

Chapitre 1

Le relevé eBOSS de SDSS

1.1 Le Sloan Digital Sky Survey

Le *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) est né dans les années 1990 de l'ambition de réaliser un relevé spectroscopique à la fois profond et étendu dans le but d'étudier, entre autres, la structuration de l'univers à grande échelle. Cette idée a été rendue possible par l'apparition des capteurs CCD, des spectrographes à fibres optiques ainsi que par les capacités à analyser des lots de données de plus en plus grands. En 1991, la fondation Sloan décide donc d'investir dans ce projet ambitieux, permettant sa construction et lui donnant ainsi son nom. Le télescope fut construit à l'Apache Point Observatory (APO) au Nouveau Mexique, et la première lumière prise en 1998. Ce télescope capable de mesurer le spectre de centaines d'objets à la fois, générant ainsi de grandes quantités de données, a marqué une nouvelle ère, à la fois en terme de relevé cosmologique et de manière d'analyser de telles quantités de données.

1.1.1 SDSS I-II-III

Les deux premières générations du SDSS, SDSS-I de 2000 à 2005 puis SDSS-II de 2005 à 2008, ont produit plusieurs résultats importants.

Premièrement, un relevé photométrique multi-bandes de plus de $11\,600\text{ deg}^2$, couvert par les filtres u , g , r , i and z ¹. Parmi ces $11\,600\text{ deg}^2$, 7500 forment le relevé contigu appelé *the Legacy Survey*. Ce relevé photométrique a permis de sélectionner plus de 930 000 galaxies et 120 000 quasars candidats, afin d'en mesurer les spectres. Il a été rendu public lors de la septième publication de données de SDSS² et est détaillé dans [1]. Son étude a conduit à la première détection à $3,6\sigma$ des BAO [2], mesurant ainsi l'échelle BAO moyennée sur le volume, D_V , à un redshift effectif de 0,35 et avec une précision de 5 %.

Un second relevé photométrique et spectroscopique de 3500 deg^2 , contenant 460 000 étoiles de notre galaxie, a été produit dans le but d'étudier la structure et la composition de la Voie Lactée. Ce relevé est nommé *SEGUE* (Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration [3]).

Enfin, le *SDSS Supernova Survey*, un relevé d'environ 250 deg^2 observé à plusieurs reprises et visant à contraindre l'expansion locale de l'univers grâce à l'étude des supernovae de type 1a, a produit un échantillon d'environ 500 SNe 1a, toutes confirmées spectroscopiquement entre $z = 0,1$ et $z = 0,4$.

Au vu du succès de SDSS-I et II, une troisième génération de SDSS débuta fin 2008. Elle se compose de 4 relevés différents [4], avec le même télescope que les deux générations

1. Ces filtres couvrent les longueurs d'onde allant de 400 à 1000 nm. Voir 1.4

2. SDSS DR7 : <http://www.sdss.org/dr7>

précédentes.

Parmi ces relevés figure *SEGUE-2*, suite du programme SEGUE. Il a produit un relevé d'étoiles de la Voie Lactée dans le but de mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies. Le relevé *MARVEL* (Multi Object APO Radial Velocity Exoplanet Large-area Survey) a opéré de 2008 à 2012. Ce programme étudie les exo-planètes via deux spectrographes interférométrique de 60 fibres chacun, en mesurant la vitesse radiale d'environ 11 000 étoiles brillantes. *APOGEE-1*, pour APO Galactic Evolution Experiment 1, vise à mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies. Il a produit un relevé spectro-métrique dans l'infra rouge de très haute résolution et très haut rapport signal sur bruit d'environ 150 000 étoiles. Ce relevé ainsi que celui de SEGUE-2 jouent un rôle important dans la compréhension de la formation des galaxies et dans l'étude de la distribution de matière noire à petite échelle.

Enfin, le 4e relevé de SDSS-III est nommé *BOSS*, pour Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. Il poursuit la mesure de l'échelle BAO faite avec le Legacy Survey et inclut un nouveau traceur : la forêt Lyman alpha dans le spectre de quasars lointains. Afin d'observer un plus grand nombre d'objets et d'avoir une mesure plus précise, le spectrographe initialement présent sur SDSS a été amélioré : la gamme de longueur d'onde observée est plus grande, le diamètre des fibres a été réduit, ce qui conduit à un nombre total de 1000 fibres. Les observations commencèrent en 2009 et se terminèrent, en avance, en 2014. Le temps d'observation restant permit de mener plusieurs programmes d'observation en dark time (#prov), tel que *SEQUELS* (Sloan Extended QUasars, ELG and LRG Survey) qui a réalisé un relevé de 300 deg^2 avec le spectrographe de BOSS, afin de tester la target selection (#prov) de SDSS-IV.

BOSS mena à de nombreux résultats importants. Il produisit un relevé de plus de 1,5 million de galaxies, qui donna une mesure de l'échelle BAO avec une précision de 2,1 % à un redshift $z = 0,32$ (échantillon *LOWZ*) ainsi qu'une mesure à $z = 0,57$ avec une précision de 1,0 % (échantillon *CMASS*) [5]. L'étude du $\text{Ly}\alpha$ conduisit à une mesure de l'échelle BAO à un redshift effectif $z = 2,4$ avec une précision de 3 % [6]. L'ensemble des données de SDSS-III a été rendu public lors de la douzième publication de données de SDSS³ [7].

1.1.2 SDSS-IV

La quatrième génération de SDSS débuta courant 2014. Elle comporte 3 programmes spectroscopiques majeurs [8], dont nous donnons une brève description ici :

- *APOGEE-2*, suite d'*APOGEE-1*, effectuée de la spectroscopie stellaire grâce à un spectrographe de haute résolution dans le proche infrarouge. En plus du relevé dans le *NGC* (North Galactic Cap) mené à l'APO, le programme comporte un relevé dans le *SGC* (South Galactic Cap). Le relevé sud est produit grâce au télescope du Pont, de 2,5 mètres, situé à Las Campanas au Chili. L'objectif final est d'obtenir le spectre de plus de 400 000 étoiles dans le proche infrarouge, afin d'accéder aux régions clés de la Voie Lactée non-observable en optique, et ainsi mieux comprendre la formation et l'évolution des galaxies.
- *MaNGA* est un nouveau programme de SDSS. C'est le premier à utiliser un spectrographe de champ intégré⁴. Contrairement aux programmes précédents qui obtenaient le spectre du centre de la galaxie cible, MaNGA va mesurer le spectre en plusieurs points répartis sur toute la surface de la galaxie observée. Ce procédé va permettre d'étudier la structure interne d'environ 10 000 galaxies proches ($z < 0,03$), en mesurant notamment les cartes 2D des vitesses et des dispersions de vitesse des étoiles, ainsi que leur métallicité.

3. SDSS DR12 : <http://www.sdss.org/dr12>

4. *integral field spectrograph* en anglais

- *eBOSS* pour Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey, est le troisième programme majeur de SDSS-IV. C’est le programme qui fournit les données de ce manuscrit, il est décrit en détail dans la section suivante ainsi que dans [9]. En plus du programme principal, eBOSS inclut deux sous-programmes : *SPIDERS* et *TDSS*.

SPIDERS étudie la nature des émissions en X. Il utilise 5 % des fibres d’eBOSS afin de viser des sources émettant en X. Ces sources sont issues principalement du relevé *ROSAT All Sky Survey* ainsi que des sources observées par le satellite *eROSITA*.

TDSS vise à comprendre la nature des sources variables. Il utilise lui aussi 5 % des fibres d’eBOSS, afin de mesurer le spectre de sources variables présentes dans le relevé *Pan-STARRS1* (PS1) ou dans l’imagerie de SDSS. Parmi les sources identifiées par PS1, environ 60 % sont des quasars, et 40 % des étoiles variables. A la fin, TDSS aura produit un relevé d’environ 200 000 spectres, jusqu’à une magnitude limite de 21.

1.2 eBOSS

Suite au succès de BOSS, la collaboration SDSS poursuit la mesure de l’échelle BAO avec le programme eBOSS. Celui-ci inclut deux nouveaux traceurs, afin de sonder une époque clé qui est l’époque de transition de la domination de la matière à celle de l’énergie noire. L’objectif principal est d’étendre la mesure de distance effectuée avec les galaxies de BOSS à un redshift $0,6 < z < 1$, ainsi que de faire la première mesure de clustering (#prov) à l’aide de quasars en tant que traceurs et la première mesure de l’échelle BAO à un redshift $1 < z < 2$. La précision visée sur la mesure de distance avec l’échantillon de galaxies est de 1 %, et de 2 % pour les nouveaux traceurs.

1.2.1 Les traceurs de eBOSS

Afin d’étendre la gamme de redshift sondée par BOSS, eBOSS inclut donc deux nouveaux traceurs : les ELG et les quasars en tant que traceurs de la matière. Auxquels s’ajoutent les traceurs déjà présents dans BOSS : les LRG et les forêts $\text{Ly}\alpha$ des quasars. Ces traceurs sont présentés ici :

- LRG : l’échantillon de *Luminous Red Galaxies* déjà construit lors du programme BOSS est étendu. Un minimum de 300 000 galaxies confirmées spectroscopiquement est nécessaire dans la gamme de redshift $0,6 < z < 1$ afin d’atteindre la précision de 1 % sur l’échelle BAO.
- ELG (*Emission Line Galaxies*) : ce sont des galaxies bleues formant beaucoup d’étoiles, facilement identifiables par leurs raies d’émission. Leur relevé couvre les redshifts $0,6 < z < 1,1$ et doit conduire à une mesure à 2 % de précision de l’échelle BAO. Un total de 190 000 ELG devrait constituer l’échantillon final.
- QSO : nouveaux traceurs, ils sont utilisés afin de construire un relevé spectroscopique au même titre que les LRG, mais à plus grand redshift. Ils permettent ainsi de mesurer le clustering (#prov) et l’échelle BAO dans une époque jusque là insondée ($0,9 < z < 2,2$). Cet échantillon peu dense doit mener à une mesure à 2 % sur l’échelle BAO. Du fait que ce relevé est dominé par le bruit de grenaille (*shot noise*), de futurs relevés pourront venir compléter cet échantillon et ainsi augmenter la précision statistique de la mesure.
- $\text{Ly}\alpha$ QSO : ces quasars sont les objets dont les spectres fournissent la forêt $\text{Ly}\alpha$. Contrairement aux traceurs directs, la quantité d’information contenue dans la forêt $\text{Ly}\alpha$ dépend du rapport signal sur bruit. Les quasars $\text{Ly}\alpha$ de BOSS possédant un faible rapport signal sur bruit sont donc réobservés dans eBOSS. Le gain attendu

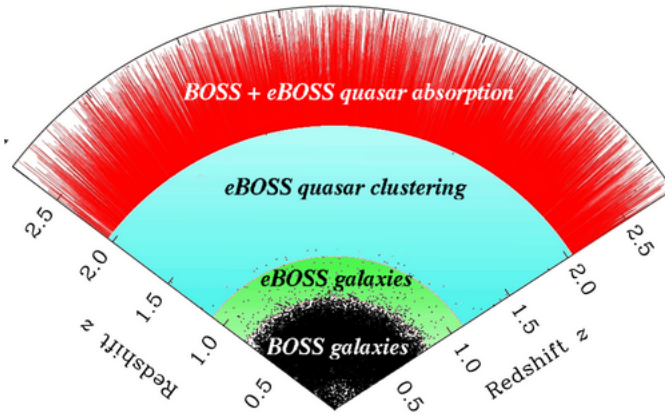


FIGURE 1.1 – Représentation des 4 différents traceurs d’eBOSS et leur répartition en redshift.

sur le rapport signal sur bruit grâce à cette réobservation est d’environ 40 %. La densité moyenne de ces objets est de l’ordre de 8 deg^{-2} .

En plus de ces objets, eBOSS a observé de nouveaux quasars $\text{Ly}\alpha$, avec une densité moyenne de 18 deg^{-2} .

Ces 4 traceurs sont représentés sur la figure 1.1.

Le relevé produit par eBOSS contient un échantillon de LRG couvrant la gamme $0,6 < z < 1$ avec une densité de 60 cibles par deg^2 et une pureté supérieur à 80 %. L’échantillon d’ELG couvre une gamme en redshift légèrement plus haute et contient un total de 190 000 objets ($\sim 130 \text{ deg}^{-2}$) avec une pureté supérieur à 74 %. Les quasars utilisés pour le clustering (#prov) constituent un échantillon couvrant la gamme $0,9 < z < 2,2$ avec une densité de 90 cibles par deg^2 et une pureté supérieur à 50 %. Enfin, eBOSS fournit 60 000 nouveaux quasars $\text{Ly}\alpha$ ainsi que la réobservation de 60 000 quasars $\text{Ly}\alpha$ déjà observés avec BOSS. Pour la suite, nous nous intéresserons uniquement aux quasars $\text{Ly}\alpha$, qui constituent l’ensemble des données traitées dans cette étude. Ils seront simplement désignés par quasars ou QSO.

1.2.2 Sélection des cibles

La sélection des cibles s’effectue sur la base du relevé photométrique réalisé par SDSS-I et II dans les bandes *ugriz* et rendu publique lors de la neuvième publication de donnée SDSS (DR9⁵). Lors de la construction du catalogue de BOSS, la photométrie provenant de *UKIDSS* (UKIRT Infrared Deep Sky Survey [10]) et de *GALEX* (Galaxy Evolution Explorer [11]) a été utilisée afin de préciser la sélection des cibles. De la même manière, la photométrie de SDSS est complétée par plusieurs relevés afin de définir les nouveaux quasars à observer dans eBOSS :

- Les bandes W1 et W2 ($3,4 \mu\text{m}$ et $4,6 \mu\text{m}$) du relevé photométrique du satellite *WISE* (Wide-field Infrared Survey Explorer [12])
- La photométrie multi-époque de *PTF* (Palomar Transient Factory [13])
- Les données de *FIRST* (Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters [14])

Pour BOSS, le relevé de QSO a été construit en utilisant d’une part l’algorithme *XDQSO* [15] pour l’échantillon *QSO_CORE*, ce qui a permis d’avoir un échantillon homogène, et d’autre

5. <http://www.sdss.org/dr9>

part en incluant des QSO sélectionnés via différentes techniques afin d’augmenter au maximum la densité de quasars Ly α . Contrairement aux relevés d’objets utilisés en tant que traceurs directs pour la mesure de l’échelle BAO ou du #prov clustering, les quasars Ly α ne nécessitent pas un relevé homogène (#prov : renvoi vers l’explication). C’est pour cette raison que l’échantillon de QSO Ly α peut être complété sans se soucier de dégrader l’homogénéité. Cependant, la présence d’un échantillon homogène de quasars à grand redshift permet d’autres sciences que la mesure de l’échelle BAO. Par exemple, le papier [16] étudie l’homogénéité cosmique en utilisant l’échantillon de quasars DR12 de BOSS.

Pour eBOSS, la présence d’un échantillon de quasars à $0,9 < z < 2,2$ destiné à la fois à la mesure de l’échelle BAO et du clustering (#prov) permet de relâcher le critère d’homogénéité imposé pour BOSS sur l’échantillon QSO_CORE et ainsi d’augmenter le nombre de cibles. L’algorithme XDQSO est donc utilisé avec des paramètres moins strictes que pour BOSS, afin d’augmenter la densité de quasars Ly α . Ainsi, 6,6 nouveaux quasars par deg² sont ajoutés à l’échantillon de cette manière. Ensuite, les QSO de BOSS ayant un rapport signal sur bruit $0,75 < S/R < 3$ et ne comprenant pas de BAL sont réobservés. Enfin, de nouveaux quasars sont sélectionnés grâce aux données de PTF, avec une densité de $3,2 \text{ deg}^{-2}$. Les catalogues FIRST fournissent eux aussi de nouveaux quasars potentiels, avec une densité de 1 deg^{-2} . Ainsi, un total de total d’environ 8 QSO par deg² sera réobservé, accompagné d’environ 18 nouveaux quasars par deg².

1.2.3 Pavage du ciel

Une fois que les cibles ont été sélectionnées grâce aux observations photométriques, la phase d’observation spectroscopique peut commencer. Les données sont acquises via 1000 fibres optiques insérées dans une plaque, que l’on dispose au centre du plan focal du télescope. Le processus de “pavage” [17] consiste donc à assigner chaque cible à une fibre optique dans une plaque d’observation, en minimisant le nombre de plaques nécessaires et en maximisant le nombre de cibles à observer. Cette opération est dirigée par le résultat de l’algorithme de sélection des cibles ainsi que du nombre de fibres disponibles.

Afin d’observer les 9000 deg^2 constituant le relevé d’eBOSS, celui-ci est divisé en environ 1800 plaques. Chaque plaque couvre une surface de 7 deg^2 sur le ciel, et en moyenne, un centre de plaque est assigné tous les 5 deg^2 afin d’éviter les trous dans le relevé. Étant donné le nombre d’heures allouées à eBOSS et le nombre de plaques à observer, chaque plaque est observée durant environ 1,5 heure.

Parmi les 1000 fibres disposées sur chaque plaque, 100 sont destinées aux programmes TDSS et SPIDERS et 100 fibres supplémentaires sont réservées à la calibration. Il reste donc 800 fibres par plaque destinées aux traceurs de eBOSS. Ces fibres sont assignées aux LRG et QSO. Le relevé des ELG se fait sur des plaques indépendantes. Afin de mener ce relevé, la taille du relevé des LRG et QSO est réduit de 9000 à 7500 deg^2 . Ainsi 300 plaques sont rendues disponibles pour l’observation des ELG ($\sim 1500 \text{ deg}^2$).

Une fois le pavage du ciel effectué, la position des fibres sur le ciel est convertie en coordonnées dans le plan focal du télescope. A cause de la chromaticité de l’instrument, la position dans le plan focal de chaque objet observé dépend de la longueur d’onde. Ainsi chaque fibre dite de science est positionnée de manière à maximiser la lumière en sortie à 5400 \AA pour les galaxies et les quasars clustering (#prov), et à 4000 \AA pour les quasars Ly α .

En plus des 900 fibres de sciences, 100 sont allouées pour la calibration. Parmi ces 100 fibres, 80 sont destinées à la soustraction du fond de ciel. Pour chaque plaque, il est requis que chaque spectrographe reçoivent au moins 30 fibres de ciel. Les 20 fibres restantes sont destinées à la calibration du flux. La calibration se fait en pointant des étoiles standards

de type F. De la même manière, parmi ces 20 fibres, au minimum 6 fibres sont requises sur chaque spectrographe.

1.2.4 Phase d’observation

Une fois le pavage du ciel réalisé et la position de chaque fibre dans le plan focale déterminée, les plaques sont préparées puis percées. Ces plaques sont des plaques d’aluminium de 3,2 m d’épaisseur et de 80 cm de diamètre. La zone contenant les fibres mesure 65,2 cm de diamètre. La préparation des plaques est faite à l’université de Washington. Elle est décrite dans [8].

Une fois les plaques prêtes, les observations peuvent commencer. La prise de données a débuté en juillet 2014. Pendant les deux premières années, seules les plaques des LRG et des QSO ont été observées. Les deux années suivantes, les plaques des ELG ont été observées en alternance avec les plaques assignées aux LRG et QSO. Les 305 plaques formant le relevé d’ELG ont fini d’être observées en février 2018.

En mars 2019, les observations sont arrêtées afin de laisser les autres programmes observer. Contrairement à BOSS, les observations pour eBOSS ont connu un mauvais temps, retardant l’avancement du relevé. Ce retard a été essentiellement répercuté sur l’observation des plaques contenant les LRG et QSO : environ 1000 plaques sur les 1500 initialement prévues ont pu être observées, réduisant le relevé de 7500 à environ 4700 deg².

1.2.5 Caractéristiques techniques de l’instrument

L’instrument [18] utilisé pour eBOSS est celui de SDSS, situé à l’APO. Nous décrivons ici ses composantes importantes.

Le télescope

Le télescope est installé à l’APO. Il est commun à tous les programmes SDSS. Afin de mener à bien ces différents programmes, le télescope doit être capable de réaliser un relevé photométrique d’un quart du ciel, puis mesurer le spectre de millions de cibles identifiées via cette photométrie. Ainsi le télescope doit avoir un grand champ de vue, avec très peu de distorsions dans le plan focal. Ces prérequis ont conduit à la construction du télescope SDSS de 2,5 m de diamètre de type Ritchey-Chrétien. Il est représenté schématiquement sur la figure 1.2.

Le télescope se compose d’un miroir primaire de 2,5 m de diamètre et d’ouverture $f/2,25$, et d’un miroir secondaire de 1,08 m de diamètre situé à 3,6 m du miroir primaire. Avec un plan focal situé à 0,76 m derrière le miroir primaire, l’ouverture finale du télescope est $f/5$. Le champ de vue qui en résulte est de 3° de diamètre sur le ciel (7 deg²), correspondant à un diamètre de 0,65 m dans le plan focal.

Le télescope inclut aussi 2 correcteurs optiques. Le premier est un correcteur d’astigmatisme de type Gascoigne. Le second est un jeu de correcteurs hautement asphériques et interchangeables situés près du plan focal. L’un, épais, est utilisé pour la photométrie ; l’autre, beaucoup plus fin, est utilisé lors des phases de spectrométrie.

La caméra

L’instrument nécessite une caméra [20] capable de couvrir l’entièreté du plan focal du télescope. Le très grand champ de vue du télescope a imposé l’utilisation des CCD les plus grands disponibles à l’époque : les Tektronix Tk2048E. Ces CCD sont des grilles de 2048×2048 pixels de 24 μ m. Etant donné la longueur focale du télescope, ces 24 μ m représentent 0,4'' sur le ciel. Ainsi, la PSF (#prov) d’une largeur à mi-hauteur d’environ 1'' est bien échantillonnée.

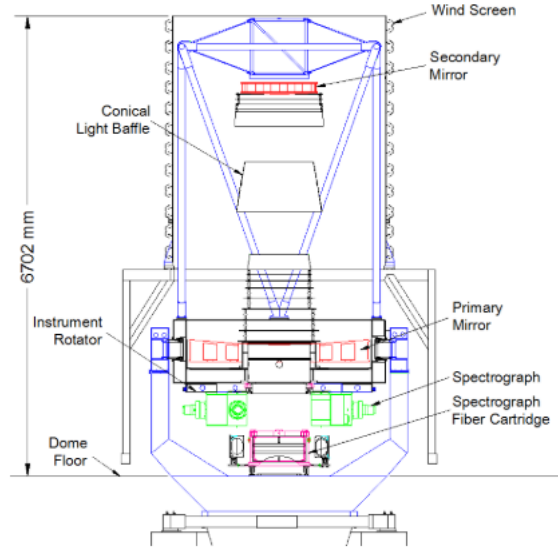


FIGURE 1.2 – Schéma du télescope SDSS. Le miroir principal est représenté en bas en rouge. Le miroir secondaire est visible au sommet du télescope en rouge. Les spectrographes sont représentés en vert sous le télescope. Une cartouche, pas encore disposée au plan focal du télescope, est représentée sous les spectrographes. Crédits : [19].

La caméra est constituée de 2 modules, le premier comportant 5 (couleurs⁶) x 6 (colonnes) CCD est destiné à la photométrie. En plus de ces 30 CCD, 22 CCD 400×2048 et de même taille de pixel sont ajoutés au dessus et en dessous du module dédié à la photométrie. Ces CCD permettent de relier les étoiles standards brillantes aux objets observés lors de la phase photométrique. Ils constituent le module d'astrométrie. Deux CCD supplémentaires sont ajoutés comme dispositif de contrôle pour la mise au point. La figure 1.3 résume leur disposition.

Lors de la phase d'observation photométrique, la caméra est utilisée en mode *time delay integration* (TDI). Ce mode d'observation consiste à laisser le ciel défiler devant la caméra. La lumière de chaque objet est ainsi accumulée durant tout le transit de l'objet. Cette technique permet de gagner en efficacité d'observation, en réduisant le temps de lecture (qu'il y aurait en mode exposition classique) et le temps de pointage du télescope.

Le spectrographe

Une fois la phase de photométrie effectuée et les cibles sélectionnées, la phase de spectroscopie commence. Les plaques d'observations sont disposées au plan focal du télescope (à la place de la camera). Les fibres, insérées dans ces plaques et placées à la position de chaque cible, sont ensuite envoyées vers les spectrographes [19] afin de mesurer le spectre de ces cibles.

Les spectrographes utilisés dans eBOSS sont les mêmes que ceux utilisés dans BOSS. Ces spectrographes, initialement présents dans SDSS, ont été améliorés afin d'atteindre les objectifs de BOSS. Comparé à SDSS, BOSS a augmenté le nombre de spectres mesurés de 35 %, ces objets étant à plus grand redshift, donc de plus faible luminosité. Ainsi le nombre de fibres des spectrographes de BOSS passe de 640 à 1000. Les objets observés étant plus lointains et donc ayant une taille sur le ciel plus petite, le diamètre de ces fibres est réduit d'un tiers, passant à 120 μm , afin d'augmenter le rapport signal sur bruit des spectres. BOSS inclut aussi un nouveau traceur : la forêt Ly α . Afin de mesurer l'absorption dans

6. Les 5 couleurs correspondant aux filtres u, g, r, i et z. Voir figure 1.4

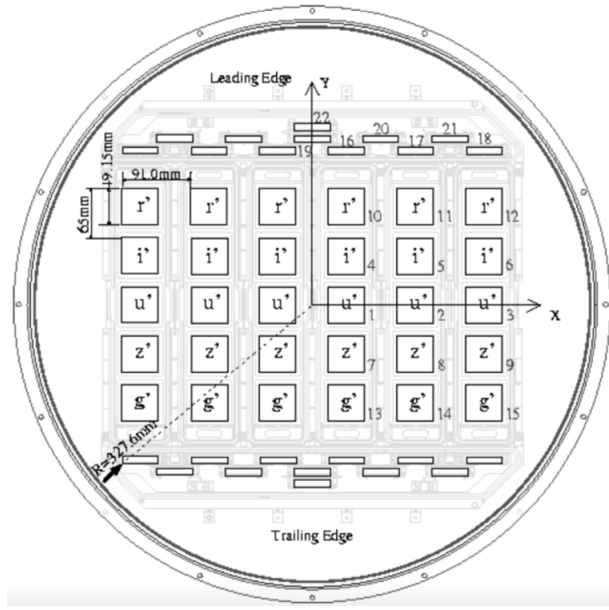


FIGURE 1.3 – Schéma de la disposition des CCD dans le plan focal du télescope SDSS. Les capteurs 1 à 15 sont les CCD dédiés à la photométrie. Le module d’astrométrie se compose des CCD 16 à 21. Enfin le CCD 22 sert au contrôle de la mise au point.

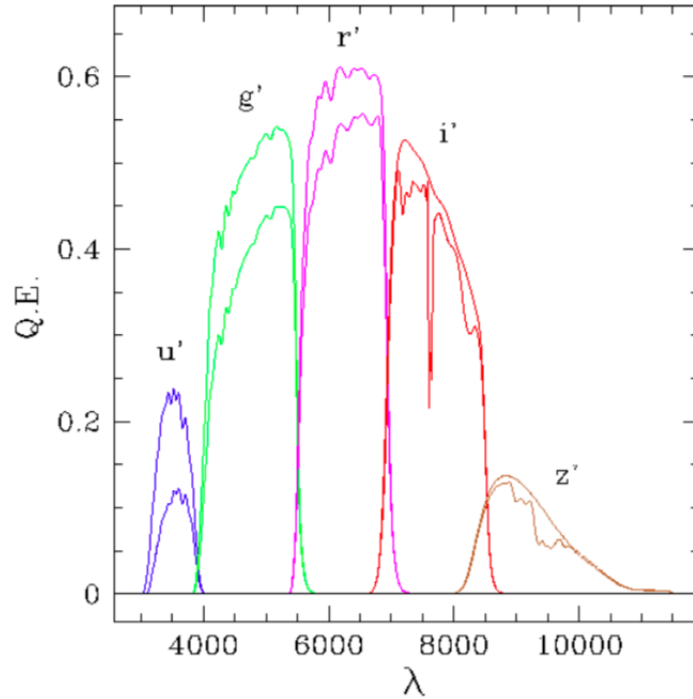


FIGURE 1.4 – Efficacité quantique de chacun des 5 filtres utilisés lors de la phase photométrique de SDSS. Les courbes incluent l’efficacité quantique des CCD, ainsi que l’efficacité du système optique. Les courbes en dessous incluent en plus la transmission de l’atmosphère.

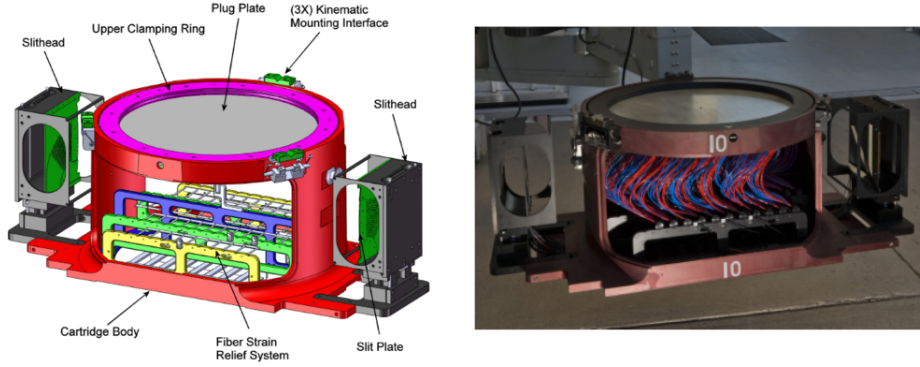


FIGURE 1.5 – Le schéma de gauche présente les différents éléments d’une cartouche. On peut y reconnaître la plaque en aluminium sur le dessus en gris. Sur la droite, une photo d’une cartouche sur laquelle les fibres optiques ont été insérées dans la plaque d’aluminium. L’extrémité des fibres est reliée aux slitheads (#prov), visibles à droite et à gauche, qui seront insérés dans les 2 spectrographes. Crédits : [19].

la forêt Ly α des quasars à un redshift $z = 2.2$, la longueur d’onde d’observation minimale a été diminuée de 3900 à 3560 Å. De la même manière, la longueur d’onde d’observation maximale a été augmentée de 9100 à 10 400 Å pour améliorer la détermination des redshifts de l’échantillon de galaxies.

Pour limiter les risques de dommage aux fibres lors du montage et du démontage des différentes plaques, chaque plaque est montée sur un support rigide. Ce support rigide est appelé cartouche, il comporte la plaque d’observation en aluminium, les 1000 fibres insérées dans cette plaque, et deux slitheads (#prov) qui sont ensuite insérés dans chacun des spectrographes. La figure 1.5 donne un aperçu de ces cartouches.

L’instrument dispose de deux spectrographes. Ils sont schématisés sur la figure 1.6. Chacun des spectrographes reçoit via les slitheads 500 fibres optiques. La lumière issue de ces fibres est collimatée grâce à un miroir sphérique. Le faisceau parallèle ainsi créé passe à travers un miroir semi-réfléchissant, permettant de séparer les longueurs d’onde plus petites des longueurs d’onde plus grandes que 6050 Å. Enfin, chaque demi-faisceau passe au travers d’un grisme⁷, et arrive sur la caméra bleue pour les longueurs d’onde plus petites que 6050 Å, ou sur la caméra rouge pour les longueurs d’onde plus grandes. Après avoir traversé toutes les pièces d’optique, la lumière arrive sur des CCD de 4000×4000 pixels, avec une taille de pixel de 15 μm . Ainsi une des dimensions du CCD correspond à la longueur d’onde observée, selon l’axe de dispersion, l’autre dimension parcourt les différentes fibres. Selon cette dimension, chaque spectre possède un profil de 3 pixels de large et est séparé de son voisin par 6 pixels afin d’éviter le cross-talk (#prov).

Les performances

Les améliorations apportées à l’instrument pour BOSS ont permis d’augmenter le nombre maximal de spectres observables par nuit, ainsi que la magnitude limite atteignable. Cette dernière est directement liée à l’efficacité optique du système. L’efficacité optique est définie comme le ratio du flux mesuré d’une source ponctuelle sur le flux de cette même source situé en dehors de l’atmosphère. La figure 1.7 présente les estimations des différentes composantes participant à l’efficacité optique globale de l’instrument.

7. Association d’un prisme et d’un réseau de diffraction. Le grisme permet de décomposer la lumière tout en gardant le faisceau parallèle.

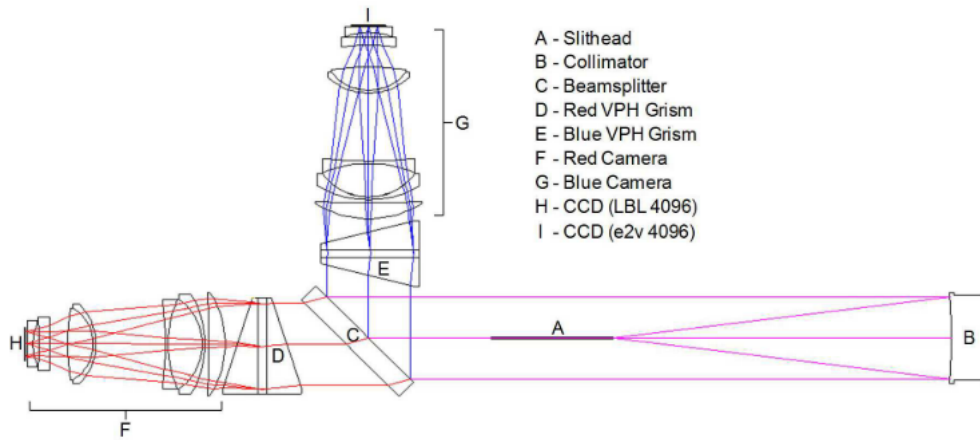


FIGURE 1.6 – Schéma des spectrographes de BOSS. La lumière arrive via les fibres optiques (A). Elle est ensuite collimatée (B) en un faisceau parallèle, puis séparée par le miroir semi-réfléchissant (C). Les longueurs d’ondes $\lambda < 6050$ sont réfléchies vers la caméra bleu (G), les autres entrent dans le bras rouge (F) du spectrographe. Chaque bras comporte un grisme (D et E), une série de lentille puis le CCD (H et I). Crédits : [19].

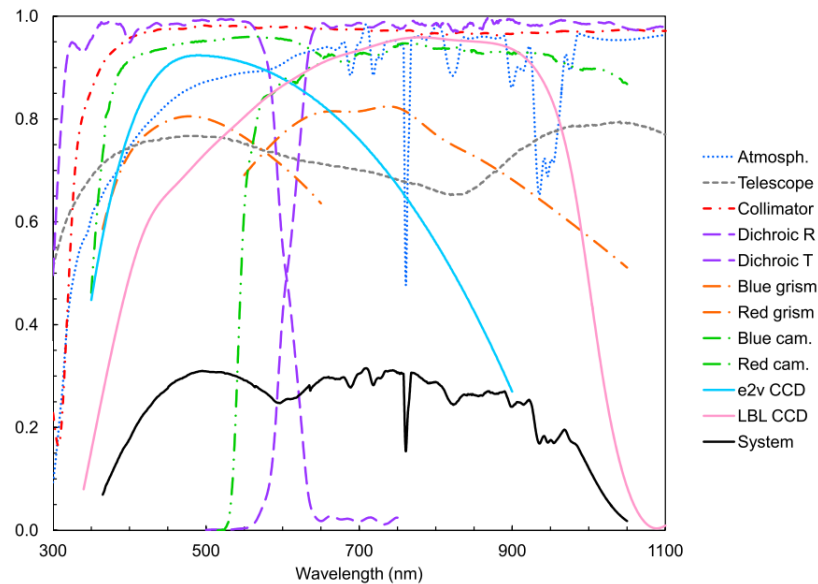


FIGURE 1.7 – Efficacité optique en fonction de la longueur d’onde. Le graphique présente les prévisions de l’efficacité optique de l’instrument avec toutes ses composantes. Crédits : [19].

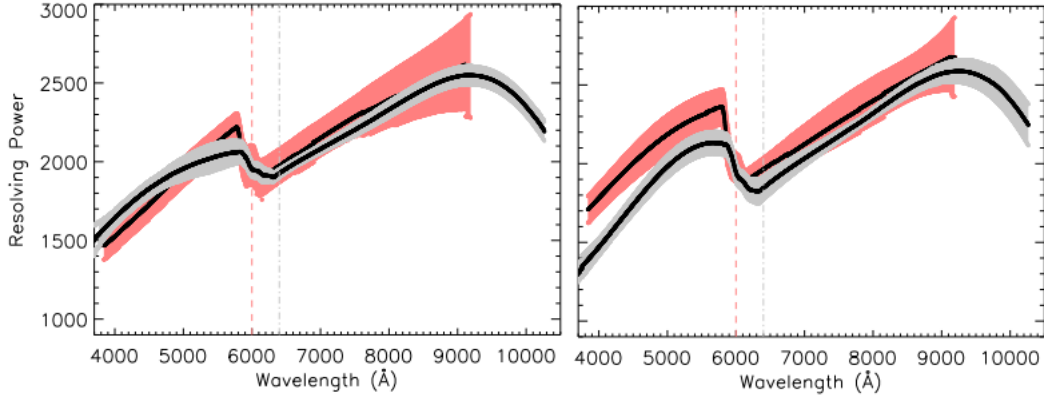


FIGURE 1.8 – Pouvoir de résolution en fonction de la longueur d’onde pour les spectrographes de SDSS (rouge) et BOSS (gris). La courbe de gauche correspond à la mesure sur le spectrographe 1, et celle de droite sur le spectrographe 2. Les régions colorées représentent les régions contenant 68 % des mesures. Crédits : [19].

Le pouvoir de résolution traduit la capacité de l’instrument à identifier et mesurer des raies spectrales. Pour mesurer ce pouvoir de résolution, le spectre de lampes à arc dédiées à la calibration est mesuré, puis chaque raie d’émission est ajustée par une gaussienne de largeur σ_λ . Ce σ_λ est ensuite ajusté par un polynôme en fonction de λ , ce qui donne une estimation de la largeur d’une raie spectrale en fonction de la longueur d’onde observée. Enfin, le pouvoir de résolution est défini comme $R = \frac{\lambda}{2,35 \times \sigma_\lambda}$. La résolution est donnée par le dénominateur : la largeur à mi-hauteur de la gaussienne. Le pouvoir de résolution a été mesuré sur 100 plaques SDSS et 100 plaques BOSS. La comparaison est présentée sur la figure 1.8. Le pouvoir de résolution est sensiblement moins grand pour BOSS que pour SDSS, mais reste au dessus des prérequis.

1.2.6 Résultats

#prov Ca sera plus simple à remplir une fois que le papier de cosmo eBOSS sera sorti.

1.3 DESI

Le *Dark Energy Spectroscopic Instrument* (DESI) [21] est un projet américain de mesure d’énergie noire de génération 4. Il a vu sa première lumière en octobre 2019 et devrait commencer la prise de données en juillet 2020. (#prov Commissionning octobre 2019 - fev 2020 puis 3 mois de SV pour tester la TS, qualité des spectres pour la détermination du redshift (temps d’exposition), puis dernier mois de SV où on fait 1 % du survey avec la config choisie (TS entre autre). A la fin de ce mois là, soit on garde et on continue le survey, soit on retouche la TS par exemple, et on part pour le survey (dans ce cas le 1 % est perdu).)

Comme eBOSS, DESI étudie les BAO et la croissance des structures à l’aide d’un très grand relevé de galaxies et de quasars. A l’issue des 5 ans d’observation prévus, DESI aura mesuré plus de 30 millions de spectres, distribués sur un relevé de plus de 14 000 deg². Pour atteindre ses objectifs, DESI utilise le télescope Mayall, mesurant 4 m de diamètre et situé au Kitt Peak en Arizona. Le champ de vue du télescope est le même que celui de SDSS : 3° de diamètre sur le ciel. L’instrument inclut aussi un système de fibre optique, au nombre de 5000, mais celles ci sont placées au plan focal à l’aide de robots qui ajustent la position de chaque fibre avant chaque exposition. Dix spectrographes reçoivent ces fibres, chacun comportant 3 caméras et couvrant les longueurs d’onde de 3600 à 9800 Å.

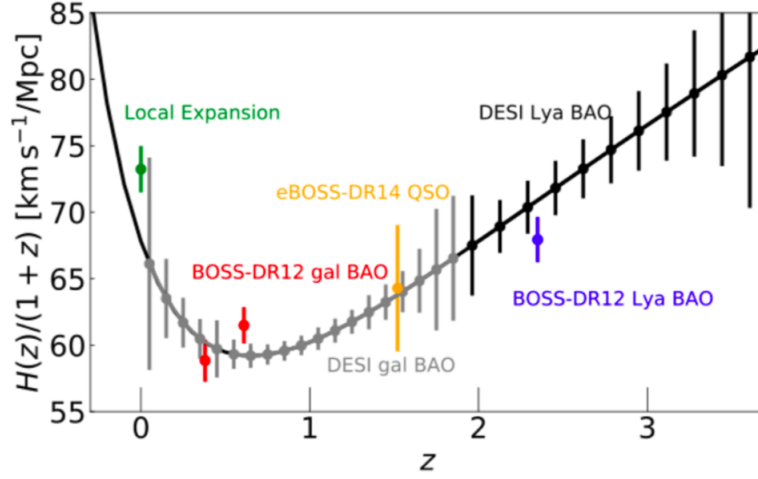


FIGURE 1.9 – Mesure de la distance de Hubble en fonction du redshift. Les points vert (mesure local à l’aide des SN1a), rouge, jaune et bleu donnent les mesures existantes. Les points gris donnent la prédiction pour les galaxies et quasars de DESI, les points noirs donnent la prédiction pour le Ly α de DESI.

DESI utilise les 4 mêmes traceurs qu’eBOSS : les LRG jusqu’à $z = 1,0$, les ELG jusqu’à $z = 1,7$, ainsi que les quasars en tant que traceurs directs de la matière et les quasars Ly α sur la gamme $2,1 < z < 3,5$. En plus de ces traceurs, DESI observera des galaxies brillantes (BG : *Bright Galaxies*) pendant le grey time (#prov). Le relevé de ces galaxies contiendra 10 millions d’objets, avec un redshift moyen $z = 0,2$.

A la fin des 5 ans d’observations, DESI fournira plus de 30 points de mesure de distance, chacun avec une précision plus petite que le pourcent, et couvrant la gamme $0 < z < 3,5$. La figure 1.9 illustre la différence entre BOSS et DESI pour la mesure paramètre de Hubble $H(z)$.

De plus, DESI donnera une mesure de la somme des masses des neutrinos, avec une incertitude de 0,020 eV. Cette précision est suffisante pour exclure la hiérarchie de masse inversée à 3σ (besoin d’expliquer ce que c’est ? ou sinon citer un papier ?).

Bibliographie

- [1] K. Abazajian. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. dec 2008.
- [2] D. J. Eisenstein, I. Zehavi, D. W. Hogg, R. Scoccimarro, M. R. Blanton, R. C. Nichol, R. Scranton, H. Seo, M. Tegmark, Z. Zheng, S. Anderson, J. Annis, N. Bahcall, J. Brinkmann, S. Burles, F. J. Castander, A. Connolly, I. Csabai, M. Doi, M. Fukugita, J. A. Frieman, K. Glazebrook, J. E. Gunn, J. S. Hendry, G. Hennessy, Z. Ivezic, S. Kent, G. R. Knapp, H. Lin, Y. Loh, R. H. Lupton, B. Margon, T. McKay, A. Meiksin, J. A. Munn, A. Pope, M. Richmond, D. Schlegel, D. Schneider, K. Shimasaku, C. Stoughton, M. Strauss, M. SubbaRao, A. S. Szalay, I. Szapudi, D. Tucker, B. Yanny, and D. York. Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies. jan 2005.
- [3] The SDSS-II SEGUE Collaboration, Brian :, Brian Yanny, Constance Rockosi, Heidi Jo Newberg, and Gillian R. Knapp. SEGUE : A Spectroscopic Survey of 240,000 stars with $g=14-20$. feb 2009.
- [4] Daniel J. Eisenstein, David H. Weinberg, Eric Agol, Hiroaki Aihara, Carlos Allende Prieto, Scott F. Anderson, James A. Arns, Eric Aubourg, Stephen Bailey, Eduardo Balbinot, Robert Barkhouser, Timothy C. Beers, Andreas A. Berlind, Steven J. Bickerton, Dmitry Bizyaev, Michael R. Blanton, John J. Bochanski, Adam S. Bolton, Casey T. Bosman, Jo Bovy, Howard J. Brewington, W. N. Brandt, Ben Breslauer, J. Brinkmann, Peter J. Brown, Joel R. Brownstein, Dan Burger, Nicolas G. Busca, Heather Campbell, Phillip A. Cargile, William C. Carithers, Joleen K. Carlberg, Michael A. Carr, Yanmei Chen, Cristina Chiappini, Johan Comparat, Natalia Connolly, Marina Cortes, Rupert A. C. Croft, Luiz N. da Costa, Katia Cunha, James R. A. Davenport, Kyle Dawson, Nathan De Lee, Gustavo F. Porto de Mello, Fernando de Simoni, Janice Dean, Saurav Dhital, Anne Ealet, Garrett L. Ebelke, Edward M. Edmondson, Jacob M. Eiting, Stephanie Escoffier, Massimiliano Esposito, Michael L. Evans, Xiaohui Fan, Bruno Femenia Castella, Leticia Dutra Ferreira, Greg Fitzgerald, Scott W. Fleming, Andreu Font-Ribera, Eric B. Ford, Peter M. Frinchaboy, Ana Elia Garcia Perez, B. Scott Gaudi, Jian Ge, Luan Ghezzi, Bruce A. Gillespie, G. Gilmore, Leo Girardi, J. Richard Gott, Andrew Gould, Eva K. Grebel, James E. Gunn, Jean-Christophe Hamilton, Paul Harding, David W. Harris, Suzanne L. Hawley, Frederick R. Hearty, Jonay I. Gonzalez Hernandez, Shirley Ho, David W. Hogg, Jon A. Holtzman, Klaus Honscheid, Naohisa Inada, Inese I. Ivans, Linhua Jiang, Peng Jiang, Jennifer A. Johnson, Cathy Jordan, Wendell P. Jordan, Guinevere Kauffmann, Eyal Kazin, David Kirkby, Mark A. Klaene, Jean-Paul Kneib, G. R. Knapp, C. S. Kochanek, Lars Koesterke, and Juna A. Kollmeier. SDSS-III : Massive Spectroscopic Surveys of the Distant Universe, the Milky Way Galaxy, and Extra-Solar Planetary Systems. jan 2011.
- [5] Shadab Alam, Metin Ata, Stephen Bailey, Florian Beutler, Dmitry Bizyaev, Jonathan A. Blazek, Adam S. Bolton, Joel R. Brownstein, Angela Burden, Chia-Hsun Chuang, Johan Comparat, Antonio J. Cuesta, Kyle S. Dawson, Daniel J. Eisenstein, Stephanie Escoffier, Héctor Gil-Marín, Jan Niklas Grieb, Nick Hand, Shirley Ho, Karen

Kinemuchi, David Kirkby, Francisco Kitaura, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, Claudia Maraston, Cameron K. McBride, Robert C. Nichol, Matthew D. Olmstead, Daniel Oravetz, Nikhil Padmanabhan, Nathalie Palanque-Delabrouille, Kaike Pan, Marcos Pellejero-Ibanez, Will J. Percival, Patrick Petitjean, Francisco Prada, Adrian M. Price-Whelan, Beth A. Reid, Sergio A. Rodríguez-Torres, Natalie A. Roe, Ashley J. Ross, Nicholas P. Ross, Graziano Rossi, Jose Alberto Rubiño-Martín, Ariel G. Sánchez, Shun Saito, Salvador Salazar-Albornoz, Lado Samushia, Siddharth Satpathy, Claudia G. Scóccola, David J. Schlegel, Donald P. Schneider, Hee-Jong Seo, Audrey Simmons, Anže Slosar, Michael A. Strauss, Molly E. C. Swanson, Daniel Thomas, Jeremy L. Tinker, Rita Tojeiro, Mariana Vargas Magaña, Jose Alberto Vazquez, Licia Verde, David A. Wake, Yuting Wang, David H. Weinberg, Martin White, W. Michael Wood-Vasey, Christophe Yèche, Idit Zehavi, Zhongxu Zhai, and Gong-Bo Zhao. The clustering of galaxies in the completed SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : cosmological analysis of the DR12 galaxy sample. jul 2016.

- [6] Hélión du Mas des Bourboux, Kyle S. Dawson, Nicolás G. Busca, Michael Blomqvist, Victoria de Sainte Agathe, Christophe Balland, Julian E. Bautista, Julien Guy, Vikrant Kamble, Adam D. Myers, Ignasi Pérez-Ràfols, Matthew M. Pieri, James Rich, Donald P. Schneider, and Anže Slosar. The extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : measuring the cross-correlation between the MgII flux transmission field and quasars and galaxies at $z=0.59$. jan 2019.
- [7] Shadab Alam, Franco D. Albareti, Carlos Allende Prieto, F. Anders, Scott F. Anderson, Brett H. Andrews, Eric Armengaud, Éric Aubourg, Stephen Bailey, Julian E. Bautista, Rachael L. Beaton, Timothy C. Beers, Chad F. Bender, Andreas A. Berlind, Florian Beutler, Vaishali Bhardwaj, Jonathan C. Bird, Dmitry Bizyaev, Cullen H. Blake, Michael R. Blanton, Michael Blomqvist, John J. Bochanski, Adam S. Bolton, Jo Bovy, A. Shelden Bradley, W. N. Brandt, D. E. Brauer, J. Brinkmann, Peter J. Brown, Joel R. Brownstein, Angela Burden, Etienne Burtin, Nicolás G. Busca, Zheng Cai, Diego Capozzi, Aurelio Carnero Rosell, Ricardo Carrera, Yen-Chi Chen, Cristina Chiappini, S. Drew Choignowski, Chia-Hsun Chuang, Nicolas Clerc, Johan Comparat, Kevin Covey, Rupert A. C. Croft, Antonio J. Cuesta, Katia Cunha, Luiz N. da Costa, Nicola Da Rio, James R. A. Davenport, Kyle S. Dawson, Nathan De Lee, Timothée Delubac, Rohit Deshpande, Letícia Dutra-Ferreira, Tom Dwelly, Anne Ealet, Garrett L. Ebelke, Edward M. Edmondson, Daniel J. Eisenstein, Stephanie Escoffier, Massimiliano Esposito, Xiaohui Fan, Emma Fernández-Alvar, Diane Feuillet, Nurten Filiz Ak, Hayley Finley, Alexis Finoguenov, Kevin Flaherty, Scott W. Fleming, Andreu Font-Ribera, Jonathan Foster, Peter M. Frinchaboy, J. G. Galbraith-Frew, D. A. García-Hernández, Ana E. García Pérez, Patrick Gaulme, Jian Ge, R. Génova-Santos, Luan Ghezzi, Bruce A. Gillespie, Léo Girardi, Daniel Goddard, Satya Gontcho A Gontcho, Jonay I. González Hernández, Eva K. Grebel, Jan Niklas Grieb, Nolan Grieves, James E. Gunn, Hong Guo, Paul Harding, Sten Hasselquist, Suzanne L. Hawley, Michael Hayden, Fred R. Hearty, Shirley Ho, David W. Hogg, Kelly Holley-Bockelmann, Jon A. Holtzman, Klaus Honscheid, Joseph Huehnerhoff, Linhua Jiang, Jennifer A. Johnson, Karen Kinemuchi, David Kirkby, Francisco Kitaura, Mark A. Klaene, Jean-Paul Kneib, Xavier P. Koenig, Charles R. Lam, Ting-Wen Lan, Dustin Lang, Pierre Laurent, Jean-Marc Le Goff, Alexie Leauthaud, Khee-Gan Lee, Young Sun Lee, Timothy C. Licquia, Jian Liu, Daniel C. Long, Martín López-Corredoira, Diego Lorenzo-Oliveira, Sara Lucatello, Britt Lundgren, Robert H. Lupton, Claude E. Mack, Suvrath Mahadevan, Marcio A. G. Maia, Steven R. Majewski, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, A. Manchado, Marc Manera, Qingqing Mao, Claudia Maraston, Robert C. Marchewski, Daniel Margala, Sarah L. Martell, Marie Martig, Karen L. Masters, Cameron K. McBride, Peregrine M. McGehee, Ian D. McGreer, Richard G.

McMahon, Brice Ménard, Marie-Luise Menzel, Andrea Merloni, Szabolcs Mészáros, Adam A. Miller, Jordi Miralda-Escudé, Hironao Miyatake, Antonio D. Montero-Dorta, Surhud More, Xan Morice-Atkinson, Heather L. Morrison, Demitri Muna, Adam D. Myers, Jeffrey A. Newman, Mark Neyrinck, Duy Cuong Nguyen, Robert C. Nichol, David L. Nidever, Pasquier Noterdaeme, Sebastián E. Nuza, Julia E. O’Connell, Robert W. O’Connell, Ross O’Connell, Ricardo L. C. Ogando, Matthew D. Olmstead, Audrey E. Oravetz, Daniel J. Oravetz, Keisuke Osumi, Russell Owen, Deborah L. Padgett, Nikhil Padmanabhan, Martin Paegert, Nathalie Palanque-Delabrouille, Kaike Pan, John K. Parejko, Changbom Park, Isabelle Pâris, Petchara Pattarakijwanich, M. Pellejero-Ibanez, Joshua Pepper, Will J. Percival, Ismael Pérez-Fournon, Ignasi Pérez-Ràfols, Patrick Petitjean, Matthew M. Pieri, Marc H. Pinsonneault, Gustavo F. Porto de Mello, Francisco Prada, Abhishek Prakash, Adrian M. Price-Whelan, M. Jordan Raddick, Mubdi Rahman, Beth A. Reid, James Rich, Hans-Walter Rix, Annie C. Robin, Constance M. Rockosi, Thaïse S. Rodrigues, Sergio Rodríguez-Rottes, Natalie A. Roe, Ashley J. Ross, Nicholas P. Ross, Graziano Rossi, John J. Ruan, J. A. Rubiño-Martín, Eli S. Rykoff, Salvador Salazar-Albornoz, Mara Salvato, Lado Samushia, Ariel G. Sánchez, Basilio Santiago, Conor Sayres, Ricardo P. Schiavon, David J. Schlegel, Sarah J. Schmidt, Donald P. Schneider, Mathias Schultheis, Axel D. Schwöpe, C. G. Scóccola, Kris Sellgren, Hee-Jong Seo, Neville Shane, Yue Shen, Matthew Shetrone, Yiping Shu, Thirupathi Sivarani, M. F. Skrutskie, Anže Slosar, Verne V. Smith, Flávia Sobreira, Keivan G. Stassun, Matthias Steinmetz, Michael A. Strauss, Alina Streblyanska, Molly E. C. Swanson, Jonathan C. Tan, Jamie Tayar, Ryan C. Terrien, Aniruddha R. Thakar, Daniel Thomas, Benjamin A. Thompson, Jeremy L. Tinker, Rita Tojeiro, Nicholas W. Troup, Mariana Vargas-Magaña, Jose A. Vazquez, Licia Verde, Matteo Viel, Nicole P. Vogt, David A. Wake, Ji Wang, Benjamin A. Weaver, David H. Weinberg, Benjamin J. Weiner, Martin White, John C. Wilson, John P. Wisniewski, W. M. Wood-Vasey, Christophe Yèche, Donald G. York, Nadia L. Zakamska, O. Zamora, Gail Zasowski, Idit Zehavi, Gong-Bo Zhao, Zheng Zheng, Xu Zhou, Zhi-min Zhou, Guangtun Zhu, and Hu Zou. The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey : Final Data from SDSS-III. jan 2015.

- [8] Michael R. Blanton, Matthew A. Bershady, Bela Abolfathi, Franco D. Albareti, Carlos Allende Prieto, Andres Almeida, Javier Alonso-García, Friedrich Anders, Scott F. Anderson, Brett Andrews, Erik Aquino-Ortíz, Alfonso Aragón-Salamanca, Maria Argudo-Fernández, Eric Armengaud, Eric Aubourg, Vladimir Avila-Reese, Carles Badenes, Stephen Bailey, Kathleen A. Barger, Jorge Barrera-Ballesteros, Curtis Bartosz, Dominic Bates, Falk Baumgarten, Julian Bautista, Rachael Beaton, Timothy C. Beers, Francesco Belfiore, Chad F. Bender, Andreas A. Berlind, Mariangela Bernardi, Florian Beutler, Jonathan C. Bird, Dmitry Bizyaev, Guillermo A. Blanc, Michael Blomqvist, Adam S. Bolton, Médéric Boquien, Jura Borissova, Remco van den Bosch, Jo Bovy, William N. Brandt, Jonathan Brinkmann, Joel R. Brownstein, Kevin Bundy, Adam J. Burgasser, Etienne Burtin, Nicolás G. Busca, Michele Cappellari, Maria Leticia Delgado Carigi, Joleen K. Carlberg, Aurelio Carnero Rosell, Ricardo Carrera, Brian Cherinka, Edmond Cheung, Yilen Gómez Maqueo Chew, Cristina Chiappini, Peter Doherty, Choi, Drew Chojnowski, Chia-Hsun Chuang, Haeun Chung, Rafael Fernando Cirolini, Nicolas Clerc, Roger E. Cohen, Johan Comparat, Luiz da Costa, Marie-Claude Cousinou, Kevin Covey, Jeffrey D. Crane, Rupert A. C. Croft, Irene Cruz-Gonzalez, Daniel Garrido Cuadra, Katia Cunha, Guillermo J. Damke, Jeremy Darling, Roger Davies, Kyle Dawson, Axel de la Macorra, Nathan De Lee, Timothée Delubac, Francesco Di Mille, Aleks Diamond-Stanic, Mariana Cano-Díaz, John Donor, Juan José Downes, Niv Drory, Hélión du Mas des Bourboux, Christopher J. Duckworth, Tom Dwelly, Jamie Dyer, Garrett Ebelke, Daniel J. Eisenstein, Eric Em-

sellem, Mike Eracleous, Stephanie Escoffier, Michael L. Evans, Xiaohui Fan, Emma Fernández-Alvar, J. G. Fernandez-Trincado, Diane K. Feuillet, Alexis Finoguenov, Scott W. Fleming, Andreu Font-Ribera, Alexander Fredrickson, Gordon Freischlad, Peter M. Frinchaboy, Lluís Galbany, R. Garcia-Dias, D. A. García-Hernández, Patrick Gaulme, Doug Geisler, Joseph D. Gelfand, Héctor Gil-Marín, Bruce A. Gillespie, Daniel Goddard, Violeta Gonzalez-Perez, Kathleen Grabowski, Paul J. Green, Catherine J. Grier, James E. Gunn, Hong Guo, Julien Guy, Alex Hagen, ChangHoon Hahn, Matthew Hall, Paul Harding, Sten Hasselquist, Suzanne L. Hawley, Fred Hearty, Jonay I. Gonzalez Hernández, Shirley Ho, David W. Hogg, Kelly Holley-Bockelmann, Jon A. Holtzman, Parker H. Holzer, Joseph Huehnerhoff, Timothy A. Hutchinson, Ho Seong Hwang, Héctor J. Ibarra-Medel, Gabriele da Silva Ilha, Inese I. Ivans, Keshawn Ivory, Kelly Jackson, Trey W. Jensen, Jennifer A. Johnson, Amy Jones, Henrik Jönsson, Eric Jullo, Vikrant Kamble, Karen Kinemuchi, David Kirkby, Francisco-Shu Kitaura, Mark Klaene, Gillian R. Knapp, Jean-Paul Kneib, Juna A. Kollmeier, Ivan Lacerna, Richard R. Lane, Dustin Lang, David R. Law, Daniel Lazarz, Jean-Marc Le Goff, Fu-Heng Liang, Cheng Li, Hongyu LI, Marcos Lima, Lihwai Lin, Yen-Ting Lin, Sara Bertran de Lis, Chao Liu, Miguel Angel C. de Icaza Lizaola, Dan Long, Sara Lucatello, Britt Lundgren, Nicholas K. MacDonald, Alice Deconto Machado, Chelsea L. MacLeod, Suvrath Mahadevan, Marcio Antonio Geimba Maia, Roberto Maiolino, Steven R. Majewski, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, Arturo Manchado, Shude Mao, Claudia Maraston, Rui Marques-Chaves, Karen L. Masters, Cameron K. McBride, Richard M. McDermid, Brianne McGrath, Ian D. McGreer, Nicolás Medina Peña, Matthew Melendez, Andrea Merloni, Michael R. Merrifield, Szabolcs Meszaros, Andres Meza, Ivan Minchev, Dante Minniti, Takamitsu Miyaji, Surhud More, John Mulchaey, Francisco Müller-Sánchez, Demitri Muna, Ricardo R. Munoz, Adam D. Myers, Preethi Nair, Kirpal Nandra, Janaina Correa do Nascimento, Alenka Negrete, Melissa Ness, Jeffrey A. Newman, Robert C. Nichol, David L. Nidever, Christian Nitschelm, Pierros Ntelis, Julia E. O’Connell, Ryan J. Oelkers, Audrey Oravetz, Daniel Oravetz, Zach Pace, Nelson Padilla, Nathalie Palanque-Delabrouille, Pedro Alonso Palicio, Kaike Pan, Taniya Parikh, Isabelle Pâris, Changbom Park, Alim Y. Patten, Sebastien Peirani, Marcos Pellejero-Ibanez, Samantha Penny, Will J. Percival, Ismael Perez-Fournon, Patrick Petitjean, Matthew M. Pieri, Marc Pinsonneault, Alice Pisani, Radosław Poleski, Francisco Prada, Abhishek Prakash, Anna Bárbara de Andrade Queiroz, M. Jordan Raddick, Anand Raichoor, Sandro Barboza Rembold, Hannah Richstein, Rogemar A. Riffel, Rogério Riffel, Hans-Walter Rix, Annie C. Robin, Constance M. Rockosi, Sergio Rodríguez-Torres, A. Roman-Lopes, Carlos Román-Zúñiga, Margarita Rosado, Ashley J. Ross, Graziano Rossi, John Ruan, Rossana Ruggeri, Eli S. Rykoff, Salvador Salazar-Albornoz, Mara Salvato, Ariel G. Sánchez, David Sánchez Aguado, José R. Sánchez-Gallego, Felipe A. Santana, Basílio Xavier Santiago, Conor Sayres, Ricardo P. Schiavon, Jaderson da Silva Schimoia, Edward F. Schlafly, David J. Schlegel, Donald P. Schneider, Mathias Schultheis, William J. Schuster, Axel Schwöpe, Hee-Jong Seo, Zhengyi Shao, Shiyin Shen, Matthew Shetrone, Michael Shull, Joshua D. Simon, Danielle Skinner, M. F. Skrutskie, Anže Slosar, Verne V. Smith, Jennifer S. Sobeck, Flavia Sobreira, Garrett Somers, Diogo Souto, David V. Stark, Keivan Stassun, Fritz Stauffer, Matthias Steinmetz, Thaisa Storchi-Bergmann, Alina Streblyanska, Guy S. Stringfellow, Genaro Suárez, Jing Sun, Nao Suzuki, Laszlo Szigeti, Manuchehr Taghizadeh-Popp, Baitian Tang, Charling Tao, Jamie Tayar, Mita Tembe, Johanna Teske, Aniruddha R. Thakar, Daniel Thomas, Benjamin A. Thompson, Jeremy L. Tinker, Patricia Tissera, Rita Tojeiro, Hector Hernandez Toledo, Sylvain de la Torre, Christy Tremonti, Nicholas W. Troup, Octavio Valenzuela, Inma Martinez Valpuesta, Jaime Vargas-González, Ma-

riana Vargas-Magaña, Jose Alberto Vazquez, Sandro Villanova, M. Vivek, Nicole Vogt, David Wake, Rene Walterbos, Yuting Wang, Benjamin Alan Weaver, Anne-Marie Weijmans, David H. Weinberg, Kyle B. Westfall, David G. Whelan, Vivienne Wild, John Wilson, W. M. Wood-Vasey, Dominika Wylezalek, Ting Xiao, Renbin Yan, Meng Yang, Jason E. Ybarra, Christophe Yèche, Nadia Zakamska, Olga Zamora, Pauline Zarrouk, Gail Zasowski, Kai Zhang, Gong-Bo Zhao, Zheng Zheng, Zhi-Min Zhou, Guangtun B. Zhu, Manuela Zoccali, and Hu Zou. Sloan Digital Sky Survey IV : Mapping the Milky Way, Nearby Galaxies, and the Distant Universe. feb 2017.

- [9] Kyle S. Dawson, Jean-Paul Kneib, Will J. Percival, Shadab Alam, Franco D. Albareti, Scott F. Anderson, Eric Armengaud, Eric Aubourg, Stephen Bailey, Julian E. Bautista, Andreas A. Berlind, Matthew A. Bershad, Florian Beutler, Dmitry Bizyaev, Michael R. Blanton, Michael Blomqvist, Adam S. Bolton, Jo Bovy, W. N. Brandt, Jon Brinkmann, Joel R. Brownstein, Etienne Burtin, N. G. Busca, Zheng Cai, Chia-Hsun Chuang, Nicolas Clerc, Johan Comparat, Frances Cope, Rupert A. C. Croft, Irene Cruz-Gonzalez, Luiz N. da Costa, Marie-Claude Cousinou, Jeremy Darling, Axel de la Macorra, Sylvain de la Torre, Timothee Delubac, Helion du Mas des Bourboux, Tom Dwelly, Anne Ealet, Daniel J. Eisenstein, Michael Eracleous, S. Escoffier, Xiaohui Fan, Alexis Finoguenov, Andreu Font-Ribera, Peter Frinchaboy, Patrick Gaulme, Antonis Georgakakis, Paul Green, Hong Guo, Julien Guy, Shirley Ho, Diana Holder, Joe Huehnerhoff, Timothy Hutchinson, Yipeng Jing, Eric Jullo, Vikrant Kamble, Karen Kinemuchi, David Kirkby, Francisco-Shu Kitaura, Mark A. Klaene, Russ R. Laher, Dustin Lang, Pierre Laurent, Jean-Marc Le Goff, Cheng Li, Yu Liang, Marcos Lima, Qiufan Lin, Weipeng Lin, Yen-Ting Lin, Daniel C. Long, Britt Lundgren, Nicholas MacDonald, Marcio Antonio Geimba Maia, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, Vivek Mariappan, Cameron K. McBride, Ian D. McGreer, Brice Menard, Andrea Merloni, Andres Meza, Antonio D. Montero-Dorta, Demitri Muna, Adam D. Myers, Kirpal Nandra, Tracy Naugle, Jeffrey A. Newman, Pasquier Noterdaeme, Peter Nugent, Ricardo Ogando, Matthew D. Olmstead, Audrey Oravetz, Daniel J. Oravetz, Nikhil Padmanabhan, Nathalie Palanque-Delabrouille, Kaike Pan, John K. Parejko, Isabelle Paris, John A. Peacock, Patrick Petitjean, Matthew M. Pieri, Alice Pisani, Francisco Prada, Abhishek Prakash, Anand Raichoor, Beth Reid, James Rich, Jethro Ridl, Sergio Rodriguez-Torres, Aurelio Carnero Rosell, Ashley J. Ross, Graziano Rossi, John Ruan, Mara Salvato, Conor Sayres, Donald P. Schneider, David J. Schlegel, Uros Seljak, Hee-Jong Seo, Branimir Sesar, Sarah Shandera, Yiping Shu, Anze Slosar, Flavia Sobreira, Alina Streblyanska, Nao Suzuki, Charling Tao, Donna Taylor, Jeremy L. Tinker, Rita Tojeiro, Mariana Vargas-Magana, Yuting Wang, Benjamin A. Weaver, David H. Weinberg, Martin White, W. M. Wood-Vasey, Christophe Yèche, Zhongxu Zhai, Cheng Zhao, Gong-bo Zhao, Zheng Zheng, Guangtun Ben Zhu, and Hu Zou. The SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey : Overview and Early Data. aug 2015.
- [10] A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, A. C. Edge, N. C. Hambly, R. F. Jameson, P. Lucas, M. Casali, A. Adamson, S. Dye, J. P. Emerson, S. Foucaud, P. Hewett, P. Hirst, S. T. Hodgkin, M. J. Irwin, N. Lodieu, R. G. McMahon, C. Simpson, I. Smail, D. Mortlock, and M. Folger. The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS). apr 2006.
- [11] D. Christopher Martin, James Fanson, David Schiminovich, Patrick Morrissey, Peter G. Friedman, Tom A. Barlow, Tim Conrow, Robert Grange, Patrick N. Jelinsky, Bruno Milliard, Oswald H. W. Siegmund, Luciana Bianchi, Yong-Ik Byun, Jose Donas, Karl Forster, Timothy M. Heckman, Young-Wook Lee, Barry F. Madore, Roger F. Malina, Susan G. Neff, R. Michael Rich, Todd Small, Alex S. Szalay, and Ted K. Wyder. The Galaxy Evolution Explorer : A Space Ultraviolet Survey Mission. nov 2004.

- [12] Edward L. Wright, Peter R. M. Eisenhardt, Amy Mainzer, Michael E. Ressler, Roc M. Cutri, Thomas Jarrett, J. Davy Kirkpatrick, Deborah Padgett, Robert S. McMillan, Michael Skrutskie, S. A. Stanford, Martin Cohen, Russell G. Walker, John C. Mather, David Leisawitz, Thomas N. Gautier, Ian McLean, Dominic Benford, Carol J. Lonsdale, Andrew Blain, Bryan Mendez, William R. Irace, Valerie Duval, Fengchuan Liu, Don Royer, Ingolf Heinrichsen, Joan Howard, Mark Shannon, Martha Kendall, Amy L. Walsh, Mark Larsen, Joel G. Cardon, Scott Schick, Mark Schwalm, Mohamed Abid, Beth Fabinsky, Larry Naes, and Chao-Wei Tsai. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) : Mission Description and Initial On-orbit Performance. jul 2010.
- [13] N. M. Law, S. R. Kulkarni, R. G. Dekany, E. O. Ofek, R. M. Quimby, P. E. Nugent, J. Surace, C. C. Grillmair, J. S. Bloom, M. M. Kasliwal, L. Bildsten, T. Brown, S. B. Cenko, D. Ciardi, E. Croner, S. G. Djorgovski, J. C. van Eyken, A. V. Filippenko, D. B. Fox, A. Gal-Yam, D. Hale, N. Hamam, G. Helou, J. R. Henning, D. A. Howell, J. Jacobsen, R. Laher, S. Mattingly, D. McKenna, A. Pickles, D. Poznanski, G. Rahmer, A. Rau, W. Rosing, M. Shara, R. Smith, D. Starr, M. Sullivan, V. Velur, R. S. Walters, and J. Zolkower. The Palomar Transient Factory : System Overview, Performance and First Results. jun 2009.
- [14] Robert H. Becker, Richard L. White, and David J. Helfand. The FIRST Survey : Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters. *The Astrophysical Journal*, 450 :559, sep 1995.
- [15] Jo Bovy, Joseph F. Hennawi, David W. Hogg, Adam D. Myers, Jessica A. Kirkpatrick, David J. Schlegel, Nicholas P. Ross, Erin S. Sheldon, Ian D. McGreer, Donald P. Schneider, and Benjamin A. Weaver. Think Outside the Color Box : Probabilistic Target Selection and the SDSS-XDQSO Quasar Targeting Catalog. nov 2010.
- [16] Pierre Laurent, Jean-Marc Le Goff, Etienne Burtin, Jean-Christophe Hamilton, David W. Hogg, Adam Myers, Pierros Ntelis, Isabelle Pâris, James Rich, Eric Aubourg, Julian Bautista, Timothée Delubac, Hélión du Mas des Bourboux, Sarah Eftekharzadeh, Nathalie Palanque Delabrouille, Patrick Petitjean, Graziano Rossi, Donald P. Schneider, and Christophe Yèche. A $14 \text{ h}^{-3} \text{ Gpc}^3$ study of cosmic homogeneity using BOSS DR12 quasar sample. feb 2016.
- [17] M. R. Blanton, R. H. Lupton, F. Miller Maley, N. Young, I. Zehavi, and J. Loveday. An Efficient Algorithm for Positioning Tiles in the Sloan Digital Sky Survey. may 2001.
- [18] James E. Gunn, Walter A. Siegmund, and Edward J. Mannery et Al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. feb 2006.
- [19] Stephen Smee, James E. Gunn, Alan Uomoto, Natalie Roe, David Schlegel, Constance M. Rockosi, Michael A. Carr, French Leger, Kyle S. Dawson, Matthew D. Olmstead, Jon Brinkmann, Russell Owen, Robert H. Barkhouser, Klaus Honscheid, Paul Harding, Dan Long, Robert H. Lupton, Craig Loomis, Lauren Anderson, James Annis, Mariangela Bernardi, Vaishali Bhardwaj, Dmitry Bizyaev, Adam S. Bolton, Howard Brewington, John W. Briggs, Scott Burles, James G. Burns, Francisco Castander, Andrew Connolly, James R. Davenport, Garrett Ebelke, Harland Epps, Paul D. Feldman, Scott Friedman, Joshua Frieman, Timothy Heckman, Charles L. Hull, Gillian R. Knapp, David M. Lawrence, Jon Loveday, Edward J. Mannery, Elena Malanushenko, Viktor Malanushenko, Aronne Merrelli, Demitri Muna, Peter Newman, Robert C. Nichol, Daniel Oravetz, Kaike Pan, Adrian C. Pope, Paul G. Ricketts, Alaina Shelden, Dale Sandford, Walter Siegmund, Audrey Simmons, D. Smith, Stephanie Snedden, Donald P. Schneider, Michael Strauss, Mark SubbaRao, Christy Tremonti, Patrick Waddell, and Donald G. York. The Multi-Object, Fiber-Fed Spectrographs for SDSS and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. aug 2012.

- [20] J. Gunn, M. Carr, C. Rockosi, and M. Sekiguchi. The Sloan Digital Sky Survey Photometric Camera. sep 1998.
- [21] DESI DESI Collaboration, Amir Aghamousa, Jessica Aguilar, Steve Ahlen, Shadab Alam, Lori E. Allen, Carlos Allende Prieto, James Annis, Stephen Bailey, Christophe Balland, Otger Ballester, Charles Baltay, Lucas Beaufore, Chris Bebek, Timothy C. Beers, Eric F. Bell, José Luis Bernal, Robert Besuner, Florian Beutler, Chris Blake, Hannes Bleuler, Michael Blomqvist, Robert Blum, Adam S. Bolton, Cesar Briceno, David Brooks, Joel R. Brownstein, Elizabeth Buckley-Geer, Angela Burden, Etienne Burtin, Nicolas G. Busca, Robert N. Cahn, Yan-Chuan Cai, Laia Cardiel-Sas, Raymond G. Carlberg, Pierre-Henri Carton, Ricard Casas, Francisco J. Castander, Jorge L. Cervantes-Cota, Todd M. Claybaugh, Madeline Close, Carl T. Coker, Shaun Cole, Johan Comparat, Andrew P. Cooper, M. C. Cousinou, Martin Crocce, Jean-Gabriel Cuby, Daniel P. Cunningham, Tamara M. Davis, Kyle S. Dawson, Axel de la Macorra, Juan De Vicente, Timothée Delubac, Mark Derwent, Arjun Dey, Govinda Dhungana, Zhejie Ding, Peter Doel, Yutong T. Duan, Anne Ealet, Jerry Edelstein, Sarah Eftekharzadeh, Daniel J. Eisenstein, Ann Elliott, Stéphanie Escoffier, Matthew Evatt, Parker Fagrelus, Xiaohui Fan, Kevin Fanning, Arya Farahi, Jay Farihi, Ginevra Favole, Yu Feng, Enrique Fernandez, Joseph R. Findlay, Douglas P. Finkbeiner, Michael J. Fitzpatrick, Brenna Flaugher, Samuel Flender, Andreu Font-Ribera, Jaime E. Forero-Romero, Pablo Fosalba, Carlos S. Frenk, Michele Fumagalli, Boris T. Gaensicke, Giuseppe Gallo, Juan Garcia-Bellido, Enrique Gaztanaga, Nicola Pietro Gentile Fusillo, Terry Gerard, Irena Gershkovich, Tommaso Giannantonio, Denis Gillet, Guillermo Gonzalez-de Rivera, Violeta Gonzalez-Perez, Shelby Gott, Or Graur, Gaston Gutierrez, Julien Guy, Salman Habib, Henry Heetderks, Ian Heetderks, Katrin Heitmann, Wojciech A. Hellwing, David A. Herrera, Shirley Ho, Stephen Holland, Klaus Honscheid, Eric Huff, Timothy A. Hutchinson, Dragan Huterer, Ho Seong Hwang, Joseph Maria Illa Laguna, Yuzo Ishikawa, Dianna Jacobs, Niall Jeffrey, Patrick Jelinsky, Elise Jennings, Linhua Jiang, Jorge Jimenez, Jennifer Johnson, Richard Joyce, Eric Jullo, Stéphanie Juneau, Sami Kama, Armin Karcher, Sonia Karkar, Robert Kehoe, Noble Kennamer, Stephen Kent, Martin Kilbinger, Alex G. Kim, David Kirkby, Theodore Kisner, Ellie Kitanidis, Jean-Paul Kneib, Sergey Koposov, Eve Kovacs, Kazuya Koyama, Anthony Kremin, Richard Kron, Luzius Kronig, Andrea Kueter-Young, Cedric G. Lacey, Robin Lafever, Ofer Lahav, Andrew Lambert, Michael Lampton, Martin Landriau, Dustin Lang, Tod R. Lauer, Jean-Marc Le Goff, Laurent Le Guillou, Auguste Le Van Suu, Jae Hyeon Lee, Su-Jeong Lee, Daniela Leitner, Michael Lesser, Michael E. Levi, Benjamin L’Huillier, Baojiu Li, Ming Liang, Huan Lin, Eric Linder, Sarah R. Loebman, Zarija Lukić, Jun Ma, Niall MacCrann, Christophe Magneville, Laleh Makarem, Marc Manera, Christopher J. Manser, Robert Marshall, Paul Martini, Richard Massey, Thomas Matheson, Jeremy McCauley, Patrick McDonald, Ian D. McGreer, Aaron Meisner, Nigel Metcalfe, Timothy N. Miller, Ramon Miquel, John Moustakas, Adam Myers, Milind Naik, Jeffrey A. Newman, Robert C. Nichol, Andrina Nicola, Luiz Nicolati da Costa, Jundan Nie, Gustavo Niz, Peder Norberg, Brian Nord, Dara Norman, Peter Nugent, Thomas O’Brien, Minji Oh, Knut A. G. Olsen, Cristobal Padilla, Hamsa Padmanabhan, Nikhil Padmanabhan, Nathalie Palanque-Delabrouille, Antonella Palmese, Daniel Pappalardo, Isabelle Pâris, Changbom Park, Anna Patej, John A. Peacock, Hiranya V. Peiris, Xiyan Peng, Will J. Percival, Sandrine Perruchot, Matthew M. Pieri, Richard Pogge, Jennifer E. Pollack, Claire Poppett, Francisco Prada, Abhishek Prakash, Ronald G. Probst, David Rabinowitz, Anand Raichoor, Chang Hee Ree, Alexandre Refregier, Xavier Regal, Beth Reid, Kevin Reil, Mehdi Rezaie, Constance M. Rockosi, Natalie Roe, Samuel Ronayette, Aaron Roodman, Ashley J. Ross, Nicholas P. Ross, Graziano Rossi, Eduardo

Rozo, Vanina Ruhlmann-Kleider, Eli S. Rykoff, Cristiano Sabiu, Lado Samushia, Eusebio Sanchez, Javier Sanchez, David J. Schlegel, Michael Schneider, Michael Schubnell, Aurélia Secroun, Uros Seljak, Hee-Jong Seo, Santiago Serrano, Arman Shafieloo, Huanyuan Shan, Ray Sharples, Michael J. Sholl, William V. Shourt, Joseph H. Silber, David R. Silva, Martin M. Sirk, Anze Slosar, Alex Smith, George F. Smoot, Debopam Som, Yong-Seon Song, David Sprayberry, Ryan Staten, Andy Stefanik, Gregory Tarle, Suk Sien Tie, Jeremy L. Tinker, Rita Tojeiro, Francisco Valdes, Octavio Valenzuela, Monica Valluri, Mariana Vargas-Magana, Licia Verde, Alistair R. Walker, Jiali Wang, Yuting Wang, Benjamin A. Weaver, Curtis Weaverdyck, Risa H. Wechsler, David H. Weinberg, Martin White, Qian Yang, Christophe Yèche, Tianmeng Zhang, Gong-Bo Zhao, Yi Zheng, Xu Zhou, Zhimin Zhou, Yaling Zhu, Hu Zou, and Ying Zu. The DESI Experiment Part I : Science, Targeting, and Survey Design. oct 2016.