

où on attendrait un candidat pour expliquer *Dama/Libra*. Les incertitudes sur ces résultats sont encore un peu trop élevées pour exclure définitivement *Dama/Libra*... mais la situation n'est pas très favorable.

LA PISTE DE L'AXION

La piste du wimp semble se refroidir, mais un autre candidat a le vent en poupe : l'axion. Cette particule avait été postulée en 1977 par Roberto Peccei et Helen Quinn, initialement pour résoudre un problème lié aux quarks et à l'interaction forte. Mais en 1983, le Prix Nobel de physique Frank Wilczek et ses collègues ont compris que l'axion était aussi une solution possible pour la matière noire. Des expériences comme ADMX, à l'université de Washington, ou encore le projet européen MADMAX, tentent de détecter ces particules en s'appuyant sur l'effet Primakoff : dans un champ magnétique fort, l'axion peut se convertir en photon. Pour l'instant, aucun signal n'a été constaté. En 2020, l'expérience de recherche directe de wimps, XENON1T, a enregistré un signal anormal à basse énergie dont une interprétation possible serait la manifestation d'axions dans l'enceinte de l'expérience. Cette hypothèse devra être confirmée par son successeur, XENONnT.

La recherche de l'axion commence à atteindre des sensibilités intéressantes et pourrait réserver des surprises. Celle sur la détection directe de wimps n'a pas livré d'indices forts, mais l'ambiance n'est pas à l'abattement. «Trois grandes expériences au xénon liquide, XENONnT, LZ et PandaX, ont démarré ou devraient être opérationnelles d'ici peu», souligne Julien Masbou, de l'université de Nantes et membre de la collaboration XENON. «Nous devrions voir assez vite si le signal à basse énergie de XENON1T est dû à un excès de tritium (un isotope de l'hydrogène présent en faibles quantités dans l'eau) ou s'il s'agit d'autre chose comme des axions.» La génération suivante de détecteurs se précise également. «L'expérience Darwin devrait contenir 50 tonnes de xénon. Même si l'objectif principal est la détection de matière noire, ce projet est un véritable observatoire pour les événements rares. Il devrait permettre d'étudier les wimps, les axions, mais aussi les neutrinos solaires ou astrophysiques, certains processus de désintégration dite "double bêta" et plein d'autres phénomènes.»

Dans les années à venir, de nouveaux résultats aideront peut-être à y voir plus clair. Mais il semble tout aussi indispensable d'explorer d'autres voies pour expliquer le profil de vitesse des galaxies et le spectre du fond diffus cosmologique. La piste de la gravité modifiée s'affirme donc comme un concurrent intéressant, d'autant plus que certaines de ses variantes décrivent avec efficacité la dynamique de rotation des galaxies. Cette approche justifie, par



L'expérience XENONnT succède à XENON1T, installée dans le laboratoire souterrain de Gran Sasso, en Italie. Elle consiste en une cuve de 8,3 tonnes de xénon, très pur. Une grande partie est à l'état liquide. Lorsqu'un wimp, une hypothétique particule de matière noire, interagit avec un atome de xénon, deux phénomènes sont possibles : une scintillation ou une ionisation. Dans le cas d'une scintillation, de la lumière à une longueur d'onde de 178 nanomètres serait émise et détectée par un ensemble de capteurs (des photomultiplicateurs) installés sur les parties supérieure et inférieure de la cuve cylindrique. Si une ionisation se produit, l'électron arraché à son atome est entraîné par un champ électrique vers le haut de la cuve et déclenche un signal. La sensibilité de XENONnT est l'une des plus élevées parmi les expériences de détection directe de matière noire.

exemple, bien mieux la loi empirique, dite «loi de Tully-Fisher», qui relie la luminosité des galaxies spirales à leur masse, que ne le font les scénarios à base de matière noire.

MATIÈRE NOIRE OU MOND ?

Cette approche a été proposée en 1983 par Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël. Ce chercheur était motivé par l'idée d'expliquer le profil de vitesse des galaxies sans avoir besoin d'invoquer un nouveau type de particule. Il a suggéré de modifier la gravitation aux accélérations très faibles, on parle de théorie Mond (*Modified newtonian dynamics*). Au-dessus d'un seuil de l'ordre de 10^{-10} mètre par seconde au carré, la gravitation universelle de Newton, en tant que limite de champ faible de la relativité générale, est inchangée. En dessous du seuil, sa formulation diffère. Cette théorie décrit alors parfaitement le mouvement des galaxies en rotation. Un inconvénient est que le seuil est si faible qu'il est impossible de tester cette hypothèse en laboratoire sur Terre.

Pour étudier les conséquences cosmologiques d'une approche de gravité modifiée, il était nécessaire de développer une version

BIBLIOGRAPHIE

C. Skordis et T. Złóćnik, **New relativistic theory for modified newtonian dynamics**, *Physical Review Letters*, 2021.

Collaboration *Cosine-100*, **Strong constraints from COSINE-100 on the DAMA dark matter results using the same sodium iodide target**, *Science Advances*, 2021.

J. Freundlich et al., **Probing the radial acceleration relation and the strong equivalence principle with the Coma cluster ultra-diffuse galaxies**, *Astronomy & Astrophysics*, 2021.

J. Amaré et al., **Annual modulation results from three-year exposure of ANAIS-112**, *Physical Review D*, 2021.

Collaboration *XENON*, **Excess electronic recoil events in XENON1T**, *Physical Review D*, 2020.

relativiste de Mond. En 2004, Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem, a proposé un premier exemple, nommé TeVeS, dans lequel il a considéré trois champs (tensoriel, vectoriel et scalaire) pour remplacer l'unique champ gravitationnel (la métrique) de la relativité générale. Malheureusement, TeVeS se heurtait à un obstacle majeur : ce modèle ne permet pas de reproduire correctement le spectre du fond diffus cosmologique, réputé pour être le test ultime pour les théories concurrentes à Λ CDM.

Pire, en 2017, la détection d'ondes gravitationnelles par les interféromètres *Ligo* et *Virgo* lors de la fusion de deux étoiles à neutrons (notée GW170817) a asséné un second coup fatal à TeVeS. De nombreux observatoires sur Terre et en orbite ont enregistré la contrepartie électromagnétique de cette coalescence, le rayonnement émis lors de cette collision. Les ondes gravitationnelles et lumineuses sont arrivées presque simultanément (à une seconde d'intervalle en prenant en compte les incertitudes sur l'instant d'émission depuis la source située à 130 millions d'années-lumière de la Terre). Conclusion : ces ondes se sont donc propagées à la même vitesse. Avec TeVeS, les physiciens s'attendaient à un autre résultat. En effet, à cause de la présence sur le trajet de matière qui déforme l'espace-temps, les ondes gravitationnelles et lumineuses sont ralenties, c'est l'effet Shapiro. Dans le cadre de la relativité générale, ce retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais dans TeVeS, il diffère. Et dans le cas de GW170817, le retard entre les ondes

gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours. Grâce à ce résultat, les physiciens ont pu définitivement éliminer le modèle TeVeS et de nombreux autres scénarios de gravité modifiée relativistes.

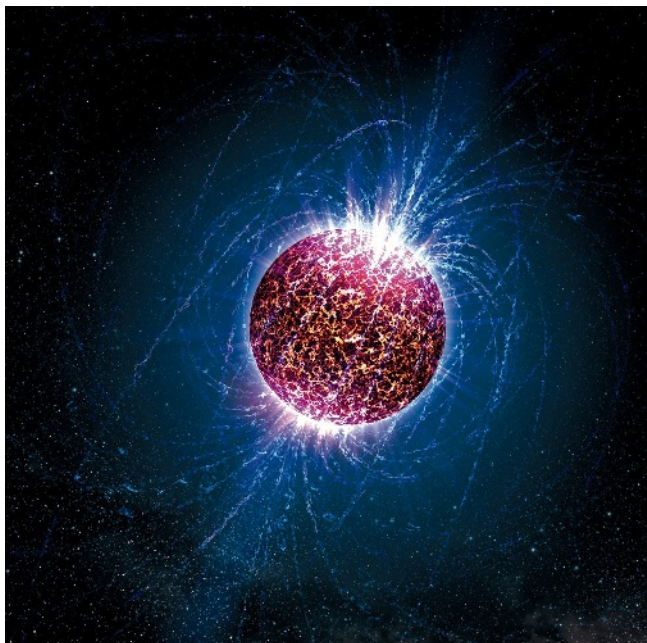
La question était donc de savoir s'il est possible de construire un modèle de gravité modifiée qui passe les contraintes sur les ondes gravitationnelles (avec l'effet Shapiro) et sur le spectre du fond diffus cosmologique.

À L'ASSAUT DU FOND DIFFUS

L'objectif de Constantin Skordis et de Tom Złóćnik était de construire un modèle relativiste dérivé de TeVeS qui se comporte comme Mond à l'échelle des galaxies et comme la matière noire aux échelles cosmologiques pour reproduire les résultats de Λ CDM. Cette nouvelle approche devait, aussi, rendre correctement compte de l'arrivée simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques dans l'événement GW170817.

Les deux chercheurs ont développé un modèle, nommé RMond, qui répond à toutes ces contraintes. Extension du modèle TeVeS, il s'en distingue cependant de deux façons. Dans TeVeS, la matière ordinaire, en particulier les photons, interagissait avec les trois champs supplémentaires alors que les ondes gravitationnelles ne couplaient qu'avec la métrique. C'était la source du problème de l'effet Shapiro pour GW170817. Dans RMond, la matière n'interagit qu'avec la métrique et des paramètres sont ajustés pour avoir les mêmes vitesses pour les différentes ondes.

DES AXIONS DANS LES PULSARS ?



Les observations en astrophysique offrent des pistes intéressantes de détection des axions. Comme ces particules seraient des millions de fois plus légères que les électrons, elles devraient être produites en grand nombre dans certains processus astrophysiques. En s'échappant, elles emporteraient une grande quantité d'énergie et conduiraient au refroidissement plus rapide que prévu de certaines étoiles. En janvier 2021, Benjamin Safdi, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont proposé d'interpréter un rayonnement en rayons X provenant d'étoiles à neutrons comme la manifestation de la présence d'axions. Les étoiles à neutrons (*ci-contre*) sont des astres très compacts dotés d'un fort champ magnétique, dans lequel on peut imaginer que des axions sont convertis en photons. Cependant, la plupart des étoiles à neutrons sont en rotation rapide (au moins plusieurs dizaines de tours par seconde) et émettent pour cette raison de grandes quantités de rayons X. Il serait donc impossible d'y distinguer la contribution des axions. Benjamin Safdi et son équipe se sont intéressés aux « Sept Mercenaires », des étoiles à neutrons qui ont la particularité de tourner très lentement sur elles-mêmes (avec des périodes comprises entre 3 et 12 secondes). Six d'entre elles présentent un excès dans leurs émissions X, une mesure que les chercheurs proposent d'interpréter comme un signal venant d'axions et pour laquelle ils suggèrent de nouvelles observations pour confirmer cette piste et l'existence de ces particules hypothétiques.