

L'UNIVERS SOMBRE NOUS RÉSERVE-T-IL DE NOUVELLES SURPRISES?

Le modèle qui décrit la composition de l'Univers – dont 95 % d'éléments «sombres» de nature encore inconnue – et son histoire est-il fiable?

De récentes recherches pourraient le mettre en question.

Explications de **Nathalie Palanque-Delabrouille**.

La composition de notre Univers demeure depuis près d'un siècle l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie contemporaine. Le modèle cosmologique qui décrit actuellement le mieux les observations exige en effet que seuls 5 % de l'Univers soient sous forme de matière ordinaire, les autres 95 % se trouvant sous des formes de nature inconnue, dites sombres. Bien que déroutant par l'ampleur de notre méconnaissance, ce modèle est d'une étonnante fiabilité. Ses prédictions se révèlent confirmées

COSMOLOGIE

Dans le cadre de notre partenariat avec l'Académie des sciences, les académiciens nouvellement élus fin 2019 présentent un éclairage sur leur discipline et ses enjeux scientifiques, éthiques, politiques et sociétaux, à travers leur expérience personnelle.

au pourcent près par nombre de données observationnelles. Pas toutes, cependant. La valeur actuelle du taux d'expansion de l'Univers, par exemple, qui permet de déterminer l'âge de celui-ci, peut être mesurée par deux approches fondamentalement différentes, l'une à partir de l'extrapolation de données primordiales, l'autre directement à partir de données locales. Ces deux mesures conduisent à des résultats en tension. Aurions-nous mis le doigt sur une faille du modèle cosmologique?

L'UNIVERS SOMBRE

Un fait est certain : l'Univers sombre s'impose. À commencer par la matière noire. Dès 1933, l'astronome

suisse Fritz Zwicky postule l'existence de matière noire pour résoudre une anomalie gravitationnelle dans un vaste ensemble de galaxies appelé amas de Coma. Puis, dans les années 1970, une astronome américaine, Vera Rubin, est la première à mesurer de façon systématique les vitesses de rotation d'étoiles jusqu'en périphérie de galaxies semblables à la nôtre, et montre que ces vitesses ne décroissent pas avec la distance au cœur de la galaxie. Or, ce résultat est contraire à ce que prédisent les lois de Kepler si la masse de ces galaxies suivait la même distribution que ces étoiles. La présence d'un halo de matière noire englobant l'ensemble de la galaxie et dix fois plus massif que les étoiles dont cette dernière est composée permettrait d'expliquer ces observations.

À partir des années 1990, les désaccords entre les effets gravitationnels observés et ceux prédits par la distribution « visible » de la matière ne cessent de se multiplier. Tous pointent vers une fraction significative de masse non lumineuse dans les galaxies ou les amas de galaxies. De surcroît, il apparaît rapidement que cette composante sombre ne peut être constituée de matière ordinaire (ou baryons), dont la densité est aujourd'hui déterminée avec une précision plus fine que celle du pourcent. À ce jour, malgré des décennies de recherche pour tenter d'en fabriquer dans les plus grands accélérateurs de particules ou pour déceler ses rares interactions dans des détecteurs dédiés, cette matière noire demeure mystérieuse. Pas davantage de



PROFIL

Directrice de recherche en cosmologie à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (CEA), **Nathalie Palanque-Delabrouille** est membre de l'Académie des sciences. Spécialiste de la matière et de l'énergie noires, composantes principales mais inexplicables de l'Univers, elle a notamment développé des simulations colossales de l'Univers pour résoudre le mystère de ses composantes invisibles.

succès pour les théories qui cherchent à s'en affranchir moyennant des modifications aux lois de la gravité newtonienne.

L'énergie noire, autre composante de l'Univers sombre, n'est pas en reste. En 1998, une découverte fortuite chamboule la cosmologie. Deux équipes, l'une menée par Adam Riess et l'autre par Saul Perlmutter, découvrent simultanément que des explosions stellaires (ou supernovae) distantes étaient plus faibles que ce que le modèle cosmologique prédisait. Cela ne pouvait s'interpréter que par une accélération de l'expansion de l'Univers. Or, cette accélération n'était absolument pas prévue. En relativité générale, toute forme d'énergie « gravite », autrement dit réagit à l'action attractive de la gravité, et ne peut en effet que ralentir l'expansion de l'Univers. Seul un fluide de pression négative, que l'on nomme génériquement « énergie noire », peut s'opposer à cette tendance et conduire au contraire à l'accélération observée. Ce

Un fait est certain: l'Univers sombre s'impose. À commencer par la matière noire. Dès 1933, Zwicky postule son existence pour résoudre une anomalie gravitationnelle dans l'amas de galaxies appelé Coma.

fluide pourrait s'apparenter à une énergie du vide dont la densité serait inchangée au cours de l'histoire de l'Univers. De façon équivalente, il pourrait également correspondre à une constante cosmologique comme celle initialement envisagée par Einstein dans ses fameuses équations, alors qu'il cherchait le moyen de maintenir l'Univers statique et de prévenir l'inévitable effondrement gravitationnel qui semblait le guetter. Si la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers a été récompensée en 2011 du prix Nobel de physique, la compréhension des mécanismes à l'œuvre à l'origine de cette accélération demeure à ce jour un mystère.

Ainsi, le modèle cosmologique constitué de 5 % de matière ordinaire, 25 % de matière noire de nature inconnue et 70 % d'une forme appelée énergie noire permet de décrire l'histoire de notre Univers sur 13,8 milliards d'années avec une précision à couper le souffle, que ce soit la formation des premiers noyaux alors que l'Univers était âgé de quelques minutes à peine, puis celle des atomes, à l'âge de 380 000 ans, puis des grandes structures comme les galaxies et amas de galaxies. Toute cette histoire est dictée par le refroidissement de l'Univers depuis le big bang jusqu'à nos jours sous l'effet de son expansion.

L'EXPANSION COSMIQUE EN CRISE?

L'expansion cosmique, aujourd'hui incontestée, constitue l'un des principaux piliers du modèle du big bang. Les observations à l'origine de cette découverte indiquent que les galaxies s'éloignent toutes de l'observateur, et ce d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. En remontant le film de l'expansion, on peut déduire l'âge de l'Univers comme le temps qui s'est écoulé pour que des galaxies initialement confondues en un même point prennent la place qu'elles occupent aujourd'hui. Autrement dit, l'âge de l'Univers est intimement lié à la valeur de son taux d'expansion. Cette question fut d'ailleurs l'objet d'un long débat : avant la publication des résultats de 1998 sur les supernovae, plusieurs jeux de données venaient contredire un modèle cosmologique uniquement constitué de matière. D'une part, les galaxies distantes semblaient trop nombreuses, ce qui nécessitait soit une évolution imprévue de la luminosité des galaxies, soit une accélération de l'expansion. D'autre part, l'âge de l'Univers estimé sur la base de la matière le constituant se trouvait être plus jeune que celui des plus vieilles étoiles de notre galaxie ! Ces deux incongruités furent résolues par la découverte de l'accélération de l'expansion. Une simple analogie permet de s'en rendre compte. Considérons le temps nécessaire pour parcourir une distance donnée à »

Si la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers a été récompensée en 2011 du Nobel de physique, la compréhension des mécanismes à l'œuvre demeure à ce jour un mystère.

» vitesse constante. Si maintenant nous avons accéléré au cours de notre trajet, pour une même vitesse à l'arrivée (aujourd'hui), cela signifie que notre vitesse était plus lente par le passé, donc le temps de parcours global s'en trouve allongé par rapport à l'hypothèse précédente de vitesse constante. De façon analogue, pour un même taux d'expansion aujourd'hui, une accélération passée provoque l'allongement du temps nécessaire pour passer de l'état initial à l'état présent.

DES RÉSULTATS EN TENSION

Que savons-nous précisément de l'âge de l'Univers, autrement dit du taux avec lequel il est aujourd'hui en expansion ? Notre modèle cosmologique repose sur le détail de la composition de l'Univers en termes de matière ordinaire, matière noire et énergie noire. Ces informations nous proviennent notamment de l'Univers primordial que l'on peut étudier par le biais du rayonnement cosmologique, image de l'Univers âgé de 380 000 ans alors qu'il quitte tout juste l'état de plasma. D'infimes variations dans cette image par ailleurs remarquablement uniforme sont caractéristiques des conditions qui régnaient alors dans l'Univers. Leur analyse nous informe sur la composition de celui-ci. L'expansion ainsi déterminée conduit à un Univers âgé aujourd'hui de 13,8 milliards d'années, avec une incer-

titude de l'ordre de 100 millions d'années seulement.

C'est tout naturellement que les scientifiques ont cherché à comparer cette prédiction du modèle cosmologique à des mesures locales, s'appuyant sur une méthode analogue à celle utilisée pour mettre en évidence l'expansion de l'Univers. L'approche est simple : on observe des supernovae dont la vitesse de récession est obtenue par mesure spectrale et dont la distance est déterminée à partir du flux observé connaissant leur luminosité intrinsèque. La mise en œuvre a toutefois nécessité d'avoir recours à des moyens colossaux : tout d'abord les satellites Hipparcos, puis plus récemment Gaia pour déterminer la distance d'étoiles proches (on parle de « parallaxe »), celle-ci permettant la calibration intermédiaire d'étoiles variables, elles-mêmes permettant ultimement de déterminer la distance absolue de galaxies hôtes de supernovae proches, conduisant in fine à la détermination de la luminosité recherchée. Ces étapes successives permettent enfin une mesure du taux local d'expansion, et donc de l'âge de l'Univers. Et le résultat est surprenant : 12,6 milliards d'années, à 200 millions d'années près.

Cette tension entre les approches primordiales et locales de détermination de l'âge de l'Univers fait couler beaucoup d'encre. Des centaines de papiers sont publiés sur le sujet par la communauté scientifique en quelques mois. D'autres approches ont déjà confirmé la valeur dite « primordiale », tandis que des mesures locales indépendantes semblent au contraire confirmer les résultats des supernovae. À ce jour, les scientifiques n'ont pas identifié de biais dans les mesures qui puissent expliquer ce désaccord. Et les pistes théoriques qui réconcilieraient l'Univers primordial avec celui qui nous entoure n'ont pas encore abouti à un modèle cohérent. ★

Le site de l'Académie des sciences : WWW.ACADEMIE-SCIENCES.FR

« Le temps cosmologique », conférence de N. Palanque-Delabrouille au Festival d'astronomie de Fleurance, 11 août 2020 : <https://www.youtube.com/watch?v=ZESC4JAKSdY> (à partir de 12:01)

« Tension at the heart of cosmology », de Robert Naeye, <https://astronomy.com/magazine/2019/06/tension-at-the-heart-of-cosmology>, 18 juin 2019

« La simulation Grand Challenge "Extreme-Horizon" : comprendre l'Univers noir et la formation des galaxies » et en particulier la vidéo qui y est publiée : http://irfu.cea.fr/Phocaea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant&id_ast=4844



GETTY IMAGES / ISTOCKPHOTO

Un amas d'étoiles dans la nébuleuse de la Rosette. Qui imaginerait que l'ensemble des astres et galaxies ne constitue que 5% de l'Univers ? C'est pourtant le constat qui tourmente les esprits depuis près d'un siècle.