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.

© P. Marenfeld & NOAO/AURA/NSF

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.

Il 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 pourrons étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomérats 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 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.

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

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

le Big Bang, la matière s'est tant diluée que le responsable de l'expansion cosmique accélérée a commencé à faire son œuvre et à empêcher la formation de grandes structures de se poursuivre.

Les supernovæ ont eu un rôle primordial dans la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers. Il s'agissait plus précisément de supernovæ de type Ia. Ces explosions stellaires se produisent quand une petite étoile dense, une naine blanche, accumule de la matière et atteint une masse limite. Ces supernovæ ont une caractéristique très utile: la variation au cours du temps de la luminosité est la même pour toutes.

Pour un observateur sur Terre, toute différence dans la courbe de luminosité est ainsi uniquement due à la distance de la supernova: plus elles sont pâles, plus elles sont lointaines. Il est donc possible de déterminer la distance de la supernova. C'est pourquoi on parle de «chandelle standard». Nous savons par exemple qu'une supernova de type Ia 100 fois plus pâle qu'une autre est 10 fois plus lointaine.

LES CHANDELLES DE L'UNIVERS

Le relevé DES examine à intervalles de quelques nuits les mêmes régions du ciel afin de mesurer les distances précises de quelques milliers de supernovæ Ia dans l'Univers proche et lointain. Cela représente près de 100 fois plus d'objets qu'on n'en a utilisés en 1998 pour mettre en évidence la dynamique accélérée de l'Univers.

Mais la distance est insuffisante pour déterminer le rythme d'expansion cosmique. Nous utilisons d'autres télescopes pour mesurer le décalage spectral des émissions électromagnétiques de ces supernovæ. En effet, lorsqu'un objet s'éloigne d'un observateur, la longueur d'onde lumineuse mesurée par ce dernier est supérieure à la longueur d'onde émise: c'est l'effet Doppler. Le spectre d'émission apparaît donc décalé vers le rouge. Dans le cas des supernovæ, ce décalage est dû à l'expansion de l'Univers entre le moment de l'émission de l'onde et sa réception par nos télescopes. En combinant nos données sur la distance à laquelle se trouvent les supernovæ et leur vitesse d'éloignement, nous pourrons reconstruire avec précision l'histoire des dix derniers milliards d'années d'expansion de l'Univers.

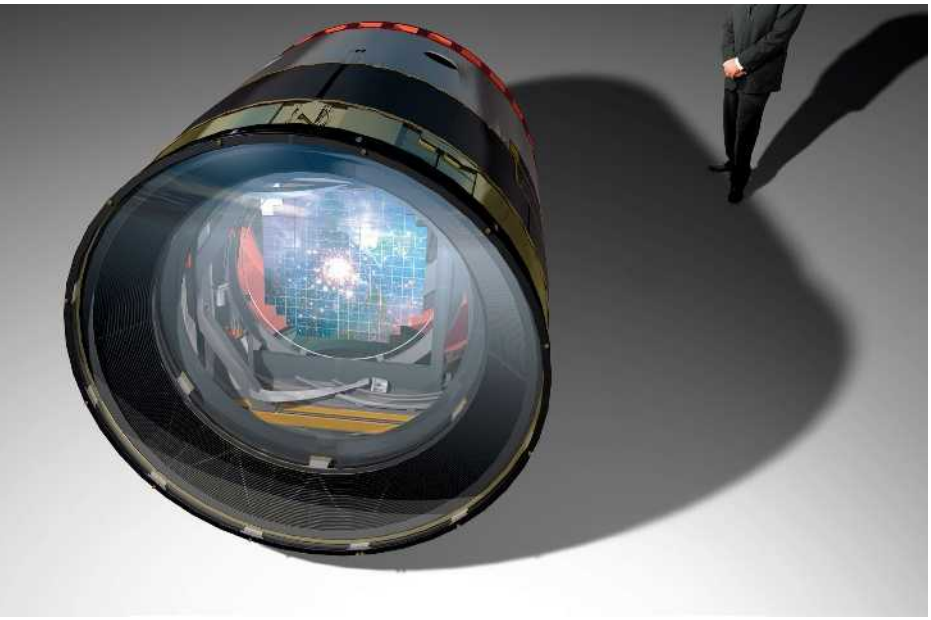
Une telle mesure aide à départager les théories de l'accélération cosmique parce que chacune d'elles prédit une expansion au déroulement légèrement différent. Si par exemple c'est la quintessence qui est à l'œuvre, l'expansion accélérée aurait débuté un peu plus tardivement que dans le scénario de l'énergie du vide et elle se serait intensifiée plus progressivement. Ainsi, les supernovæ présentant un décalage vers le rouge donné sembleront plus brillantes (car plus proches) si l'énergie sombre est sous la forme de quintessence plutôt que d'énergie du vide. Et dans l'hypothèse où la gravité ne se comporte pas, aux grandes distances, conformément à la théorie de la relativité générale, le motif pour les supernovæ lointaines sera encore différent.

Ces mesures doivent être précises pour départager les modèles, car les différences qu'ils prévoient restent assez faibles. Par conséquent, nous souhaitons connaître la relation entre distance et décalage vers le rouge avec une précision de l'ordre de 1%, un exploit accessible pour la *Dark Energy Camera*.

UN ÉTALON DE DISTANCE

Le relevé DES traque aussi un vestige des conditions régnant dans l'Univers primordial pour étudier l'histoire de son expansion: les oscillations acoustiques des baryons (les baryons sont la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons, qui composent les noyaux atomiques). L'Univers jeune était empli d'un plasma de matière ionisée (noyaux atomiques et électrons) et de photons en interaction. Deux forces s'opposaient. La gravité tendait à agglomérer la matière dans des zones de surdensité, tandis que la lumière prisonnière exerçait une pression qui s'y opposait. Cette concurrence a engendré dans le plasma des vibrations, comparables à des ondes sonores. Celles-ci ont formé des zones plus ou moins denses de matière qui suivent une distribution particulière, que l'on nomme oscillations acoustiques des baryons.

Vers 380000 ans après le Big Bang, la matière s'est assez refroidie pour que les noyaux atomiques et les électrons se combinent et forment des atomes neutres. La lumière interagissant alors peu avec la matière, l'opposition des forces a pris fin. La distance parcourue par les ondes acoustiques jusqu'à cet instant fatidique correspond aujourd'hui à une échelle d'environ 480 millions d'années-lumière. Les astronomes la retrouvent imprimée dans la répartition spatiale des galaxies sous la forme d'une >

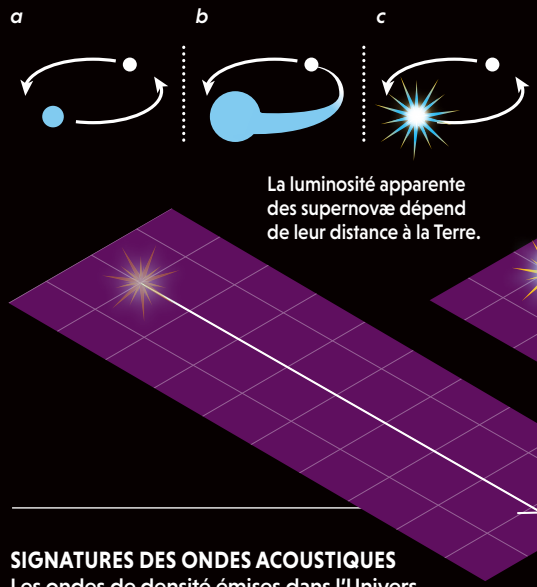


© Collaboration LSST

La caméra du projet LSST avec ses 3,2 milliards de pixels de résolution est le plus gros appareil photo jamais construit.

QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

La vitesse d'expansion de l'Univers augmente depuis sept milliards d'années. Le relevé DES *(Dark energy survey)* vise à comprendre la cause de ce phénomène par l'examen de quatre types de signaux. Les deux présentés ci-dessous à gauche permettent de mesurer des distances indiquant quelle était la taille de l'Univers et à quel rythme il se dilatait à différentes époques. Les deux de droite permettent de cartographier l'hétérogénéité de la matière dans l'espace, afin d'évaluer la compétition entre la gravitation et la force responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Certains motifs d'expansion et de structuration de la toile cosmique au fil du temps suggèrent que l'accélération découle d'une « énergie sombre », une composante hypothétique de l'Univers. Une autre piste pour expliquer l'accélération, en lien avec certaines observations, est d'envisager une modification des lois de la gravitation aux échelles cosmiques.

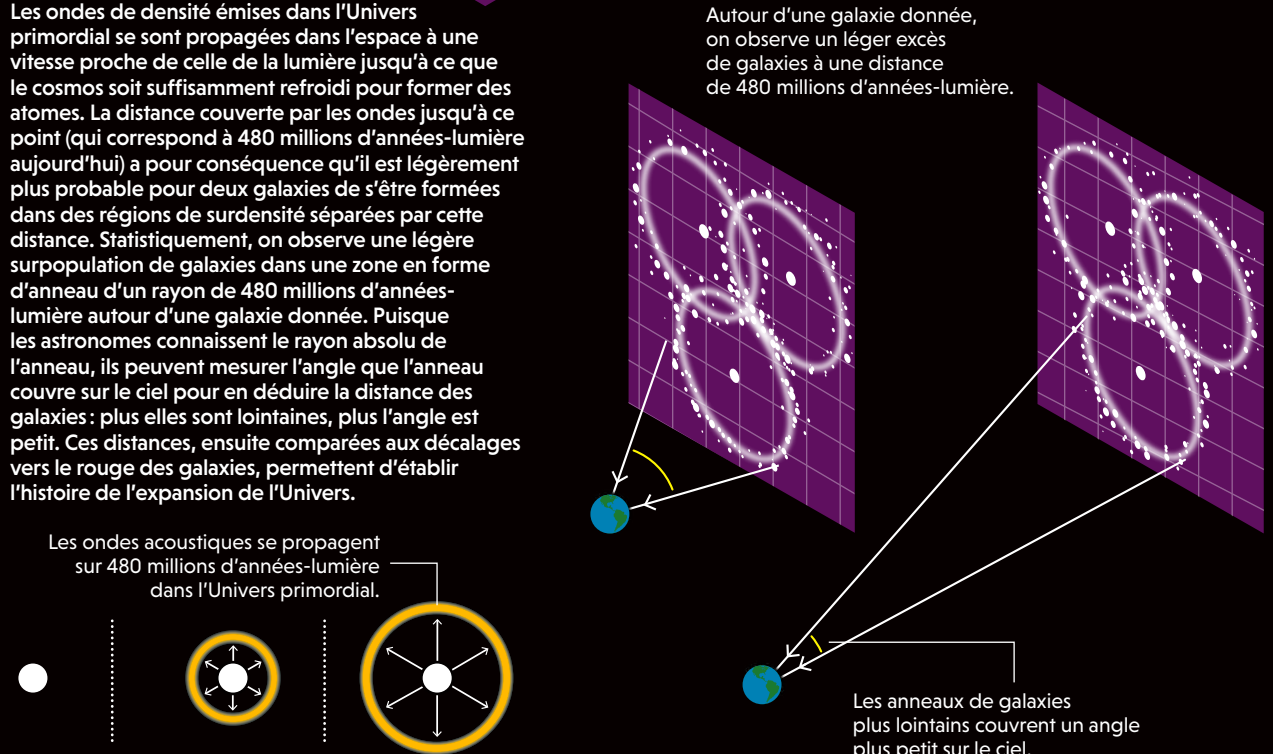


LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE IA

Ces explosions stellaires sont le fait d'un type particulier d'étoiles denses, les naines blanches. Selon un scénario possible, la naine blanche forme un système binaire avec une étoile compagnon *(a)*, dont elle absorbe de la matière *(b)* jusqu'à atteindre une certaine limite de masse, déclenchant une supernova *(c)*. Comme toutes les supernovæ de type Ia produisent presque la même quantité de matériau radioactif, leur luminosité intrinsèque (qui dépend de ce matériau) est pratiquement toujours la même. Par conséquent, leur luminosité apparente ne dépend que de leur distance et révèle donc leur éloignement. La comparaison des distances des supernovæ avec leur décalage vers le rouge (qui indique la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous) révèle la vitesse d'expansion de l'Univers aux différentes époques cosmiques.

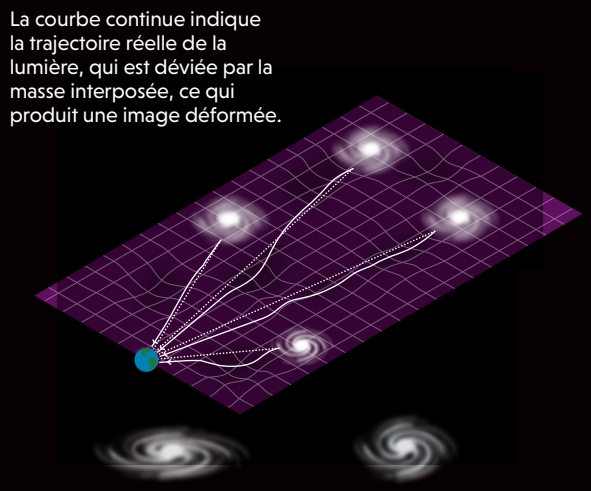
SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

Les ondes de densité émises dans l'Univers primordial se sont propagées dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière jusqu'à ce que le cosmos soit suffisamment refroidi pour former des atomes. La distance couverte par les ondes jusqu'à ce point (qui correspond à 480 millions d'années-lumière aujourd'hui) a pour conséquence qu'il est légèrement plus probable pour deux galaxies de s'être formées dans des régions de surdensité séparées par cette distance. Statistiquement, on observe une légère surpopulation de galaxies dans une zone en forme d'anneau d'un rayon de 480 millions d'années-lumière autour d'une galaxie donnée. Puisque les astronomes connaissent le rayon absolu de l'anneau, ils peuvent mesurer l'angle que l'anneau couvre sur le ciel pour en déduire la distance des galaxies : plus elles sont lointaines, plus l'angle est petit. Ces distances, ensuite comparées aux décalages vers le rouge des galaxies, permettent d'établir l'histoire de l'expansion de l'Univers.

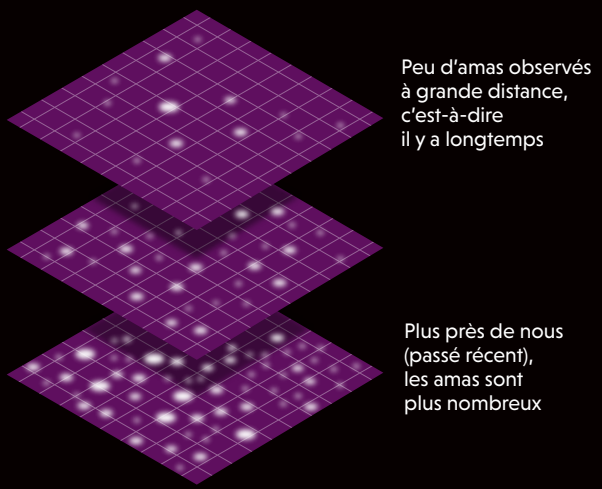


© Nigel Hawtin

LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES
La lumière des galaxies lointaines est déviée quand elle passe à côté d'objets massifs (comme les amas de galaxies) lors de son trajet vers l'observateur. À cause de cet effet dit de lentille gravitationnelle, l'image des galaxies lointaines apparaît déformée au télescope. En mesurant les légères distorsions de nombreuses galaxies, on peut déduire une carte de la répartition de la masse dans l'Univers. Cela révèle l'hétérogénéité de la matière aux différentes époques cosmiques.



LES AMAS DE GALAXIES
Au cours du temps, la gravité rassemble les galaxies en amas, malgré l'effet opposé de l'énergie sombre. Le relevé DES traquera des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous pour comparer le nombre d'amas observés dans un passé récent et plus ancien. Cela nous renseignera sur le rythme auquel les galaxies se sont regroupées.



légère tendance statistique des galaxies à être séparées de cette distance typique plutôt que d'une autre.

Cette échelle des oscillations acoustiques des baryons fournit un étalon de distance qui peut être mesuré à différentes époques dans l'histoire de l'Univers. Le relevé DES s'attache à déterminer cette caractéristique des oscillations acoustiques des baryons à partir de son catalogue de galaxies. Ces informations sur les distances seront associées à leurs décalages vers le rouge, de la même façon que pour les supernovæ. Les galaxies présentant un même décalage vers le rouge seraient plus proches si la quintessence, qui a entraîné un début d'accélération plus tardif, est en jeu, en comparaison avec le scénario où l'énergie du vide serait responsable et où l'accélération aurait commencé plus tôt.

DES GALAXIES DÉFORMÉES

Quant à la méthode des lentilles gravitationnelles, elle repose sur une propriété de la lumière prédite par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Lors de leur trajet jusqu'à nous, les rayons lumineux en provenance de lointaines galaxies sont courbés par le champ gravitationnel de la matière à proximité de laquelle ils passent. Cette courbure induit une distorsion des images des galaxies: c'est l'effet de lentille gravitationnelle. Quand la courbure est importante, les images résultantes sont spectaculaires: des galaxies lointaines prennent l'apparence d'arcs de lumière longs et fins, et l'on peut même voir plusieurs images d'une même galaxie. Mais les rayons lumineux de la plupart des galaxies ne sont que légèrement courbés, et ces très petites distorsions ne sont pas détectables à l'œil nu: c'est le régime des lentilles gravitationnelles faibles.

Cet effet est sensible à toute la matière présente, donc principalement à la matière noire, et est un peu moins sensible à la matière ordinaire, composée de baryons. Cette approche est donc très complémentaire de celle fondée sur les oscillations acoustiques de baryons.

En mesurant les formes de nombreuses galaxies sur une petite portion du ciel, on détermine dans quelle mesure les images ont été déformées et on établit ainsi une carte de la matière interposée. En répétant cette opération dans différentes parties du ciel, on met en évidence la répartition générale hétérogène de la matière dans l'Univers. L'évolution de cette granulosité au fil du temps, parce qu'elle reflète la compétition entre la gravité et l'énergie sombre, peut aider à déterminer l'origine de l'accélération de l'Univers.

Le relevé DES mesurera la forme des 200 millions de galaxies recensées pour observer cet effet, couvrant ainsi 20 fois plus de galaxies et une plus grande portion du ciel que les précédentes études de lentilles gravitationnelles faibles. La carte obtenue pour diverses régions et à différentes distances de la Terre (donc à différentes époques cosmiques) dépendrait des facteurs en jeu dans l'expansion de l'Univers. Les simulations montrent que la quintessence entrave plus la formation de grandes structures que l'énergie du vide, par exemple. Connaissant le degré d'hétérogénéité actuel, il s'ensuit que l'Univers jeune devait contenir plus d'hétérogénéité dans l'hypothèse de la quintessence que dans celle de l'énergie du vide.

LES OBSERVATOIRES DE L'UNIVERS LOINTAIN

Les années à venir promettent de resserrer l'étau autour de la nature de la matière noire et de l'énergie sombre. Nous entrons dans l'ère des grands sondages de galaxies qui vont révolutionner notre vision de l'Univers tant le nombre d'objets observés va augmenter et profiter de l'amélioration des techniques de traitement des données.

D'abord, dans la lignée du projet DES à qui il succédera, le *Large synoptic survey telescope* (LSST) entamera ses observations en 2022. Ce télescope, installé au Chili sur la montagne du Cerro Pachón, est doté d'un miroir primaire de 8,40 mètres associé à une caméra de 3,2 milliards de pixels, ce qui en fera le plus gros appareil photo jamais construit. Le LSST prendra des photos du ciel à une cadence infernale : un champ d'observation équivalent à 40 pleines lunes en un temps de pose de 15 secondes, produisant un cliché de tout le ciel austral en un peu plus de trois jours ! En dix ans, LSST observera ainsi près de 800 fois la voûte céleste. Cette stratégie d'observation est optimisée pour la détection des phénomènes transitoires et les objets variables. En particulier le LSST observera 300 000 supernovæ de type Ia et 10 milliards de galaxies, soit 100 fois plus d'objets que dans le relevé DES. Les supernovæ permettront de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers en remontant le temps jusqu'à 8 milliards d'années, tandis que la forme des galaxies sera étudiée pour en déduire la distribution de matière noire dans l'Univers.

La difficulté à laquelle les cosmologistes sont confrontés lors des analyses cosmologiques est l'estimation de la distance des objets. En effet nous ne mesurons pas directement les distances des galaxies ou des supernovæ, mais leur décalage spectral. Dans le cas du LSST, ce décalage spectral est mesuré grâce à six bandes photométriques, c'est-à-dire une observation du ciel dans six couleurs, amenant à une précision de l'ordre de 1 % caractéristique des sondages photométriques. De façon complémentaire aux relevés photométriques, comme DES et LSST, vont se déployer les grands relevés spectroscopiques de galaxies comme *Dark energy spectroscopic instrument* (DESI) et *Euclid*. Les sondages spectroscopiques ont la particularité de pouvoir mesurer l'ensemble du spectre des galaxies observées, ce qui fournit une précision sur les mesures de distances de l'ordre de 1 ‰ ; c'est dix fois mieux. Mais le prix à payer est cher, avec des durées d'observation de plusieurs minutes, et donc un nombre d'objets observés plus faible.

Ainsi le DESI, installé sur le télescope Mayall de 4 mètres, sur le pic Kitt, en Arizona, est conçu pour mesurer le spectre de 5 000 objets célestes simultanément toutes les 20 minutes. En cinq années d'observation, DESI mesurera la position et la distance de 35 millions de galaxies et de 2,4 millions de quasars, soit 15 fois plus que les meilleurs instruments actuels. Ces observations couvriront soit un tiers du ciel, et seront réalisées grâce à des spectrographes qui enregistrent les spectres dans l'ultraviolet, le visible et l'infrarouge à la fois, permettant de sonder l'Univers jusqu'à 11,5 milliards d'années. L'instrument DESI a ouvert pour la première ses 5 000 « yeux » à fibre optique à l'automne 2019 pour sa campagne de caractérisation, et démarrera ses observations scientifiques à partir de mi-2020.

Dans le même registre, l'Agence spatiale européenne (ESA) a sélectionné en 2011 la mission spatiale *Euclid*. Avec un lancement prévu en 2022, le satellite *Euclid* sera mis en orbite à 1,5 million de kilomètres de la Terre, pour une campagne d'observation d'au moins six ans. *Euclid* est doté d'un miroir de 1,2 mètre et de deux instruments, une caméra (VIS) de 600 millions de pixels observant dans le domaine visible et pour laquelle l'observation de milliards de galaxies est attendue, et un spectro-imageur dans l'infrarouge (NISP) qui fournira le spectre de près de 50 millions de galaxies. Avec un temps de pose de 15 minutes, la stratégie d'observation est optimisée pour observer chaque recoin d'une région du ciel (presque la moitié) en une seule fois, exception faite de quelques régions particulières, où le satellite fera une quarantaine de relevés.

L'excellente précision sur la mesure des distances permettra à DESI et à *Euclid* de dresser la carte en trois dimensions la plus dense et la plus détaillée de l'Univers sur la plus grande étendue jamais observée. En analysant soigneusement l'espacement entre galaxies, et en comparant à l'échelle des oscillations acoustiques des baryons, cette carte renseignera sur l'histoire de l'expansion cosmique et l'évolution de l'énergie sombre. Mais la mesure très précise du décalage spectral des galaxies procure aussi une estimation du mouvement propre des galaxies qui résulte de l'attraction gravitationnelle des structures à grande échelle avoisinantes. L'étude de ces mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière est un outil fabuleux pour tester les prédictions de la relativité générale d'Albert Einstein. La mise à l'épreuve de cette théorie sur ces échelles colossales est essentielle car elle pourrait révéler des explications alternatives à l'énergie sombre.

Ces trois projets futurs, LSST, DESI et *Euclid*, sont tous très ambitieux, et posent des questions au-delà de l'énergie sombre, comme la masse des neutrinos, les propriétés et la démographie des galaxies et des amas de galaxies, ou encore la physique stellaire. La France est très engagée dans la construction de ces instruments, notamment la caméra et le changeur de filtres de LSST, la réalisation et la caractérisation des dix spectrographes de DESI et les deux instruments d'*Euclid*, le VIS et le NISP.

Ces trois projets ont aussi un défi de taille : l'énorme quantité de données à traiter. Par exemple LSST produira plus de 200 pétaoctets de données sur dix ans (à comparer aux 25 pétaoctets traités par an au LHC). Ces données, ainsi que celles d'*Euclid*, seront en partie hébergées en France au Centre de calcul de Lyon (CC-IN2P3). Les techniques de traitement des données requièrent également la production de simulations numériques gigantesques, et l'application de méthodes d'apprentissage automatique.

Le CNRS, le CEA et de nombreuses universités françaises sont engagés plus que jamais dans la course à la compréhension du côté sombre de l'Univers. L'enjeu sera aussi de combiner les observations de ces différents instruments pour confronter de façon robuste les observations aux prédictions théoriques.

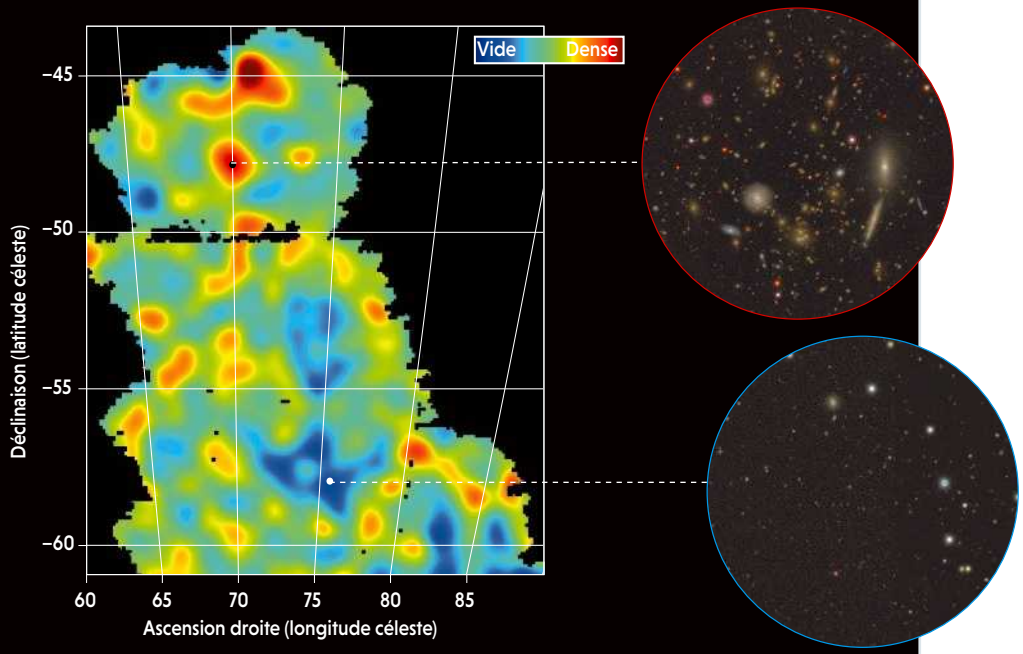
STÉPHANIE ESCOFFIER
Cosmologiste, directrice de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille

Le futur satellite *Euclid* sera lancé en 2022 pour dresser la carte tridimensionnelle de l'Univers avec une précision jamais atteinte jusque-là.

© ESA

CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-contre montre la répartition à grande échelle de la matière sur environ 139 degrés carrés du ciel, une zone correspondant à 650 fois la taille angulaire de la pleine lune. Les régions en rouge sont des zones où la densité de matière est supérieure à la moyenne, tandis que le bleu représente des zones moins denses. Cette carte résulte des données du relevé DES sur les lentilles gravitationnelles faibles (la légère déformation de l'image d'une galaxie provoquée par la déviation des rayons lumineux lors de leur passage à proximité d'objets massifs tels que des amas de galaxies, contenant de la matière ordinaire et de la matière noire). Les photographies en médaillon, prises par l'instrument *Dark Energy Camera*, montrent une région de surdensité (avec un grand nombre de galaxies brillantes) et une zone où apparaissent relativement peu de galaxies, conformément à la densité comparativement faible de la région.



© J. Zuntz, M. Troxel et la collaboration DES

> Enfin, DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous seront pris en compte.

Les cosmologistes compareront alors le nombre d'amas présents près de la Terre (correspondant à l'époque récente) et loin dans le passé. Comme pour les effets de l'hétérogénéité de la matière mis en évidence par les lentilles gravitationnelles faibles, nous nous attendons à voir davantage d'amas dans l'Univers jeune si c'est la quintessence, plutôt que l'énergie du vide, qui est à l'œuvre. Et nous devrions observer une tendance fort différente et plus compliquée dans l'hypothèse d'une gravité modifiée.

UN AVANT-GOÛT PROMETTEUR

Le relevé s'est achevé en janvier 2019, l'analyse des données est en cours. Des résultats préliminaires ont été publiés en mai 2019, incluant l'analyse de 207 supernovæ de type Ia confirmées spectroscopiquement. D'abord, l'étude confirme l'existence d'une énergie sombre. Elle donne également une mesure de la constante de Hubble H_0 (67,8 kilomètres par seconde par mégaparsec) compatible avec les mesures du fonds diffus cosmologique, en plein débat sur un apparent désaccord de la valeur de cette constante déduite des mesures des céphéides (*voir Un problème de vitesse, par N. Wolchover, page 78*). Or la constante de Hubble n'est autre que le taux d'expansion actuel de notre Univers, son inverse nous renseignant sur son âge. Autre enseignement de l'étude, l'Univers serait géométriquement euclidien, c'est-à-dire « plat ».

L'ensemble concourt à valider le principe du DES et plaide pour un renforcement des investigations de ce type. C'est exactement ce qu'entendent faire les projets DESI, déjà en cours, ainsi que LSST et *Euclid* prévus en 2022.

DES a également obtenu des résultats intéressants d'une tout autre nature, telle la découverte à confirmer de 16 galaxies naines ultrapâles dans le voisinage de la Voie lactée. Ces galaxies très proches ne contiennent, pour certaines, pas plus de quelques dizaines d'étoiles et sont parmi les objets les plus riches en matière noire que l'on connaisse. Peu lumineuses, leur détection est difficile, mais elles sont cruciales pour comprendre la formation des galaxies telles que la Voie lactée.

Que ce soit DES, DESI, LSST ou *Euclid*, la course à l'énergie sombre n'a jamais été aussi effrénée. Qui l'emportera ? L'énergie du vide ? La quintessence ? La gravité modifiée ? Ou bien une tout autre forme d'énergie sombre surgie du diable vauvert ? ■

BIBLIOGRAPHIE

T. ABBOTT *ET AL.*, Cosmological constraints from multiple probes in the Dark Energy Survey, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122(17), art. 171301, 2019.

S. ALAM *ET AL.*, The clustering of galaxies in the completed SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample, https://arxiv.org/abs/1607.03155, 2016.

K. BECHTOL *ET AL.*, Eight new Milky Way companions discovered in first-year Dark Energy Survey data, *Astrophysical Journal*, vol. 807, art. 50, 2015.

C. CHANG *ET AL.*, Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 051301, 2015.

L'ESSENTIEL

- Depuis 1998, on sait que l'expansion de l'Univers s'accélère.
- Pour en rendre compte, les physiciens ont imaginé une « énergie sombre » dotée d'une force répulsive à grande échelle.
- Pourtant, la constante cosmologique, un terme introduit dans les équations de la relativité générale par Albert Einstein, explique naturellement le phénomène.
- Cette constante avait été abandonnée par la communauté scientifique, à l'exception notable de Georges Lemaître, qui l'a défendue toute sa vie durant. Ne serait-il pas temps de la réhabiliter ?

L'AUTEUR

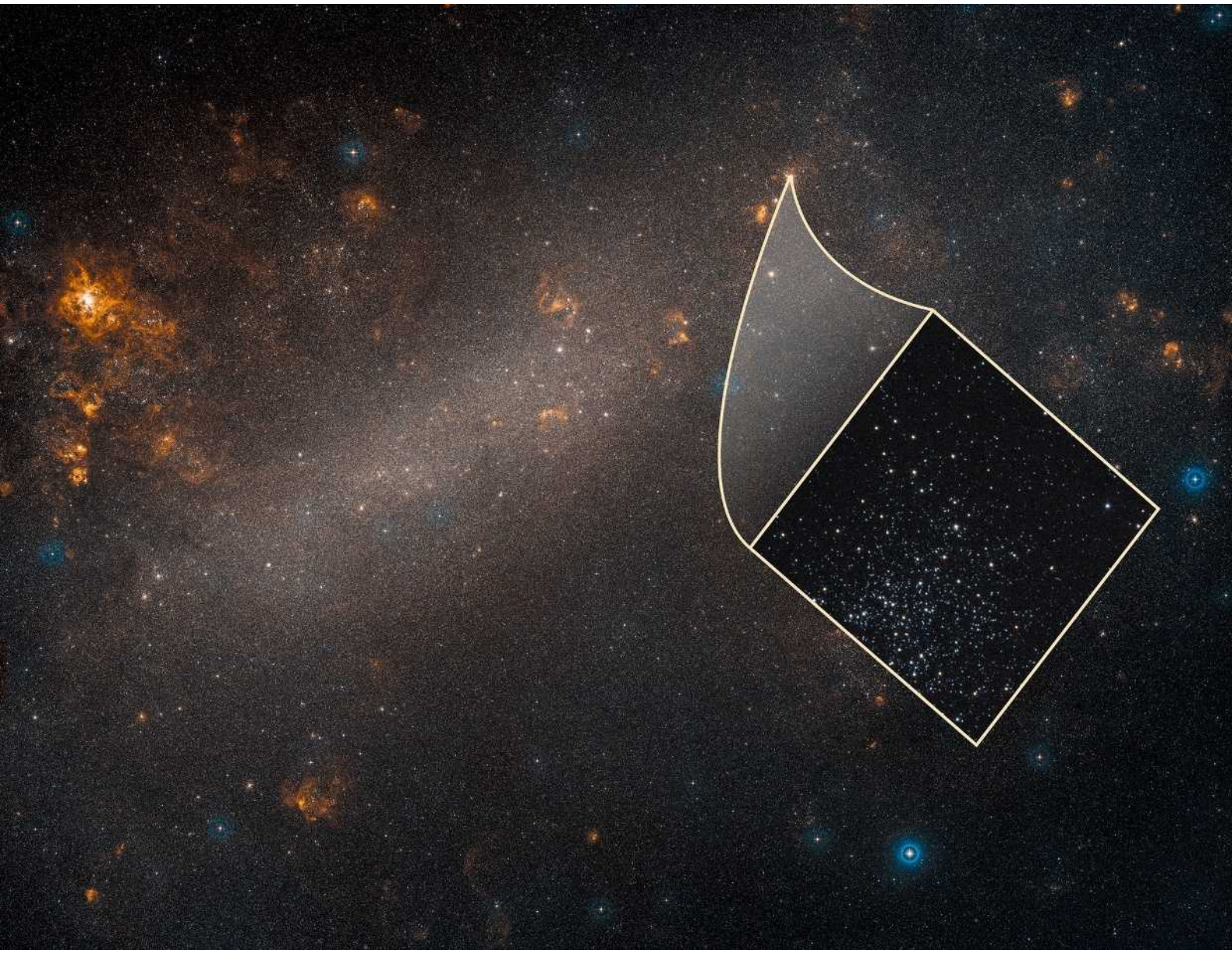
JEAN-PIERRE LUMINET
directeur de recherche au CNRS, membre du Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), du Centre de physique théorique de Marseille (CPT) et du laboratoire Univers et théories (Luth) de l'observatoire de Paris.

Indispensable constante cosmologique

Pour expliquer l'énergie sombre et l'accélération de l'expansion de l'Univers, les physiciens rivalisent de nouvelles théories. Mais ce n'est pas nécessaire : la constante cosmologique, introduite puis reniée par Albert Einstein, suffit amplement à résoudre le mystère.

Depuis 1927 et l'article fondateur de la cosmologie relativiste moderne de l'astronome et chanoine belge Georges Lemaître, théorie et observations se sont accordées pour prouver que l'Univers se dilate, la plupart des astronomes considérant que cette expansion, sous l'influence de la gravité, devait évoluer en ralentissant. C'est donc confiantes que, sur la base des données recueillies par les grands télescopes, deux équipes indépendantes conduites par Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess se sont lancées dans la cartographie de l'Univers, pensant mesurer avec une précision encore jamais atteinte les signes de ce ralentissement.

À leur grande surprise, ils ont constaté que, certes, l'expansion de l'Univers a bien été freinée dans les premiers milliards d'années par la gravité, mais qu'elle s'est accélérée au bout de 7 milliards d'années. L'explication la plus naturelle d'une telle accélération est d'invoquer l'existence d'une force répulsive à grande échelle, capable de contrer la force d'attraction des masses célestes : c'est l'« énergie sombre ».



© Nasa, ESA, Adam Riess, et Palomar Digitized Sky Survey

Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine satellite de notre Voie Lactée renfermant de nombreux amas d'étoiles (dans le médaillon). La luminosité de certaines d'entre elles, nommées Céphéides, pulsent à un rythme régulier. En les étudiant, on peut calculer avec précision la vitesse à laquelle l'univers s'étend.

La découverte, confirmée depuis par d'autres méthodes, vaudra le prix Nobel de physique 2011 aux astronomes. Mais la publication des résultats, en 1998, a déjà donné lieu aux habituels effets d'annonce dans la presse sur le modèle de : « Notre modèle de l'Univers remis en question. » Le Forum économique de Davos a même consacré en janvier 2000 une session au sujet, devant une assistance qui n'y comprenait goutte. Invité comme intervenant avec deux cosmologistes américains, j'ai tenté de tempérer l'emballement médiatique en expliquant que l'accélération de l'expansion cosmique ne nécessitait pas forcément une remise en question des modèles généraux de Big Bang. Je crois n'avoir eu aucun succès : il n'était pas évident, devant une assistance en attente de scoop, d'expliquer qu'un physicien belge, le même Georges Lemaître cité plus haut, en langue française et avec soixante ans d'avance, avait déjà donné tous les tenants et aboutissants de la répulsion cosmique en invoquant une constante cosmologique.

De fait, ce terme figurant dès 1917 dans les équations originales d'Einstein sous la forme de la lettre grecque λ a été ensuite abandonné par le courant dominant de la cosmologie anglo-saxonne. Pourtant, il explique tout naturellement et de la façon la plus élégante qui soit le phénomène de la répulsion cosmique sans faire intervenir de mystère particulier. L'affaire mérite de plus amples détails, et les objections >

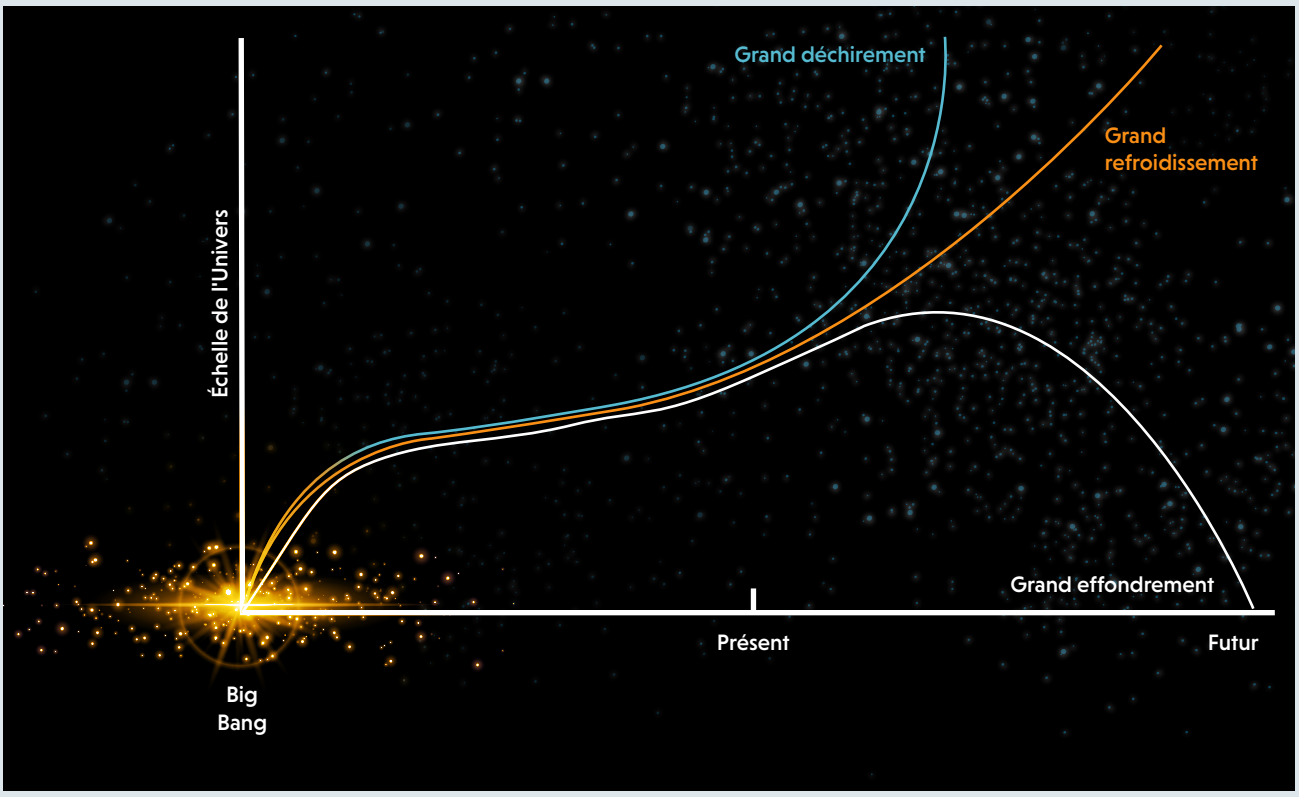
LES DESTINS DE L'UNIVERS

L'évolution de l'Univers dépend de façon cruciale de la densité totale de matière et d'énergie qu'il contient. Lorsque les astrophysiciens font l'inventaire de toutes les formes de matière et d'énergie, ils se heurtent à un certain nombre de complications. Différentes formes d'énergie ont en effet tour à tour dominé le cours de l'évolution cosmique et en ont imposé la dynamique, c'est-à-dire la variation au cours du temps du facteur d'échelle spatiale R, que l'on peut par exemple identifier au rayon de l'Univers observable. On distingue quatre phases. La première, encore hypothétique, est la très brève période d'inflation, où R aurait été en expansion exponentielle. C'est durant cette période que la matière aurait été créée. Dans une seconde phase, la radiation a dominé, mais comme la densité d'énergie diminue comme R^{-4} tandis que R augmente, elle a été supplantée dans une troisième phase par la matière dont la densité diminue seulement comme R^{-3}. Pour des raisons semblables, dans une quatrième phase l'énergie sombre a pris le relais voici 7 milliards d'années et domine l'Univers actuel. Son effet est d'accélérer l'expansion, moins rapidement cependant que durant l'inflation. Nul ne sait où elle nous conduira, puisqu'on ignore sa vraie nature et que l'on ne connaît pas sa loi de variation au cours du temps. On peut néanmoins esquisser trois scénarios.

Une énergie sombre constante *(en orange)* dominera de plus en plus la balance énergétique de l'Univers, et l'expansion observée de l'espace continuera à accélérer jusqu'à devenir exponentielle. Les structures qui ne sont pas déjà reliées gravitationnellement vont se briser et leurs parties vont s'éloigner les unes des autres à des vitesses apparentes supérieures à celle de la lumière. L'accélération nous empêchera finalement d'observer des portions importantes de l'Univers qui est aujourd'hui visible. Néanmoins, les structures liées gravitationnellement, comme les galaxies et les systèmes planétaires, le resteront. Ainsi, le système solaire ou la Voie lactée demeureront essentiellement identiques à ce qu'ils sont maintenant, alors que le reste de l'Univers semblera s'enfuir loin de nous. Ce scénario dit du « Big Chill » (« Grand Refroidissement ») est, dans l'état actuel de nos connaissances, le plus plausible.

Avec une densité d'énergie sombre diminuant *(en blanc)* dans le futur (c'est le modèle de quintessence), la matière peut redevenir dominante. L'horizon cosmique grandira, nous révélant une part toujours plus grande de l'Univers. La gravité attractive l'emportera à nouveau et l'expansion non seulement cessera d'accélérer, mais s'inversera et l'Univers se contractera dans son ensemble pour disparaître dans un « Big Crunch » (« Grand Effondrement ») pouvant survenir dans 18 milliards d'années.

Si l'énergie sombre augmente *(en bleu)* au cours du temps, ou si elle est dominée par l'énergie fantôme fortement répulsive, l'espace se dilatera à un rythme sans cesse accru, et l'accélération sera elle-même accélérée. En ce cas, l'issue sera un « Big Rip » (« Grand Déchirement »), advenant lorsque l'accélération deviendra infinie au bout d'un temps fini. Toute la matière de l'Univers, même les atomes, sera déchirée par la dilatation de l'espace. D'après le scénario le plus extrême, cet événement se produira dans « à peine » 22 milliards d'années. D'abord les galaxies seront séparées les unes des autres et les amas se dissoudront. Environ 60 millions d'années avant le Big Rip, la gravité sera trop faible pour maintenir la cohésion de notre galaxie, qui se dispersera ; trois mois avant, le système solaire sera déchiré ; dans les dernières minutes, étoiles et planètes seront déchiquetées, et 10^{-19} seconde avant, les atomes et les noyaux seront eux-mêmes détruits, laissant un Univers vide et sans aucune structure.



© Véronique Marmont

récurrentes que l'on oppose à l'identification de l'énergie noire à la constante cosmologique, quelques éclaircissements.

En 1917, Albert Einstein souhaite logiquement utiliser sa nouvelle théorie de la relativité générale pour décrire la structure de l'Univers dans son ensemble. La conception qui prévaut alors est que l'Univers doit être statique, c'est-à-dire invariable dans le temps. Einstein s'attend à ce que sa théorie appuie cette opinion. Ce n'est pas le cas. Le modèle d'Univers qu'il élabore en premier lieu n'a pas un rayon de courbure constant : la force attractive inexorable de la gravité, agissant sur chaque corps céleste, a tendance à le déstabiliser et à le faire s'effondrer sur lui-même. Or notre Univers ne s'effondre pas.

LA PLUS GROSSE BÉVUE D'EINSTEIN ?

Pour Einstein, le seul remède à ce problème consiste à ajouter un terme *ad hoc* mais mathématiquement cohérent dans ses équations d'origine. Cet ajout correspond à une sorte d'« antigravité », qui agit comme une force de répulsion ne se faisant sentir qu'à l'échelle cosmique. Grâce à cette astuce mathématique, le modèle d'Einstein reste permanent et invariable (*voir la figure 97*). Einstein représente ce terme par la lettre grecque Λ et le nomme « constante cosmologique ». Il s'agit bien d'une constante, puisqu'elle doit garder exactement la même valeur dans l'espace et dans le temps. Formellement, elle peut prendre *a priori* n'importe quelle valeur, mais celle qui est sélectionnée par Einstein aboutit à un modèle d'Univers statique.

La même année, l'astrophysicien néerlandais Willem de Sitter bâtit un autre modèle d'Univers relativiste statique, très différent de celui d'Einstein (il suppose que la densité de matière reste nulle au cours du temps), mais incluant lui aussi une constante cosmologique, dont l'effet ici est d'induire, en l'absence de matière et donc de gravité, une courbure de l'espace-temps. Le rôle de la constante s'éclaire alors d'un jour nouveau. Dans le modèle de Sitter, les lignes d'Univers (les trajectoires d'espace-temps) suivies par les galaxies se séparent rapidement les unes des autres au cours du temps, comme si l'espace était en dilatation générale : cela signifie qu'en l'absence de matière la constante cosmologique a une influence certaine sur la structure de l'Univers. Aux yeux d'Einstein, la solution de Sitter se réduit toutefois à une simple curiosité mathématique, dans la mesure où l'Univers réel contient bel et bien de la matière.

Un premier coup de théâtre se produit en 1922, lorsque le mathématicien russe Alexandre Friedmann étudie les modèles cosmologiques relativistes sans préjuger du caractère statique de l'Univers. Il découvre des solutions simples et exactes faisant des modèles statiques d'Einstein et de Sitter des cas très particuliers de solutions plus générales, lesquelles sont dynamiques.

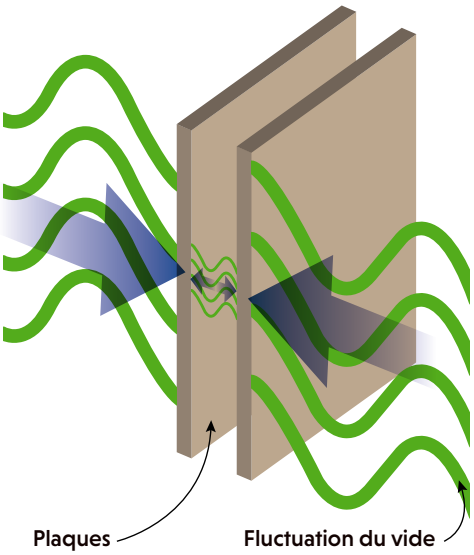
Peu après, les observations astronomiques effectuées aux États-Unis par Vesto Slipher et mises en forme en 1929 par Edwin Hubble (qui en tirera seul toute la gloire) confirment que les galaxies ont effectivement tendance à se séparer au cours du temps. De façon concomitante, le théoricien britannique Arthur Eddington réexamine le modèle statique d'Einstein et démontre que, tel un stylo posé sur sa pointe, il est instable : à la moindre perturbation, il devrait entrer en expansion ou en contraction.

Ces faits nouveaux concourent à faire admettre que le modèle cosmologique d'Einstein n'est pas un bon modèle d'Univers et, concomitamment, à remettre en cause la constante cosmologique. Puisqu'elle ne remplit plus sa fonction première, à savoir stabiliser le rayon d'Univers, à quoi bon la garder ? Einstein est le premier à faire son autocritique. Après quelques réticences, il finit par admettre la pertinence des solutions dynamiques de Friedmann et dans la nouvelle solution qu'il élabore en 1932 avec de Sitter, la constante cosmologique a disparu !

L'HOMME QUI A DIT NON

À première vue, le débat paraît clos. Pourtant, un homme n'est pas d'accord. Il s'appelle Georges Lemaître. Il a commencé ses recherches cosmologiques en 1925 et il a compris le rôle dynamique joué par la constante cosmologique dans le modèle de Sitter. En 1927, il retrouve les solutions plus générales découvertes par Friedmann et fait pour la première fois le lien entre l'expansion de l'espace et la fuite apparente des galaxies. C'est lui le véritable père de la cosmologie moderne et des fameux modèles de Big Bang !

Pour Lemaître, la constante cosmologique est un ingrédient essentiel de la théorie relativiste, une nécessité à la fois logique et observationnelle. Il développe une argumentation prémonitoire en trois points. D'abord, la constante cosmologique est nécessaire pour obtenir une échelle de temps d'évolution largement supérieure à la durée des âges géologiques. Les modèles de Big Bang sans constante cosmologique prédisent en effet que l'âge théorique de l'Univers, calculé à partir de son taux d'expansion, est plus court que celui des étoiles, voire celui de notre planète… Ensuite, l'instabilité de l'équilibre entre l'attraction gravitationnelle et la répulsion cosmique est une façon de comprendre comment les étoiles et les galaxies ont pu se former durant un laps de temps d'environ



Deux surfaces parfaitement conductrices séparées par du vide s'attirent. Cet « effet Casimir » résulte des fluctuations quantiques spontanées du champ électromagnétique dans le vide.

> 1 milliard d'années après le Big Bang. Enfin, l'énergie contenue dans l'Univers n'est définie qu'à une constante additive près, car la relativité générale ne fournit pas de méthode d'ajustement lors d'un changement arbitraire du niveau zéro de l'énergie. Selon Lemaître, la constante cosmologique permet de faire cet ajustement. Dès 1934 il entrevoit ainsi le lien entre la constante cosmologique et la mécanique quantique.

Aux yeux de Lemaître, la constante cosmologique est donc parée de toutes les vertus. Il ne parviendra pourtant jamais à convaincre Einstein, lequel ira jusqu'à dire qu'avec l'introduction de la constante cosmologique il avait commis la plus grosse bévue de sa vie.

On interprète souvent cette curieuse déclaration par le fait que le père de la relativité générale aurait été mécontent d'avoir gâché la beauté de sa théorie en introduisant un terme superflu. C'est faux, car dès 1916 Einstein avait envisagé l'existence de ce terme hors du contexte cosmologique. Dans une note de bas de page, il remarquait que ses équations du champ gravitationnel n'étaient pas les plus générales possible et qu'il existait un terme additionnel compatible avec la structure de sa théorie. Par ailleurs, le mathématicien français Élie Cartan a démontré en 1922 que la forme la plus générale des équations de la relativité générale doit nécessairement comprendre une constante d'intégration identique à la constante cosmologique, et Einstein connaissait ce résultat. Non, la vraie bévue commise par Einstein a été de donner au terme cosmologique une valeur très particulière pour forcer son modèle d'Univers à demeurer statique. Ce faisant, il est passé à côté de la découverte capitale de la cosmologie du XX^{e} siècle : l'expansion de l'Univers. Einstein en était parfaitement conscient, et l'on peut interpréter sa surprenante décision d'abandonner toute recherche en cosmologie à partir de 1933 comme la conséquence d'une blessure d'amour-propre !

Toujours est-il que le désaveu du père de la relativité pèsera de tout son poids, et le reste de la communauté des cosmologistes le suivra : malgré les puissants arguments de Lemaître en sa faveur, la constante cosmologique va rester au placard pendant soixante ans, d'autant qu'avant 1998 aucune observation astronomique directe n'est venue appuyer son existence.

LES VERTUS DE L'ÉNERGIE DU VIDE

L'idée de constante cosmologique a aussi pâti de son interprétation en termes d'énergie du vide. En 1934, à une époque où la théorie quantique est encore balbutiante, Lemaître est le premier à prendre en compte l'énergie du vide et à lui associer une pression négative pour interpréter la constante cosmologique. Mais sa contribution va rester complètement ignorée.

Il faut attendre la fin des années 1940, époque où la majorité des astronomes rejette l'idée d'une constante cosmologique, pour que des physiciens théoriciens commencent à explorer les propriétés du vide. Ils commencent à comprendre que la notion d'espace vide est plus subtile qu'ils ne le pensaient. L'espace n'est pas un réceptacle passif empli de matière et de rayonnement, c'est une entité physique et dynamique qui a une « chair ». Et cette chair, c'est l'énergie du vide. Des physiciens comme Paul Dirac, Enrico Fermi et Richard Feynman font l'hypothèse que ce que nous appelons « espace vide » est, en vertu du principe de Heisenberg, empli de « particules virtuelles », ne se manifestant en tant que réalité matérielle que de façon éphémère. Le vide quantique joue le rôle d'une banque auprès de laquelle on peut emprunter de l'énergie pour créer pendant un temps très court une particule et une antiparticule (de telle sorte qu'elles sont inobservables). La quantité d'énergie que l'on peut emprunter est inversement proportionnelle à la durée de l'emprunt.

Les fluctuations quantiques du vide électromagnétique ont même des manifestations macroscopiques, prévues en 1948 par le physicien néerlandais Hendrik Casimir, qui montra qu'elles induisaient une force d'attraction entre deux plaques conductrices parallèles (*voir la figure ci-contre*).

Le vide n'est donc pas le néant, il est potentiellement bourré d'énergie. Appliquant ce concept à la cosmologie, le Russe Iakov Zeldovitch redémontre en 1967, sans jamais avoir lu Lemaître, que le terme Λ équivaut à un champ d'énergie latent dans l'espace vide. La constante cosmologique est en quelque sorte une « dynamite » du vide.

© Cern/Atlas

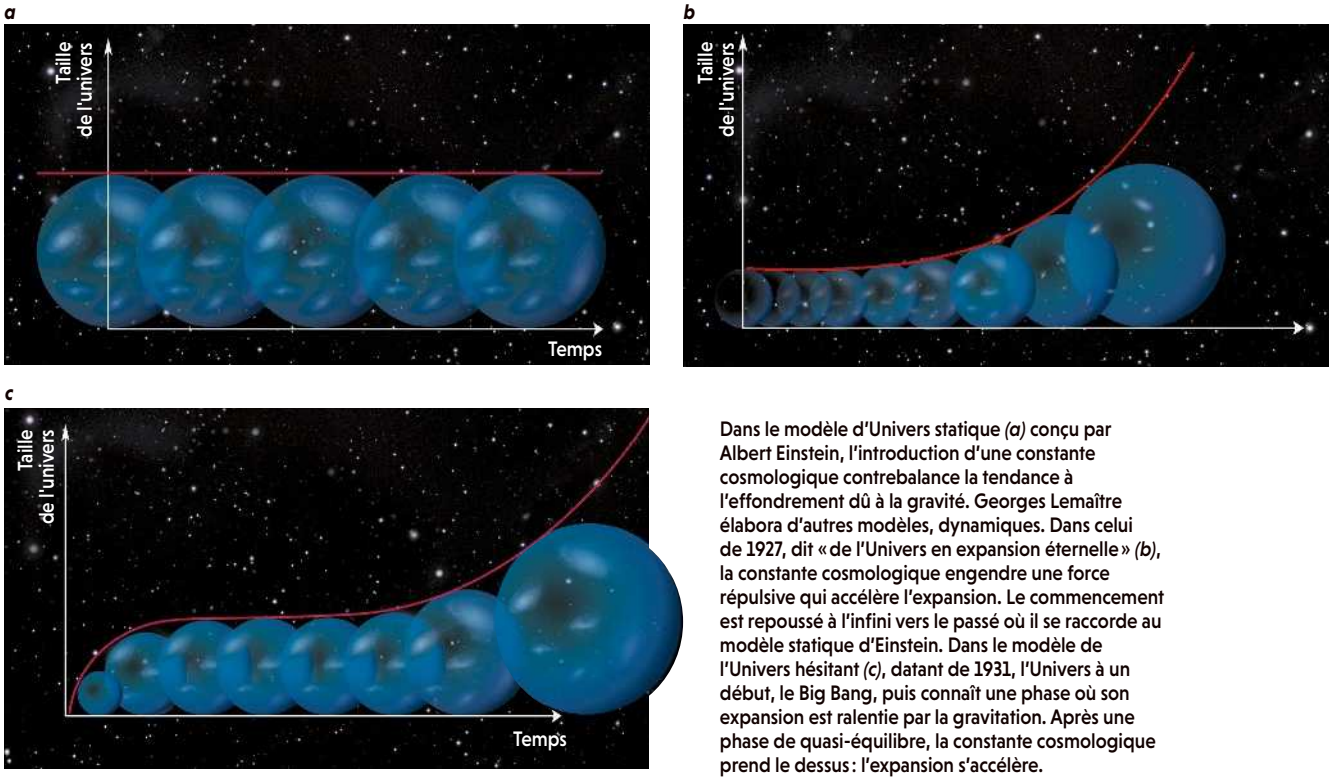
Le vide n'est donc pas le néant, il est potentiellement bourré d'énergie

Forts de ces acquis théoriques, les cosmologistes Alan Guth et Andrei Linde proposent en 1979 que l'énergie du vide a provoqué une phase d'« inflation » dans l'Univers très primordial : sur un très court laps de temps compris entre 10^{-36} et 10^{-34} seconde après le Big Bang, notre Univers aurait subi une croissance exponentielle, son expansion s'étant fortement accélérée sur cette période.

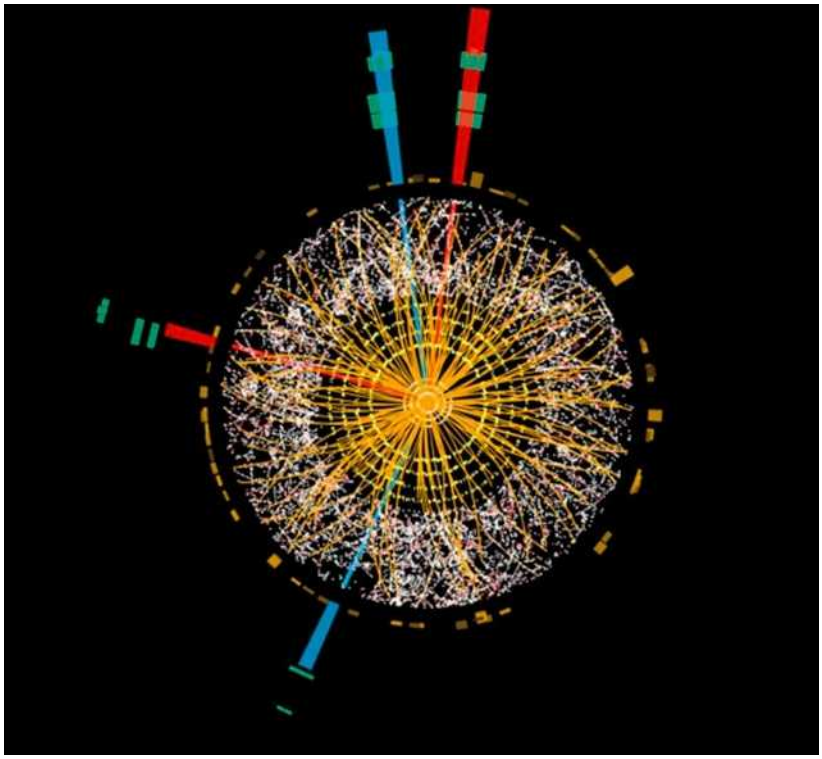
Les modèles d'inflation sont assez vite acceptés, mais les astronomes continuent à ignorer la constante cosmologique, considérée comme inadéquate pour décrire l'Univers actuel. Seul le cosmologiste d'origine canadienne James Peebles, récompensé en 2019 par le prix Nobel, propose au début des années 1980 la réintroduction de la constante cosmologique dans les modèles de Big Bang. Le développement de la théorie de l'inflation implique en effet que la géométrie de l'espace observable doive être très proche d'une géométrie de courbure nulle. Or, il n'y a pas assez de matière dans l'Univers pour aboutir à une telle géométrie. Peebles invoque donc une valeur élevée de la constante cosmologique pour combler le déficit.

LES MAUVAIS CALCULS DE L'ÉNERGIE DU VIDE

Les physiciens qui travaillent sur le concept d'énergie du vide ont en vue un projet plus grandiose : l'unification des interactions fondamentales. Dans ce dessein, ils sont obligés d'ajouter des termes dans leurs équations, qui représentent des champs naturels entièrement nouveaux. Le concept de champ a été inventé au XIXe siècle par les mathématiciens pour exprimer comment une quantité donnée peut varier d'un point à l'autre de l'espace. Les physiciens ont aussitôt adopté cette idée pour décrire quantitativement comment des forces, comme la gravité et l'électromagnétisme, changent en fonction de l'éloignement par rapport à une source. Par exemple le champ de Higgs, dont le boson médiateur (*voir la figure page suivante*) a été mis expérimentalement en évidence au Cern en 2012, découle de la théorie électrofaible >



Dans le modèle d'Univers statique *(a)* conçu par Albert Einstein, l'introduction d'une constante cosmologique contrebalance la tendance à l'effondrement dû à la gravité. Georges Lemaître élabora d'autres modèles, dynamiques. Dans celui de 1927, dit « de l'Univers en expansion éternelle » *(b)*, la constante cosmologique engendre une force répulsive qui accélère l'expansion. Le commencement est repoussé à l'infini vers le passé où il se raccorde au modèle statique d'Einstein. Dans le modèle de l'Univers hésitant *(c)*, datant de 1931, l'Univers à un début, le Big Bang, puis connaît une phase où son expansion est ralentie par la gravitation. Après une phase de quasi-équilibre, la constante cosmologique prend le dessus : l'expansion s'accélère.



Le boson de Higgs a été découvert en 2012 au Cern par le détecteur Atlas. Il est ici trahi par sa désintégration en quatre particules *(les faisceaux bleus et rouges)*. Il est le médiateur d'un champ quantique (le champ de Higgs) qui contraint la valeur de l'énergie du vide, possible cause de l'expansion accélérée de l'Univers.

© CERN/ATLAS

> introduite par Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg pour unifier les interactions électromagnétique et nucléaire faible.

Mais il y a un prix à payer pour l'introduction de nouveaux champs quantiques : ils confèrent à l'état de vide une énorme énergie latente, qui se comporte exactement comme la constante λ des modèles cosmologiques. Comme l'avait prophétisé Lemaître, voici donc ce terme si controversé brillamment ressuscité par la théorie quantique ! Il ne reste plus qu'à calculer sa valeur dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Et là, catastrophe ! Plusieurs manières de calculer sont possibles, mais la valeur obtenue dans la plupart des cas est 10^{122} fois supérieure à celle prescrite par l'observation astronomique, un écart si faramineux, qualifié de « pire prédiction de toute la physique », que notre esprit a des difficultés à le saisir. Avec une énergie du vide aussi grande, toute la matière de l'Univers serait instantanément dispersée, et les galaxies ne se seraient jamais formées.

On conçoit qu'il soit déplaisant, aux yeux des physiciens théoriciens, que leurs meilleurs modèles d'unification, censés faire des prédictions ultra-précises dans le domaine des particules élémentaires, conduisent à une conséquence cosmologique aussi aberrante. C'est un exemple extrême du problème de base qui affecte le modèle standard de la physique des particules : on ne comprend pas pourquoi les quelque trente paramètres libres dont il dépend pour écrire les lois de la physique ont telle ou telle valeur.

Pour la constante cosmologique, les physiciens ont donc tout tenté pour réduire l'écart en inventant des théories « au-delà du modèle standard ». La plus étudiée est la supersymétrie (Susy), ainsi nommée car elle suppose une symétrie entre les fermions (particules qui constituent la matière) et les bosons (qui véhiculent les interactions). Mais rien à faire, elle échoue complètement à résoudre le problème.

UNE CONSTANTE QUI NE L'EST PAS

Pour sauver la mise, les physiciens des hautes énergies ont alors imaginé que la constante cosmologique n'était peut-être pas vraiment constante. Par exemple, Robert Caldwell et ses collaborateurs ont proposé en 1998 l'existence d'une nouvelle entité qui imbiberait complètement l'espace, un peu comme le faisait l'éther chez Aristote, un cinquième élément nommé « quintessence ». Le terme a été repris par les chercheurs pour l'appliquer à ce nouveau champ d'énergie hypothétique. Celui-ci, auquel on attribue une variation excessivement lente, peut encore être représenté dans les modèles d'Univers à l'aide du terme cosmologique, lequel cesse alors d'être défini comme une constante. Il peut toujours s'interpréter comme ce qui reste dans l'Univers lorsqu'on en retire toute la matière et tout le rayonnement. En ce sens, la quintessence correspond à une certaine forme de vide, mais plus flexible que la constante cosmologique car variable au cours du temps. La valeur de ce champ, extrêmement élevée dans l'Univers très primordial (donc en accord avec les calculs des physiciens des hautes énergies), tomberait très bas au cours de l'évolution cosmique, conformément à la valeur aujourd'hui mesurée par les astronomes.

Une autre approche est celle de la théorie des cordes, extension de la supersymétrie destinée à inclure une description de la gravité. L'une de ses propositions les plus étonnantes concerne le multivers. Ses partisans les plus fervents (et médiatisés) comme Leonard Susskind, Brian Greene ou Max Tegmark espèrent convertir un échec explicatif en un tour de passe-passe extravagant : si l'on ne comprend pas les valeurs que prennent les constantes fondamentales dans notre Univers, il suffit de présumer que notre Univers appartient à un ensemble quasi infini et inobservable d'Univers, chacun d'eux étant muni de paramètres aléatoirement distribués. Dans le « paysage » du multivers, la constante cosmologique est extraordinairement grande dans la plupart des cas, mais il y a forcément un Univers très improbable où elle est strictement nulle, un autre tout aussi improbable où elle a la « bonne valeur » – celle de notre Univers, bien entendu.

La théorie M, extension de la théorie des cordes proposée par Edward Witten, promet encore davantage. Selon ses partisans, dans le monde multidimensionnel des «branes» issu de la théorie, l'énergie sombre mesurée dans notre Univers-brane pourrait être importée à partir des dimensions supplémentaires de la «matrice» dans laquelle nous serions immergés. D'autres chercheurs voient l'origine de la répulsion cosmique dans d'éventuelles interactions entre branes – ce qui revient à éliminer toute énergie sombre. Ceci n'éclaire en rien le problème, si l'on se souvient que la théorie M est bien plus mystérieuse que l'énergie sombre, qui elle au moins a des effets observables sur la vitesse d'expansion cosmique!

La physique ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données ?

On le voit, aucune de ces nouvelles théories, aussi fascinantes soient-elles, ne résout mieux les difficultés que leurs versions antérieures à plus basse énergie. Comme elles, elle les repousse chaque fois un peu plus loin, éloignant d'autant le fantasme qu'elles suscitent: celui d'une physique totalement unifiée qui serait proche de son achèvement.

À ce stade, on peut se demander si la découverte de l'accélération cosmique devait forcément conduire à tant de contorsions théoriques. D'un côté, on peut penser qu'il faut davantage d'imagination et de créativité pour sortir la physique théorique de ce que l'on croit être une impasse. De l'autre, on peut se demander si justement la physique actuelle ne souffre pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données expérimentales.

Et entre ces deux positions, rappelons que le phénomène de l'accélération cosmique peut être simplement décrit par la constante cosmologique classique des équations d'Einstein, sans faire appel à une nouvelle physique. Cependant, ce n'est pas parce que c'est l'explication la plus simple qu'elle est la bonne. Alors, si ce n'est pas la constante cosmologique associée au vide quantique qui provoque l'accélération observée de l'expansion cosmique, quelle en est la cause? Le problème soulevé est celui de la compatibilité entre la description classique de l'espace, du temps et de la gravitation avec celle, quantique, de la matière: la nature encore mystérieuse de l'énergie sombre suggère qu'il manque quelque chose d'essentiel dans notre compréhension de l'Univers physique. À ce titre, son élucidation peut servir de guide sur la façon de mettre au point une bonne théorie de la gravitation quantique.

TRAQUER L'ÉNERGIE SOMBRE

Peut-on dès lors imaginer des dispositifs expérimentaux susceptibles de mieux contraindre les différents modèles d'énergie sombre? Celle-ci est caractérisée par une pression négative. Cette dernière équivaut en fait à une tension, tout comme les objets élastiques, ressorts et feuilles de caoutchouc, ont eux aussi, quand ils sont tendus, une pression négative dirigée vers l'intérieur.

On montre que, lorsque la pression est inférieure à un tiers de la densité d'énergie, la force gravitationnelle change de signe et devient répulsive. Le paramètre clé est l'équation d'état, qui explicite le rapport entre la pression p de l'énergie sombre et sa densité d'énergie ρ sous la forme $p = w \rho c^2$, où w est un paramètre dépendant de la nature de l'énergie. Pour obtenir une énergie répulsive, w doit être négatif et inférieur à $-1/3$.

Comme l'avait vu Lemaître dès 1934, la constante cosmologique ou le vide quantique sont caractérisés par $w = -1$, ils sont donc fortement répulsifs. D'autres formes d'énergie sombre, comme les modèles de quintessence, ont des w compris entre -1 et $-1/3$. La forme la plus extrême d'énergie répulsive, dite «énergie fantôme», est caractérisée par $w < -1$. La flexibilité théorique permet en outre à l'équation d'état de varier arbitrairement au cours du temps.

Les astronomes ont mis en place d'ambitieux programmes d'observations susceptibles (*voir À la poursuite de l'énergie sombre, par J. Frieman, page 84*) de contraindre les valeurs possibles de w et ce faisant les différents modèles d'énergie sombre. L'enjeu est capital pour la cosmologie puisque le futur à très long terme de notre Univers en dépend entièrement (*voir l'encadré, page 94*). Si le paramètre w s'avère très proche de -1, la théorie de la relativité générale et sa constante cosmologique rendront bien compte du taux d'expansion de l'Univers et de la présence de l'énergie noire. En revanche, une valeur significativement différente impliquerait soit l'existence d'une autre forme d'énergie sombre soit la nécessité de réviser la théorie de la relativité générale... ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. LUMINET, *L'Invention du Big Bang*, Le Seuil/Points Sciences, 2e éd., 2014.

J.-P. LUMINET, *L'Univers chiffonné*, 2e éd., Folio Essais, 2005.

L'ESSENTIEL

- En 1998, les cosmologistes ont découvert que l'expansion de l'Univers accélère.
- Ce phénomène s'expliquerait par une « énergie sombre », qui représenterait 70 pour cent de la densité d'énergie de l'Univers.
- L'énergie sombre pourrait correspondre à une constante cosmologique liée aux fluctuations quantiques du vide.
- D'autres pistes sont explorées, comme la « quintessence » ou des modifications des lois de la gravitation.

L'AUTEUR

CÉDRIC DEFFAYET est directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris et à l'Institut des hautes études scientifiques.

Vers une nouvelle gravitation ?

L'expansion de l'Univers accélère. Pour expliquer ce phénomène constaté récemment, les théoriciens explorent plusieurs voies, comme l'existence d'une mystérieuse « énergie sombre » ou de nouvelles lois de la gravitation.

Souvenez-vous. La dernière fois que vous avez admiré un ciel étoilé, ne vous êtes-vous pas demandé à quelle distance se trouvent les étoiles ? Les Grecs se posaient déjà de la question. Aristarque de Samos tenta, par exemple, d'estimer la distance à l'étoile la plus proche, le Soleil. Son calcul était faussé par le manque de précision des instruments de l'époque. Au cours des siècles suivants, les astronomes ont amélioré les techniques. L'invention de la lunette astronomique a étendu le champ

d'investigation à un domaine jusqu'alors invisible. Les techniques géométriques, telle que l'utilisation de la parallaxe (on déduit la distance d'un objet à partir de son déplacement par rapport à un fond fixe quand on l'observe de deux positions différentes), ont par la suite trouvé leurs limites. De nouvelles méthodes ont été mises au point et les astrophysiciens utilisent aujourd'hui des étoiles telles que les céphéides ou les supernovæ de type Ia – des astres en train d'exploser –, pour déterminer les distances dans l'Univers.

Alors que ces chercheurs cartographiaient le cosmos, les théoriciens ont développé une description géométrique de l'Univers. Le modèle standard cosmologique, le modèle du Big Bang, décrit avec succès les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a près de cent ans. La «force de gravitation» y est décrite de façon géométrique dans un espace-temps courbe. Plus précisément, le mouvement d'un objet en chute libre est interprété dans la théorie d'Einstein comme un trajet qui suit le plus court chemin dans un espace-temps courbe. La géométrie de l'espace-temps définit les trajectoires des objets et, en retour, le contenu matériel de l'Univers déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et contenu matériel sont intimement liés dans les équations de la relativité générale.

En combinant l'observation précise de la lumière émise par les galaxies lointaines avec des mesures de distance, les cosmologistes ont découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies semblent s'éloigner les unes des autres, car l'espace-temps qui les contient s'étire. Plus étonnant, en observant des supernovæ très éloignées, les scientifiques ont découvert que l'expansion se fait à un rythme qui s'accélère.

Quelle est l'origine de ce phénomène? Une explication possible est la présence dans l'Univers d'une «énergie sombre», dont la nature reste inconnue, mais dont on peut déduire certaines caractéristiques des observations astrophysiques. C'est cette question qui nous intéresse ici.

Avant d'aborder la question de la nature de l'énergie sombre, voyons comment les cosmologistes ont eu l'idée de son existence et comment ils ont estimé son abondance dans l'Univers. Toute substance influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Or l'analyse du fond diffus cosmologique – un rayonnement électromagnétique émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans – indique que l'Univers suit une géométrie proche de celle d'Euclide aux grandes échelles. Une telle propriété n'est possible que si le contenu de l'Univers présente une certaine densité moyenne d'énergie, dite «densité d'énergie critique».

UN PROBLÈME DE CONTENU

Par ailleurs, les astrophysiciens déduisent le contenu en matière ordinaire (dite «baryonique» et qui compose les planètes, les étoiles...) de l'étude de la formation des noyaux atomiques légers dans les premières minutes de l'Univers. Cette matière ne représente que 5% de la densité d'énergie critique (*voir Repères, page 6*). Ainsi, 95% du contenu de l'Univers est sous une forme inconnue.

Ce contenu mystérieux se manifeste néanmoins de façon indirecte par son influence gravitationnelle sur la matière baryonique. Les cosmologistes le séparent en deux composantes selon son comportement, soit aujourd'hui environ 25% de matière noire et 70% d'énergie sombre. Cette composition est maintenant confirmée par de nombreuses observations.

La présence de matière noire a d'abord été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière >

baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle: la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire.

MESURER L'EXPANSION

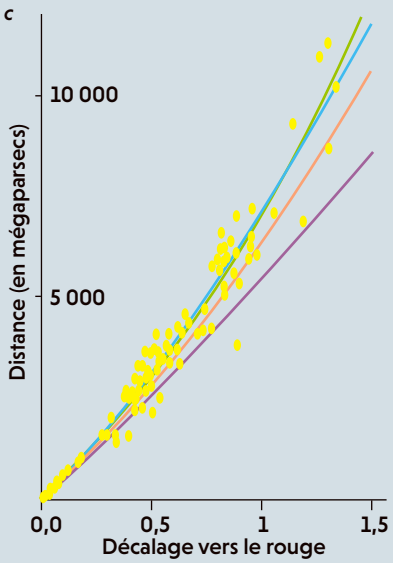
La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est due à Einstein en 1917, mais elle ne fut prise au sérieux que lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

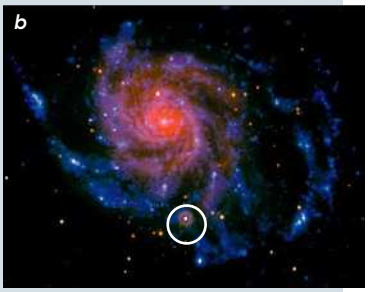
La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, quand on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était systématiquement décalé vers le rouge. Cette observation peut être interprétée par l'effet Doppler: la longueur d'onde d'un signal électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la «loi de Hubble», entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée.

Dans le cadre de la relativité générale, les observations de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers: c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est la constante de Hubble. Elle a été déterminée avec une précision de l'ordre de 1% et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par

LES CHANDELLES STANDARD

Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). De fait, elles servent de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable: une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (*a et b*). Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. Comme la quantité de lumière émise est connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi le décalage vers le rouge de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers. En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (*c*). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible: l'expansion était donc plus lente dans le passé.





Les mesures de la distance et de la vitesse d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches *(telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b)* vérifient la loi de Hubble linéaire *(c)*. Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines *(les courbes correspondent à différents modèles cosmologiques)*.

Nasa/Swift/Peter Brown, université de l'Utah/université de Hawaii

L'addition d'une constante cosmologique dans les équations ajoute un nouveau contenu à l'Univers

l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique), qui postule qu'il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats ; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat. En effet, la constante a pu varier au cours du temps. Mesurer cette variation consiste précisément à estimer l'accélération ou la décélération de l'expansion de l'Univers. Jusqu'en 1998, le consensus chez les cosmologistes était que l'expansion devait ralentir. En effet, la matière ordinaire et la matière noire s'opposent à l'expansion, un peu comme l'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil tend à ralentir le mouvement de fuite d'une comète.

Dans les années 1990, deux équipes ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années (*voir À la poursuite de l'énergie sombre, par J. Frieman, page 84*). Les premiers résultats ont été publiés en 1998 et ce fut une surprise : l'expansion de l'Univers accélère. Par ailleurs, ce phénomène a débuté relativement récemment dans l'histoire cosmique, quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui.

Si ce résultat n'était pas celui attendu, il n'est cependant pas difficile à reproduire dans le cadre de la relativité générale : il suffit de donner une valeur non nulle à la « constante cosmologique » (*voir Indispensable constante cosmologique, par J.-P. Luminet, page 92*). Elle a été introduite par Einstein dans ses équations de la relativité générale – avant la découverte de l'expansion cosmique – pour que ces équations correspondent à un univers statique. Il suffisait d'ajuster la valeur de cette constante pour contrebalancer l'effet attractif de la matière.

Mais que représente physiquement cette constante cosmologique ? L'ajout de ce terme dans les équations d'Einstein est l'équivalent mathématique de l'addition d'un nouveau contenu dans l'Univers, dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, ce nouveau contenu a une densité d'énergie constante au cours de l'histoire cosmique, alors que celle de la matière ordinaire diminue avec l'expansion de l'espace-temps. La densité d'énergie associée à la constante cosmologique ne varie pas, ce qui signifie que, dans un volume d'Univers dilaté par l'expansion cosmique, il y a une création continue d'énergie.

UNE PRESSION NÉGATIVE

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'une pression négative lui est associée. De façon générale, la pression est définie comme une force agissant sur une surface. Par exemple, la pression cinétique d'un fluide est due aux chocs des molécules sur les parois du récipient. Le fluide exerce une poussée sur les parois et la pression est positive. Une pression négative peut apparaître sur les parois d'un récipient, par exemple si la pression extérieure est plus élevée que celle à l'intérieur.

Comment la pression d'une composante de l'Univers agit-elle sur la dynamique de celui-ci ? La pression positive de la matière est interprétée comme un surplus d'énergie cinétique qui s'ajoute au bilan de la densité d'énergie de l'Univers. Elle tend donc à ralentir l'expansion. En revanche, un fluide présentant une pression négative, comme celui associé à la constante cosmologique, a une contribution opposée et crée une sorte de force répulsive : la vitesse d'expansion de l'Univers augmente au lieu de diminuer.

La constante cosmologique est donc associée à une pression négative et à une densité d'énergie constante, dont la valeur est estimée grâce aux observations astrophysiques. Elle est très faible : l'énergie contenue dans un volume équivalent à celui d'une piscine olympique pourrait alimenter une ampoule de 1 watt pendant moins d'un millionième de seconde !

Compte tenu de ces propriétés, la nature de l'énergie noire est énigmatique. Une possibilité émerge naturellement dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les interactions fondamentales en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Ainsi, le modèle standard de la physique des particules est formulé dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Il est testé notamment dans les accélérateurs de particules tels que le LHC au Cern ; les >

observations s'accordent avec une grande précision aux calculs théoriques du modèle.

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, on montre que, même en l'absence de matière, tout volume d'Univers doit contenir une certaine énergie (on parle d'énergie du vide) et une pression, dues aux fluctuations quantiques du vide et qui sont compatibles avec les caractéristiques de la constante cosmologique.

UN PROBLÈME DE 120 ORDRES DE GRANDEUR

L'énergie du vide pourrait donc résoudre la question de la nature de l'énergie sombre, mais la valeur que l'on calcule pour la densité d'énergie du vide et celle requise pour l'énergie sombre de la cosmologie sont incompatibles. Une estimation simple indique que l'énergie du vide dans un volume égal à celui d'une piscine olympique devrait suffire à pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant 10^{97} ans ! Ce résultat est supérieur de plus de 120 ordres de grandeur à ce qui est nécessaire selon les observations cosmologiques.

Comment résoudre ce problème ? En réalité, les physiciens ne savent pas calculer rigoureusement la valeur de l'énergie du vide dans le cadre de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une valeur en accord avec les observations cosmologiques en la fixant « à la main », par l'ajustement de certains paramètres. Mais aucun principe connu ne justifie ce qui apparaît alors comme un tour de passe-passe et qui nécessite un ajustement extrêmement fin des paramètres (à plus de 120 décimales près si l'on considère le calcul simple mentionné plus haut). C'est ce que l'on nomme le premier problème de la constante cosmologique.

Un second problème apparaît lorsqu'on constate que la densité d'énergie associée à la constante cosmologique dans l'Univers aujourd'hui est du même ordre que celle de la matière (ordinaire et noire), alors même que le rapport de ces deux densités d'énergie a changé au cours de l'histoire cosmique. Il semble donc que l'humanité soit apparue à un moment particulier de l'histoire de l'Univers, celui où ces deux densités d'énergie sont proches. Certains chercheurs s'efforcent d'expliquer cette « coïncidence cosmique » qui traduit aussi le fait que l'accélération cosmique n'a débuté que récemment dans l'histoire de l'Univers.

Plusieurs approches ont été suivies pour tenter de résoudre les problèmes posés par la constante cosmologique. Mais avant d'en décrire certaines, précisons qu'aucune n'est unanimement partagée.

Le premier problème de la constante cosmologique a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, et à une époque où l'on penchait pour une décélération de l'expansion cosmique, avec une constante cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc être nulle, ce que contredisait l'estimation évoquée précédemment. Pour y remédier, une idée était d'introduire une nouvelle symétrie en théorie quantique des champs, qui impose que cette valeur soit nulle sans avoir à faire des ajustements artificiels. Notons que si une telle symétrie existait, elle pourrait aussi conduire à une faible valeur qui suffirait à expliquer l'expansion accélérée de l'Univers. Il suffit pour cela de supposer que la symétrie est légèrement brisée dans l'Univers.

Une telle symétrie est par exemple la « supersymétrie », qui stipule que chaque particule du modèle standard a un « superpartenaire ». Ces particules appariées ont la même masse mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie totale du vide serait nulle. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie existe, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée. Cependant, le degré de brisure requis par la physique des particules est trop important pour résoudre le problème de l'énergie du vide. Notons en revanche que la supersymétrie, brisée, pourrait apporter une solution au problème de la matière noire. Les particules supersymétriques sont activement recherchées, en particulier au LHC, mais aucune n'a été découverte pour le moment, ce qui met de nombreux modèles de matière noire sous tension.

Avec l'inflation éternelle, des bulles d'univers peuvent apparaître aléatoirement

Les théoriciens ne parviennent pas à résoudre les problèmes soulevés par la constante cosmologique, une situation d'autant plus frustrante que les observations indiquent une valeur non nulle de cette constante. D'autres pistes sont cependant explorées, à la recherche

La théorie du multivers suppose que des bulles-univers ont des constantes fondamentales différentes, fixées aléatoirement lors de leur formation. Dans ce cadre, certains physiciens ont recours au principe anthropique pour expliquer la valeur de l'énergie du vide : la bulle-univers dans laquelle nous sommes a les bons paramètres pour que la vie se soit développée.

© Juergen Faelchle/shutterstock.com

d'autres contenus matériels qui produiraient une expansion cosmique accélérée. On désigne ainsi sous le terme générique de « quintessence » de tels composants matériels. Par exemple, l'existence d'un champ « scalaire » (c'est-à-dire dont le spin est nul, tel le champ de Higgs associé au boson de Higgs) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique.

Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre la constante cosmologique et les champs scalaires. On attend beaucoup en particulier de l'observatoire spatial européen *Euclid*, qui doit être lancé en 2022.

Un paramètre que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision est le rapport entre la densité de l'énergie sombre et sa pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport adimensionnel). Ce paramètre, nommé paramètre d'état de l'énergie sombre et noté en général w, est égal à -1 pour une constante cosmologique. Il diffère en général de -1 pour un modèle de quintessence. Lorsque c'est le cas, la densité d'énergie associée n'est plus constante, mais varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes veulent mettre en évidence.

Les modèles de quintessence ne parviennent en général pas à expliquer le premier problème de la constante cosmologique. Mais certains pourraient apporter un éclairage intéressant sur le second problème *via*, par exemple, un couplage entre le champ scalaire et la matière ordinaire ou noire, et qui expliquerait le fait que les densités d'énergie de quintessence et de matière sont du même ordre de grandeur aujourd'hui. Grâce à un tel couplage, la densité d'énergie de la quintessence est corrélée lors de l'histoire cosmique avec celle de la matière.

L'APPROCHE ANTHROPIQUE

Une autre voie qui a le mérite de résoudre les deux problèmes à la fois est une approche anthropique conçue en particulier par l'Américain Steven Weinberg (Prix Nobel de physique en 1979). D'après cette idée, la valeur de la constante cosmologique est fixée librement au début de l'histoire de l'Univers. En imaginant tous les univers possibles, seuls ceux où cette valeur est proche ou inférieure à celle observée aujourd'hui permettent le développement de la vie telle que nous la connaissons. En effet, dans un univers où la constante cosmologique serait très supérieure à celle que nous inférons aujourd'hui, l'accélération de l'expansion cosmique aurait commencé trop tôt pour que se forment des structures telles que des étoiles ou des galaxies riches en éléments chimiques complexes. Dans un tel univers, la vie telle que nous l'observons n'aurait pas pu apparaître. Comme nous existons, il est normal d'observer une faible valeur (éventuellement nulle) de la constante cosmologique.

Depuis l'idée de Steven Weinberg, la théorie des supercordes et certains modèles d'inflation cosmique (nommés « inflation éternelle ») ont renforcé cette explication anthropique en fournissant un cadre théorique expliquant comment la valeur de la constante cosmologique pourrait avoir été « tirée au sort » dans les premiers instants de l'Univers. En effet, la théorie des supercordes conduit à penser que les valeurs de certains paramètres qui nous apparaissent comme des constantes de la nature peuvent varier dans l'Univers très primordial et se fixer parmi un très grand nombre de possibilités. Chaque combinaison donne un univers aux propriétés physiques différentes.

Par ailleurs, dans les scénarios d'inflation éternelle, qui peuvent également être incorporés dans certains modèles issus des supercordes, des bulles d'univers où les constantes de la nature prennent des valeurs différentes peuvent apparaître aléatoirement. Elles sont d'abord microscopiques, puis enflent jusqu'à devenir des univers séparés causalement les uns des autres. Chaque univers possède alors son propre jeu de paramètres et seuls certains sont compatibles avec la vie (*voir la figure ci-dessus*).

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : >

> comment séparer les paramètres que l'on est autorisé à faire varier, et pour lesquels on peut éventuellement donner une explication anthropique, des autres paramètres pour lesquels il pourrait exister une autre explication? Doit-on aussi faire varier la forme des lois physiques? D'autre part, personne ne sait comment calculer avec rigueur des probabilités d'apparition de la vie en tenant compte de l'ensemble des univers possibles. Enfin, on ne voit pas bien comment on pourrait réfuter une telle explication. Il se pourrait cependant que cela soit en effet la bonne réponse.

Les modèles de constante cosmologique et de quintessence supposent que les lois de la gravitation, aux plus grandes échelles, sont bien décrites par la relativité générale. Mais peut-être la gravitation suit-elle d'autres lois aux échelles cosmologiques?

Les physiciens ont souvent rencontré des situations où l'existence de constituants «sombres» était conjecturée à partir de leur influence gravitationnelle. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets ou à la modification de la théorie de la gravitation. Au XIXe siècle, par exemple, la planète Neptune a été découverte grâce aux calculs de l'astronome Urbain Le Verrier, qui avait supposé sa présence pour expliquer des anomalies dans la trajectoire d'Uranus.

Le Verrier tenta de renouveler son exploit pour expliquer certaines caractéristiques du mouvement de Mercure. Ce fut un échec, et les anomalies de la trajectoire de la planète furent expliquées par une nouvelle théorie de la gravitation: la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue: sauver les lois de la gravitation par l'introduction de composants sombres (matière noire et énergie sombre) ou bien tenter de modifier ces lois pour expliquer les observations.

MODIFIER LA GRAVITATION...

Par exemple, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a proposé en 1983 un cadre théorique assez séduisant pour éviter l'hypothèse de la matière noire. Les lois de la gravitation sont modifiées quand l'accélération d'un corps est plus faible qu'une valeur critique. Mais le modèle a ses propres difficultés.

Pour ma part, alors que je travaillais à l'université de New York en 2001, j'ai remarqué que le modèle dit «DGP», proposé peu de temps auparavant par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati, également à l'université de New York, fournit une alternative intéressante à l'idée d'énergie sombre. Dans ce modèle, qui suppose en particulier l'existence de dimensions d'espace supplémentaires, la gravitation d'Einstein est modifiée à très grande distance et une accélération cosmique peut apparaître sans qu'il y ait besoin d'une constante cosmologique non nulle (*voir l'encadré page ci-contre*).

Ce modèle a suscité un regain d'intérêt pour la recherche d'une «gravité massive» où le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de la force gravitationnelle, a une masse non nulle. La relativité générale implique que le graviton est de masse nulle. L'interaction a alors une portée infinie et se propage à la vitesse de la lumière. Dans le cas du modèle DGP, le graviton est la seule particule capable de se propager dans la dimension supplémentaire. De façon générale, des particules qui évoluent dans une dimension supplémentaire sont perçues comme un ensemble de particules massives par un observateur qui n'a pas accès à cette dimension. Les gravitons massifs du modèle DGP conduisent à grande distance à une déviation par rapport à la théorie d'Einstein.

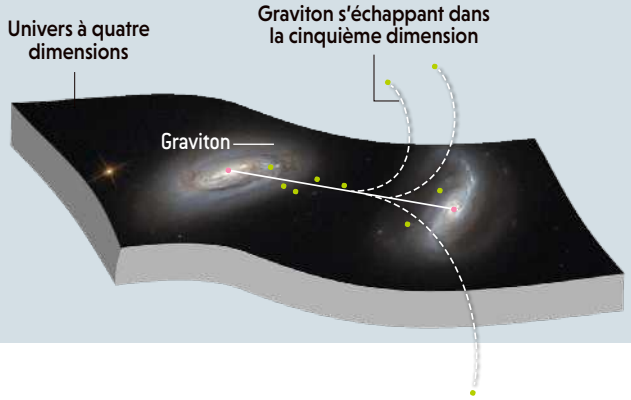
On peut d'ailleurs remarquer qu'Einstein liait (à tort) l'introduction de la constante cosmologique et un potentiel gravitationnel semblable à celui créé par un graviton massif. Il existe donc un lien historique entre la constante cosmologique et la gravité massive. Le modèle DGP et sa cosmologie fournirent le premier cadre proposant explicitement un lien entre accélération cosmique et modification à grande distance de la gravitation. Cependant, ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant, puisqu'il rencontre des difficultés théoriques et observationnelles. Il a néanmoins attiré l'attention de certains physiciens qui s'en sont inspirés.

Le modèle DGP conduit à une théorie où le graviton serait de masse non nulle

En particulier, il a conduit à tenter de construire une théorie relativiste de la gravitation où le graviton serait de masse non nulle. L'une des motivations est que cette masse, qui peut jouer un rôle analogue à celui de la constante cosmologique, peut être «protégée» par une symétrie et donc avoir une valeur naturellement petite, ce qui évite tout écart par rapport à la relativité générale sur de faibles distances.

LE MODÈLE DGP

Les modèles d'univers dotés de dimensions supplémentaires peuvent offrir des solutions au problème de l'expansion accélérée de l'Univers. Celui développé par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati modifie les lois de la gravitation. Ces trois physiciens de l'université de New York ont construit un modèle d'univers, noté DGP, qui ajoute une unique dimension d'espace aux quatre dimensions de l'espace-temps usuel.
Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini, mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y propager. Les autres particules ne peuvent échapper à l'espace-temps usuel et, ainsi, la dimension supplémentaire échappe à nos sens mais peut être révélée via son effet sur la gravitation.
Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que les gravitons s'échappent est faible. Ainsi, les équations de la relativité générale reproduisent correctement les lois de la gravitation. À plus grande échelle, une certaine quantité de gravitons fuient dans la cinquième dimension *(voir la figure)*. À de telles distances, les équations de la relativité générale ne décrivent donc plus correctement les interactions gravitationnelles. L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale est valide sur de telles distances, donne l'impression que l'Univers a une vitesse d'expansion qui augmente. Ce résultat a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais le modèle DGP présente plusieurs difficultés théoriques et expérimentales.



Construire une théorie relativiste de la gravitation intégrant un seul graviton massif (et non une infinité comme dans le modèle DGP) et dépourvue de problème grave est longtemps resté un défi. Les premiers essais sont même antérieurs à DGP et datent de 1939, avec Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Ces physiciens suisses ont introduit une masse pour le graviton de la relativité générale de façon perturbative, c'est-à-dire en ajoutant des termes linéaires de faibles valeurs. Mais en 1970, les physiciens Hendrik van Dam, Martinus Veltman et, indépendamment, Vladimir Zakharov ont montré que le modèle de Fierz et Pauli ne redonnait pas les équations de la relativité générale lorsqu'on faisait tendre la masse du graviton vers zéro. La théorie restait cohérente, mais elle s'accompagnait d'effets mesurables qui n'ont pas été observés. Deux ans plus tard, Arkady Vainshtein a montré que le problème du modèle venait du traitement linéaire. Il a suggéré qu'un traitement non linéaire pouvait résoudre le problème observationnel, mais d'autres difficultés théoriques ont surgi ensuite.

... AVEC UN GRAVITON MASSIF

Après le modèle DGP, un premier progrès important a été fait en 2009-2010 où j'ai pu montrer, en collaboration avec Eugeny Babichev et Riad Ziour, que les idées de Vainshtein fonctionnaient bien comme prévu. À peu près en même temps, en se fondant sur les travaux liés au modèle DGP, Claudia de Rham, alors à l'université de Genève, G. Gabadadze et Andrew Tolley, de l'université Case Western Reserve, aux États-Unis, ont construit un modèle à graviton massif qui semble dénué des problèmes de ses prédécesseurs. Ce modèle est toujours à l'étude, en particulier ses conséquences cosmologiques.

Il faut souligner qu'il est très difficile de modifier la relativité générale à grande distance tout en restant en accord avec les différents tests de cette théorie, et il est encore plus difficile de trouver une théorie qui reproduise les différentes propriétés observables de l'énergie sombre et, plus encore, de la matière noire.

Pour l'instant, aucune des approches mentionnées, ainsi que d'autres que nous n'avons pas évoquées (comme celles qui consistent à renoncer en partie au principe cosmologique, ou à tenter d'expliquer l'accélération cosmique par l'effet des hétérogénéités de matière), ne fait l'unanimité, d'autant que le modèle de la constante cosmologique a la vertu de la simplicité et est bien compatible avec les données. Mais les problèmes qu'il pose, on l'a vu, ont engendré bien des travaux qui ont eu aussi le mérite de pousser à mieux comprendre le modèle cosmologique standard.

Les données à venir, notamment celles des grands programmes d'observation tels que *Euclid*, devraient permettre d'invalider un certain nombre d'approches et de mieux comprendre les propriétés mystérieuses de l'énergie sombre et de la gravitation aux très grandes distances. D'ores et déjà, nombre de modèles de gravitation modifiée ont pu être exclus grâce à l'observation des ondes gravitationnelles par la collaboration *Ligo-Virgo* en 2015. En particulier, une contrainte très forte est venue de l'observation d'une fusion d'étoiles à neutrons à la fois par le canal des ondes gravitationnelles et par le canal des ondes électromagnétiques. Cette observation, lors de l'été 2017, a montré que la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles ne pouvait pas différer beaucoup de celle de la lumière contrairement à ce qui était prévu par un certain nombre de modèles. Cette faculté d'exclure des modèles de gravité modifiée par des observations n'est pas la moindre de leur vertu. ■

BIBLIOGRAPHIE

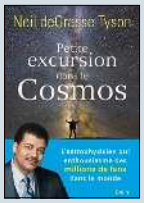
C. DE RHAM *ET AL.*, Resummation of massive gravity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 231101, 2011.

G. BÖRNER, L'énergie sombre et ses alternatives, *Dossier Pour la Science*, n°71, avril-juin 2011.

C. DEFFAYET *ET AL.*, Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions, *Phys. Rev. D*, vol. 65, 044023, 2002.

G. DVALI *ET AL.*, 4D gravity on a brane in 5D Minkowski space, *Phys. Lett. B*, vol. 485, n°1-3, pp. 208-214, 2000.

À LIRE EN PLUS



Petite excursion dans le cosmos

NEIL DEGRASSE TYSON

ÉDITIONS BELIN, 2017

(**160 PAGES, 14,90 EUROS**)

Vérifiez bien vos poches. Vous n'avez rien oublié? Alors c'est parti pour une petite excursion dans le cosmos afin de comprendre les mystères de l'Univers... Dans son style caractéristique, mélange d'érudition, d'humour et d'intelligence, la star de l'astrophysique sait mettre à la portée du plus grand nombre l'essentiel des grands mystères du cosmos, du Big Bang aux trous noirs, des quarks à la mécanique quantique. Un livre indispensable pour acquérir le b.a.-ba de toutes les découvertes qui fondent notre compréhension actuelle de l'Univers.

L'Insoutenable gravité de l'Univers

GABRIEL CHARDIN

LE POMMIER, 2018

(**464 PAGES, 25,00 EUROS**)

Plus d'un siècle après la construction par Einstein de la théorie de la relativité générale, la gravitation reste une énigme. Alors que c'est la force la plus immédiate à nos sens! La découverte des ondes gravitationnelles, témoins des premiers instants de l'Univers, constitue une nouveauté forte, mais les résultats obtenus sont difficiles à expliquer par le modèle cosmologique standard, censé décrire l'Univers de la façon la plus précise possible... Et s'il fallait carrément changer de modèle d'Univers pour résoudre l'énigme?

Chroniques de l'espace

JEAN-PIERRE LUMINET

LE CHERCHE-MIDI/FRANCE INTER, 2019

(**180 PAGES, 14,80 EUROS**)

Il y a cinquante ans, un homme a marché sur la Lune. L'auteur a commémoré cette prouesse par des chroniques sur France Inter tout l'été 2019. Elles sont désormais éditées. Jean-Pierre Luminet y retrace la fabuleuse épopée de l'exploration spatiale et nous invite également à voyager dans le futur et dans tout l'Univers. Le message est important: le véritable, grand et noble objectif de l'exploration spatiale n'est pas de conquérir, mais de comprendre. Et en comprenant ce qui nous est étranger et si lointain, nous nous comprenons mieux nous-mêmes, en vue de construire un monde meilleur.

La fabuleuse histoire de l'Univers Du Big Bang au Big Freeze

JACQUES PAUL ET JEAN-LUC ROBERT-ESIL

DUNOD, 2019

(**336 PAGES, 19,90 EUROS**)

D'où viennent les étoiles et les planètes? Qu'est-ce que l'horizon d'un trou noir? L'Univers est-il infini? Depuis que nous avons conscience du monde, nos regards sont tournés vers le ciel, cherchant des réponses. Du début de son expansion, il y a 13,8 milliards d'années, au froid absolu de ses derniers instants, les auteurs racontent la fabuleuse l'histoire de notre Univers. Plongez dans ce livre et laissez-vous guider à la découverte des mystères du Cosmos ainsi que des efforts de l'humanité pour l'explorer.

JEUNESSE

Atlas des aventures spatiales

STUDIO MUTI

LA MARTINIÈRE JEUNESSE, 2019

(**56 PAGES, 14,50 EUROS**)

Partez pour un incroyable voyage dans l'espace. Après l'exploration du Soleil et de la Lune, traversez le système solaire et notre galaxie, apprenez les origines de l'Univers et du temps lui-même. Cet ouvrage invite les lecteurs à imaginer ce que pourrait devenir le tourisme spatial, explore des concepts tels que la gravité, la vitesse de la lumière et la relativité. L'atlas est en lien avec une application gratuite qui contient plus de cinquante vidéos de la Nasa, de l'ESA et de l'ESO pour plonger le lecteur au cœur de l'espace.

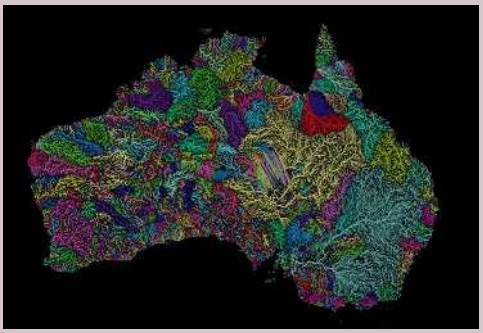
RENDEZ-VOUS

P. 110

REBONDISSEMENTS
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS

P. 114

DONNÉES À VOIR
DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

LES INCONTOURNABLES
DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS… À NE PAS MANQUER

P. 118

SPÉCIMEN
UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG « BEST OF BESTIOLES »

P. 120

ART & SCIENCE
COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART

HORS-SÉRIE N° 105 : GÉNÉTIQUE

CRISPR-Cas9 : première application en cancérologie

L'outil d'édition du génome permet désormais d'améliorer l'efficacité du système immunitaire de malades atteints d'un cancer. Le début d'une révolution ?

L'outil CRISPR-Cas9, dérivé d'un système de défense bactérien, rend possible n'importe quelle manipulation génétique, avec une facilité déconcertante. Le *Hors-Série* n° 105 : « Qui sommes-nous ? Les nouvelles réponses de la génétique » détaillait les espoirs mais aussi les craintes suscités par cette révolution technologique. Dans le domaine du cancer notamment, on imagine moult applications : les résultats des premières commencent à arriver. Ainsi, le 7 décembre, Edward Stadtmauer, du centre Abramson de cancérologie de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, a présenté à Orlando, lors d'un congrès d'hématologie, les résultats qu'il a obtenu avec ses collègues de l'institut d'immunothérapie contre le cancer Parker et de la société Tmunity Therapeutics.

Ils ont utilisé CRISPR-Cas9 pour améliorer l'efficacité des cellules immunitaires de trois patients atteints d'un cancer (un myélome multiple pour deux d'entre eux et un sarcome pour l'autre). Plus précisément, la technique employée s'apparente à celle des CAR T cells : l'idée est de prélever des lymphocytes T des malades, puis, en laboratoire, de les doter via une manipulation génétique, d'un récepteur capable reconnaître une cible, en l'occurrence des protéines exprimées à la surface de cellules cancéreuses. Les lymphocytes modifiés sont ensuite réinjectés aux patients chez qui ils aident à éliminer les tumeurs.

Les travaux présentés à Orlando s'écartent de ce principe à plusieurs niveaux. D'abord, les lymphocytes T ont été modifiés grâce à CRISPR-Cas9, et non pas aux techniques classiques d'édition des gènes. Ensuite, les chercheurs n'ont pas cherché à développer un récepteur particulier. Ils ont plutôt choisi d'éteindre les gènes, d'une part, d'un récepteur naturel des lymphocytes T afin d'optimiser le ciblage des cellules cancéreuses et, d'autre part, de la protéine PD-1, un récepteur qu'activent les cellules cancéreuses pour bloquer le système immunitaire et l'empêcher de reconnaître les cellules anormales.

Les lymphocytes T ainsi transformés par CRISPR-Cas9 sont plus à même de remplir leur fonction : éliminer les cellules tumorales. Les premiers essais de phase I ont montré qu'aucun effet secondaire n'était à déplorer et invitent les chercheurs à persévérer dans cette voie prometteuse.

C'est sans doute l'un des premiers pas (d'autres ont été franchis en Chine, notamment avec des travaux en cours contre le cancer du poumon) d'une conquête de la cancérologie par CRISPR-Cas9. ■

LE COMMUNIQUÉ : HTTP://BIT.LY/PENN-CRISPR

Grâce à CRISPR-Cas9, on peut modifier des lymphocytes T de façon à les rendre plus efficaces contre le cancer.

© Shutterstock.com/Nathan Devery

Les gènes inconnus d'Ouganda

Les études de génomique humaine, par exemple celles décrites dans le *Hors-Série* n° 105 : « Qui sommes-nous ? Les nouvelles réponses de la génétique » souffrent d'un biais. Elles se fondent sur un échantillon peu représentatif de la population mondiale, le plus souvent issu des seuls pays dits « occidentaux ». C'est passer à côté d'une riche diversité, comme le montrent les travaux de Deepti Gurdasani, de l'université Queen-Mary, à Londres, et de ses collègues. Ils ont analysé l'ADN de plus de 6 000 individus vivant dans des communautés rurales du sud de l'Ouganda. Quelque 29 % des variants génétiques qu'ils y ont découverts étaient inconnus. Parmi les nouveaux variants identifiés, certains confèrent une protection contre le paludisme : ce faisant, ils modifient un marqueur sanguin utilisé mondialement pour diagnostiquer le diabète. Les tests seraient donc moins fiables pour les porteurs de ce variant. Un plaidoyer pour une recherche génétique ne négligeant personne !

D. GURDASANI *ET AL.*, *CELL*, VOL. 179 (4), PP. 984-1002, 2019

Une mémoire dynamique

La mémoire à long terme est l'une des nombreuses mémoires dont nous disposons. Elles étaient décrites dans le *Hors-Série* n° 102 : « Les mutations de notre mémoire ». Comment fonctionne-t-elle ? Yi Zhong, de l'université Tsinghua, à Pékin, en Chine, et ses collègues ont élucidé un mécanisme du maintien des souvenirs. Ils ont montré qu'il s'agit d'un processus dynamique fondé sur un équilibre entre un renforcement et un affaiblissement d'un souvenir. Deux gènes clés ont été identifiés : Rac1 participe à l'oubli tandis que alpha2-chimaerin, en inhibant le précédent, a l'effet inverse. Une conclusion s'impose : rien n'est jamais inscrit à jamais dans notre mémoire.

L. LV ET *AL.*, *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 10, ART. 5313, 2019