

modèle, l'énergie sombre sous la forme d'une constante cosmologique qui explique l'expansion accélérée de l'Univers), on reproduit de façon très précise le spectre du fond diffus cosmologique.

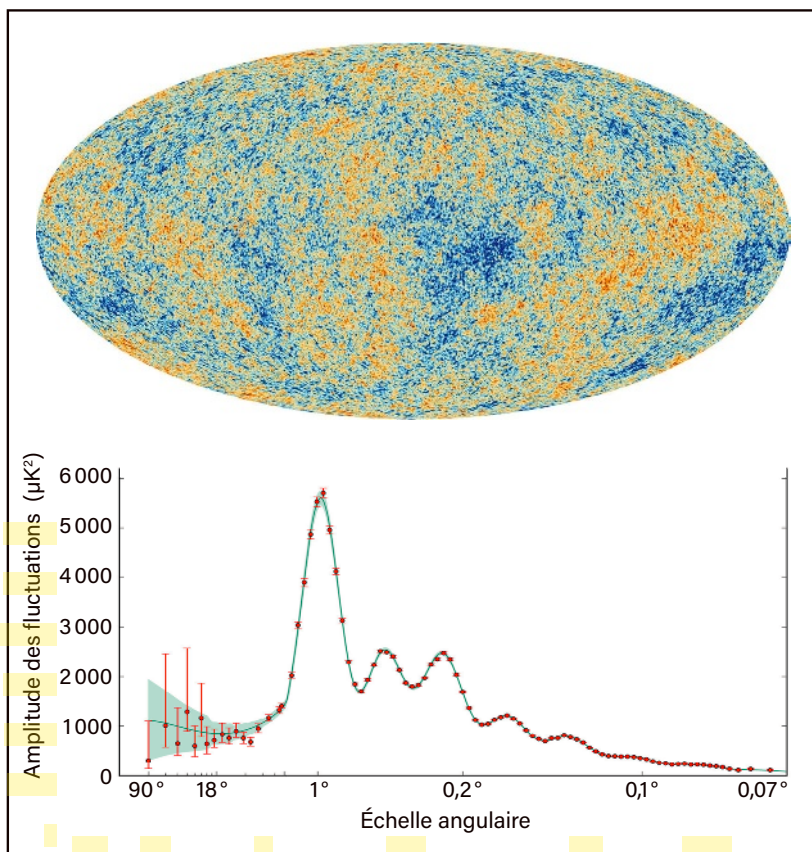
La matière noire s'est imposée en cosmologie comme un élément essentiel. Restait à en déterminer la nature. Or, à l'époque des travaux de Vera Rubin et de James Peebles, les physiciens des particules finalisaient le modèle standard et avaient compris que ce dernier n'est probablement qu'une approximation à basse énergie d'une théorie plus fondamentale. La piste d'extension la plus encourageante était celle de la supersymétrie, qui répond à certains problèmes du modèle standard, et prédit l'existence de nouvelles particules, dont certaines sont des candidats possibles pour la matière noire.

Notamment, une classe de particules supersymétriques, surnommées wimp (*weakly interacting massive particle*), a suscité beaucoup d'intérêt. En interagissant faiblement avec la matière ordinaire, et avec une masse d'environ 100 gigaélectronvolts (ce qui est l'ordre de grandeur naturel de masse pour des particules dans les modèles supersymétriques simples), le wimp serait présent dans l'Univers avec une abondance correspondant à celle requise pour la matière noire cosmique. Ce «miracle du wimp» a motivé de nombreux programmes de recherche pour confirmer l'existence de ce candidat à la matière noire.

Une possibilité est de produire ces particules dans un collisionneur de particules comme le LHC (Large Hadron Collider), au Cern, près de Genève. Les modèles les plus simples et naturels de supersymétrie devaient être à la portée des expériences du LHC. Mais aucun signe de cette extension du modèle standard n'a été observé. Et, de façon plus générale, aucune expérience de physique des particules ne semble avoir mis en évidence des indices assez solides de la physique au-delà du modèle standard. Ces dernières années, quelques anomalies dans le secteur des mésons B ou dans la mesure du moment anomal du muon ont été isolées, mais ces résultats restent à confirmer et sont bien trop préliminaires pour y voir des indices de supersymétrie.

Les physiciens ne peuvent cependant pas exclure que la supersymétrie existe bien dans la nature. Mais elle se présenterait sous une forme plus complexe et moins élégante, avec par exemple des particules plus massives que prévu (et donc hors de portée du LHC), laissant de plus en plus de chercheurs perplexes.

Une autre voie de recherche des wimps consiste non pas à les produire, mais à détecter ceux présents dans l'Univers et qui traverseraient la Terre. Les chercheurs réalisent pour cela de grandes expériences opérant pendant



des années pour identifier des interactions très rares entre un wimp et un atome de leurs dispositifs. Ces expériences ont gagné en sensibilité au fil des dernières décennies, mais elles n'ont encore récolté aucun signal positif de matière noire. Les rares annonces de détection potentielles ont finalement été écartées grâce à des mesures toujours plus précises.

Le cas du signal périodique et annuel de l'expérience *Dama/Libra*, en Italie, a longtemps tenu en haleine les spécialistes, mais il est à son tour mis à mal. Selon les physiciens de ce projet, ils observent une modulation annuelle due à la révolution de la Terre autour du Soleil. Pendant six mois, la planète (et donc le détecteur) se déplace dans le même sens que le halo galactique de matière noire, et les six autres mois à contre-courant. Ce faisant, le détecteur capterait plus ou moins de particules, une idée similaire au fait d'être plus vite trempé quand on court face au vent pendant une averse. Or en mai et en novembre 2021, les expériences *Anais*, en Espagne, et *Cosine-100*, en Corée du Sud, conçues avec les mêmes techniques que *Dama/Libra*, ont mis à mal les résultats de cette dernière. Avec trois ans de données, *Anais* n'a pas vu de signal périodique. Et avec 1,7 an d'enregistrement, *Cosine-100* n'a détecté aucun événement à basse énergie, là

UN TEST FATAL?

Le fond diffus cosmologique est le premier rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de seulement 380 000 ans. Observé dans toutes les directions sur la voûte céleste, il semble presque homogène et correspond à une température de 2,7 kelvins. Grâce à une sensibilité élevée, le télescope spatial *Planck* a mesuré la distribution spatiale de fluctuations autour de cette valeur moyenne (en haut), avec des régions un peu plus chaudes (en rouge et jaune) et d'autres, plus froides (en bleu et vert). L'analyse de la taille de ces zones conduit à un spectre (en bas) dont les caractéristiques peuvent être reliées aux conditions physiques de l'Univers au moment de l'émission du fond diffus cosmologique. L'axe horizontal correspond à la taille angulaire de ces taches. Le modèle standard de la cosmologie LCDM décrit parfaitement les mesures. Les approches concurrentes échouent souvent à faire aussi bien. Or le nouveau modèle de gravité modifiée RMond a franchi avec succès cette épreuve.

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