

servira peut-être d'inspiration à une théorie physiquement mieux motivée qui en reprendra les ingrédients de base.

L'histoire de la matière noire a presque quatre-vingt-dix ans. Dans les années 1930, l'astronome Fritz Zwicky a noté des incohérences en étudiant la dynamique des galaxies au sein de l'amas de la Chevelure de Bérénice (aussi nommé amas de Coma). Le mouvement des galaxies régi par la gravitation n'était pas compatible avec la quantité de matière que l'amas semblait contenir. Il a suggéré la présence, avant l'heure, de matière sombre. La question a suscité peu d'interrogations jusqu'en 1970, quand Vera Rubin a commencé à observer le même problème en mesurant le profil de vitesse des galaxies spirales, c'est-à-dire la vitesse de rotation des objets en fonction de leur distance au centre de leur galaxie. Les lois de Newton décrivent assez simplement comment la vitesse devrait évoluer en fonction du rayon, ou, plus précisément, en fonction de la quantité de masse galactique incluse à l'intérieur de ce rayon. Or l'astrophysicienne constatait que les objets les plus éloignés dans la galaxie se déplaçaient bien trop rapidement et auraient donc dû être éjectés. En effet, au lieu de décroître à partir

la dynamique des amas de galaxies qui posait problème à Fritz Zwicky. Et, aux échelles plus vastes, cet ingrédient contribue à reproduire de façon satisfaisante la formation des grandes structures et le spectre du fond diffus cosmologique. La matière noire est ainsi devenue un élément incontournable du modèle cosmologique.

UN INGRÉDIENT MANQUANT ET OMNIPRÉSENT

Son rôle dans la compréhension du fond diffus cosmologique est particulièrement important. Ce rayonnement microonde est presque homogène et isotrope quand on mesure sa température sur l'ensemble de la voûte céleste. Elle est d'environ 2,7 kelvins, mais elle présente de petites fluctuations, de l'ordre de 10^{-5} en valeur relative autour de sa valeur moyenne. Ces fluctuations sont très intéressantes, car elles témoignent des conditions primordiales lors de l'émission du fond diffus quand l'Univers avait 380 000 ans. Elles sont dues à des variations de densité dans le plasma qui, en se refroidissant, a libéré ce fameux rayonnement primordial. Les régions plus denses ont produit des zones plus chaudes sur la carte céleste du fond diffus cosmologique, et, inversement, les régions moins denses, des zones plus froides.

Dans le plasma primordial, la matière ordinaire interagissait fortement avec les photons. Des forces antagonistes (la force gravitationnelle de la matière, attractive, et la pression radiative des photons, répulsive) ont fait osciller la matière produisant des zones de forte densité et d'autres de faible densité, à l'image d'«ondes acoustiques». Avec ces seuls ingrédients, il n'est pas possible de reproduire de façon satisfaisante ces fluctuations. Il faut ajouter un élément comme la matière noire, qui a accentué la formation des surdensités. Comme elle n'est soumise qu'à la force gravitationnelle, elle s'est accumulée dans certaines régions. Ces dernières, créant des puits gravitationnels d'autant plus intenses, ont attiré davantage de matière ordinaire.

Vers 380 000 ans, le plasma est devenu électriquement neutre et les photons se sont alors propagés librement et ont constitué le fond diffus cosmologique. Telle une photographie, ce dernier a enregistré l'état du plasma juste au moment de la fuite des photons. Le spectre de ce rayonnement indique ainsi la distribution des zones froides et chaudes dans le fond diffus cosmologique en fonction de leur taille angulaire sur la voûte céleste.

En considérant que la matière noire est cinq fois plus abondante que la matière ordinaire dans le cadre d'un modèle noté Λ CDM (CDM fait référence à la matière noire, dite *cold dark matter*; Λ renvoie à un autre ingrédient du



Les modèles de gravité modifiée butaient sur un obstacle que l'on pensait fatal : le fond diffus cosmologique



d'une certaine distance du centre galactique, le profil de vitesse formait un plateau constant.

En 1973, en s'appuyant sur des simulations numériques, le Prix Nobel de physique 2019 pour ses travaux en cosmologie, James Peebles, et Jeremiah Ostriker ont proposé que les galaxies étaient entourées d'un halo de matière n'émettant pas de lumière et n'interagissant pas avec la matière ordinaire sauf par son influence gravitationnelle sur le système. Cette «matière noire» expliquerait alors le profil de vitesse des galaxies.

Les cosmologistes ont ensuite montré que la matière noire permettait d'expliquer aussi

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.

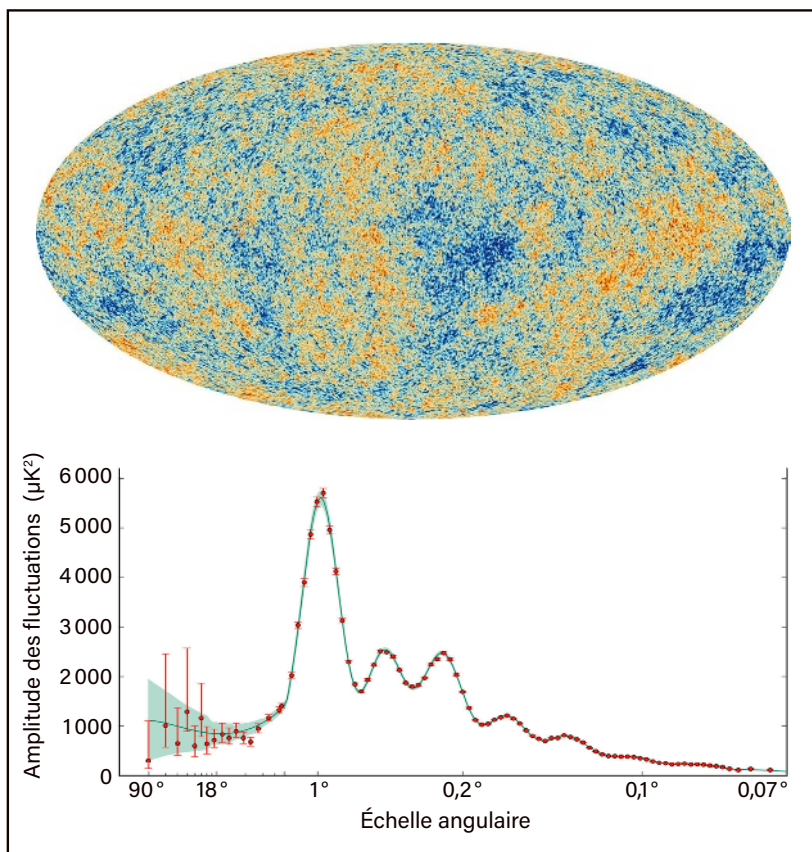
La matière noire s'est imposée en cosmologie comme un élément essentiel. Restait à en déterminer la nature. Or, à l'époque des travaux de Vera Rubin et de James Peebles, les physiciens des particules finalisaient le modèle standard et avaient compris que ce dernier n'est probablement qu'une approximation 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.