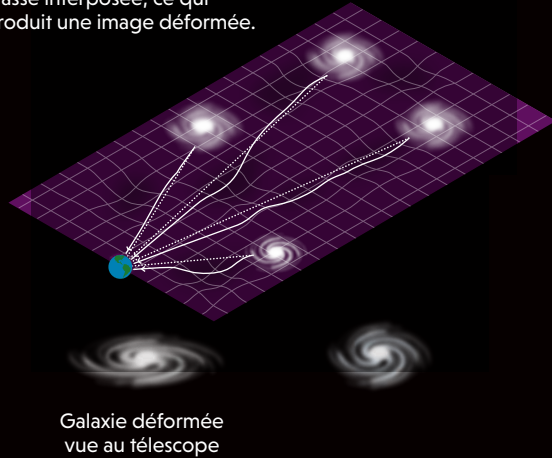


LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

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.

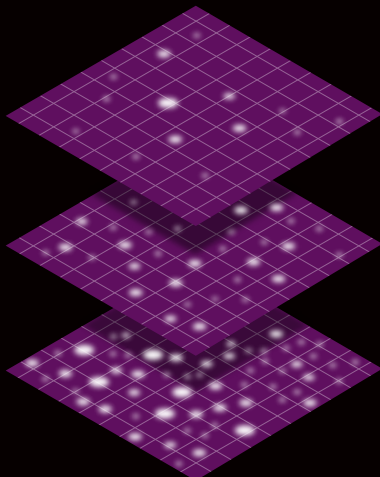
La courbe continue indique la trajectoire réelle de la lumière, qui est déviée par la masse interposée, ce qui produit une image déformée.



Galaxie déformée
vue au télescope

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.



Peu d'amas observés
à grande distance,
c'est-à-dire
il y a longtemps

Plus près de nous
(passé récent),
les amas sont
plus nombreux

- 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'état 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 (NIS) 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 NIS.

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.

