

peu à peu imposée aux astronomes dans les années 1970. Les mesures des vitesses de rotation des étoiles au sein des galaxies spirales donnaient l'impression que de la masse supplémentaire est présente, mais sous une forme invisible. Les étoiles des régions externes de ces galaxies en forme de disque ont en effet une vitesse de rotation trop élevée pour que l'attraction gravitationnelle exercée par la matière visible les maintienne sur leur orbite.

L'astronome d'origine suisse Fritz Zwicky avait fait une remarque similaire dans les années 1930 : dans l'amas de la Chevelure de Bérénice, les galaxies se déplaçaient plus vite que prévu. La force gravitationnelle exercée par la matière visible de l'amas était insuffisante pour empêcher les galaxies de cet amas de se disperser. Zwicky parla alors du « problème de la masse manquante ». Pour le résoudre, les astrophysiciens ont supposé l'existence d'une substance qui, bien qu'invisible, se manifeste au moins par sa force gravitationnelle.

Ainsi, les observations des galaxies et des amas de galaxies conduisaient à une même conclusion : une incompatibilité entre le bilan de matière du système étudié et sa dynamique gravitationnelle.

D'autres hypothèses que la matière noire étaient envisageables pour résoudre ce conflit. Mais l'idée de la matière noire s'est renforcée au début des années 1990 lorsqu'elle a permis d'interpréter une observation très différente : les infimes fluctuations de température présentes dans le fond diffus cosmologique. Les mesures fines de ce rayonnement micro-onde en provenance du fond du ciel ont débuté avec le satellite COBE et les expériences embarquées sur ballons stratosphériques, telles que *Boomerang* et *Maxima* ; elles se sont poursuivies avec les satellites WMAP et *Planck*.

Lorsque l'Univers était âgé d'environ 380 000 ans, il s'est refroidi à une température de près de 4 000 kelvins du fait de sa propre expansion. Les noyaux d'hydrogène et d'hélium ont pu capturer des électrons. Les composants formés, les atomes, étaient électriquement neutres et interagissaient moins que les particules chargées avec les photons. Ces derniers ont alors pu s'échapper et parvenir jusqu'à nous.

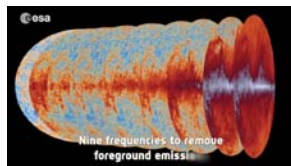
L'Univers a poursuivi son expansion et la température correspondant au rayonnement du fond diffus a diminué. En moyenne, elle n'est plus que de 2,73 kelvins aujourd'hui (soit 2,73 degrés au-dessus du zéro absolu).

L'AUTEUR



Volker SPRINGEL est professeur d'astrophysique théorique à l'Université de Heidelberg, en Allemagne. Il travaille sur la modélisation de la formation des structures cosmiques et des galaxies à l'Institut d'études théoriques à Heidelberg.

EN VIDÉO



Présentation de l'Agence spatiale européenne du satellite *Planck* et de ses résultats.
<https://www.youtube.com/watch?v=Fn0Fg0wyu0w>

Le fond diffus présente toutefois d'infimes variations de température, de l'ordre de quelques dix millièmes de degré par rapport à la température moyenne. Sur une carte du ciel, les fluctuations forment un motif caractéristique de taches (voir la figure 3).

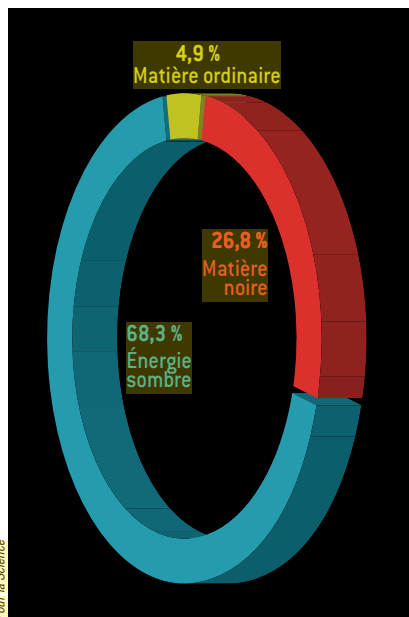
Ces minuscules écarts de température sont la conséquence des mouvements d'oscillation dont était animée la matière baryonique avant que les noyaux capturent leurs électrons. Les particules de matière subissaient alors deux forces antagonistes, l'une tendant à les concentrer et due à la gravité, l'autre tendant à les diluer et due à leurs interactions avec les photons piégés dans le plasma (le milieu constitué de particules électriquement chargées et de photons). Les oscillations se sont traduites par des régions plus ou moins denses en matière et par l'apparition de fluctuations de température.

Leur analyse statistique permet de mettre en évidence les phénomènes qui étaient en jeu dans les oscillations baryoniques ou qui ont perturbé le trajet des photons. L'interprétation des résultats suggère par exemple que la matière noire a joué un rôle dans ces oscillations.

Le fond diffus : un pilier de la cosmologie

La découverte du fond diffus cosmologique et de ses fluctuations de température a été cruciale pour construire ce qui est aujourd'hui le « modèle standard » de la cosmologie. Ce dernier repose sur une solution exacte des équations de la relativité générale d'Albert Einstein, dite métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker et qui décrit la géométrie de l'espace-temps dans l'hypothèse où l'Univers est homogène et isotrope aux grandes échelles. Nommé « Λ CDM » (*Lambda Cold Dark Matter*), ce modèle décrit un Univers initialement chaud, dense et en expansion. La physique des particules décrit les différentes phases que traverse l'Univers lors de son refroidissement. Tout cela est contrôlé par sa composition et seulement six paramètres, déterminés à partir de centaines de milliers de mesures indépendantes effectuées sur le fond diffus cosmologique.

En résumé, les observations du fond diffus cosmologique, de la dynamique des galaxies et de celle des amas de galaxies indiquent que de la matière noire est présente. Mais quelle est sa nature ? Les physiciens supposent qu'il s'agit de particules apparues très tôt dans l'Univers chaud.



2. LA COMPOSITION DE L'UNIVERS peut être estimée par sa densité en énergie. Elle se répartit entre la matière ordinaire, dite baryonique, la matière noire et l'énergie sombre. Les proportions ont été estimées avec précision grâce aux mesures du satellite *Planck*. Les photons contribuent aussi à la densité d'énergie, mais très peu.