

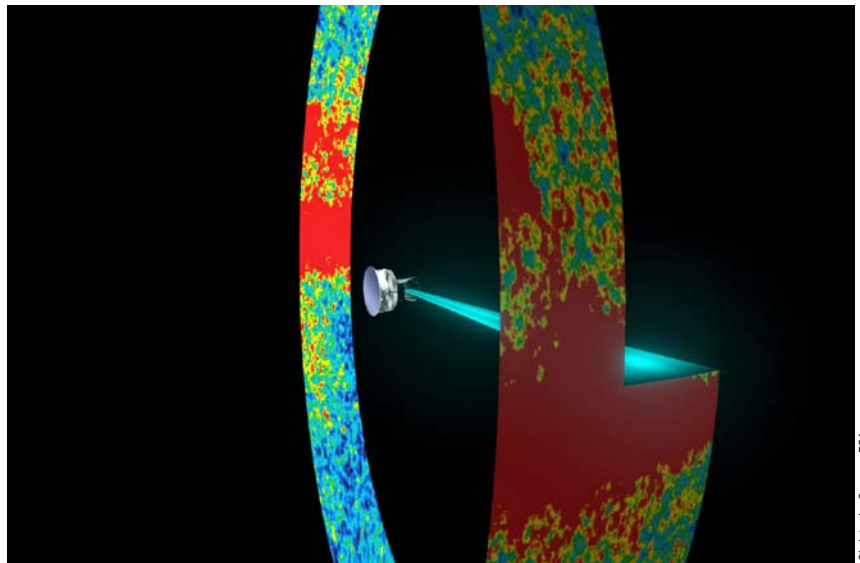
Les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire maintenaient à l'époque un certain équilibre du nombre de ces particules. Mais à mesure que la température a diminué, les interactions des particules de matière noire avec les autres ont faibli et la matière noire s'est « découplée » de l'équilibre thermique de l'Univers. Le nombre de particules de matière noire est devenu constant, et leur densité a diminué du seul fait de l'expansion de l'Univers. Par ailleurs, leur vitesse est devenue insignifiante, et l'on parle donc de « matière noire froide » (en anglais *cold dark matter*, CDM).

L'étude du fond diffus cosmologique a mis en évidence les substances qui composent l'Univers, mais dans quelles proportions sont-elles présentes ? Une partie de la réponse est donnée par l'étude de la géométrie de l'Univers. Dans le cadre de la relativité générale, la matière et l'énergie déforment l'espace-temps. De la même façon, aux grandes échelles, la composition de l'Univers influe sur sa géométrie. Les observations suggèrent que la géométrie de l'Univers est euclidienne, c'est-à-dire que les axiomes d'Euclide sont vérifiés sur de grandes distances (ce qui n'est pas le cas à proximité d'un objet très massif, qui courbe l'espace-temps). Or pour que la géométrie soit euclidienne à grande échelle, la densité d'énergie de l'Univers doit avoir une certaine valeur critique. Mais on montre que les densités estimées de matière ordinaire et de matière noire ne suffisent pas pour obtenir la bonne densité d'énergie.

Ce qui manque a été nommé « énergie sombre ». Dans ses versions les plus simples, on peut l'identifier comme la densité d'énergie liée à l'état du vide quantique (où de grandes quantités de particules et d'antiparticules apparaissent et disparaissent spontanément) ou tout simplement comme une « constante cosmologique », un paramètre supplémentaire intervenant dans les équations d'Einstein et noté Λ (lambda).

C'est sur la matière noire froide et la constante cosmologique que se fondent les prévisions du modèle standard Λ CDM. Dans ce cadre, l'analyse des fluctuations du fond diffus cosmologique conduit à la répartition suivante de la densité d'énergie dans l'Univers actuel : l'énergie sombre en représente 68,3 pour cent, la matière noire 26,8 pour cent et la matière baryonique ne contribue que pour les 4,9 pour cent restants.

Ces résultats sont d'autant plus convaincants qu'on les obtient aussi par d'autres



Christophe Carreau, ESA

3. LE SATELLITE PLANCK a cartographié le rayonnement du fond diffus cosmologique sur l'ensemble du ciel, dont seule une portion est représentée ici (les différences de température sont représentées par les couleurs). Les données confirment le modèle standard de la cosmologie, selon lequel la matière noire et l'énergie sombre prédominent dans l'Univers.

observations indépendantes. Par exemple, l'abondance des éléments légers (hydrogène, deutérium, hélium, lithium) formés dans l'Univers primordial peut être calculée en considérant les réactions nucléaires qui se sont déroulées quelques minutes après la naissance de l'Univers, quand les températures étaient de l'ordre de 10^{10} degrés. Un paramètre décisif dans le calcul est la densité de matière baryonique. L'utilisation de la densité obtenue par l'analyse du fond diffus donne des abondances d'éléments légers qui concordent avec les mesures portant sur les étoiles, dont la composition chimique a peu évolué par rapport à celle de l'Univers primordial.

Un autre exemple est fourni par les grands amas de galaxies. Il existe différentes façons d'estimer leur masse. L'une d'elles consiste à utiliser l'effet de lentille gravitationnelle, où l'amas déforme légèrement les images de galaxies éloignées (la distribution de matière courbe localement l'espace-temps, déviant ainsi la trajectoire des photons et altérant les images d'objets lumineux). Le résultat ainsi obtenu peut être comparé à ceux issus de l'analyse des émissions de rayons X du plasma chaud entre les galaxies, des calculs des mouvements de galaxies ou de l'estimation de la masse à partir de l'effet Sunyaev-Zeldovich (un effet lié à l'interaction des photons du fond diffus cosmologique avec la matière des amas de galaxies). Les différentes estimations de

la masse des amas et de leur quantité de matière noire sont compatibles entre elles.

La matière noire semble donc omniprésente dans l'Univers ; elle se manifeste à différentes époques (de l'Univers primordial à aujourd'hui) et à différentes échelles (galactique à cosmologique). Mais les mesures sont-elles interprétées correctement ? Les chercheurs explorent d'autres scénarios et, par exemple, se demandent s'ils comprennent bien la loi de la gravitation. Autrement dit : une modification de la loi de la gravitation pourrait-elle expliquer les observations sans faire l'hypothèse de la matière noire ?

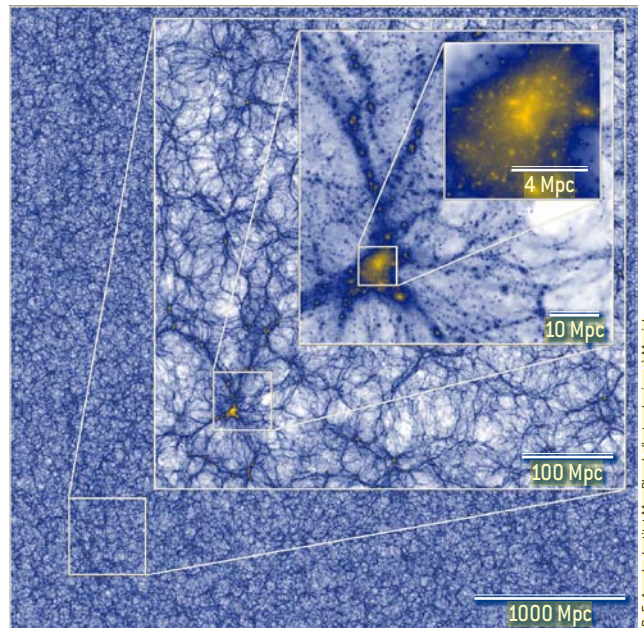
Une théorie sans matière noire ?

Dans cet ordre d'idées, Mordehai Milgrom, de l'Institut Weizmann en Israël, a proposé en 1983 la théorie MOND, la théorie de la « Dynamique newtonienne modifiée ». Il postule que la force gravitationnelle suit une loi modifiée pour des accélérations très faibles. Cette théorie explique ainsi très bien les vitesses de rotation au sein des galaxies et a même été généralisée depuis par la théorie TeVeS (théorie tenseur-vecteur-scalaire) de Jacob Bekenstein, à l'Université hébraïque de Jérusalem, pour des vitesses proches de celle de la lumière.

Malheureusement, les succès de la théorie MOND se limitent à l'échelle de la galaxie. Son utilisation pour décrire une structure telle que le *Bullet Cluster* – ou Amas du



4. LA SIMULATION MILLENNIUM-XXL (à droite), réalisée avec la participation de l'auteur, correspond à un volume d'Univers de 13,4 milliards d'années-lumière de côté. Elle met en évidence des structures de matière noire aux échelles des galaxies et des amas de galaxies. De tels ensembles ont été repérés dans l'Amas du Boulet (ci-dessus) où deux amas de matière sont entrés en collision et ont séparé la matière noire (en fausse couleur bleue) de la matière ordinaire (en fausse couleur rouge).



Boulet – nécessite de revenir à l'existence de matière qui ne peut pas être de la matière baryonique (voir la figure 4). La marge de manœuvre pour de nouvelles lois de la gravitation est très limitée par les nombreux tests de précision que la théorie de la relativité a subis dans le Système solaire. Par ailleurs, des tests de la loi de la gravitation effectués à de très grandes échelles, au cours desquels des données relatives aux lentilles gravitationnelles, aux amas galactiques et aux vitesses des galaxies ont été combinées de façon astucieuse. Ces tests excluent presque complètement la théorie TeVeS.

Certains physiciens travaillent toujours sur des théories et des lois de la gravitation susceptibles de se passer de la matière noire. Mais aucun modèle ne semble aussi fructueux que le modèle Λ CDM, qui offre les explications les plus simples. Mais en admettant que ce soit le bon modèle, se pose la question de la nature de la matière noire.

C'est du côté de la physique des particules que la réponse viendra probablement. Depuis les années 1960, les chercheurs ont développé le « modèle standard » de la physique des particules, une théorie qui décrit les particules fondamentales et leurs interactions. Ils ont même prévu l'existence de particules qui ont toutes été découvertes – la dernière, le boson de Higgs, l'a été en 2012 au CERN, près de Genève.

Nous savons toutefois que ce modèle n'est valable que dans un domaine d'éner-

gie limité. À des échelles d'énergie élevées, des difficultés apparaissent. En outre, il n'intègre pas l'interaction gravitationnelle. Les chercheurs étudient donc des théories plus fondamentales, qui apporteraient des solutions à ces difficultés et dont la manifestation à basse énergie coïnciderait avec le modèle standard. L'une des pistes les plus discutées est la supersymétrie, principe de symétrie selon lequel à chaque espèce de particule du modèle standard correspondrait une espèce partenaire dite supersymétrique.

La matière noire, des neutralinos ?

Or la particule supersymétrique la plus légère que prédisent de telles théories pourrait être un candidat pour la matière noire. Dans de nombreuses versions de la supersymétrie, cette particule est un « neutralino » et ses propriétés sont idéales : le neutralino serait stable, très lourd et n'interagirait que très faiblement avec la matière ordinaire.

Le neutralino est qualifié de WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle* ou Particule massive interagissant faiblement avec la matière). De plus, il serait apparu dans l'Univers primordial en des quantités qui donnent la bonne densité de matière noire observée aujourd'hui. Une telle coïncidence est séduisante, mais la plupart des physiciens ne seront convaincus par la supersymétrie que lorsque le neutralino aura été détecté

et ses propriétés mesurées. Mais comment observer une particule aussi furtive ?

Plusieurs approches sont possibles. L'une d'elles consiste à chercher des particules supersymétriques dans les collisions proton-proton de haute énergie dans l'accélérateur LHC du CERN. Les détecteurs ne verront pas directement de traces laissées par les neutralinos, mais on pourra rechercher leur présence sous la forme d'énergie manquante emportée par les neutralinos qui s'échappent de la collision sans interagir avec les détecteurs.

Un autre type d'expériences se concentre sur la détection directe de la matière noire. La Voie lactée baignerait dans un halo de matière noire dont la distribution peut être estimée par la dynamique de la galaxie. Sur l'orbite du Soleil autour du centre de la Galaxie, la densité de matière noire serait d'environ 0,3 gigaélectronvolt par centimètre cube. On s'attend donc à environ une à trois particules par litre, au cas où les particules seraient des WIMP dont la masse serait de l'ordre de 100 gigaélectronvolts (un proton a une masse de près d'un gigaélectronvolt).

Ce halo implique que la Terre est traversée en permanence par une grande quantité de particules de matière noire. Les physiciens ont installé de nombreuses expériences sous des centaines de mètres de roche pour les protéger d'autres types de particules, espérant détecter de rares interactions de particules de matière noire avec les atomes de leurs