

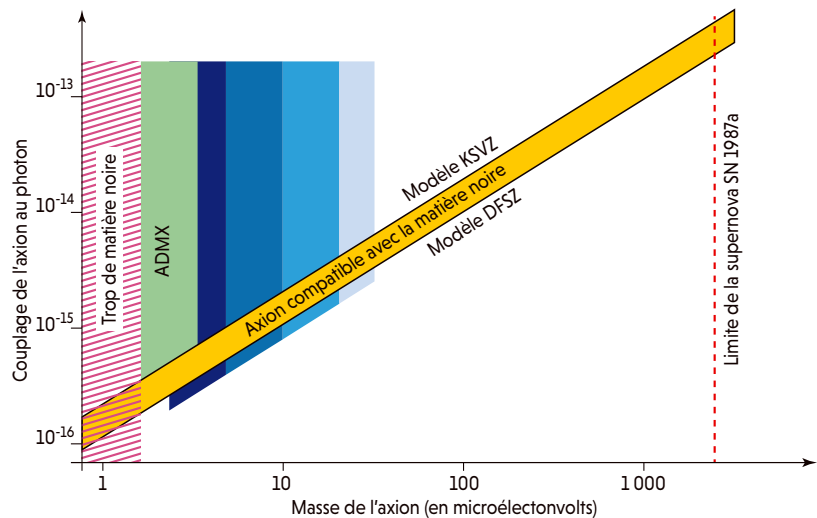
DES AXIONS INVISIBLES

Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions pendant le Big Bang montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité en axions qui en résulte est grande. Ainsi, pour des masses d'axions inférieures à un certain seuil, le Big Bang aurait produit beaucoup plus d'axions qu'il n'en faut pour rendre compte de la matière noire. Certes, d'importantes incertitudes pèsent sur le mécanisme de production des axions et les théoriciens ont proposé des astuces pour contourner le problème. Mais il est de plus en plus improbable que les axions aient une masse très inférieure à un microélectronvolt.

En résumé, les axions ne peuvent pas être trop lourds, sinon nous les aurions déjà détectés dans les collisionneurs de particules ou au travers de leurs effets sur l'évolution des autres étoiles. Et ils ne peuvent pas non plus être trop légers, sinon il y aurait trop de matière noire. On peut estimer que la plage raisonnable pour la masse de l'axion se situe entre un microélectronvolt et un milliélectronvolt.

Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky (DFSZ) du nom des physiciens qui les ont développés. Dans ces modèles, l'interaction des axions avec la matière est encore plus rare que dans le modèle initial. Ainsi, dans la gamme de masses des axions intéressante pour la matière noire, la probabilité d'interaction est si faible que l'on parle d'« axions invisibles ».

Alors comment détecter les axions ? Quand Helen Quinn et Roberto Peccei ont théorisé l'existence de ces particules, des physiciens se sont mis à les rechercher dans les collisions des



On synthétise les diverses contraintes pesant sur l'axion en représentant le couplage de l'axion au photon en fonction de la masse de l'axion. La zone colorée en jaune correspond aux conditions pour lesquelles l'axion est un bon candidat au titre de matière noire. Si la masse de l'axion est très faible, trop de ces particules sont produites durant le Big Bang et on obtient trop de matière noire. Au-delà de 1000 microélectronvolts, certaines observations astrophysiques restreignent aussi les caractéristiques de l'axion. L'expérience ADMX explore une partie des masses possibles pour l'axion (en vert). Les futures améliorations permettront d'aller plus loin (en bleu).

accélérateurs de particules. Mais les propriétés mêmes qui font de l'axion un candidat intéressant au titre de matière noire (ses faibles interactions avec la matière ordinaire et le rayonnement) signifiaient qu'il était insaisissable et que sa recherche semblait vaine. Il était frustrant de savoir que nous baignons peut-être dans un océan de particules impossibles à mettre en évidence en laboratoire.

Pierre Sikivie, de l'université de Floride, a alors proposé de changer d'approche : au lieu d'essayer de créer les axions dans des accélérateurs, nous pourrions tenter de détecter les axions cosmiques. L'idée était d'utiliser une cavité cylindrique vide de tout sauf des axions cosmiques censés inonder l'espace. Un champ magnétique intense régnant dans l'enceinte inciterait des axions à se transformer en photons faciles à détecter. Une telle réaction se produirait avec une probabilité d'autant plus grande que la fréquence de résonance de la cavité (qui dépend de ses dimensions, des matériaux...) est proche de la fréquence du photon produit par l'axion.

Comme la masse des axions est petite, et que ceux qui environnent se déplacent à des vitesses comparables au reste de la Voie lactée, leur énergie est minuscule. Dès lors, la fréquence du photon produit se situerait dans la gamme des microondes. Mais pour la définir exactement, il faut connaître la masse de l'axion... C'est pourquoi les expérimentateurs devront changer en permanence la fréquence résonante de la cavité expérimentale afin de « balayer » la plage possible, dans l'espoir de tomber sur la fréquence qui correspond à la masse de l'axion.

Le signal résultant serait très faible, peut-être 10^{-21} watt ou moins, et accompagné d'un bruit à peu près du même ordre de grandeur. Mais des détecteurs de microondes très sensibles, collectant un signal sur un temps assez long, devraient être à la hauteur de la tâche. ➤