

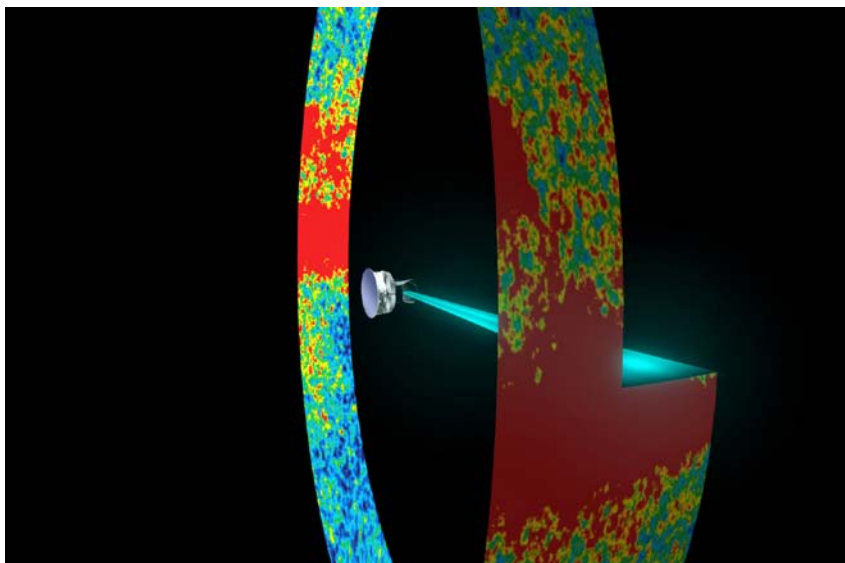
Les interactions de la matière noire avec la matière ordinaire maintenaient à l'époque un certain équilibre du nombre de ces particules. Mais à mesure que la température a diminué, les interactions des particules de matière noire avec les autres ont faibli et la matière noire s'est « découplée » de l'équilibre 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