
Pauline Zarrouk, CEA-Saclay Irfu / DPhP, Gif-sur-Yvette, France

A la fin des années 90, des observations du mouvement des supernovae, explosions cataclysmiques de certaines étoiles, ont révélé que les distances entre les galaxies augmentent plus rapidement lors des derniers 6 milliards d'années de l'univers. Cette **découverte capitale de l'accélération de l'expansion de l'univers** est considérée comme l'une des plus grandes énigmes de la cosmologie et est **au coeur de mon sujet de thèse**. Afin d'expliquer les observations, le modèle actuel suppose qu'il existe une composante exotique, appelée "énergie sombre", qui domine aujourd'hui le contenu énergétique de l'univers. A ce jour, aucune théorie ne permet d'expliquer de manière satisfaisante l'origine de cette accélération. Ainsi, mon sujet de thèse s'inscrit parfaitement dans la **thématique scientifique du labEx P2IO "Composants sombres de l'Univers"**.

Dans le cadre de mon doctorat, je fais partie de l'un des plus ambitieux programmes d'observation du ciel porté par la collaboration Sloan Digital Sky Survey (SDSS) qui utilise un télescope aux Etats-Unis en opération depuis les années 2000 et qui a déjà mesuré la position dans le ciel de plus d'un million de galaxies. Dans un premier temps, j'ai développé les outils nécessaires pour l'**analyse d'un gros échantillon de données spectroscopiques** afin de reconstruire la fonction de corrélation à 2 points. Cet **outil statistique** décrit la distribution des corrélations spatiales des structures cosmiques de l'univers. La mesure de cette distribution au moyen de grands relevés comme le SDSS a ouvert une nouvelle piste pour explorer la nature de l'énergie noire grâce à l'exploitation d'une nouvelle sonde : les **oscillations acoustiques de baryons** (BAO). Il s'agit d'ondes de pression qui se sont propagées pendant les 380 000 premières années de l'univers et qui présentent une signature caractéristique dans la carte des structures de l'univers : deux galaxies sont préférentiellement séparées de 500 millions d'année-lumière. Cette distance caractéristique (ou échelle BAO) est utilisée comme un étalon de distance pour mesurer l'évolution des distances dans l'univers, autrement dit son taux d'expansion. Pour étendre les mesures faites jusqu'à présent grâce aux galaxies et être capable de sonder l'univers tel qu'il était il y a plus de 6 milliards d'années, il faut pouvoir observer des astres très brillants et très lointains. Les **quasars** sont justement les candidats idéaux pour établir la carte la plus aboutie des structures de l'univers. Il s'agit de trous noirs super-massifs situés au centre de certaines galaxies qui émettent une très forte lumière provenant du disque d'accrétion de matière situé autour du trou noir central. Ces phares cosmiques sont précisément les **objets que j'ai étudié dans ma thèse** et que le programme SDSS-IV eBOSS a observé pendant deux ans pour collecter la position de presque 150 000 d'entre eux dans l'intervalle en redshift $0.8 \leq z \leq 2.2$. Mon sujet de thèse a porté sur l'analyse de la fonction de corrélation des quasars de eBOSS pour contraindre l'énergie noire à une époque de l'univers pratiquement inexplorée à ce jour. Il s'agit d'une **analyse clé** de la collaboration internationale dans laquelle j'ai joué un **rôle de premier plan**. Une première partie de mon travail de recherche a constitué à mesurer l'échelle BAO à partir de l'échantillon de quasars observés par eBOSS et a donné lieu à une publication dans la revue scientifique d'astronomie Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS). « Il y a le mètre pour des petits échelles de distances, le kilomètre ou le mile pour les distances entre les villes, et nous avons l'échelle BAO pour des distances entre galaxies et quasars en cosmologie. » ai-je expliqué dans le **communiqué de presse** de ma collaboration au printemps 2017 (repris pour le CEA-Irfu en français [ici](#)) où, bien que la collaboration compte presque 150 personnes et que le milieu soit très compétitif, je suis la seule doctorante à avoir été citée en reconnaissance pour ma contribution significative dans cette analyse.

Plusieurs pistes sont envisagées pour comprendre le phénomène d'accélération de l'expansion de l'univers. En plus de mesurer précisément l'évolution des distances pour contraindre les propriétés de l'énergie noire, il est possible de **tester la validité de la théorie de la gravitation aux échelles des structures cosmiques**. L'interaction gravitationnelle qui est responsable de la formation des structures qui s'attirent sous l'effet de leur masse, est décrite par la théorie de la relativité générale d'Einstein qui est testée de manière très précise à l'échelle de notre système solaire. Mais nous supposons que la théorie est valable aux échelles de distances entre les galaxies, autrement dit à des échelles cosmologiques, alors qu'il est possible que des modifications soient à apporter à la théorie de la relativité générale. Ainsi, **mon travail de recherche comprend un deuxième volet encore plus novateur** qui consiste à mesurer la quantité de galaxies ou quasars qui se forment à une période donnée de l'univers. On appelle ce paramètre cosmologique le **taux de croissance des structures cosmiques** et sa valeur est prédite par le modèle actuel de la cosmologie. Pour mesurer ce paramètre dans les données, nous utilisons un effet dit de **distorsions dans l'espace des redshifts** (RSD). Ces distorsions sont les conséquences de l'effet des vitesses propres des astres. Lorsqu'on reconstruit la position de l'objet le long de la ligne de visée, le fait que l'objet possède une vitesse particulière modifie sa distance apparente. Cet effet engendre des anisotropies de la fonction d'auto-corrélation qui contiennent des informations précieuses sur la formation des structures. Au cours de ma thèse, je

me suis familiarisée avec les modèles théoriques de RSD qui nécessitent un contrôle plus fin des effets systématiques liés à la modélisation. Le modèle RSD que j'ai utilisé dans mon travail est l'un des plus récents et décrit l'évolution non-linéaire des champs de matière et de vitesse en se basant sur la théorie des perturbations. Le modèle avait déjà été utilisé pour une analyse antérieure sur des galaxies proches mais il n'a jamais été testé pour un échantillon de quasars beaucoup plus lointains. Par conséquent, j'ai aussi étudié la validité et les conditions d'utilisation du modèle à partir de **simulations numériques d'univers**. Ces simulations sont des réalisations fictives de notre univers pour lesquelles nous connaissons les paramètres cosmologiques injectés. Il s'agit d'outils complexes que j'ai appris à utiliser, et précieux car ils permettent de tester notre procédure d'analyse et d'estimer les incertitudes systématiques. Ainsi, mon sujet de thèse s'inscrit également dans la **thématique technologique de P2IO**, à savoir "**l'exploitation de données et l'utilisation de simulations numériques**". J'ai mené une analyse rigoureuse des effets pouvant altérer la mesure qui a permis de déterminer la croissance des structures pour la première fois à partir de cet échantillon de quasars. Nous avons ainsi confirmé la validité du modèle actuel de la cosmologie basé sur la relativité générale pour une époque de l'univers quasiment inexplorée à ce jour. Cette étude a fait l'objet d'un [article 1er auteur](#) dans la revue MNRAS et j'ai accompagné cette publication d'un [communiqué du CEA-Irfu](#) en février. Cette étude a d'ores et déjà été citée par la collaboration *Planck* pour l'analyse des résultats de 2018. Par ailleurs, aucune expertise dans la mesure du taux de croissance des structures n'existait dans mon groupe de recherche au CEA-Saclay, et était peu développée en France.

Ainsi, dans ma thèse j'ai mesuré et analysé la fonction de corrélation à deux points de l'échantillon de quasars obtenu après deux ans d'observation d'eBOSS pour contraindre les distances cosmiques, à savoir la distance angulaire D_A et le taux d'expansion H , ainsi que le taux de croissance des structures $f\sigma_8$ à un redshift effectif $z_{\text{eff}} = 1.52$. Les résultats de ce travail sur l'évolution des distances cosmiques sont compatibles avec les prédictions du modèle Λ CDM utilisant les paramètres de *Planck* et basé sur l'existence d'une constante cosmologique. La mesure du taux de croissance des structures est compatible avec la prédiction de ce modèle basé sur la relativité générale, ce qui étend ainsi la validité de la théorie aux échelles cosmologiques à grand redshift. Dans mon manuscrit de thèse, j'ai également exploré les implications cosmologiques de ces mesures pour des modèles d'extensions à Λ CDM et pour des scénarios de gravité modifiée. Les mesures de croissance des structures à grand redshift, comme la 1ère mesure effectuée avec l'échantillon quasars de eBOSS que j'ai effectuée, vont ainsi apporter des nouvelles contraintes sur les modèles de gravité alternative, des contraintes qui sont complémentaires de celles qui sont en train d'être apportées par les ondes gravitationnelles et qui s'annoncent aussi très prometteuses. Mon travail de thèse constitue une première étude menée avec les données de quasars d'eBOSS et sera utilisé pour l'analyse de l'échantillon final à la fin 2019 où l'on attend une amélioration de la précision statistique d'un facteur 2. **Le labEx P2IO peut donc se réjouir de sa forte implication dans l'analyse des données spectroscopiques et de leurs implications cosmologiques grâce aux relevés actuels. Mon travail de recherche est d'autant plus précurseur qu'il ouvrira la voie pour les futurs grands relevés**, comme le prometteur programme DESI qui s'inscrit dans la continuité du relevé SDSS ou encore le satellite européen Euclid, projets dans lesquels le labEx P2IO est déjà fortement impliqué. Ces deux programmes sonderont intensivement l'époque de l'univers entre $1 < z < 2$ en observant plusieurs millions de spectres, ce qui permettra d'améliorer d'environ un ordre de grandeur les contraintes actuelles sur les paramètres cosmologiques. Ainsi, **la mission de soutien du labEx P2IO engagé dans la relève de ce défi scientifique et technologique majeur apparait d'autant plus justifiée qu'elle s'inscrit dans la transition vers une ère de cosmologie de précision.**