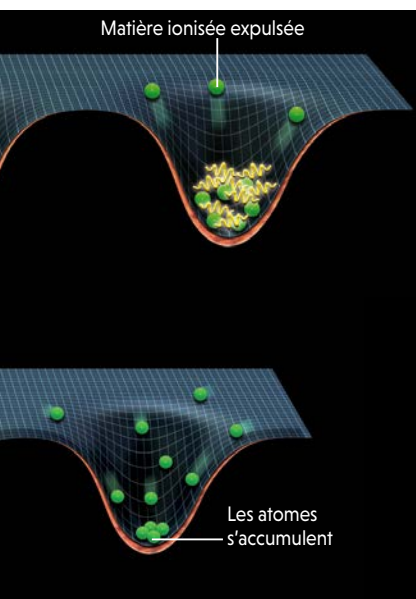




expériences dédiées ou d'en voir une signature indirecte dans l'étude des rayons cosmiques. Mais aucun de ces programmes n'a été couronné de succès.

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.