



lors de la digestion en glucose et fructose) ou en sirop de maïs, riche en fructose. Et quand le niveau d'acide urique atteint des sommets, le risque d'obésité et de diabète est beaucoup plus grand.

En 2014, Eric Gaucher, James Kratzer et Miguel Lanaspá ont publié certaines des preuves de laboratoire les plus convaincantes que le gène muté de l'uricase constitue le gène d'épargne. Ils ont d'abord déterminé la probable séquence d'ADN des gènes de l'uricase de primates disparus depuis longtemps ainsi que de mammifères tels que porcs, rats et chiens et leurs ancêtres communs. Par des méthodes de génie génétique, ils ont ensuite fait produire les enzymes correspondantes par des cellules hépatiques humaines. Ils ont ainsi montré que les uricases sont devenues de moins en moins actives au cours de l'évolution des hominoïdes, jusqu'à leur inactivation totale chez l'ancêtre commun des hominidés. Cette évolution génétique aurait conféré aux hominidés une meilleure capacité à stocker des graisses et à libérer du glucose pour alimenter le cerveau pendant les famines.

Notre hypothèse ne sera toutefois définitivement prouvée que le jour où l'on aura pu mener chez l'homme une série d'essais afin de faire baisser le taux d'acide urique. Comme on l'a vu plus haut, les essais pilotes réalisés jusqu'ici ont déjà montré qu'un médicament qui réduit le niveau

LES POPULATIONS

ayant conservé leur mode de subsistance traditionnel, tels les Yanomamis, en Amazonie brésilienne, ne souffrent guère d'obésité, de diabète de type 2 ou des maladies afférentes.

■ BIBLIOGRAPHIE

R. J. Johnson et P. Andrews, *Fructose, uricase, and the back-to-Africa hypothesis*, *Evolutionary Anthropology*, vol. 19(6), pp. 250-257, 2010.

J. T. Kratzer et al., *Evolutionary history and metabolic insights of ancient mammalian uricases*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 111(10), pp. 3763-3768, 2014.

R. J. Johnson, *The Fat Switch*, Mercola.com, 2012.

d'acide urique fait baisser la tension artérielle et la résistance à l'insuline, ralentit l'insuffisance rénale et prévient la prise de poids. Il reste à reproduire ces résultats à une échelle statistiquement suffisante.

Si le gène mutant de l'uricase est bien le gène d'épargne, alors la prévention de l'obésité, du diabète et des maladies cardiaques nécessitera d'abaisser les taux élevés d'acide urique, de cholestérol et de triglycérides. On pourrait même utiliser les nouvelles techniques de génie génétique pour améliorer dans l'organisme la synthèse de l'uricase humaine, et ainsi dégrader plus efficacement l'acide urique, au lieu de seulement l'évacuer par l'urine.

Réduire le sucre

En attendant, mieux vaut faire de l'exercice et adopter une alimentation plus saine afin d'éviter la prise de poids et les maladies afférentes. Le miel et le sucre blanc apportent tous deux du fructose et, pendant des milliers d'années, partout où des personnes aisées en ont consommé beaucoup, elles ont pris trop de poids et souvent souffert de la goutte. Au cours des dernières décennies, on a en outre ajouté de plus en plus de saccharose et de sirop de maïs ou de blé, riche en fructose, aux aliments transformés. Résultat : les prévalences de l'obésité et du diabète ont augmenté en flèche, de même que les niveaux moyens d'acide urique dans le sang.

En réduisant notre consommation de fructose et en le tirant essentiellement de fruits frais, qui contiennent aussi des substances telles que la vitamine C et des antioxydants susceptibles de neutraliser les effets du fructose et de l'acide urique, nous devrions pouvoir éviter de nombreuses maladies. Pour toutes ces raisons, l'association américaine de cardiologie a recommandé de réduire la consommation de sucre à 6 cuillerées à café par jour pour les femmes et à 9 cuillerées à café par jour pour les hommes. Des quantités inférieures seraient préférables !

Cinquante ans après les travaux pionniers de Neel, nous connaissons peut-être l'identité d'au moins un gène d'épargne et il semble qu'il joue un grand rôle dans les épidémies actuelles d'obésité et de diabète. Savoir épargner passe pour une vertu, mais dans le cas du métabolisme de notre organisme, cette capacité s'est retournée contre nous. ■

Le projet DES L'ÉNERGIE

Joshua Frieman

L'ESSENTIEL

- L'Univers est en expansion accélérée. La raison en est inconnue. L'une des hypothèses est l'existence d'une « énergie sombre ».
- Un nouveau projet, le relevé DES (*Dark Energy Survey*), vise à résoudre ce mystère en étudiant l'histoire de l'expansion cosmique.
- Le programme DES consiste à observer des supernovæ, les empreintes des ondes acoustiques primordiales, des amas de galaxies et des lentilles gravitationnelles.

© Felidar Hahn/Familab

à la poursuite de SOMBRE

Pourquoi l'expansion de l'Univers est-elle de plus en plus rapide ? Pour résoudre cette grande énigme de la cosmologie, les scientifiques plongent leur regard dans les confins du cosmos grâce à l'expérience *Dark Energy Survey*.

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 s'accélère.

Pendant la majeure partie du XX^e siècle, les chercheurs ont supposé que la gravité devait ralentir progressivement l'expansion. Pourtant, deux équipes d'astronomes étudiant les supernovæ (des explosions stellaires qui servent de référence pour mesurer les distances cosmiques) ont trouvé que la vitesse d'expansion de la structure d'espace-temps cosmique augmente. Cette découverte, confirmée depuis par d'autres observations, a été récompensée par le prix Nobel de physique en 2011. Mais

pourquoi donc l'Univers accélère-t-il ? Cette énigme est l'une des plus grandes 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, devenant une force répulsive, quand il s'agit des énormes distances de l'espace intergalactique. Dès lors, il faudrait modifier la théorie de la gravitation pour les échelles cosmiques.

La seconde idée est que l'Univers serait rempli de quelque chose d'invisible (que l'on nomme maintenant 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 (la masse et l'énergie sont équivalentes, d'après la relation d'Einstein $E=mc^2$). Le reste de la masse de l'Univers est partagé entre la matière noire (une forme invisible de matière), à raison de 25 %, et la

matière ordinaire (constituées d'atomes, telles les étoiles, les planètes ou les gens), à raison de 5 % environ.

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, mes collègues et moi, du Fermilab et de l'université de Chicago, avec quelque 300 autres physiciens et astronomes des États-Unis, d'Espagne, du Royaume-Uni, du Brésil, d'Allemagne et de Suisse, avons lancé il y a quelques années le projet d'observation astronomique DES (pour *Dark Energy Survey*, qui signifie « relevé de l'énergie sombre »).

Grâce à ce relevé, nous serons à même de reconstruire l'évolution de l'expansion cosmique au cours des quelque 14 milliards

L'INSTRUMENT DARK ENERGY CAMERA

a été installé sur le télescope *Víctor Blanco*, au Chili. Grâce à lui, les chercheurs pourront entre autres établir un catalogue de supernovæ (des explosions d'étoile), et évaluer les distances qui nous en séparent.

d'années de l'histoire de l'Univers. Et nous pourrions étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomerats de galaxies qui occupent l'Univers), ce qui nous permettra peut-être de trancher entre les différentes explications possibles de la dynamique d'expansion de l'Univers.

La collaboration a construit la *Dark Energy Camera*, qui constitue le cœur du projet. En 2012, nous avons monté cette caméra sur le télescope de quatre mètres *Víctor Blanco* à l'Observatoire interaméricain du Cerro Tololo, installé sur les hauteurs des Andes chiliennes (voir la photographie page 50).

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 collectera les données d'août à février de chaque année pendant cinq ans et produira à terme une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel, ainsi qu'un catalogue de supernovæ. Le relevé a d'ores et déjà recueilli une multitude de données qui sont en cours d'analyse.

L'un des objectifs du projet est de recueillir des indices qui permettront 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 vont mettre à l'épreuve deux idées: l'énergie du vide et la quintessence.

La première est assez paradoxale. Supposez que vous vidiez une boîte de tout son contenu (atomes, rayonnement, matière noire, etc.) 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 (l'espace 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 120 ordres de grandeur (10^{120} fois) supérieure à ce qu'elle devrait être si elle constituait l'éner-

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 descend); 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.

Ce sont justement les détails, par lesquels se distinguent les différents scénarios, que les chercheurs 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 qui sont sensibles, et de façon différente, au rythme d'expansion de l'Univers. Comme les quatre phénomènes faisant office de sondes ne seront pas tous affectés de la même façon selon le scénario considéré (que ce soit l'énergie sombre – énergie du vide, quintessence – ou la gravité modifiée), 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.

Le relevé *Dark Energy Survey*

produira une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel

gie sombre. Si les physiciens ne peuvent ignorer ce problème, ils utilisent malgré tout l'idée de l'énergie du vide comme banc d'essai pour mettre à l'épreuve les données observationnelles sur l'Univers.

Pour régler ce problème d'ordres de grandeur trop différents, 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 (le Grand collisionneur de hadrons), 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.

Comme nous l'avons mentionné, 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 certaine 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.

Des chandelles étalons dans 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 de type Ia dans l'Univers proche et lointain. Cela représente près de 100 fois plus d'objets qu'on n'en a utilisé 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 pourrions reconstruire avec précision l'histoire des 10 derniers milliards d'années d'expansion de l'Univers.

Une telle mesure permet de 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 elles sont 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, bien que les détails varient selon les modèles imaginés par les chercheurs.

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 que la caméra *Dark Energy Camera* devrait être la première à réaliser.

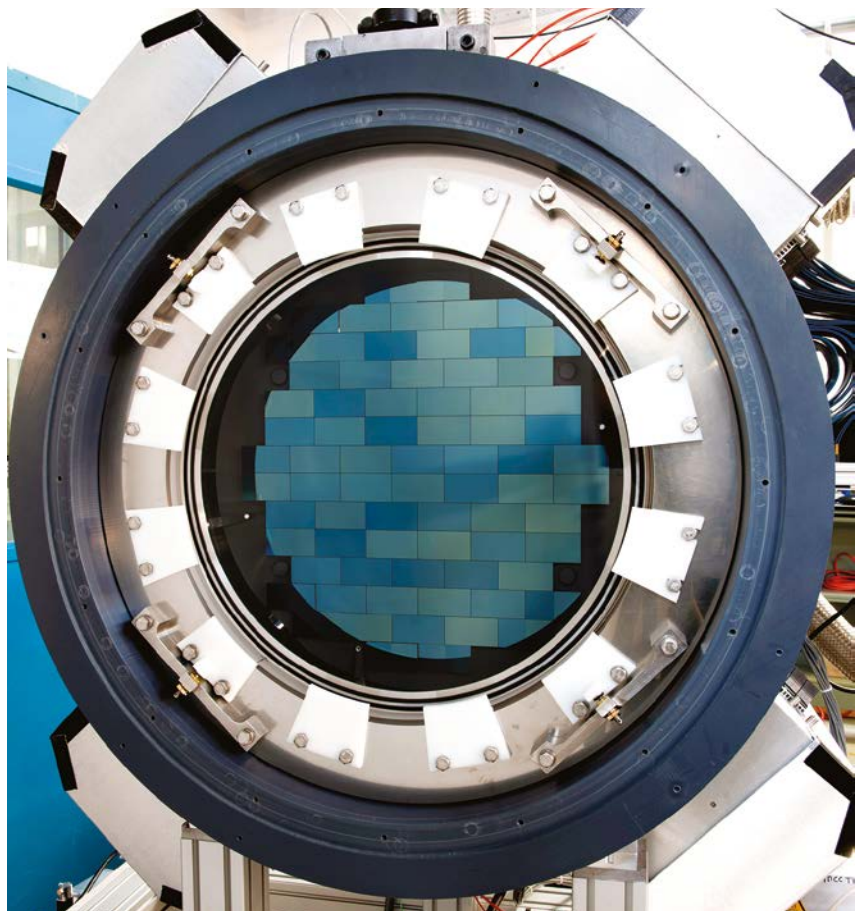
Le relevé DES utilisera aussi un vestige des conditions régnant dans l'Univers

■ L'AUTEUR



Joshua FRIEMAN est cosmologiste et directeur du programme DES (*Dark Energy Survey*).

Il est directeur de recherche au Fermilab, aux États-Unis, et professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'institut Kavli de physique cosmologique, à l'université de Chicago.



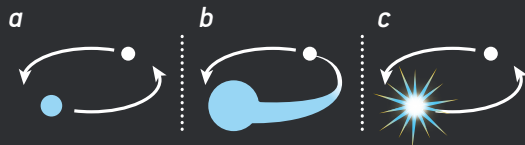
LA CAMÉRA DU PROGRAMME *DARK ENERGY SURVEY* comporte 74 capteurs CCD au silicium. Ils permettent à cet instrument de couvrir un champ relativement grand du ciel avec une résolution de 570 mégapixels.

© Reidar Hahn/Fermilab

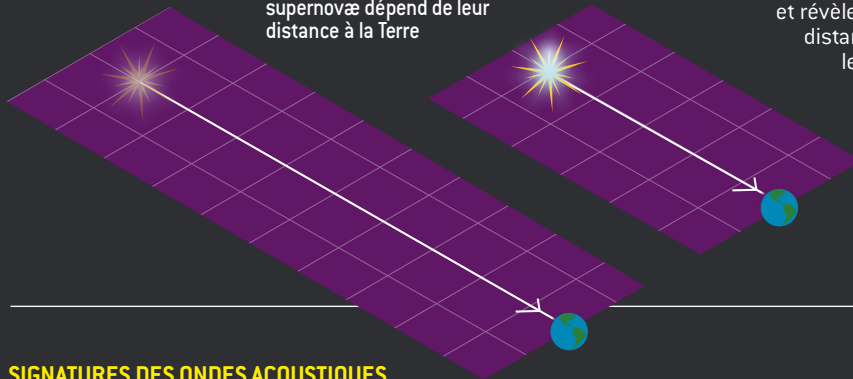
QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

La vitesse d'expansion de l'Univers augmente depuis 7 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 com-

pétition 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.



La luminosité apparente des supernovæ dépend de leur distance à la Terre



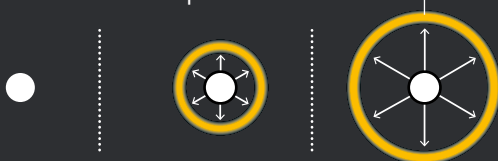
LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE Ia

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 compagne [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.

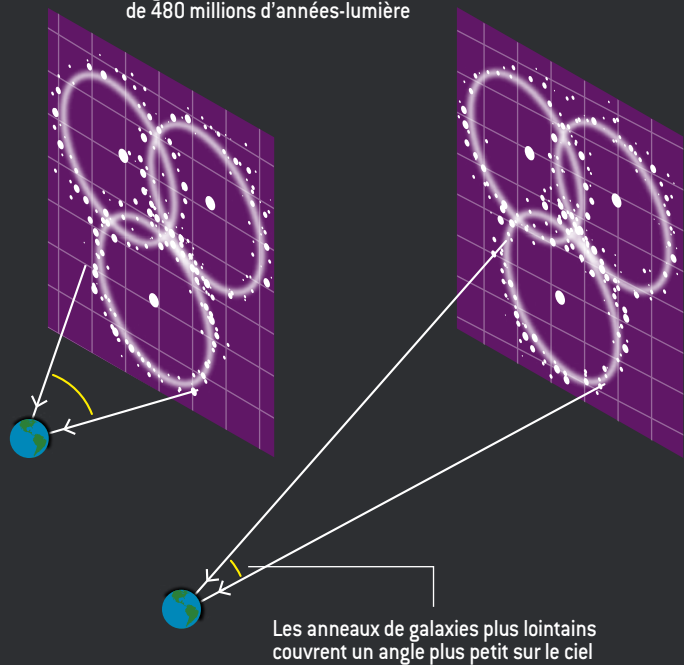
SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

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.

Les ondes acoustiques se propagent sur 480 millions d'années-lumière dans l'Univers primordial



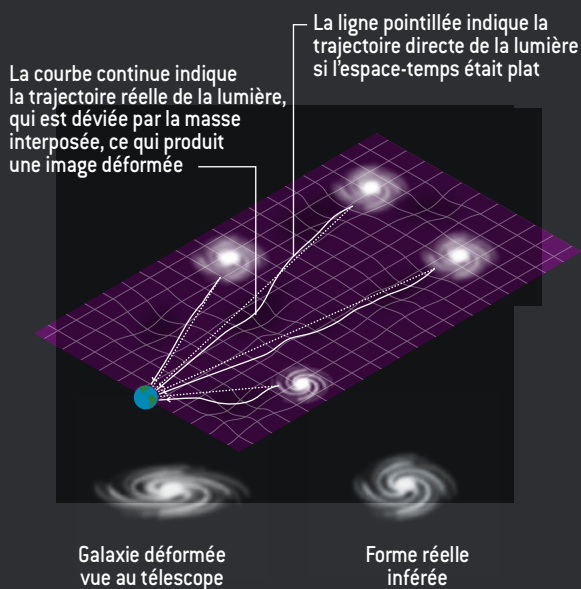
Autour d'une galaxie donnée, on observe un léger excès de galaxies à une distance de 480 millions d'années-lumière



Les anneaux de galaxies plus lointains couvrent un angle plus petit sur le ciel

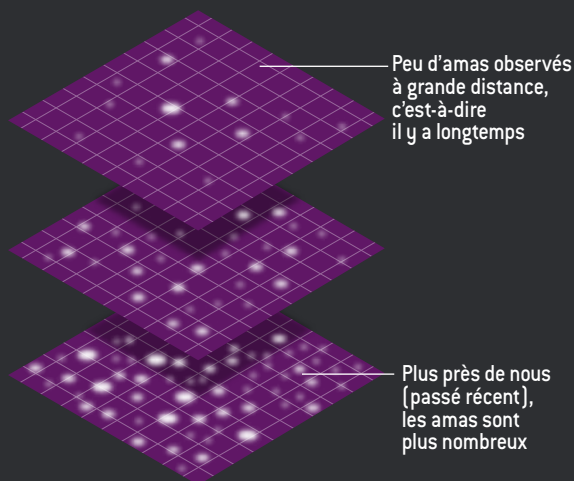
LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

La lumière des galaxies lointaines est déviée quand elle passe à côté d'objets massifs (tels 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. L'expérience DES mesurera les légères distorsions de nombreuses galaxies pour en déduire une carte de la répartition de la masse dans l'Univers. Cela permettra de mettre en évidence 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.



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 380 000 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 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 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 mesurera cette caractéristique des oscillations acoustiques des baryons à partir d'un catalogue d'environ 200 millions de galaxies. Cela nous permettra de déterminer leurs distances et d'associer cette donnée 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 conduit à 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 présentent 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.

BOSS voit l'Univers en trois dimensions

Une équipe d'une centaine de physiciens et d'astronomes a annoncé en juillet 2016 les derniers résultats du plus grand relevé spectrométrique actuel de galaxies, le sondage BOSS (*Baryon Oscillation Spectroscopic Survey*).

Ce relevé fait partie du programme *Sloan Digital Sky Survey III* (SDSS-III), auquel participent le CNRS et le CEA en France. Il a permis de dresser une carte tridimensionnelle de 1,2 million de galaxies sur plus d'un quart du ciel. Les chercheurs ont alors utilisé cette carte pour effectuer des mesures très précises de l'énergie sombre censée régir l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Pour cela, BOSS compare l'échelle des ondes de densité ou pression primordiales que l'on observe dans le fond diffus cosmologique émis 380 000 ans après le Big Bang à celles qui influent, 7 à 12 milliards d'années plus tard, sur la répartition spatiale des galaxies (les oscillations acoustiques baryoniques, ou BAO, nées de l'opposition entre la gravité, qui fait s'effondrer la matière sur elle-même, et la pression radiative des photons).

Le relevé DES étudie aussi les BAO, mais il s'agit d'un relevé photométrique, tandis que BOSS est un relevé spectrométrique.

La précision inégalée de BOSS sur les mesures de distance est obtenue grâce à un spectrographe composé de 1000 fibres optiques installées sur le télescope SDSS de 2,5 mètres à l'observatoire d'Apache Point, au Nouveau-Mexique, aux États-Unis. Il a fallu près de 2000 nuits d'observation pour mesurer l'ensemble

des spectres des galaxies : la lumière de chaque galaxie passe, via une fibre, à travers un spectrographe, lequel décompose la lumière en différentes longueurs d'onde, à l'instar d'un prisme, qui sépare la lumière selon les couleurs de l'arc-en-ciel.

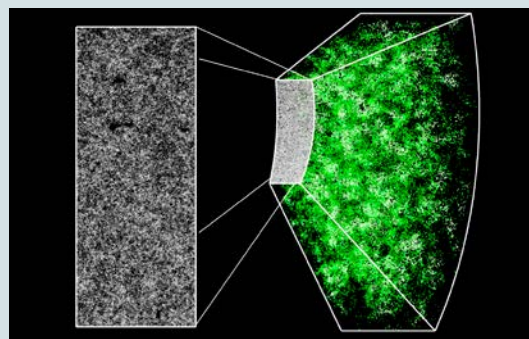
La carte établie par BOSS permet de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers et de déterminer ainsi la quantité de matière et d'énergie noire. Cette carte met aussi en évidence la signature des mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière, telle qu'attendue dans le cadre de la théorie de la relativité générale. Ces mesures confortent la description d'un Univers spatialement plat contenant un fluide cosmique assimilable à une constante cosmologique, correspondant à l'énergie du vide.

Cependant, les incertitudes sur les mesures ne permettent pas d'écarter d'autres possibilités pour

l'énergie sombre. Et il est probable qu'il faille attendre la prochaine génération de sondages de galaxies pour que les résultats soient sensibles à des extensions du modèle standard de la cosmologie et pour distinguer une éventuelle déviation de la théorie qui décrit les lois de la gravitation aux très grandes échelles.

La France joue un rôle majeur dans les deux grands futurs programmes de cosmologie prévus pour 2020 : le *Large Synoptic Survey Telescope*, télescope au sol de 8 mètres qui sera installé au Chili, et la mission spatiale *Euclid*, qui sera mise en orbite. Cette dernière, conçue par l'Agence spatiale européenne, permettra d'étudier l'Univers sombre grâce à sa spectroscopie ultraprécise, et de tester les différents scénarios de l'énergie sombre en combinant la signature des ondes sonores primordiales avec les lentilles gravitationnelles. L'enjeu du projet *Euclid*, qui regroupe déjà plus d'un millier de chercheurs, est de taille : comprendre 95 % du contenu en énergie de l'Univers !

– **Stéphanie Escoffier**
CPPM, CNRS/université
Aix-Marseille



LE RELEVÉ BOSS a déterminé la position dans l'Univers de près de un million de galaxies (en vert). Cette carte permet d'étudier l'expansion cosmique.

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 cela dans différentes parties du ciel, on met en évidence la répartition générale hétérogène de la matière dans l'Univers (voir l'encadré ci-contre). 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 de 200 millions de galaxies 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, car plus un objet est lointain, plus la lumière de cet objet met de temps à nous parvenir) 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.

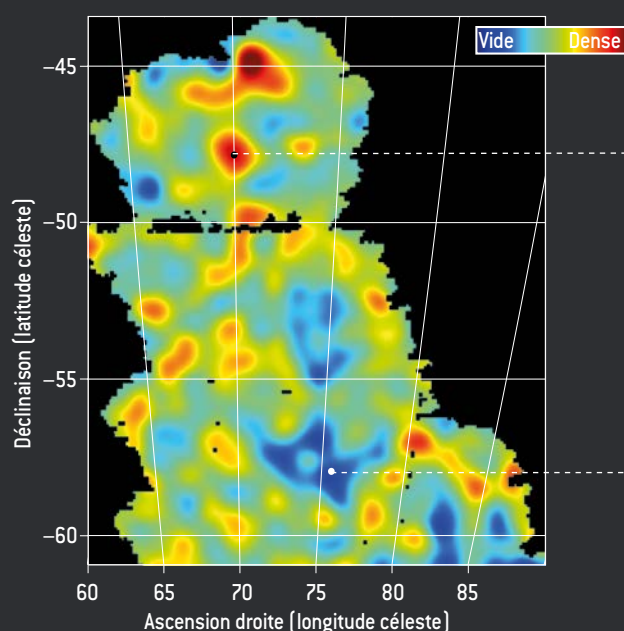
Enfin, le relevé DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique au fil du temps. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Par rapport aux précédents relevés cosmologiques des amas, qui ont couvert des régions du ciel plus petites, le relevé DES devrait découvrir des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous.

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

CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-dessous 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

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.

Une riche moisson

Depuis son lancement officiel en août 2013, le relevé DES a couvert près de 5000 degrés carrés du ciel et a livré des images d'une centaine de millions de galaxies. Quant aux supernovæ, plus de 1000 de type Ia ont été relevées. Nous entamons l'analyse de ces données pour déterminer les distances de ces supernovæ et les relier à leur décalage vers le rouge. Nous mesurons aussi les formes des galaxies pour déduire le signal de lentille gravitationnelle faible, la distribution spatiale des galaxies pour traquer la signature des oscillations acoustiques des baryons et la répartition des amas de galaxies. D'ici à la fin de cette année, la première phase de

cette analyse sera à peu près achevée. Nous pourrons alors commencer à chercher des indices sur l'expansion de l'Univers.

En attendant, l'expérience a déjà donné des résultats intéressants et 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.

De nouvelles données de DES arrivent sans cesse. Nous ne savons pas encore si le relevé DES apportera des réponses définitives sur les causes de l'expansion accélérée de l'Univers – l'énergie du vide, la quintessence, une autre forme d'énergie sombre ou la gravité modifiée – mais nous savons qu'il nous fera franchir un grand pas vers la résolution de cette énigme. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

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, article 50, 2015.

C. Chang *et al.*, Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, 051301, 2015.

C. Deffayet, Énergie sombre ou nouvelle gravitation ?, *Pour la Science*, n° 443, septembre 2014.

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

Comment le cerveau

