

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 Λ -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 plus de 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 Λ -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 publications des données 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 le nombre d'événements mesurés et d'améliorer la qualité des mesures (notamment l'étalonnage photométrique qui constituait jusque là la principale source d'erreur systématique [Betoule et al. 2014](#)), des effets astrophysiques plus fins doivent désormais être pris en compte de manière rigoureuse par la nouvelle génération d'expérience. L'objectif majeur de la thèse est l'établissement d'un diagramme de Hubble de troisième génération, combinant la puissance statistique accrue des derniers relevés ZTF et Subaru à un progrès méthodologique permettant d'atteindre une *précision de 0.1% dans le contrôle des erreurs systématiques sur la mesure de distance*.

Le sujet proposé comporte deux volets. Le premier volet, méthodologique, concerne *le développement d'un pipeline d'analyse des données SN-Ia de nouvelle génération* intégrant le biais de sélection des relevés, dit biais de Malmquist

(voir p.e. Rubin et al. 2015 pour l'état de l'art du traitement de cet effet), ainsi que l'évolution des populations (Rigault et al. 2020) à la fonction de vraisemblance des données.

Le second volet, applicatif, concerne *l'établissement du diagramme de Hubble joint des relevés ZTF et Subaru*. Portant la statistique à près de 5000 événements (Dhawan et al. 2022; Yasuda et al. 2019), ce diagramme de Hubble devrait délivrer les meilleures contraintes sur la nature de l'énergie noire avant l'avènement des expériences de quatrième génération.

Détail du volet méthodologique

L'inférence des paramètres cosmologiques est aujourd'hui effectuée en deux étapes : les données spectro-photométriques des relevés sont d'abord réduites (compressées en quelques paramètres par événement) grâce à un modèle de courbe de lumière (Guy et al. 2007; Saunders et al. 2018; Léget et al. 2020); les données réduites sont ensuite analysées pour produire l'estimation des distances (p.e. Betoule et al. 2014). Le travail de recherche sur ce volet méthodologique est envisagé en deux paliers. Le premier palier consiste à incorporer les effets de sélection et d'évolution à la fonction de vraisemblance des données réduites, ce qui permettra de construire l'estimateur de distance sans biais et la propagation correcte des incertitudes associées, indispensable au niveau de précision atteint par les relevés modernes.

La complétion du premier palier, si elle suffit à assurer le succès de l'exploitation des relevés de troisième et quatrième génération, peut également ouvrir la voie sur un second palier, plus exploratoire, en permettant d'envisager l'inférence des paramètres cosmologiques *en une seule étape*. La promesse scientifique associée à un tel changement de paradigme est double: i) Les modèles de courbe de lumière n'incorporent pas les biais de sélection, leur ajustement ne peut donc être effectué que sur la fraction des événements suffisamment proches pour que le relevé soit complet, excluant ainsi environ la moitié des événements mesurés par un relevé donné. La levée de cette limitation doublerait le nombre d'événements disponibles pour l'établissement du modèle de supernovae réduisant la part des incertitudes qui lui sont associées. ii) Plusieurs études pointent le fait que la compression des données par les modèles de courbe de lumière est sous-optimale du point de vue de l'estimation des distances suggérant que la précision limite sur les distances par événement est aussi basse que 8%, contre $\sim 14\%$ pour l'estimateur classique (Fakhouri et al. 2015). Les tentatives d'amélioration de la compression dans l'approche classique convergent très lentement du point de vue de la précision des distances comme démontré dans Rose et al. (2020). Ainsi, l'ajustement des distances en une seule étape, qui permet d'optimiser directement la quantité d'intérêt, constitue la principale piste algorithmique d'amélioration de l'estimateur de distance. Le succès d'une telle entreprise constituerait un gain technologique majeur pour le domaine, il est toutefois notable qu'elle constitue un challenge numérique conséquent.

2. Encadrement

L'étudiant travaillera au sein de l'équipe de cosmologie du LPNHE, sous la co-direction de Nicolas Regnault et Marc Betoule, et de Nao Suzuki au LBL. 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 applicables 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 simulations. Publication de la méthode.

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

Troisième année Recherche d'extensions au-delà du modèle de standardisation actuel. La principale piste envisagée est d'inclure l'information de distance en entrée de l'algorithme d'apprentissage non-supervisé de manière à orienter la réduction de dimension vers la description des distances. Dans un premier temps, la grande statistique de ZTF pourra être mise à profit pour entraîner le modèle sur le sous-volume complet du relevé de manière à évaluer rapidement les gains potentiels associé à cette approche. Les autres pistes astrophysiques classiques (âge des progéniteurs, environnement local, poussière intergalactique) pourront être évaluées en parallèle. L'application de l'approche aux releases successives des données ZTF et Subaru nécessitera l'incorporation dans l'algorithme de la gestion des biais de sélection développée en première année. À cet horizon, une extension aux premières données LSST devrait devenir envisageable.

4. Adéquation du candidat avec le profil de candidature déposé

Le sujet proposé s'adresse spécifiquement à des étudiants en astrophysique intéressés par la cosmologie et l'analyse de données. Étant donné la technicité du sujet, il doit conduire à une excellente maîtrise des outils informatique et statistiques. La thèse s'effectuant dans un cadre international sur un sujet de recherche particulièrement actif et concurrentiel, il convient parfaitement à un étudiant dynamique et volontaire.

Dylan Kuhn a démarré en mars son stage de master 2 dans le groupe de cosmologie du LPNHE, sur la thématique proposée. Il a jusque là suivi une courbe d'apprentissage remarquablement rapide, témoignant de sa grande motivation et de son intérêt pour le sujet. Ainsi dans les six premières semaines de son stage, il a acquis l'ensemble des bases mathématiques et logicielles nécessaires à la réécriture de l'estimateur classique des distances cosmologiques à partir des paramètres de courbe de lumière des supernovae. Il a développé une simulation pour caractériser les biais de cet estimateur puis appliqué ses développements aux données de la littérature (Scolnic et al. 2018). Il commence désormais la première phase des développements originaux proposés pour le début de la thèse.

Dylan a présenté systématiquement ses avancées aux réunions hebdomadaires du groupe de travail supernovae du laboratoire, et s'est parfaitement intégré à l'effort en court. Le financement de la poursuite de ses travaux en thèse constituerait un renfort extrêmement précieux pour le groupe sur le point de l'analyse le plus essentiel en terme de retombées scientifiques. Nous soutenons sans réserve sa candidature sur le sujet déposé.

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
 Dhawan, S., Goobar, A., Smith, M., et al. 2022, MNRAS, 510, 2228
 Fakhouri, H. K., Boone, K., Aldering, G., et al. 2015, ApJ, 815, 58
 Guy, J., Astier, P., Baumont, S., et al. 2007, A&A, 466, 11
 Léget, P. F., Gangler, E., Mondon, F., et al. 2020, A&A, 636, A46
 Rigault, M., Brinnel, V., Aldering, G., et al. 2020, A&A, 644, A176
 Rose, B. M., Dixon, S., Rubin, D., et al. 2020, ApJ, 890, 60
 Rubin, D., Aldering, G., Barbary, K., et al. 2015, ApJ, 813, 137
 Saunders, C., Aldering, G., Antilogus, P., et al. 2018, ApJ, 869, 167
 Scolnic, D. M., Jones, D. O., Rest, A., et al. 2018, ApJ, 859, 101
 Suzuki, N., Rubin, D., Lidman, C., et al. 2012, ApJ, 746, 85
 Yasuda, N., Tanaka, M., Tominaga, N., et al. 2019, PASJ, 71, 74