

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.

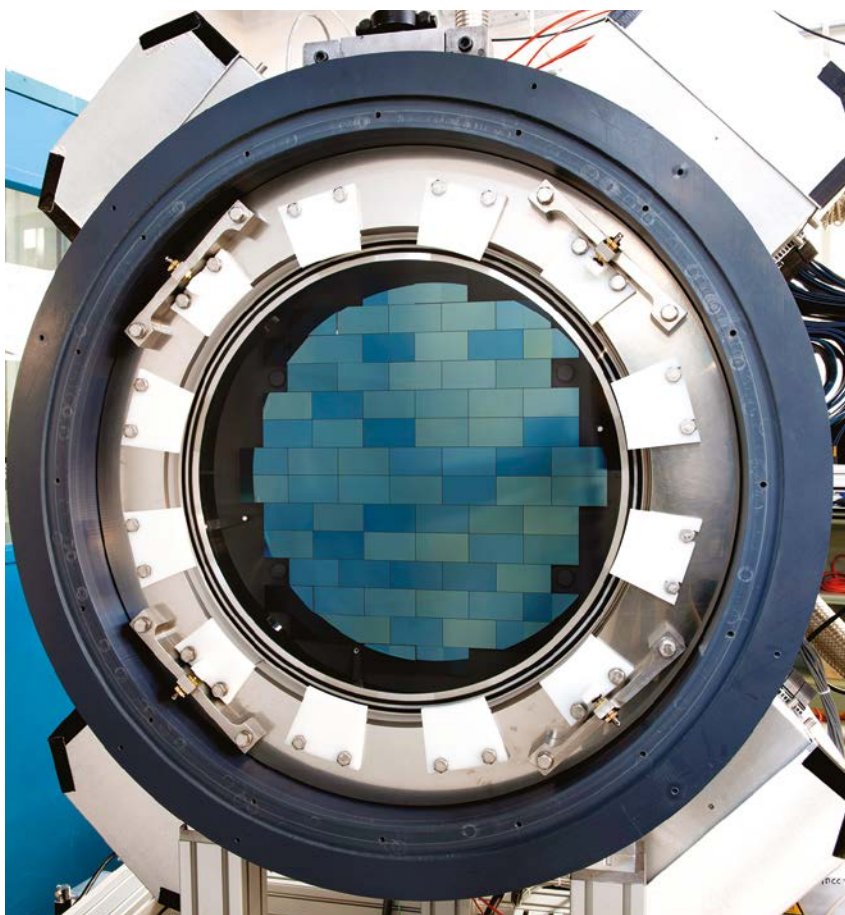
Le relevé DES utilisera aussi un vestige des conditions régnant dans l'Univers

■ 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.



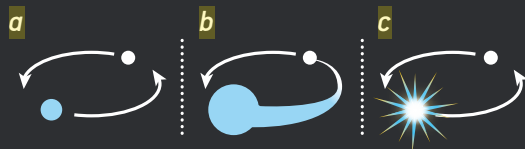
LA CAMÉRA DU PROGRAMME *DARK ENERGY SURVEY* comporte 74 capteurs CCD au silicium. Ils permettent à cet instrument de couvrir un champ relativement grand du ciel avec une résolution de 570 mégapixels.

© Reidar Hahn/Fermilab

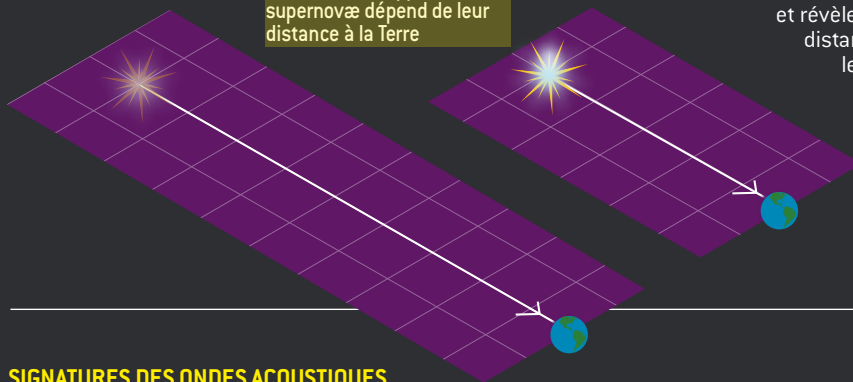
QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

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



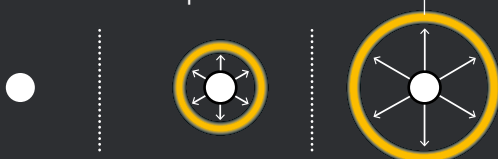
LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE Ia

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 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.

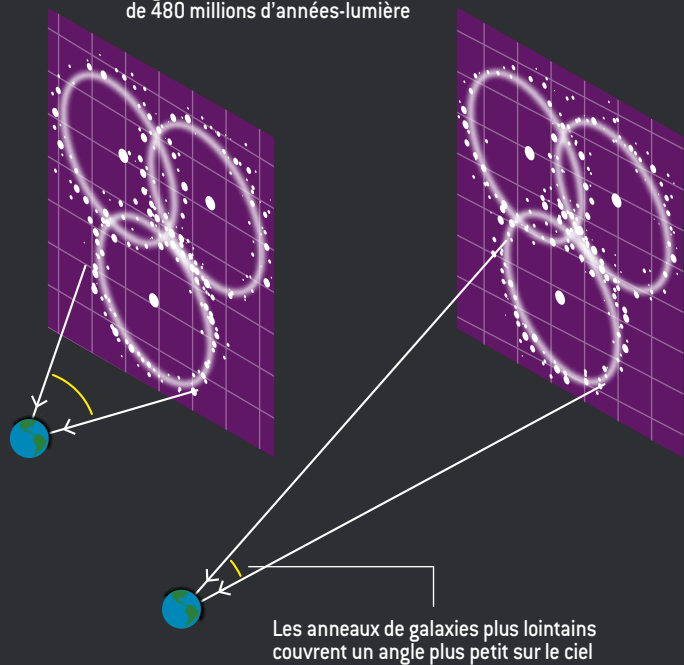
SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

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.

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