

À la poursuite de l'énergie sombre

Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, les physiciens invoquent une énergie sombre répulsive. Les scientifiques espèrent en savoir plus en sondant les confins du cosmos.



Le télescope *Mayall*, installé sur le pic Kitt, en Arizona, accueille l'instrument DESI dédié à l'observation des galaxies et des quasars afin de mieux comprendre l'énergie sombre.

L'ESSENTIEL

● L'expansion de l'Univers accélère, et on ignore pourquoi. L'une des hypothèses est l'existence d'une «énergie sombre».

● Plusieurs projets, comme DES, DESI et bientôt LSST et *Euclid*, visent à résoudre ce mystère en étudiant l'histoire de l'expansion cosmique.

● En en connaissant les détails fins, on pourra contraindre les différents modèles d'énergie sombre, voire en éliminer certains.

L'AUTEUR



JOSHUA FRIEMAN est cosmologiste, directeur de recherche au Fermilab, aux États-Unis, professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'institut Kavli de physique cosmologique, à l'université de Chicago et directeur du programme DES.

I

l y a près d'un siècle, Edwin Hubble a découvert que l'Univers est en expansion: presque toutes les galaxies s'éloignent de la Voie lactée, et plus elles sont distantes, plus elles s'éloignent vite. Cette découverte fondamentale a été suivie en 1998 d'une autre, encore plus surprenante: cette expansion est de plus en plus rapide. Mais pourquoi donc accélère-t-elle? C'est l'une des plus grandes énigmes de la science moderne.

Pour expliquer l'accélération cosmique, les cosmologistes ont proposé deux solutions. La première est qu'Albert Einstein n'avait pas eu le dernier mot sur la gravitation: bien que la gravité ait un effet attractif sur Terre et dans le Système solaire, peut-être agit-elle différemment, à grande échelle, devenant une force répulsive quand les distances en jeu deviennent gigantesques. Dès lors, il faudrait modifier la théorie de la gravitation pour les échelles cosmiques (voir l'entretien avec B. Famaey, page 46).

La seconde idée est que l'Univers est empli de quelque chose d'invisible, une «énergie sombre», qui contre la force de gravité et prend le dessus aux plus grandes échelles. Des mesures cosmiques indiquent que l'énergie sombre, si elle existe, constituerait aujourd'hui 70% de la masse de

l'Univers (voir *Repères*, page 6). Le reste de la masse de l'Univers est partagé entre 25% de matière noire et 5% de matière ordinaire (celle des étoiles, des planètes, de vous...).

L'hypothèse de l'énergie sombre a reçu davantage d'attention que l'idée d'une gravité modifiée aux grandes échelles parce qu'elle explique mieux la formation des galaxies et des grandes structures de l'Univers et parce qu'elle est compatible avec toutes les mesures dont nous disposons.

Mais comment peut-on savoir avec certitude si l'énergie sombre est responsable de l'accélération cosmique? Et si c'est bien l'énergie sombre, quelle en est exactement la nature? Pour répondre à ces questions, avec quelque 300 autres physiciens et astronomes des États-Unis, d'Espagne, du Royaume-Uni, du Brésil, d'Allemagne et de Suisse, nous avons lancé il y a quelques années le projet d'observation astronomique DES (pour *Dark energy survey*, soit «relevé de l'énergie sombre»). D'autres projets affichant le même objectif ont été depuis initiés (voir l'encadré page 90).

UNE MÉGARÉSOLUTION

Grâce à ce relevé, nous espérons reconstruire l'évolution de l'expansion cosmique au cours des quelque 14 milliards d'années de l'histoire de l'Univers. Et nous pourrions étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomerats de galaxies qui occupent l'Univers) afin de, peut-être, trancher entre les différentes hypothèses quant à l'expansion de l'Univers.

La collaboration DES a construit la *Dark Energy Camera*, le cœur du projet, et nous l'avons installé sur le télescope de quatre mètres *Víctor Blanco* à l'Observatoire interaméricain du Cerro Tololo, installé sur les hauteurs des Andes chiliennes.

La caméra est conçue pour étudier avec rapidité de nombreux objets: des galaxies, des amas de galaxies et des supernovæ. Grâce à

➤ cinq grandes lentilles, cette caméra ultrasensible et dotée d'une résolution de 570 mégapixels a un très grand champ, qui lui permet de photographier de larges bandes du ciel en une pose.

La caméra a pris ses premiers clichés du ciel nocturne en septembre 2012 et le DES a officiellement entamé son relevé d'une large bande du ciel austral un an plus tard. Le relevé a collecté les données d'août à février de chaque année pendant cinq ans (soit un total de 758 nuits d'observation) et a produit une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel (environ 5 000 degrés carrés d'angle solide, la Lune en couvrant par comparaison 0,2), ainsi qu'un catalogue de supernovæ. Les données sont en cours d'analyse.

L'un des objectifs du projet est de recueillir des indices afin de départager les hypothèses sur l'origine de l'accélération de l'expansion cosmique: gravité modifiée ou énergie sombre, chacune existant sous différentes formes, ou scénarios. Pour le cas de l'énergie sombre, les physiciens mettront à l'épreuve deux idées: l'énergie du vide et la quintessence.

UN PROBLÈME DE TAILLE

La première est assez paradoxale. Supposez que vous vidiez une boîte de tout son contenu (atomes, rayonnement, matière noire...) et que rien ne puisse y pénétrer par les parois. L'intérieur de la boîte serait un vide parfait. D'après la physique classique, le vide n'a pas d'énergie. Mais la théorie quantique dit que même l'espace vide est porteur d'une certaine forme d'énergie. En effet, la théorie autorise l'apparition spontanée de paires particule-antiparticule qui, après un bref instant, s'annihilent. Ainsi, le vide de la boîte n'est pas «vide»: il est à tout instant peuplé de ces particules, dites virtuelles, porteuses d'une énergie dont la forme correspond à celle requise pour constituer l'énergie sombre et entraîner l'accélération de l'expansion de l'Univers.

La seule difficulté avec cette idée est que, selon la physique quantique, la valeur de l'énergie du vide serait 122 ordres de grandeur (10^{122} fois) supérieure à ce qu'elle devrait être si elle constituait l'énergie sombre. Si les physiciens ne peuvent ignorer ce problème, ils utilisent malgré tout l'idée de l'énergie du vide pour mettre à l'épreuve les données observationnelles sur l'Univers.

Pour régler ce problème d'ordre de grandeur, les chercheurs ont proposé d'autres explications que l'énergie du vide. Une piste est celle d'un champ quantique, nommé quintessence, présent en tout point de l'espace. Ce champ a de nombreux points communs avec le champ de Higgs, associé au boson de Higgs, la particule découverte en 2012 au LHC, au Cern. La particule associée à la quintessence aurait, comme le boson de Higgs, un spin (moment cinétique intrinsèque) nul, mais elle serait plus légère d'environ 44 ordres de grandeur.

Le comportement de la particule de quintessence peut être comparé à celui d'une balle qui roule sur la pente d'une colline. L'énergie de cette balle est à la fois cinétique (en raison de son mouvement) et potentielle (à cause de la hauteur de la colline qu'elle dévale); plus la balle se trouve en hauteur, plus son énergie potentielle est grande. Quand elle descend, son énergie potentielle diminue, et son énergie cinétique augmente. Si la particule de quintessence est extrêmement légère, alors elle descendrait

Les physiciens utilisent l'idée de l'énergie du vide pour mettre à l'épreuve leurs observations de l'Univers

très lentement aujourd'hui, avec relativement peu d'énergie cinétique par rapport à son énergie potentielle. Dans ce cas, les cosmologistes ont montré que son effet sur l'expansion cosmique serait similaire, à quelques détails près, à celui de l'énergie du vide et conduirait à une accélération.

Ce sont justement les détails, par lesquels se distinguent les différents scénarios, que les physiciens du projet DES veulent mettre en évidence pour déterminer quelle explication est correcte. Pour trancher entre les causes possibles de l'accélération cosmique, les chercheurs explorent quatre phénomènes sensibles, de façon différente, au rythme d'expansion de l'Univers. Comme les quatre phénomènes faisant office de sondes ne seraient pas tous affectés de la même façon selon le scénario considéré, il serait possible d'écarter les mauvaises pistes.

Ces quatre phénomènes sont les supernovæ, les traces des ondes acoustiques primordiales, les lentilles gravitationnelles et les amas de galaxies. Collectivement, ils nous renseignent sur la vitesse à laquelle l'Univers s'est dilaté et sur la quantité de matière qui s'est agrégée pour former les grandes structures aux différentes époques de l'histoire cosmique.

Dans l'Univers primordial, la densité de matière était assez importante pour former les grandes structures. Environ 7 milliards d'années après