

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.

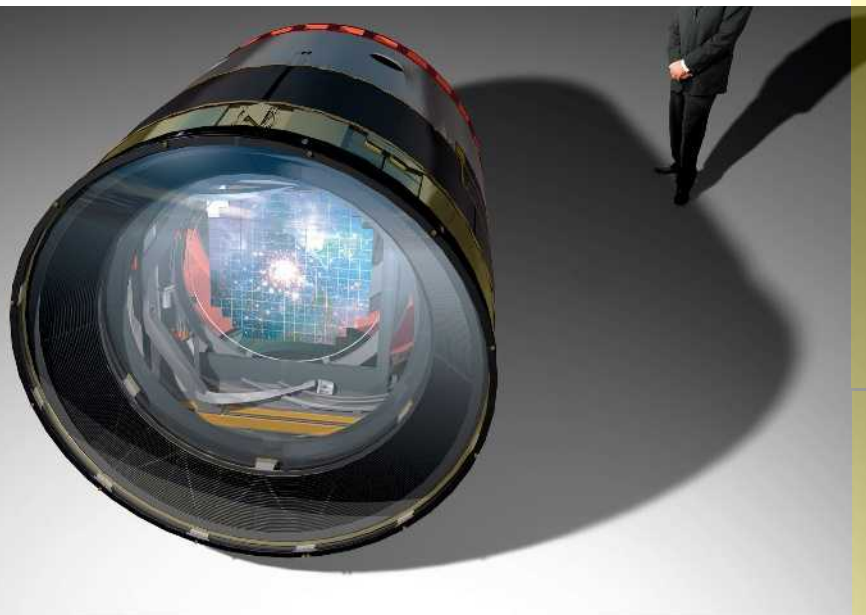
Ces mesures doivent être précises pour départager les modèles, car les différences qu'ils prévoient restent assez faibles. Par conséquent, nous souhaitons connaître la relation entre distance et décalage vers le rouge avec une précision de l'ordre de 1%, un exploit accessible pour la *Dark Energy Camera*.

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

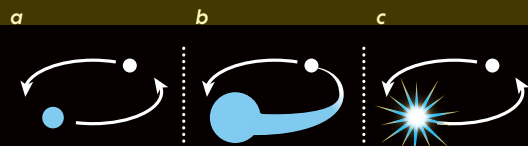
La caméra du projet LSST avec ses 3,2 milliards de pixels de résolution est le plus gros appareil photo jamais construit.



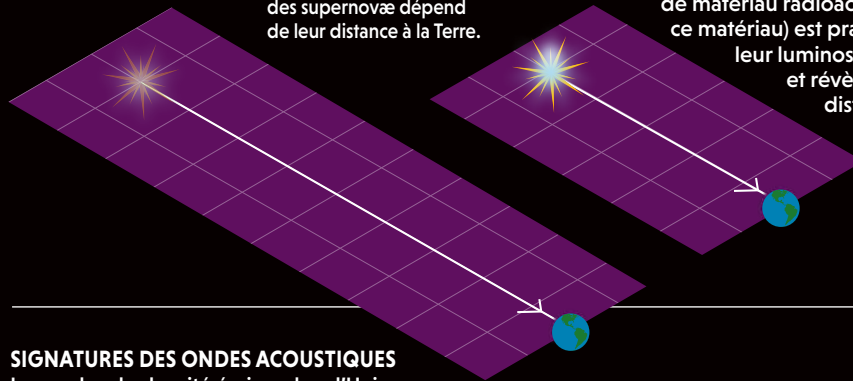
QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

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.



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



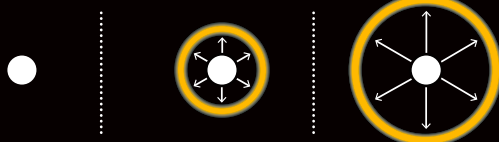
LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE Ia

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.

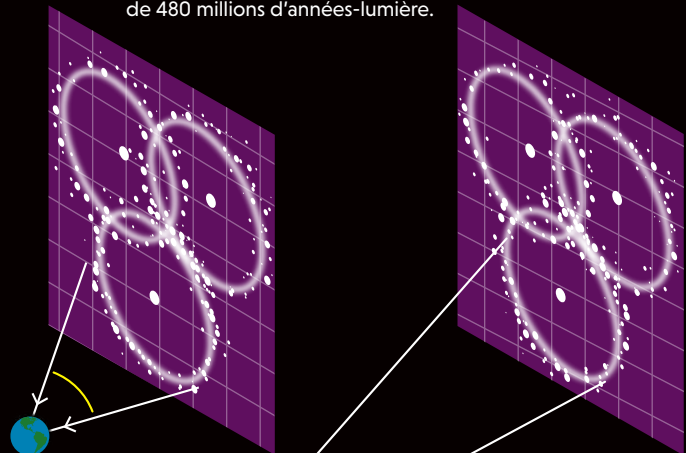
SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

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.