

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

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

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

UN PROBLÈME DE TAILLE

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 pourrions 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 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 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

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

© Collaboration LSST

