

# Mesure de l'évolution du taux d'expansion de l'univers par la combinaison des relevés de supernovae ZTF et Subaru

## ABSTRACT

L'étudiant travaillera au sein de l'équipe de cosmologie du LPNHE, dans le cadre des collaborations internationales ZTF et Subaru. Il aura en charge le développement d'un pipeline d'inférence statistique des paramètres cosmologiques à partir du diagramme de Hubble des supernovae de type Ia et son application aux données des deux grands relevés de troisième générations ZTF et Subaru.

**Key words.** Cosmologie, Energie Noire, Physique de l'Univers

## 1. Descriptif du sujet

Les supernovae de type Ia sont l'outil le plus puissant pour mesurer des rapports de distances dans l'intervalle 10Mpc jusqu'à 3Gpc comobile, où le décalage vers le rouge cosmologique (redshift) atteint l'unité. Elles nous permettent ainsi de retracer l'histoire de l'expansion de l'univers sur les 8 derniers milliards d'années de son histoire. Cet outil a été mis à profit pour la première fois en 1998 par 2 équipes américaines, pour mettre en évidence l'accélération récente de l'expansion de l'univers, grâce à la mesure du flux apparent de 3 dizaines de supernovae distantes avec le télescope spatial Hubble.

Depuis ce résultat historique, l'amélioration de la technique d'observation a permis d'accroître à la fois le nombre et la précision des mesures. Le diagramme de Hubble des SN-Ia est ainsi au cœur des tests actuels du modèle standard de la cosmologie, dit modèle  $\Lambda$ -CDM, thème central de la recherche en cosmologie qui constitue l'un des piliers de l'initiative «Physique des Infinis». Il l'est d'une part du fait de sa sensibilité à un écart à la constante cosmologique, et d'autre part, car il constitue un lien agnostique entre l'échelle de distance de l'univers local (définie géométriquement), et l'échelle de distance de l'univers lointain (définie par la physique des ondes acoustiques dans le plasma primordial). Le diagramme de Hubble des supernovae de type Ia actuel compte environ 1000 événements, fruit de la seconde génération d'expériences. Combinées, elles permettent une mesure du rapport de distance entre les redshifts 0.1 à 0.6 avec une précision de l'ordre du pourcent. Cette mesure se traduit par une contrainte à 5% de la valeur du paramètre de l'équation d'état de l'énergie noire, compatible avec l'hypothèse d'une constante cosmologique. Elle montre également, indépendamment de tout modèle, que l'échelle de distance des BAOs mesurée précisément à  $z \sim 0.6$  est incompatible avec les mesures de l'échelle des distances locales. Cette tension, dite tension de Hubble, atteint aujourd'hui  $5 - \sigma$  et fait l'objet d'une grande effervescence en tant que premier écart significatif au modèle  $\Lambda$ -CDM.

Le groupe de cosmologie du LPNHE travaille sur 2 relevés de troisième génération, le télescope de 8m Subaru, situé à Hawaï et dont le relevé profond a permis la mesure de 500 supernovae à très haut redshift ( $0.8 < z < 1.5$ ), et le télescope très grand champ ZTF qui sonde rapidement toute la partie nord de l'univers local et découvre chaque année près d'un millier de supernovae proches ( $z < 0.1$ ). La combinaison de ces deux expériences étend considérablement le bras de levier en redshift du diagramme de Hubble actuel et accroît sa sensibilité à la dynamique de l'énergie noire. La thèse proposée porte sur l'établissement du diagramme de Hubble combiné de ces deux expériences, et l'inférence des contraintes sur les paramètres cosmologiques associés. Elle intervient au moment charnière que constitue les premières releases des relevés SN de troisième génération. De plus, la combinaison de ce nouveau diagramme de Hubble avec les nouvelles données BAO de l'expérience DESI (première release courant 2023) constituera une sonde extrêmement puissante de la physique de l'énergie noire.

Suite à une décennie de développements instrumentaux ayant permis d'augmenter la statistique et de réduire les systématiques de mesures, des effets astrophysiques plus fins doivent désormais être pris en compte de manière rigoureuse par la nouvelle génération d'expérience. L'étudiant aura en charge le développement d'un pipeline d'inférence statistique des paramètres cosmologiques incorporant un modèle plus complexe et permettant d'atteindre une précision de 0.1% sur la mesure de distance. Le modèle devra en particulier intégrer le biais de sélection et l'évolution des populations, qui sont aujourd'hui traités a posteriori comme des systématiques. Dans un second temps il prendra en charge la combinaison des données existantes aux nouvelles données produites par les expériences ZTF et Subaru dans l'optique d'établir les meilleurs contraintes sur la nature de l'énergie noire avant l'avènement des expériences de quatrième génération.

## 2. Encadrement

L'étudiant travaillera au sein de l'équipe de cosmologie du LPNHE, sous la co-direction de Nicolas Regnault et Marc Betoule. Nicolas Regnault est directeur de recherche au CNRS, co-coordonateur de la participation IN2P3, groupant 4 laboratoires Français (LPNHE, IPNL, CCPM et LPC) avec le soutien de l'ANR, au sein de la collaboration ZTF-II. Il est responsable de la production des courbes de lumières des supernovae de type Ia découverte par ZTF. Il est également co-PI, avec Nao Suzuki et David Rubin, de la proposition SUSHI (SUbaru Supernovae with Hubble Infrared) qui a organisé un suivi des Supernovae découverte par le relevé Subaru avec le télescope spatial Hubble. Il guidera l'étudiant pour l'application de son travail aux données ZTF. Marc Betoule est premier auteur de l'analyse jointe des données des collaborations SNLS et SDSS (JLA) [Betoule et al. \(2014\)](#) et spécialiste de la fusion des relevés. Il encadrera l'étudiant au cours de son travail sur l'estimateur de distance.

Nao Suzuki est chercheur au Laurence Berkeley Laboratory. Il est membre du Hyper Suprime-Cam SSP Survey ([Aihara et al. 2018](#)) et PI du relevé de supernovae conduit avec cet instrument. Il est spécialiste de l'observation des supernovae à haut redshift ([Suzuki et al. 2012](#)) et guidera l'étudiant dans son appropriation des données Subaru.

La thèse est à la croisée de deux collaborations internationale: Zwicky Transient Facility (ZTF: Paris, Lyon, Stockholm, Berlin, Los Angeles (Caltech)) et SUbaru Supernovae with Hubble Infrared (SUSHI: Paris, Berkeley, Université d'Hawaii, Tokyo). L'étudiant sera amené par son travail à interagir au sein de ces collaborations. L'ensemble des méthodes développées étant directement applicable au relevé de quatrième génération qui sera conduit par le Vera Rubin Observatory, l'étudiant sera également amené à présenter son travail à la Dark Energy Science Collaboration du relevé LSST.

## 3. Calendrier prévisionnel

Le relevé Subaru est complet et la première phase du relevé ZTF (ZTF-I) est également achevée. La deuxième phase du relevé ZTF (ZTF-II) est en cours. Pour les deux expériences la date de la première data-release est prévue à la fin de cette année. Dans ce contexte, le déroulement envisagé pour la thèse est le suivant:

**Première année** Écriture de la fonction de vraisemblance pour une distribution tronquée, permettant d'inclure le biais de Malmquist directement dans l'estimateur de distance. Étude de l'interaction entre les paramètres de la fonction de sélection et de l'évolution de la population des supernovae avec le redshifts. Développement de l'estimateur et caractérisation sur simulation. Publication de la méthode.

**Deuxième année** Extension de la méthode pour l'ingestion de données réelles (gestion des outliers). Développement du pipeline sur données blind. Évaluation des erreurs systématiques. Deblinding, et première publication des mesures de distances.

**Troisième année** Recherche d'extension et raffinement de la mesure de distance via l'exploration de paramètres d'évolution astrophysique supplémentaires (âge des progéniteurs, environnement local, poussière intergalactique). Application aux releases successives des données ZTF et Subaru. Extension potentielle aux premières données LSST.

## 4. Profil de candidature

Le sujet proposé s'adresse spécifiquement à des étudiants en astrophysique intéressé par la cosmologie et l'analyse de données. Étant donné la technicité du sujet, une excellente maîtrise de l'outil informatique, en particulier la connaissance du langage python, est demandée. La thèse s'effectuant dans un cadre international sur un sujet de recherche particulièrement actif et concurrentiel, il conviendra parfaitement à un étudiant dynamique et volontaire.

## References

- Aihara, H., Arimoto, N., Armstrong, R., et al. 2018, PASJ, 70, S4  
 Betoule, M., Kessler, R., Guy, J., et al. 2014, A&A, 568, A22  
 Suzuki, N., Rubin, D., Lidman, C., et al. 2012, ApJ, 746, 85