



Université Claude Bernard



Lyon 1

THÈSE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON
Opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

École Doctorale ED52
École Doctorale de Physique et Astrophysique

Spécialité de doctorat : Physique
Discipline : Cosmologie Observationnelle

Soutenue publiquement le jj/mm/aaaa, par :

Jérémy LEZMY

**Extraction de spectres de Supernovae
par modélisation HyperSpectrale des galaxies hôtes**

Devant le jury composé de :

M./Mme. XXX XXX	Président-e
M./Mme. XXX XXX	Rapporteur-e
M./Mme. XXX XXX	Rapporteur
M./Mme. XXX XXX	Examinateur-ice
M./Mme. XXX XXX	Directeur de thèse
M./Mme. XXX XXX	Co-Directeur de thèse
M./Mme. XXX XXX	Invitæ

Remerciements

Résumé

Abstract

Table des matières

Introduction générale	15
I : Contexte Scientifique	19
1 Contexte cosmologique	21
1.1 Bases de relativité générale	23
1.1.1 Concepts initiaux	23
1.1.2 Métrique et équations de conservation	23
1.1.3 Définition de la constante cosmologique	23
1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie	23
1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope	23
1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	23
1.2.3 Le modèle Λ CDM	23
1.3 Mesures cosmologiques et distance	23
1.3.1 Âge de l'Univers	23
1.3.2 Distance de luminosité	23
1.3.3 De la télémétrie aux Supernovae : Calibration	23
1.4 Supernovae et Cosmologie	23
1.4.1 Chandelles Standards	23
1.4.2 Physique de l'explosion	23
1.4.3 Spectre et classification	23
2 Zwicky Transient Facility	25
2.1 Présentation de la collaboration	26
2.2 La caméra de ZTF	29
2.3 Observation des Supernovae Ia avec ZTF	30
3 Un spectrographe 3D : La Spectral Energy Distribution machine	33
3.1 Présentation de l'instrument	34
3.1.1 Principe d'un IFS	34
3.1.2 La SEDm	35
3.2 Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données	35
3.3 Actuelle méthode d'extraction de spectre	35
3.4 SEDm en quelques chiffres	35
II : Extraction de spectre de Supernovae	39
4 HyperGal : Une nouvelle méthode d'extraction de source ponctuelle	41

4.1	Idée générale	42
4.2	SED Fitting	42
4.3	Présentation du Pipeline	42
5	Modélisation Hyperspectrale	43
5.1	Source photométrique : PS1	44
5.1.1	Présentation du survey	44
5.1.2	Utilisation des images PS1	44
5.2	Cigale et SEDFitting	44
5.2.1	Présentation de Cigale	44
5.2.2	Utilisation	44
5.3	Construction du cube intrinsèque	44
5.3.1	Sampling des spectres dans l'espace SEDm	44
5.3.2	Construction du cube	44
6	Réponse impulsionale de la SEDm	45
6.1	LSF	46
6.1.1	Lampe à arc	46
6.1.2	Détermination de la LSF	46
6.2	PSF	46
6.2.1	Modèle de profil radial	46
6.2.2	Entrainement du modèle	46
6.2.3	Chromaticité et ADR	46
6.3	Validation	46
6.3.1	Calibration photométrique	46
6.3.2	Résultats	46
7	Modélisation de Scène et Extraction de Source	47
7.1	Projection du cube intrinsèque	48
7.1.1	Seeing relatif Panstarrs/SEDm	48
7.1.2	Projection spatiale dans l'espace SEDm	48
7.2	Modélisation de Scène	48
7.2.1	Composante du fond : ciel et artefacts	48
7.2.2	Composante du point source : Supernova	48
7.2.3	Fitting de la scene	48
7.3	Extraction du point source	48
7.3.1	Outputs de contrôle du pipeline	48
7.3.2	Isolation de la galaxie hôte	48
7.3.3	Isolation de la Supernova	48
7.4	Classification : SNID	48
III : Simulations et Résultats		49
8	Simulations de cubes de données et application d'HyperGal	51
8.1	Génération des simulations	52
8.1.1	Cube de galaxies isolées	52

8.1.2	Modèles de Supernovae	52
8.1.3	Marginalisations	52
8.1.4	Paramètres libres d'étude : Distance et contraste	52
8.2	Résultats et Précision	52
8.2.1	Précision spectrophotométrique	52
8.2.2	Précision avec correction de continuum	52
8.2.3	Efficacité de classification	52
9	Data Release 2 de ZTF	53
9.1	Présentation de la DR2 de ZTF	54
9.2	Production d' HYPERGAL et résultats	54
9.2.1	Classification et détermination de l'échantillon DR2-Cosmo	54
9.2.2	Premiers résultats	54
9.2.3	Des SNeIa à la cosmologie : H_0 , w et $f\sigma_8$	55
Conclusions & perspectives		55

Table des figures

2.1	Télescope Samuel Oshin P48 au Mont Palomar	26
2.2	Observatoire de Palomar	28
2.3	Système d'imagerie ZTF et caméra	29
2.4	Champ de vue de la caméra ZTF comparé à celui d'autres relevés astronomiques	30
2.5	Filtres et performances associées de la caméra ZTF	31
2.6	Nombre cumulé de SNIa observés par ZTF (phase 1)	32
3.1	Fonctionnement d'un IFS	35
3.2	SEDm Overview	36
9.1	Paramètres SALT2 de stretch et couleur pour la DR2 de ZTF	54
9.2	Correlation entre les paramètres SALT2 de stretch et couleur (ZTF-DR2) .	55

Liste des tableaux

Introduction générale

Première partie

Contexte Scientifique

Contexte cosmologique

Et la scène disparaît pour devenir
l'actrice

Person NAME, *Doctor Who S13E08*

Bien que la cosmologie ne s'en tienne pas aux concepts récents tels qu'on les connaît et les vulgarise, c'est avec les travaux d'EINSTEIN au début du XX^e siècle que notre compréhension du monde cosmique prend son essor.

Sommaire

1.1	Bases de relativité générale	23
1.1.1	Concepts initiaux	23
1.1.2	Métrique et équations de conservation	23
1.1.3	Définition de la constante cosmologique	23
1.2	Introduction du modèle standard de la cosmologie	23
1.2.1	Univers plat, homogène et isotrope	23
1.2.2	Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker	23
1.2.3	Le modèle Λ CDM	23
1.3	Mesures cosmologiques et distance	23
1.3.1	Âge de l'Univers	23
1.3.2	Distance de luminosité	23
1.3.3	De la télémétrie aux Supernovae : Calibration	23
1.4	Supernovae et Cosmologie	23
1.4.1	Chandelles Standards	23
1.4.2	Physique de l'explosion	23
1.4.3	Spectre et classification	23

- 1) RG
- 2) Métrique
- 3) Constante cosmo
- 4) Univers Homogène et isotrope
- 5) Courbure
- 6) Expansion

- 7) Paramètres cosmologiques
- 8) Modèle standard
- 9) Distance de luminosité
- 10) Intérêt SNe

1.1 Bases de relativité générale

1.1.1 Concepts initiaux

1.1.2 Métrique et équations de conservation

1.1.3 Définition de la constante cosmologique

1.2 Introduction du modèle standard de la cosmologie

1.2.1 Univers plat, homogène et isotrope

Univers plat Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.2.2 Métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker

1.2.3 Le modèle Λ CDM

1.3 Mesures cosmologiques et distance

1.3.1 Âge de l'Univers

1.3.2 Distance de luminosité

1.3.3 De la télémétrie aux Supernovae : Calibration

1.4 Supernovae et Cosmologie

1.4.1 Chandelles Standards

1.4.2 Physique de l'explosion

1.4.3 Spectre et classification

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a

nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

Nulla malesuada porttitor diam. Donec felis erat, congue non, volutpat at, tincidunt tristique, libero. Vivamus viverra fermentum felis. Donec nonummy pellentesque ante. Phasellus adipiscing semper elit. Proin fermentum massa ac quam. Sed diam turpis, molestie vitae, placerat a, molestie nec, leo. Maecenas lacinia. Nam ipsum ligula, eleifend at, accumsan nec, suscipit a, ipsum. Morbi blandit ligula feugiat magna. Nunc eleifend consequat lorem. Sed lacinia nulla vitae enim. Pellentesque tincidunt purus vel magna. Integer non enim. Praesent euismod nunc eu purus. Donec bibendum quam in tellus. Nullam cursus pulvinar lectus. Donec et mi. Nam vulputate metus eu enim. Vestibulum pellentesque felis eu massa.

Quisque ullamcorper placerat ipsum. Cras nibh. Morbi vel justo vitae lacus tincidunt ultrices. Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. In hac habitasse platea dictumst. Integer tempus convallis augue. Etiam facilisis. Nunc elementum fermentum wisi. Aenean placerat. Ut imperdiet, enim sed gravida sollicitudin, felis odio placerat quam, ac pulvinar elit purus eget enim. Nunc vitae tortor. Proin tempus nibh sit amet nisl. Vivamus quis tortor vitae risus porta vehicula.

Zwicky Transient Facility

Sommaire

2.1	Présentation de la collaboration	26
2.2	La caméra de ZTF	29
2.3	Observation des Supernovae Ia avec ZTF	30

Nous avons vu dans le chapitre précédent les propriétés de sonde cosmologique dont sont dotées les Supernovae de type Ia. Par ailleurs, nous avons également mis en évidence l'importance de la classification de ces objets notamment par le biais d'une acquisition spectrale. Afin d'arriver à cet objectif, la première étape est de détecter ces événements transitoires. Dans ce chapitre nous présenterons la collaboration Zwicky Transient Facility (ZTF par la suite), où la recherche et l'étude de tels objets sont au centre des activités. Nous nous focaliserons particulièrement ici sur la section photométrique de ZTF. Nous commencerons par présenter la collaboration et les raisons de sa mise en place, puis nous rentrerons dans plus de technicité en présentant la caméra principale de ZTF et ses capacités photométriques. Enfin nous parlerons des enjeux cosmologiques et finirons avec quelques résultats depuis la mise en place de ce grand relevé astronomique.

2.1 Presentation de la collaboration

ZTF ([Graham et al. \(2019\)](#) and [Bellm et al. \(2019\)](#)) est un grand relevé astronomique dont la première lumière fut obtenue en Novembre 2017, et réellement actif depuis Mars 2018. Ayant achevé la phase 1 en Novembre 2020, ZTF est actuellement à mi-chemin de sa phase 2 qui s'étend de Décembre 2020 à Décembre 2023. Il succède au relevé Intermediate Palomar Transient Factory (IPTF, 2012-2017), lui-même précurseur de Palomar Transient Facility (PTF, 2009-2012) ([Rau et al. \(2009\)](#) et [Law et al. \(2009\)](#)). Ces trois relevés grand champs utilisent le télescope Samuel Oschin (48 pouces $\approx 1m22$) à l'Observatoire de Palomar en Californie (Fig. 2.1). D'une caméra avec un champ de vue de 7.9deg^2 pour PTF, ZTF utilise à présent pleinement le plan focal du télescope et bénéficie d'une nouvelle caméra offrant un champ de vue de 47deg^2 , équipé de 3 filtres g , r et i . La collaboration est également doté d'un spectrographe 3D basse résolution ($R \approx 100$) monté sur le P48 à Palomar, qui est utilisé pour suivre les transients détectés par la caméra principale.

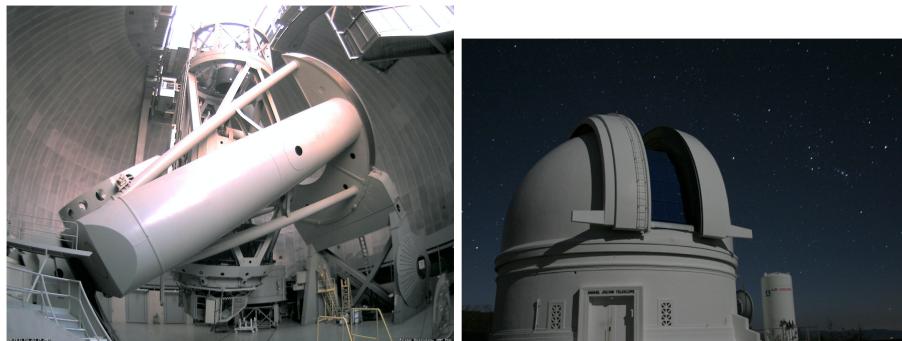


FIGURE 2.1 – Télescope Samuel Oshin P48 au Mont Palomar

ZTF est une collaboration internationale financée entre la US National Science Foundation (NSF) à travers le programme Mid-scale Innovations Program (MSIP), et un grand nombre de consortium internationaux d'Universités et institutions :

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • IN2P3 ¹. • TANGO University System of Taiwan • Weizmann Institute of Science, Israel • Oskar Klein Center, University of Stockholm, Sweden • DESY/Humboldt University of Berlin, Germany • Ruhr University Bochum, Germany | <ul style="list-style-type: none"> • University of Warwick, UK • Trinity College Dublin, Ireland • University of Maryland, College Park • Northwestern University • University of Wisconsin, Milwaukee • Lawrence Livermore National Laboratory • Caltech/IPAC |
|--|---|

ZTF est ainsi un partenariat privé-public, où son temps d'observation est divisé par chaque phase du projet entre trois niveaux :

Lors de la phase 1, le temps d'allocation public (NSF) était de 40%, pour les partenariats privés de 40% également, et les 20 derniers % dédiée aux programmes de Caltech qui possèdent l'Observatoire du Mont Palomar.

¹. Institut national de physique nucléaire et de physique des particules

L'IN2P3 étant devenu un partenaire majeur de la collaboration, la phase 2 de ZTF a vu un rééquilibrage avec 50% du temps d'observation attribué au programme MSIP, et 30% aux partenaires privés.

Durant le temps d'observation public, ZTF effectue deux sondages distincts : le ciel Nord d'une part qui est entièrement scanné tous les trois jours dans les filtres g et r , et le plan Galactique d'autre part, qui lui est entièrement observé chaque nuit également dans les filtres g et r .

Ces deux sondages combinés mènent à la détection et la génération d'alertes automatiques de plus d'un million d'événements par nuit. Ces événements sont des phénomènes astrophysiques transitoires ou variables, dont la magnitude de détection est inférieure à $r \approx 20.5$.

Les sections de recherches scientifiques au sein de ZTF sont nombreuses :

- L'étude des AGN & TDEs :

Les AGN sont les Active Galactic Nuclei, des trous noirs supermassifs qui accrètent de la matière du reste de la galaxie. Les TDEs, ou Tidal Disruption Events, correspondent à des phénomènes extrêmement lumineux résultants de cette accrétion de matière.

- L'étude des Supernovae comme sonde cosmologique

Utiliser leur caractéristique de chandelle standardisable pour effectuer des mesures précises de distance dans l'Univers proche. Avant 2018, seulement ≈ 500 de ces événements ont été observés dans l'Univers proche. En 3 ans ZTF a déterminé près de 3000 distances de ces événements.

- Physique des Supernovae

Indépendamment de leur type, de nombreux mystères demeurent sur la physique même de l'explosion des Supernovae. ZTF permet d'obtenir un échantillon unique de plusieurs milliers de Supernovae tout type confondu qui permet à l'équipe Bright Transient Survey (BTS) d'obtenir des mesures non-biaisées de taux de Supernovae, de fonctions de luminosité, de propriétés de galaxies hôte etc.

- Voie Lactée et M31

Avec l'observation de plusieurs millions d'étoiles chaque nuit, tout un pôle d'étude s'est formé autour des objets internes à notre galaxie, mais également dans la galaxie voisine M31, aka Andromède. Cet échantillon gigantesque est utilisé pour étudier les naines blanches dont la luminosité varie périodiquement, d'autres avec des débris transitoires, les systèmes binaires avec émission de rayons-X, et de nombreux autres objets stellaires.

- L'Astrophysique Multimessager

Cette toute nouvelle branche a vu le jour notamment grâce aux premières détections d'ondes gravitationnelles ou de neutrinos. De tels phénomènes sont habituellement grossièrement localisés avec la détection de ce type de signal, ce qui rend difficile l'identification de la source. Avec son champ de vue extrêmement large et sa haute

cadence, ZTF est capable de compléter la détection primaire avec une observation photométrique aux prémisses de l'évènement, si une contrepartie électromagnétique existe.

- Corps au sein du système Solaire

Ce groupe se concentre sur la découverte et la caractérisation des petits corps au sein de notre système solaire, à savoir des astéroïdes, des comètes etc.

La répartition du temps d'observation pour ces différents champs de recherches est adaptée de la façon suivante :

- ◊ L'étude des corps au sein du système solaire se fait principalement durant l'aube et l'aurore (3.5% du ciel pour chaque et principalement en bande r).
- ◊ L'étude de la physique des Supernovae bénéficie d'une observation haute cadence de $\approx 1800\text{deg}^2$, ce qui correspond à une allocation de 15% du temps d'observation.
- ◊ $\approx 8\%$ sont attribués à la Cosmologie dans le ciel extra-galactique.
- ◊ Le groupe Galaxie Science observe la Voie Lactée principalement en été ($\approx 5\%$, toutes bandes confondus).
- ◊ Le groupe Astrophysique multi-messager peut observer et étudier de potentiels sources pour $\approx 5\%$ du temps (toutes bandes confondus)

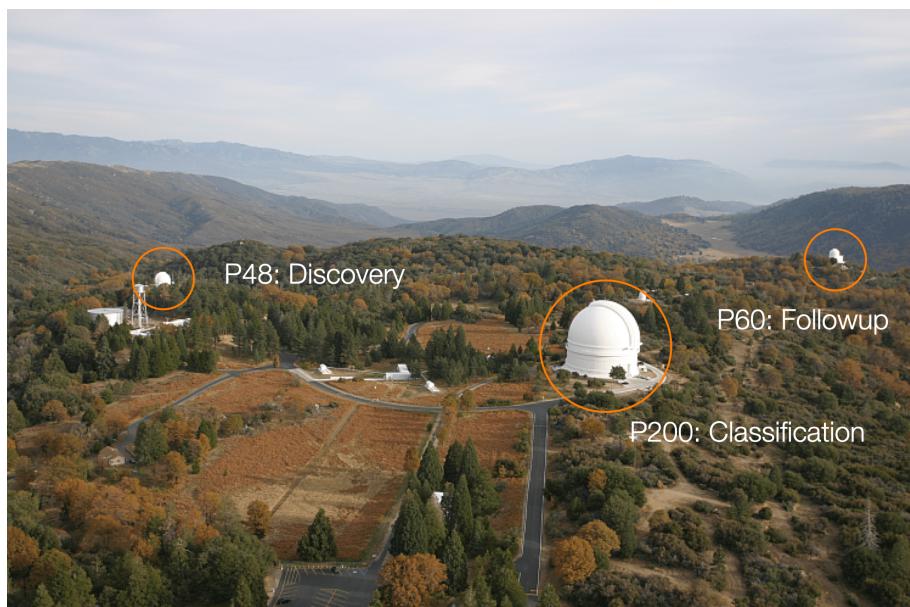
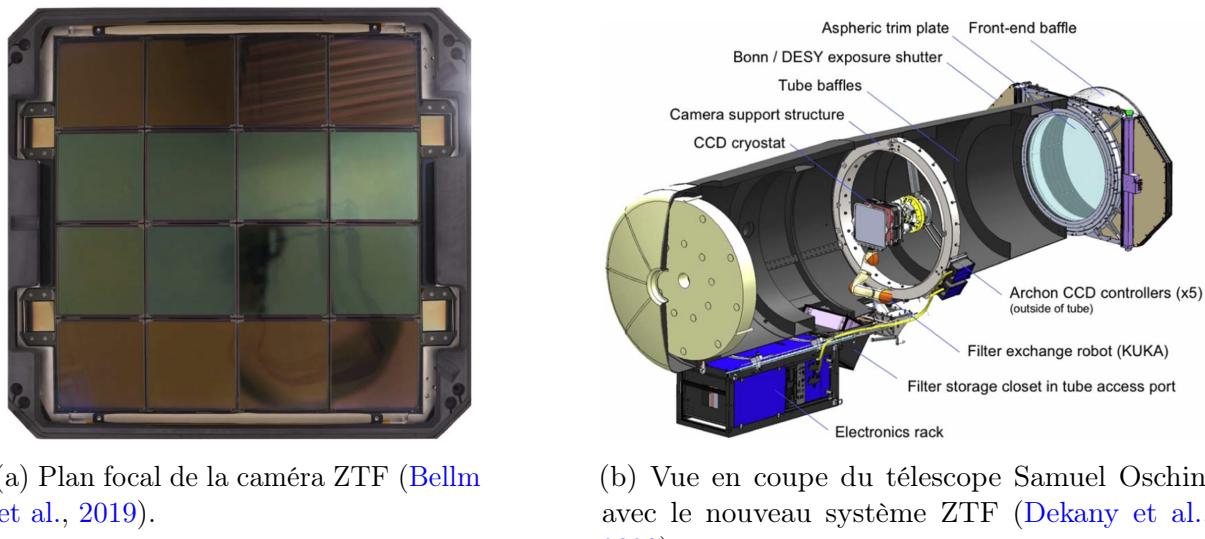


FIGURE 2.2 – Observatoire de Palomar, en Californie. Sur la gauche est située la caméra principale de ZTF, attachée au télescope P48 Samuel Oschi. En haut à droite nous avons le P60, sur lequel est monté le spectrographe 3D SEDm appartenant également à la collaboration ZTF. Le P200 est quant à lui utiliser par de nombreuses collaborations, et est utilisé occasionnellement par ZTF.

2.2 La caméra de ZTF

La nouvelle configuration de ZTF vis à vis de ses prédecesseurs PTF/iPTF est principalement due à sa caméra de 47deg^2 , profitant de l'intégralité du plan focal du télescope Schmidt P48.

Comme illustré dans la Fig. 2.3a de Bellm et al. (2019), la caméra est constituée d'une mosaïque de 16 CCD (Charge Coupled Device) composés de pixels carrés de $15\text{ }\mu\text{m}$ de côté, à une échelle de $1'01\text{ pixel}^{-1}$. Chaque CCD est composé de 6144×6160 pixels, et la caméra dans son ensemble a donc 573 Mpx. La FWHM mediane de la fonction d'étalement du point (PSF) résultant de cette configuration est de $2''1$ dans les bandes *g* et *i*, et de $2''0$ dans la bande *r*. En ce qui concerne la limite en magnitude, la bande *g* montre un seuil median à 5σ de 20.8mag, la bande *r* de 20.6mag et la bande *i* 19.9mag.



(a) Plan focal de la caméra ZTF (Bellm et al., 2019).

(b) Vue en coupe du télescope Samuel Oschin avec le nouveau système ZTF (Dekany et al., 2020).

FIGURE 2.3 – Description du système d'imagerie de ZTF (*à droite*) et présentation du plan focal de la caméra et ses 16 CCD (*à gauche*).

Le temps de pose utilisé avec cette caméra est de 30s, et la vitesse de lecture de seulement 8s. Entre le champ de vue de 47deg^2 et cette haute cadence d'acquisition, ZTF est capable de scanner près de $3750\text{deg}^2/\text{heure}$. Sachant que tout au long de l'année il y a en moyenne 6h de ciel noir par nuit au Mont Palomar, ZTF est ainsi capable d'observer l'entièreté du ciel visible plus d'une fois par nuit. Pour donner un autre ordre d'idée, ZTF serait ainsi capable de reproduire le relevé POSS (Minkowski & Abell, 1963) en 2 nuits.

Bien évidemment, un tel flux de données nécessite une infrastructure de traitement adéquate. Celle ci, appelée ZTF Science Data System (ZSDS) est hébergée à l'IPAC¹ (Masci et al., 2019). Ce système comprend le traitement des données, l'infrastructure d'émission d'alertes, le système d'interface utilisateur pour l'accès et l'analyse des résultats. Ce pipeline (exécuté en temps réel) utilise un algorithme de différentiation d'image, optimisé pour la détection de point source variable ou transitoire. Une fois l'événement confirmé, une alerte est générée et en générale déployée dans le quart d'heure qui suit.

1. Infrared Processing & Analysis Center : <https://www.ipac.caltech.edu>

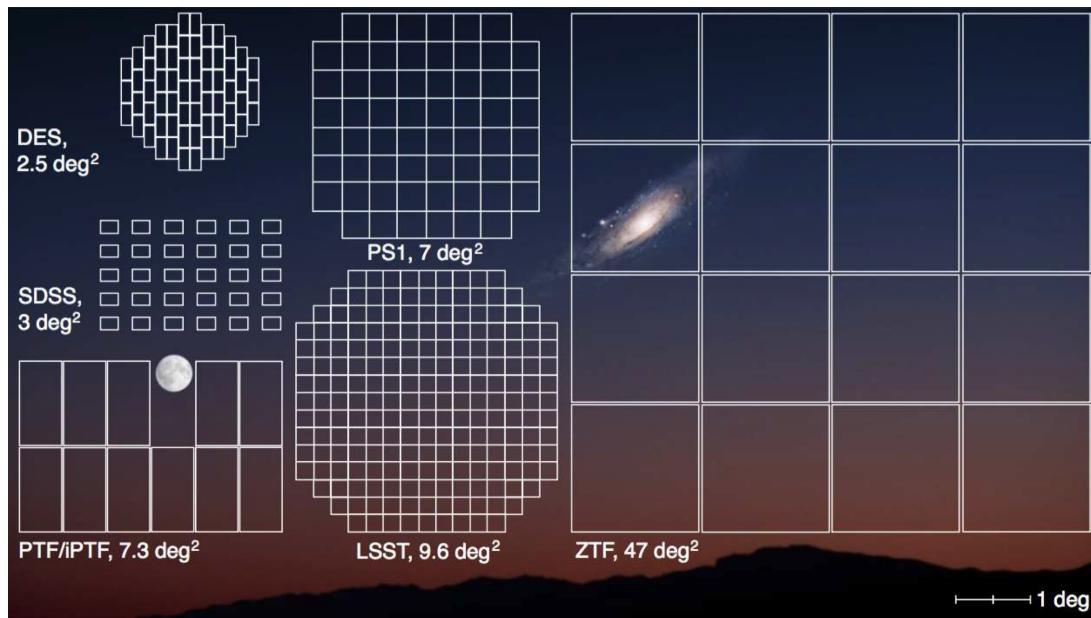


FIGURE 2.4 – Champ de vue de la caméra ZTF comparé à celui d’autres relevés astronomiques

La distribution de ce flux d’alertes utilise des technologies dont le code source est public développées en industries : Apache Kafka¹ qui fourni un système unifié en temps réel à latence faible pour la manipulation de flux de données, et Avro² qui est un framework de sérialisation de données. Les ordres de grandeurs de la quantité de données à manipuler sont impressionnantes : Ce système gère avec succès un flux d’environ 1,2 millions d’alertes ~ 70 GB de données par nuit. La vitesse de transfert est d’environ 80,000 alertes/minute. Plus de détails sur le système de distribution d’alertes sont apportés dans Patterson et al. (2019). On notera que le framework Avro sera celui utilisé pour LSST.

Seules les alertes provenant des observations liées au programme MSIP sont rendues public immédiatement. Les images en revanches (brut, calibrées et produits de données associés) deviennent disponibles 6 à 12 mois après l’observation pour la Phase 1 de ZTF, et entre 3 et 6 mois pour la Phase 2. Les données d’observation ayant pour origine les programmes privés et de Caltech sont disponibles après environ 12 à 18 mois. Lors de l’écriture de ces lignes en Avril 2022, la DataRelease³ 10 est public, ce qui correspond à toutes les observations MSIP de Mars 2018 au 5 Novembre 2021, et celles privées et de Caltech jusqu’au 5 Juillet 2020.

2.3 Observation des Supernovae Ia avec ZTF

Nous allons à présent nous focaliser sur l’observation des Supernovae de type Ia avec ZTF.

Les événements transitoires nécessitant d’être filtrés parmi toutes les alertes reportées

1. <https://kafka.apache.org>

2. <https://avro.apache.org>

3. <https://www.ztf.caltech.edu/ztf-public-releases.html>

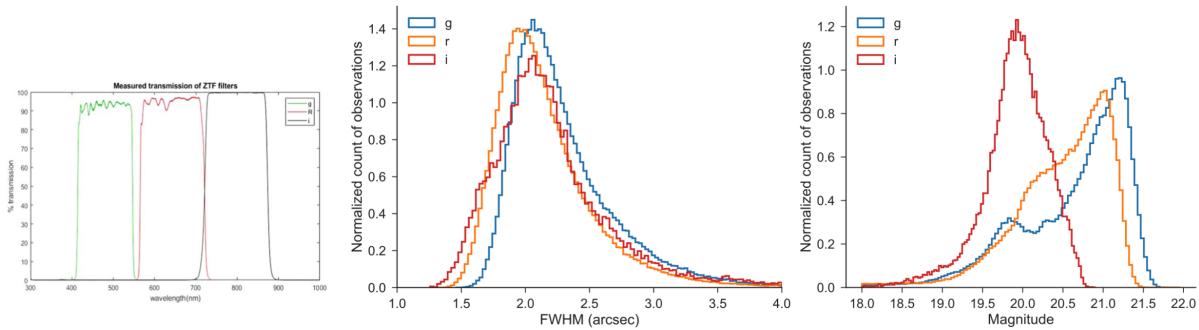


FIGURE 2.5 – Transmission des filtres g , r et i de la caméra de ZTF (Dekany et al., 2020) à gauche. Au centre histogramme normalisé de la largeur à mi-hauteur (FWHM) de la fonction d'étalement de point (PSF) pour chaque filtre durant le mois de Juin 2018 (Bellm et al., 2019). Enfin à droite est représenté l'histogramme à 5σ des magnitudes limites avec un temps de pose de 30s pour chaque filtre sur une période d'une lunaison.

par ZTF, Nordin et al. (2019) a élaboré le système **AMPEL**¹ afin d'automatiquement filtrer les détections de ZTF et établir les courbes de luminosité associés aux événements retenus.

Sur les $\sim 10^5$ alertes par nuit (ce qui correspond environ à 10% de ce qui est attendu pour LSST), la majorité ($\sim 90\%$) d'entre elles sont filtrés comme étant des artefacts, des étoiles variables, des satellites ou encore des objets du système solaire. In fine, "seulement" $\mathcal{O}(10)$ sont de nouvelles Supernovae qui doivent être identifiées et classifiées. Entre 70 et 80% d'entre elles s'avèrent être de type Ia, dont la moitié atteignent le seuil de magnitude de ZTF permettant d'établir une courbe de lumière exploitable.

La 1^{re} data release dédiée au sondage des Supernovae de type Ia avec ZTF a été publiée et décrite par Dhawan et al. (2022) très récemment. Au stade de cette DR1, ce qui correspond à un peu plus de 2 ans et demi d'observations (Mars 2018-Novembre 2020), ZTF a déjà répertorié plus de 3000 SNIa. La profondeur en magnitude atteind 20.8, 20.6, 20.3 mag dans les bandes g r , et i respectivement, ce qui correspond à un redshift $z \lesssim 0.1$. L'échantillon est complet à 100% en terme de classification en deça de $m_{peak} = 16.5$ mag, à 93.6% en deça de $m_{peak} = 18.5$ mag et 88.8% à $m_{peak} = 19.0$ mag (Fremling et al., 2020). Cette classification est rendue possible grâce à la combinaison de la caméra de ZTF et du spectrographe 3D monté sur le P60, la Spectral Energy Distribution machine (SEDm), qui est optimisé pour la classification des SNe jusqu'à $m \approx 19$ mag. Nous détaillerons cet instrument dans le chapitre suivant. La DR1 présente ainsi un échantillon de 761 Supernovae classifiées spectralement avec un redshift median de $\bar{z} = 0.057$, incluant 547 SNeIa, 155 SNeII, 40 SNeIb/c et 19 SLSNe. La Figure 2.6 (Rigault et al DR2 in prep) met en évidence la croissance de l'échantillon de SNeIa observées durant la phase 1 de ZTF, qui constituera la 2^e Data Release de ZTF-Cosmo consacrée aux Supernovae de type Ia. Sur les ≈ 3700 SNeIa classifiées spectralement, près de 3000 entrent dans la catégorie *échantillon dorée*, ce qui signifie qu'elles remplissent les critères dit de qualité cosmologiques pour leur courbe de luminosité vis à vis de l'algorithme SALT2 qui en dérive les paramètres de couleur et de stretch. Ces critères, basés sur l'intervalle de phase $[-15, 30]$ jours où SALT2 est le mieux définie, sont les suivants :

- ◊ Seulement les détections photométriques à 5σ sont considérées

1. <https://github.com/AmpelProject/Ampel-contrib-sample>

- ◊ Au moins 7 points avec le maximum dans au moins 2 bandes
- ◊ Au moins 7 points après le maximum dans au moins 2 bandes

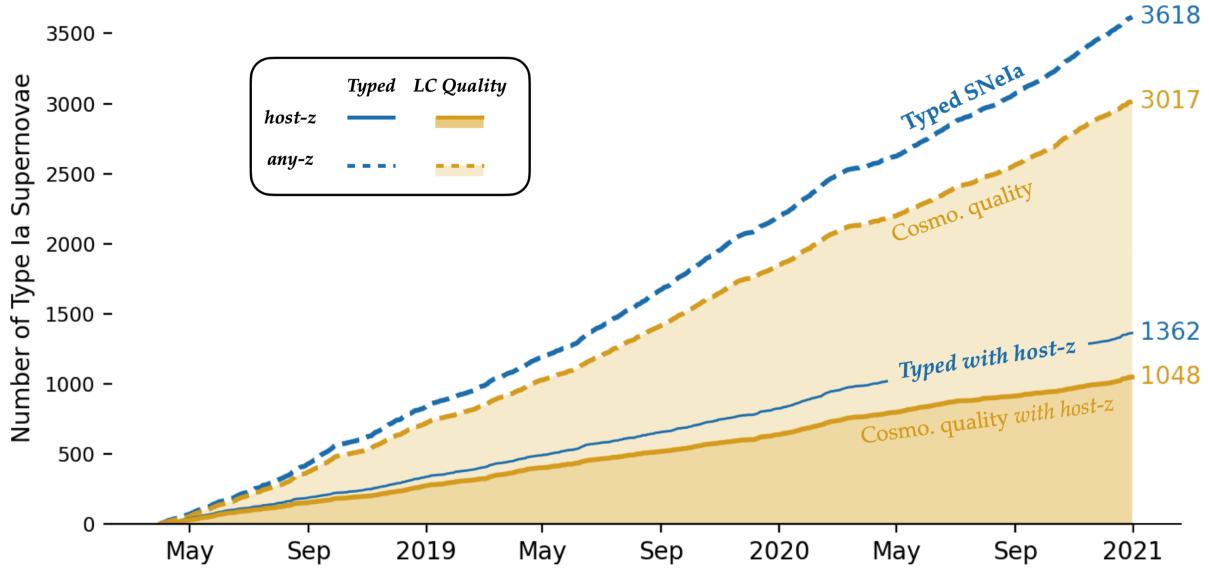


FIGURE 2.6 – Nombre cumulé de SNIa observés par ZTF (phase 1). Les contours dorés correspondent à l'échantillon passant les critères de coupure pour une qualité cosmologique. Le trait plein montre les SN avec un redshift spectroscopique de leur galaxie hôte. À titre de comparaison, le set de données le plus récent dans la littérature cosmologique comptabilise moins de 500 SNIa à un redshift de $z < 0.1$

Environ 40% de ces Supernovae possèdent un redshift spectral de leur galaxie hôte (majoritairement des relevés SDSS). 50% proviennent des caractéristiques des spectres des supernovae elles mêmes, et 10% de raies d'émissions de la galaxie hôte ayant contaminées le spectre de la SNIa. Il est à noté que pour les 2 derniers points, la précision n'est que de l'ordre de 5%, insuffisant pour la cosmologie. Cependant, plus de 95% des galaxies hôtes ont une magnitude supérieure à 20 mag, ce qui signifie que d'autres relevés (comme par exemple DESI) pourraient à posteriori mesurer et fournir les redshift manquant.

ZTF a donc montré sa capacité à débusquer et classifier pas moins de 1000 Supernovae de type Ia par an, très loin devant l'actuel (ancien) leader à bas redshift Pantheon ([Scolnic et al., 2018](#)) avec 1048 SNeIa sur les 20 dernières années, dont seulement 210 à un redshift $z < 0.1$. Leur plus récente publication (Pantheon+ [Scolnic et al. \(2021\)](#)) fait état de 1550 SNeIa, dont 389 à $z < 0.1$.

Nous parlerons dans le dernier chapitre de ce manuscrit de la nouvelle Data Release 2 en cours d'étude, des premiers résultats obtenus sur les courbes de lumières ainsi que des ouvertures sur la dérivation de paramètres cosmologiques. Rappelons que tout cela se base sur la capacité, certes, à détecter les Supernovae grâce à la caméra ZTF, mais également à leur classification. Cette étape a été peu détaillée dans ce chapitre mais est cruciale pour éviter toute contamination des échantillons de SNeIa, induisant des biais dans la dérivation des paramètres cosmologiques ([Jones et al., 2017](#)). Comme nous l'avons mentionné au tout début de la Section 2.1, cette classification se fait grâce à un spectrographe 3D monté sur le télescope P60. Le chapitre suivant est tout naturellement dédiée à la présentation de cet instrument.

Un spectrographe 3D : La Spectral Energy Distribution machine

Sommaire

3.1	Présentation de l'instrument	34
3.1.1	Principe d'un IFS	34
3.1.2	La SEDm	35
3.2	Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données . .	35
3.3	Actuelle méthode d'extraction de spectre	35
3.4	SEDm en quelques chiffres	35

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté la collaboration Zwicky Transient Facility et nous nous sommes focalisés sur la caméra principale de 47deg^2 montée sur le P48 au Mont Palomar. Cette caméra permet à ZTF de détecter 10^5 événements transitoires ou variables, en scannant l'entièreté du ciel Nord visible chaque nuit, à la vitesse vertigineuse de $3760\text{deg}^2/\text{heure}$. Parmi ces événements, $\mathcal{O}(10)$ correspondent à de nouveaux événements transitoires non répertoriés : Les Supernovae. Comme expliqué dans le Chapitre 1.4, seules les Supernovae de type Ia sont d'intérêts dans la cosmologie, de part leur propriété de chandelle standardisable. Il faut donc les classifier. Pour cela, on utilise leur spectre, dont les raies d'absorption/émission sont caractéristiques d'un type à l'autre de SN. Ainsi, ZTF possède également un spectrographe 3D monté sur le télescope P60 au Mont Palomar (Figure 2.2) spécialement conçu à cet effet. Nous présentons dans ce chapitre ce spectrographe, la Spectral Energy Distribution machine (SEDm).

3.1 Présentation de l'instrument

3.1.1 Principe d'un IFS

Le spectrographe 3D SEDm est ce qu'on appelle un IFS pour Integral Field Spectrograph. Sans surprise, c'est un instrument qui permet de recueillir le spectre du ciel sur un champ de vue bidimensionnel. Ainsi et indépendamment de la méthode utilisée, le produit final avec cet instrument correspond à un cube de données ayant 2 dimensions spatiales ((x, y) ou (RA, Dec)) et une dimension spectrale (longueur d'onde λ ou une vitesse).

Un IFS est composé de 2 parties : le spectrographe qui va disperser la lumière incidente, et l'IFU (Integrated Field Unit). Le rôle de l'IFU est de diviser le plan spatial 2D du champ de vue en réseau continu et concentré de lumière. Ce réseau est ensuite donné en entrée au spectrographe qui va se charger de le disperser sur le détecteur.

Il existe 3 types principaux d'IFU, schématisés dans la Figure 3.1.

- **Le réseau de micro-lentilles** conceptualisé par [Bacon et al. \(1995\)](#) (qui s'apparente aux yeux composites de certains insectes) : C'est le système utilisé par la SEDm, mais également par l'IFS SAURON ([Bacon et al., 2001](#)) dans le projet ATLAS3D ([Cappellari et al., 2011](#)) ou encore SNIFS ([Lantz et al., 2004](#)). Dans ce système, l'image bi-dimensionnelle est fractionnée par un réseau de micro-lentilles (le MLA, microlens array). Chaque élément est ensuite concentré et dispersé par le spectrographe (voir Figure 3.1). Pour éviter au maximum le chevauchement des spectres sur le détecteur, le réseau de lentille est légèrement incliné. Le désavantage principal de cette technique est le court intervalle de longueur d'onde dispersable sans induire de chevauchement.
- **Le paquet de fibre** comme avec l'IFS du relevé MaNGA d'SDSS ([Yan et al., 2016](#)) qui peut être utilisé en combinaison ([Barden & Wade, 1988](#)) ou non ([Allington-Smith et al., 1997](#)) de réseau de micro-lentilles. Ici la lumière n'est pas concentrée par des lentilles mais acheminée par un paquet de fibres optiques “à la chaîne” jusqu'à la fente du spectrographe. Le premier avantage est bien évidemment la flexibilité des fibres. Mais en contrepartie l'échantillon du ciel dispergé devient non contigu, à cause de la forme circulaire des fibres. Il est possible de pallier à cet effet en ajoutant un réseau de micro-lentilles (lui contigu) entre le plan focal et le paquet de fibres.
- **Le “trancheur d'image”** qui est la méthode la plus ancienne ([Bowen \(1938\)](#), [Content \(1997\)](#)) utilisée par exemple avec le NIFS (near-infrared integral field spectrograph, [McGregor et al. \(2003\)](#)). Cette méthode utilise un miroir segmenté en fines sections horizontales. Chacune de ces sections va diriger la lumière incidente dans des directions légèrement différentes jusqu'à un second miroir segmenté. Ce dernier va réarranger les tranches incidentes non pas l'une au dessus de l'autre, mais de façon étalées, “à la chaîne” comme avec la méthode fibrée. L'agencement est ensuite dispersé par la fente du spectrographe. Cette méthode permet de conserver la contiguïté du champ de vue, mais est en contrepartie couteuse et difficile à concevoir.

Les données brutes obtenues à partir d'un IFS sont ainsi sous la forme de multiples spectres (de plusieurs dizaines à plusieurs milliers) étalés (la trace) sur le détecteur, chacun ayant pour origine un élément individuel de l'IFU. Ces éléments sont en quelques sortes des pixels spatiaux, que l'on contracte communément par le terme de spaxels. La reconstruction

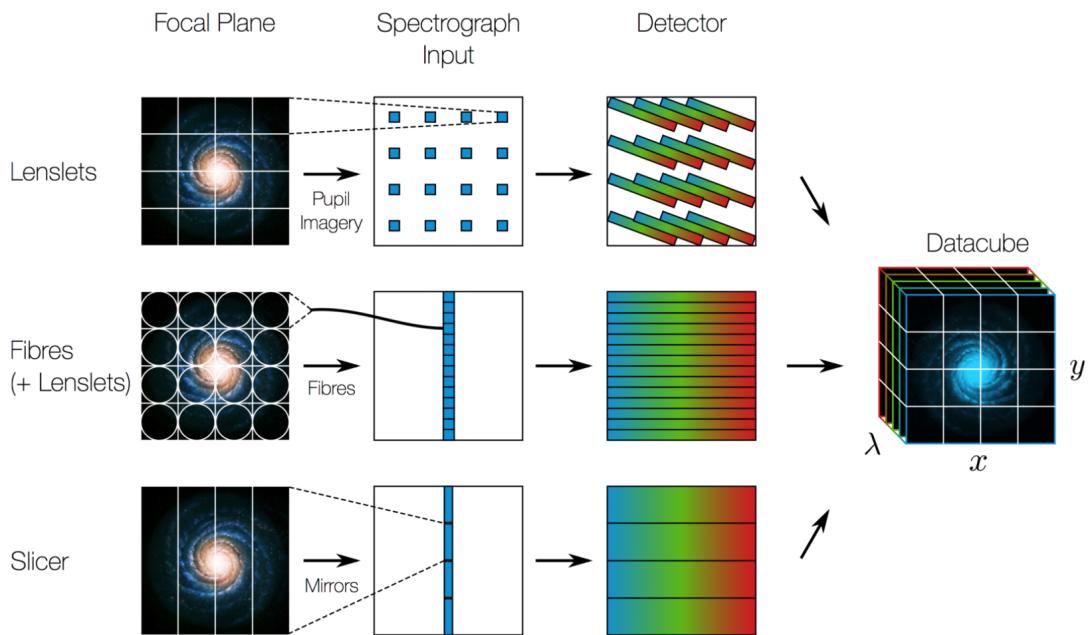


FIGURE 3.1 – Fonctionnement d'un IFS pour différents types d'IFU. La SEDm utilise un système d'agencement de micro-lentilles (cas du haut) (*Crédit M. Westmoquette, adaptée de Allington-Smith & Content (1998)*)

du cube de données se fait en extrayant chaque spectre du détecteur, et en les réarrangeant dans le même espace géométrique que le plan focal du télescope (nous détaillerons ce processus dans la section suivante).

3.1.2 La SEDm

3.2 Extraction des spectres du CCD et création des cubes de données

3.3 Actuelle méthode d'extraction de spectre

3.4 SEDm en quelques chiffres

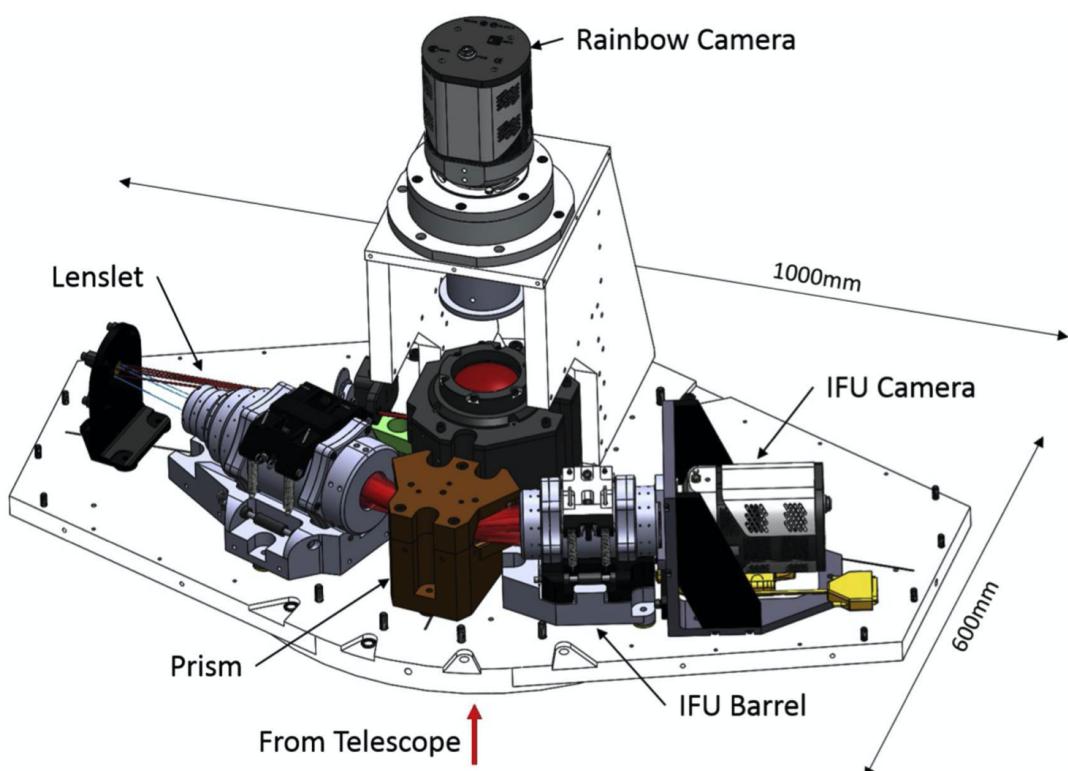


FIGURE 3.2 – SEDm Overview

Bibliographie

- Allington-Smith, J. R., Content, R., Haynes, R., & Lewis, I. J. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1284–1294](#)
- Allington-Smith, J. & Content, R. 1998, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, [110](#), 1216
- Bacon, R., Adam, G., Baranne, A., et al. 1995, *Astronomy & Astrophysics*, Supplement, [113](#), [347](#)
- Bacon, R., Copin, Y., Monnet, G., et al. 2001, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [326](#), [23](#)
- Barden, S. C. & Wade, R. A. 1988, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 3, Fiber Optics in Astronomy, ed. S. C. Barden, [113–124](#)
- Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [131](#), [018002](#)
- Bowen, I. S. 1938, *The Astrophysical Journal*, [88](#), [113](#)
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [413](#), [813](#)
- Content, R. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1295–1305](#)
- Dekany, R., Smith, R. M., Riddle, R., et al. 2020, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [132](#), [038001](#)
- Dhawan, S., Goobar, A., Smith, M., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [510](#), [2228](#)
- Fremling, C., Miller, A. A., Sharma, Y., et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, [895](#), [32](#)
- Graham, M. J., Kulkarni, S. R., Bellm, E. C., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [131](#), [078001](#)
- Jones, D. O., Scolnic, D. M., Riess, A. G., et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, [843](#), [6](#)
- Lantz, B., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2004, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5249, Optical Design and Engineering, ed. L. Mazuray, P. J. Rogers, & R. Wartmann, [146–155](#)
- Law, N. M., Kulkarni, S. R., Dekany, R. G., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [121](#), [1395](#)

- Masci, F. J., Laher, R. R., Rusholme, B., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **131**, 018003
- McGregor, P. J., Hart, J., Conroy, P. G., et al. 2003, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, [1581–1591](#)
- Minkowski, R. L. & Abell, G. O. 1963, in Basic Astronomical Data : Stars and Stellar Systems, ed. K. A. Strand, 481
- Nicolas, N., Rigault, M., Copin, Y., et al. 2021, *Astronomy and Astrophysics*, **649**, A74
- Nordin, J., Brinnel, V., van Santen, J., et al. 2019, *Astronomy and Astrophysics*, **631**, [A147](#)
- Patterson, M. T., Bellm, E. C., Rusholme, B., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **131**, 018001
- Rau, A., Kulkarni, S. R., Law, N. M., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **121**, 1334
- Scolnic, D., Brout, D., Carr, A., et al. 2021, *arXiv e-prints*, arXiv:2112.03863
- Scolnic, D. & Kessler, R. 2016, *The Astrophysical Journal, Letters*, **822**, L35
- Scolnic, D. M., Jones, D. O., Rest, A., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, **859**, 101
- Yan, R., Bundy, K., Law, D. R., et al. 2016, *The Astronomical Journal*, **152**, 197

Deuxième partie

Extraction de spectre de Supernovae

HyperGal : Une nouvelle méthode d'extraction de source ponctuelle

- XXX -

Sommaire

4.1	Idée générale	42
4.2	SED Fitting	42
4.3	Présentation du Pipeline	42

4.1 Idée générale

4.2 SED Fitting

4.3 Présentation du Pipeline

Modélisation Hyperspectrale

- XXX -

Sommaire

5.1	Source photométrique : PS1	44
5.1.1	Présentation du survey	44
5.1.2	Utilisation des images PS1	44
5.2	Cigale et SEDFitting	44
5.2.1	Présentation de Cigale	44
5.2.2	Utilisation	44
5.3	Construction du cube intrinsèque	44
5.3.1	Sampling des spectres dans l'espace SEDm	44
5.3.2	Construction du cube	44

5.1 Source photométrique : PS1

5.1.1 Présentation du survey

5.1.2 Utilisation des images PS1

5.2 Cigale et SEDFitting

5.2.1 Présentation de Cigale

5.2.2 Utilisation

5.3 Construction du cube intrinsèque

5.3.1 Sampling des spectres dans l'espace SEDm

5.3.2 Construction du cube

Réponse impulsionale de la SEDm

– XXX –

Sommaire

6.1	LSF	46
6.1.1	Lampe à arc	46
6.1.2	Détermination de la LSF	46
6.2	PSF	46
6.2.1	Modèle de profil radial	46
6.2.2	Entrainement du modèle	46
6.2.3	Chromaticité et ADR	46
6.3	Validation	46
6.3.1	Calibration photométrique	46
6.3.2	Résultats	46

6.1 LSF

6.1.1 Lampe à arc

6.1.2 Détermination de la LSF

6.2 PSF

6.2.1 Modèle de profil radial

6.2.2 Entrainement du modèle

6.2.3 Chromaticité et ADR

6.3 Validation

6.3.1 Calibration photométrique

6.3.2 Résultats

Modélisation de Scène et Extraction de Source

– XXX –

Sommaire

7.1	Projection du cube intrinsèque	48
7.1.1	Seeing relatif Panstarrs/SEDm	48
7.1.2	Projection spatiale dans l'espace SEDm	48
7.2	Modélisation de Scène	48
7.2.1	Composante du fond : ciel et artefacts	48
7.2.2	Composante du point source : Supernova	48
7.2.3	Fitting de la scene	48
7.3	Extraction du point source	48
7.3.1	Outputs de contrôle du pipeline	48
7.3.2	Isolation de la galaxie hôte	48
7.3.3	Isolation de la Supernova	48
7.4	Classification : SNID	48

7.1 Projection du cube intrinsèque

7.1.1 Seeing relatif Panstarrs/SEDm

7.1.2 Projection spatiale dans l'espace SEDm

7.2 Modélisation de Scène

7.2.1 Composante du fond : ciel et artefacts

7.2.2 Composante du point source : Supernova

7.2.3 Fitting de la scene

7.3 Extraction du point source

7.3.1 Outputs de contrôle du pipeline

7.3.2 Isolation de la galaxie hôte

7.3.3 Isolation de la Supernova

7.4 Classification : SNID

Troisième partie

Simulations et Résultats

Simulations de cubes de données et application d'HyperGal

– XXX –

Sommaire

8.1	Génération des simulations	52
8.1.1	Cube de galaxies isolées	52
8.1.2	Modèles de Supernovae	52
8.1.3	Marginalisations	52
8.1.4	Paramètres libres d'étude : Distance et contraste	52
8.2	Résultats et Précision	52
8.2.1	Précision spectrophotométrique	52
8.2.2	Précision avec correction de continuum	52
8.2.3	Efficacité de classification	52

8.1 Génération des simulations

- 8.1.1 Cube de galaxies isolées
- 8.1.2 Modèles de Supernovae
- 8.1.3 Marginalisations
- 8.1.4 Paramètres libres d'étude : Distance et contraste

8.2 Résultats et Précision

- 8.2.1 Précision spectrophotométrique
- 8.2.2 Précision avec correction de continuum
- 8.2.3 Efficacité de classification

Data Release 2 de ZTF

Sommaire

9.1	Présentation de la DR2 de ZTF	54
9.2	Production d' HYPÉRGAL et résultats	54
9.2.1	Classification et détermination de l'échantillon DR2-Cosmo	54
9.2.2	Premiers résultats	54
9.2.3	Des SNeIa à la cosmologie : H_0 , w et $f\sigma_8$	55

9.1 Présentation de la DR2 de ZTF

9.2 Production d'HyperGal et résultats

9.2.1 Classification et détermination de l'échantillon DR2-Cosmo

9.2.2 Premiers résultats

L'utilisation de l'échantillon de SNeIa pour dériver les paramètres cosmologiques nécessite de considérer d'éventuels biais de sélection. En effet, une SNIa avec un paramètre de couleur élevé (donc plus rouge) ou un déclin rapide de luminosité (bas stretch) peuvent ne plus être détectées par ZTF et sa profondeur en magnitude limite. La Figure 9.1 met bien en évidence cet effet de sélection, où la corrélation entre les paramètres de la courbe de lumière et le redshift est clairement visible. C'est pourquoi un sous-échantillon à volume limité ($z < 0.06$) est considéré, comme indiqué par **Amenouche et al (in prep)**.

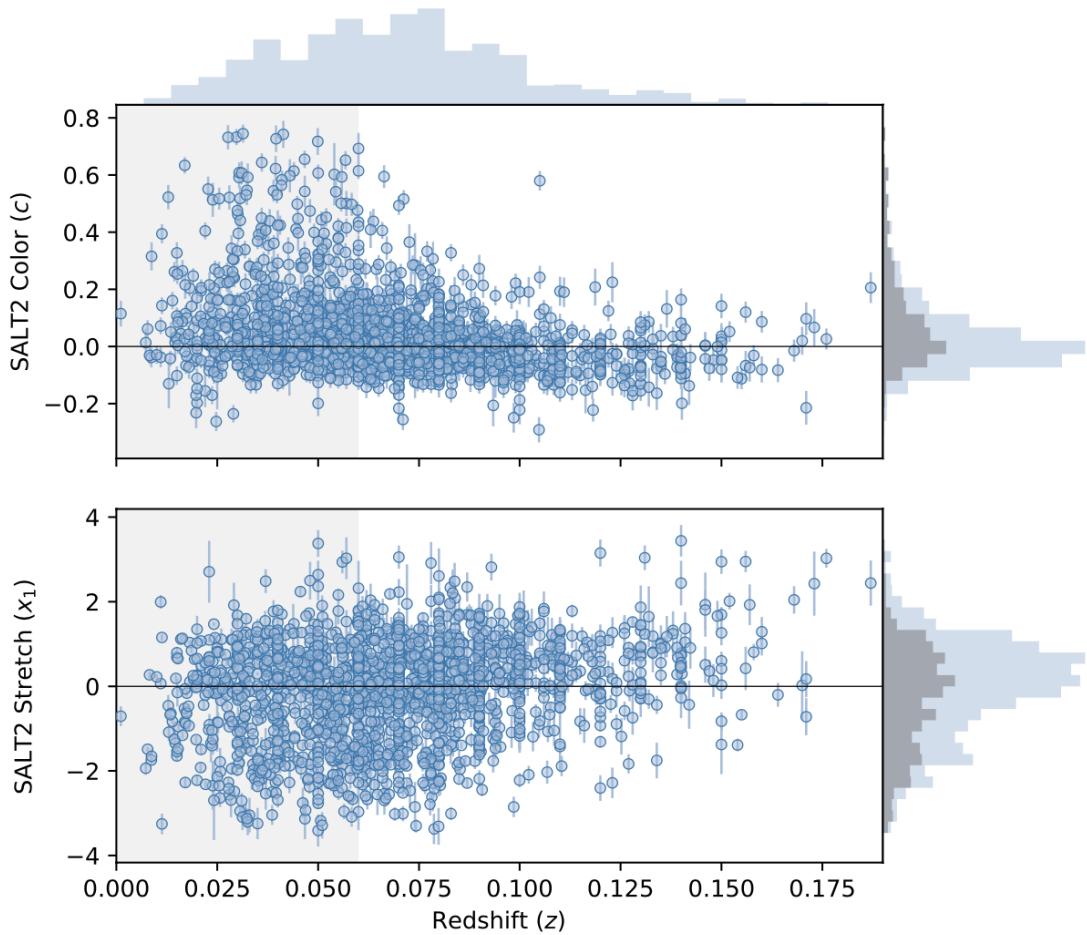


FIGURE 9.1 – Paramètres SALT2 de stretch (*en bas*) et couleur (*en haut*) pour la DR2 de ZTF (**Rigault et al DR2 (in prep)**). Ici seules les Supernovae de l'échantillon doré sont considérées. La bande grise indique le volume limite à $z < 0.06$. Les histogrammes sur la droite représentent l'échantillon entier (en bleu) et volume limité (en gris).

Le volume limité étant défini, il est à présent possible d'étudier les paramètres de

distributions des courbes de lumières, ainsi que leurs corrélations. La première raison de cette analyse est la nécessité d'estimer la fonction de sélection sous-jacente pour éviter d'induire des biais dans la dérivation des paramètres cosmologiques ([Scolnic & Kessler, 2016](#)). La seconde raison est que cela permet d'étudier la nature de la population (jeune/vieille) des SNIa, et de mettre en évidence des potentiels évolution en redshift ([Nicolas et al., 2021](#)). Les corrélations stretch/couleur sont montrées dans la Figure 9.2, où la caractéristique bi-modale de la distribution en stretch est clairement visible. Le mode à bas stretch compte pour $\approx 25\%$ de la distribution, comme prédit par [Nicolas et al. \(2021\)](#).

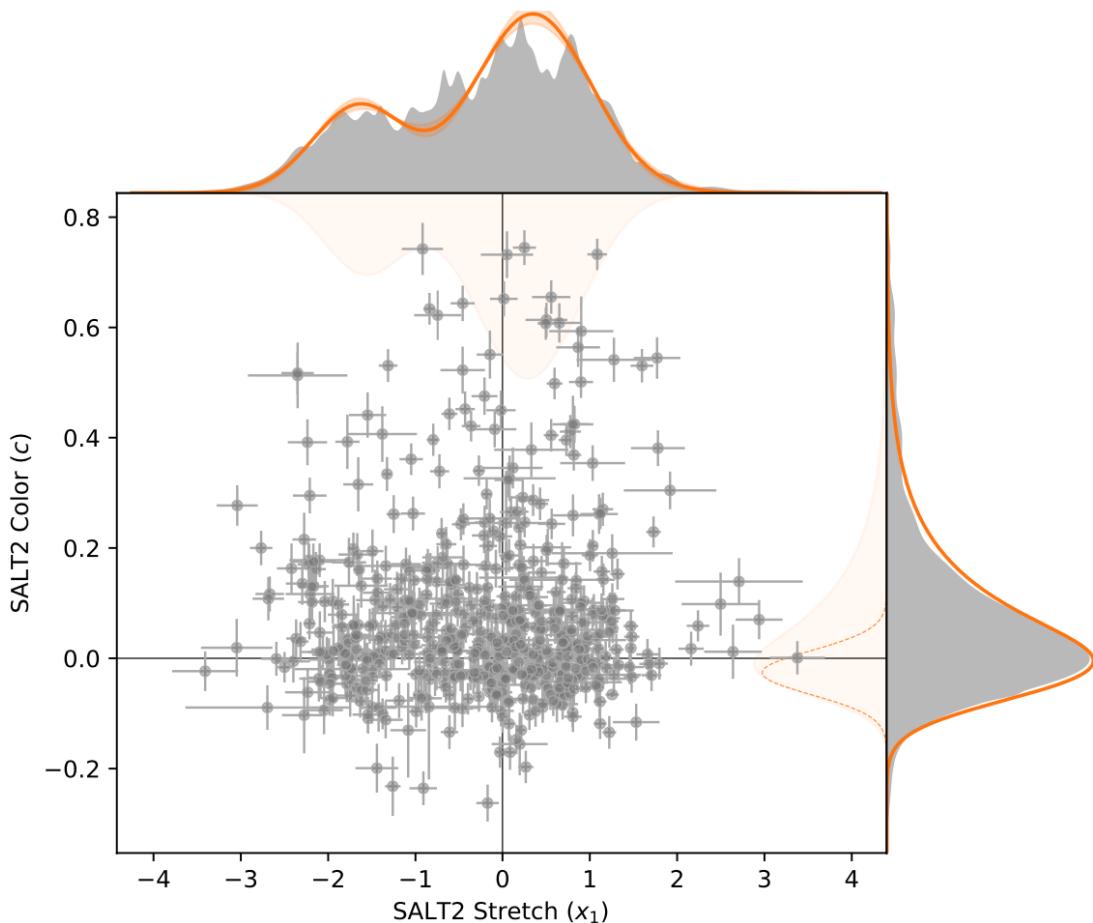


FIGURE 9.2 – Correlation entre les paramètres SALT2 de stretch et couleur pour la DR2 de ZTF ([Rigault et al DR2 \(in prep\)](#)). Ici seules les Supernovae du volume limité à $z < 0.06$ sont considérées. Les distributions en orange correspondent aux prédictions du model de double population de SNeIa de [Nicolas et al. \(2021\)](#).

9.2.3 Des SNeIa à la cosmologie : H_0 , w et $f\sigma_8$

À ce rythme, ZTF aura observé et classifié près de 5000 SNeIa de qualité cosmologique d'ici la fin de la phase 2, mi-2024.

Conclusions & perspectives

Bibliographie

- Allington-Smith, J. R., Content, R., Haynes, R., & Lewis, I. J. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1284–1294](#)
- Allington-Smith, J. & Content, R. 1998, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, [110](#), 1216
- Bacon, R., Adam, G., Baranne, A., et al. 1995, *Astronomy & Astrophysics*, Supplement, [113](#), [347](#)
- Bacon, R., Copin, Y., Monnet, G., et al. 2001, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [326](#), [23](#)
- Barden, S. C. & Wade, R. A. 1988, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 3, Fiber Optics in Astronomy, ed. S. C. Barden, [113–124](#)
- Bellm, E. C., Kulkarni, S. R., Graham, M. J., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [131](#), [018002](#)
- Bowen, I. S. 1938, *The Astrophysical Journal*, [88](#), [113](#)
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnović, D., et al. 2011, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [413](#), [813](#)
- Content, R. 1997, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 2871, Optical Telescopes of Today and Tomorrow, ed. A. L. Ardeberg, [1295–1305](#)
- Dekany, R., Smith, R. M., Riddle, R., et al. 2020, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [132](#), [038001](#)
- Dhawan, S., Goobar, A., Smith, M., et al. 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, [510](#), [2228](#)
- Fremling, C., Miller, A. A., Sharma, Y., et al. 2020, *The Astrophysical Journal*, [895](#), [32](#)
- Graham, M. J., Kulkarni, S. R., Bellm, E. C., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [131](#), [078001](#)
- Jones, D. O., Scolnic, D. M., Riess, A. G., et al. 2017, *The Astrophysical Journal*, [843](#), [6](#)
- Lantz, B., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2004, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 5249, Optical Design and Engineering, ed. L. Mazuray, P. J. Rogers, & R. Wartmann, [146–155](#)
- Law, N. M., Kulkarni, S. R., Dekany, R. G., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, [121](#), [1395](#)

- Masci, F. J., Laher, R. R., Rusholme, B., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **131**, 018003
- McGregor, P. J., Hart, J., Conroy, P. G., et al. 2003, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4841, Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes, ed. M. Iye & A. F. M. Moorwood, [1581–1591](#)
- Minkowski, R. L. & Abell, G. O. 1963, in Basic Astronomical Data : Stars and Stellar Systems, ed. K. A. Strand, 481
- Nicolas, N., Rigault, M., Copin, Y., et al. 2021, *Astronomy and Astrophysics*, **649**, A74
- Nordin, J., Brinnel, V., van Santen, J., et al. 2019, *Astronomy and Astrophysics*, **631**, [A147](#)
- Patterson, M. T., Bellm, E. C., Rusholme, B., et al. 2019, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **131**, 018001
- Rau, A., Kulkarni, S. R., Law, N. M., et al. 2009, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, **121**, 1334
- Scolnic, D., Brout, D., Carr, A., et al. 2021, *arXiv e-prints*, arXiv:2112.03863
- Scolnic, D. & Kessler, R. 2016, *The Astrophysical Journal, Letters*, **822**, L35
- Scolnic, D. M., Jones, D. O., Rest, A., et al. 2018, *The Astrophysical Journal*, **859**, 101
- Yan, R., Bundy, K., Law, D. R., et al. 2016, *The Astronomical Journal*, **152**, 197