



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.

➤ lesquelles, fascinées, nous contemplâmes une prospère forêt de corail regorgeant de seiches, de bénitiers géants violets et de gracieuses tortues marines...

Et me voilà de retour, cette fois en tant que chercheuse postdoctorale à l'Institut australien des sciences marines situé à Cape Ferguson dans le Queensland. Prête à m'émerveiller à nouveau, j'entre dans l'eau jusqu'au menton, puis regarde à travers mon masque. Mon cœur se serre: plus aucune seiche, plus de tortues non plus... Le corail est pâle. Le foisonnement de vie auquel je m'attendais a été remplacé par des algues et des sédiments. Certes, j'ai déjà entendu des chercheurs confirmés raconter des histoires déchirantes quant à la dégradation de tel ou tel récif au cours de leur carrière, mais, à peine dix ans après le début de la mienne, j'ai l'impression d'être trop jeune pour faire le même constat.

50 % DES CORAUX SONT MORTS, 70 % ONT BLANCHI

Ce choc, c'est en 2014, alors que commençait le troisième grand épisode de blanchiment, que je l'ai vécu. Les coraux – que l'on confond souvent avec des rochers – sont en fait de petits animaux – les polypes – sécrétant un exosquelette et vivant en symbiose avec des microalgues – les zooxanthelles –, qui leur fournissent la majeure partie de leur nourriture (de 60 à 90%) et leur donnent leurs couleurs. Quand l'élévation de la température des eaux marines stresse les coraux, ils tendent à expulser leurs microalgues. Leurs colonies perdent alors leurs couleurs pour adopter celle du calcaire constitutif de l'exosquelette des polypes: elles blanchissent. Le blanchiment massif des coraux entamé en 2014 a duré trois ans, dévastant les récifs et brisant des cœurs sur toute la planète. En fait, même si la surpêche, la pollution et l'acidification des océans menacent aussi les récifs coralliens, la principale inquiétude à leur propos aujourd'hui est bien leur destruction rapide et massive par le réchauffement des eaux océaniques.

Provoquées par des épisodes El-Niño, les premières grandes phases de blanchiment se sont produites en 1998 et en 2008. Celle de 2014-2017 a de loin été la plus longue et la plus ample puisqu'elle a concerné pas moins de 70% des récifs coralliens du monde. Deux tiers des coraux de la Grande Barrière de corail ont été soit sévèrement blanchis, soit détruits. Et la dévastation continue: les récifs coralliens disparaissent sous nos yeux. Au cours des 30 dernières années, nous avons perdu approximativement 50% des coraux de la planète et les chercheurs estiment que pas plus de 10% des coraux du monde survivront jusqu'en 2050. Nous avons besoin de solutions pour les sauver et il nous les faut très vite!

Même si les récifs coralliens ne couvrent que 0,1% de la surface du fond océanique, on



y rencontre 25% des espèces marines connues, dont certaines nourrissent des millions de gens. Ils représentent aussi des protections côtières naturelles capables d'abattre jusqu'à 97% de l'énergie des vagues et 84% de leur hauteur. Et puis, les coraux sont aussi à l'origine d'une activité touristique. Si nous devons les perdre, nous compromettrions les vies de quelque 500 millions de personnes et un volume d'activité annuel de plus de 30 milliards d'euros de ressources naturelles et de services.

Poussés par l'urgence de la situation, des chercheurs se sont mis à développer des moyens de plus en plus audacieux et créatifs pour maintenir les récifs coralliens et les restaurer. Les techniques nécessaires doivent être bon marché et adaptables à grande échelle. Ces critères ont conduit à une poignée d'options fondées sur des processus naturels et des interventions humaines. Ensemble, ces actions pourraient aider les coraux à traverser les prochaines décennies – et atteindre, espérons-le, une période où l'humanité aura assez réduit ses émissions pour que le réchauffement climatique ralentisse.

Si vous plongez un jour à quelque sept kilomètres de la côte de Floride, peut-être tomberez-vous sur des forêts d'arbres en plastique aux branches ornées de coraux, semblables à des sapins de Noël décorés. Les chercheurs emploient de tels élevages en mer ou en bassin

Les plongeurs fixent sur un récif des coraux élevés au laboratoire marin Mote, en Floride, afin de repeupler le récif, un peu comme on plante de jeunes arbres pour reconstituer une forêt.

À PROPOS DE L'AUTEURE



REBECCA ALBRIGHT
s'est spécialisée dans l'étude des coraux ; elle travaille comme conservatrice à l'Académie des sciences de Californie.