
Variabilités intrinsèques des SNe Ia et leurs conséquences sur les paramètres cosmologiques

Résumé : L'étude des supernovae de type Ia a de nombreuses utilités en physique. Elle sert notamment à la détermination de paramètres cosmologiques, comme la constante de Hubble ou le paramètre d'état de l'énergie noire. Afin d'améliorer la précision et la justesse des mesures existantes, les incertitudes statistiques et systématiques doivent être traitées correctement. Si l'ajout de données permet de réduire les incertitudes statistiques, il n'y a que l'étude du comportement physique des supernovae qui permet de réduire les incertitudes systématiques. Dans ce rapport, nous discutons comment l'établissement de lois d'évolution du paramètre de durée d'explosion d'une supernova en fonction du redshift permettrait d'atteindre ce but.

Mots-clés : Cosmologie, supernovae

Stage supervisé par :
RIGAULT Mickaël, Chercheur
rigault@ipnl.in2p3.fr
[Site personnel](#)

Institut de Physique des Deux Infinis
Université Lyon 1
4 rue Enrico Fermi – bâtiment Dirac
69622 Villeurbanne Cedex
<https://www.ipnl.in2p3.fr>

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce stage et de ce rapport de stage. En premier lieu, bien évidemment, je remercie Mickaël RIGAULT pour son encadrement sans faille

Table des matières

Remerciements	0
1 Introduction	1
1.1 Le domaine de recherche	1
1.2 Diagramme de Hubble	1
1.3 Les SNe Ia	2
1.4 Courbes de lumière	2
1.5 Incertitudes systématiques	4
1.6 Problème du progéniteur	6
2 Construction d'un échantillon complet	6
2.1 Effets de sélection	6
2.2 Méthode de détermination	7
3 Modèle d'évolution	7
3.1 Origine du modèle	7
3.2 Implémentation aux échantillons	7
3.3 Modifications et comparaisons	8
4 Conclusion	8
Bibliographie	8

I - Introduction

I - 1. Le domaine de recherche

La combinaison des observations et des prédictions théoriques du modèle du Big Band indiquent que l'univers est en expansion. Lors de la découverte de cette expansion, on pensait qu'elle devrait ralentir sous l'effet de la gravitation. Cependant, l'utilisation des supernovae de type Ia (SNe Ia) par PERLMUTTER ET AL. [1], RIESS ET AL. [2] et SCHMIDT ET AL. [3] a permis de mettre en évidence l'expansion accélérée de l'Univers, découverte pour laquelle ils ont eu le prix Nobel de physique de 2011. Il y aurait ainsi un phénomène allant à l'encontre des effets gravitationnels, phénomène qui a été nommé « énergie noire » : la cosmologie moderne vise entre autres à mieux comprendre la nature de cette énergie, sa proportion dans l'Univers et les lois physiques auxquelles elle obéit.

- Tension sur H_0 ? RIESS ET AL. 2016 donne des valeurs en intro

I - 2. Diagramme de Hubble

Cette découverte a été effectuée par l'utilisation des mesures des flux lumineux de supernovae, exprimés en magnitude qui en est le logarithme. Le flux est relié à la luminosité L d'une source lumineuse et à la distance d_L entre la source et le point d'observation par la relation

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2} \quad (1)$$

et la magnitude apparente m est reliée au flux reçu par la relation

$$m - m_0 = -2.5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right) = -2.5 \log \left(\frac{L}{4\pi d_L^2} \right) + C \quad (2)$$

avec F_0 le flux d'une étoile de référence. Cette définition de la magnitude dépend donc de la distance ; on définit alors une magnitude *absolue* traduisant la luminosité intrinsèque du corps observé : c'est la magnitude apparente que percevrait un observateur situé à une distance de 10 pc de la source, autrement dit

$$M = -2.5 \log \left(\frac{L}{4\pi (10 \text{ pc})^2} \right) + C \quad (3)$$

On peut alors définir le *module de distance* μ défini par

$$\mu \equiv m - M = 5 \log(d_L) - 5 \quad (4)$$

avec d_L en parsec. Or, en considérant un univers plat homogène et isotrope, l'équation de FRIEDMANN-LEMAÎTRE mène à une expression de d_L dépendant des paramètres cosmologiques d'après la relation

$$d_L = (1+z) \times c \left(\int_0^z dz' \left[\Omega_R (1+z')^4 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} \right) \quad (5)$$

avec Ω_R la densité d'énergie de rayonnement, Ω_M la densité d'énergie de matière, et Ω_Λ la densité d'énergie noire. Elles sont reliées par la relation

$$1 = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_\Lambda \quad (6)$$

pour un univers plat.

Rajouter développement en annexe ?

Ainsi, le module de distance μ permet de déterminer d_L *via* la mesure de la magnitude apparente m , si la magnitude absolue M est connue. Les SNe Ia sont utilisées pour leur magnitude absolue *a priori* standard, ce qui leur a valu le nom de *chandelles standards*.

En réalité, il existe une dispersion naturelle d'environ 40% des magnitudes absolues des SNe Ia. Cette dispersion implique une imprécision sur la valeur de la distance déduite par la mesure de magnitude apparente de 20%.

- Mesure de magnitude, équations ;
- Dispersion naturelle, imprécision.

I - 3. Les SNe Ia

Si les SNe Ia sont considérées comme des chandelles standards, c'est parce qu'elles obéissent au même mécanisme d'explosion. Bien qu'il soit encore mal compris, on sait qu'il résulte de l'augmentation de la masse de naines blanches, des étoiles inertes très denses, qui mènerait à une explosion thermonucléaire lorsqu'elles atteignent la masse critique de CHANDRASEKHAR de $1.4 M_{\odot}$. Cette augmentation peut suivre de l'accrétion d'un compagnon qui est généralement une géante rouge, ou par fusion de deux naines blanches.

Elles sont beaucoup étudiées en cosmologie de fait de leur forte luminosité permettant une mesure de magnitude jusqu'à des redshifts de l'ordre de $z \approx 1$, ce qui équivaut à une analyse des propriétés cosmologiques de l'Univers quand il était de la moitié de son âge actuel. Elles sont notamment les meilleures candidates pour les études à bas redshift, leur luminosité (sur une courte période) pouvant dépasser celle de leur galaxie hôte contenant des centaines de milliards d'étoiles, et qui, d'après l'équation 5, est la zone d'Univers où le paramètre d'énergie noire domine (pour $z \leq 1$, c'est le terme en Ω_{Λ} qui domine étant donné la puissance $-1/2$ sur le crochet). Un des buts de l'utilisation des SNe Ia en cosmologie est de mieux comprendre le comportement de cette énergie noire, sa densité précise et l'évolution de sa densité.

- Spécificité astrophysique ;
- Pertinence cosmologique.

I - 4. Courbes de lumière

Pour réaliser les mesures de magnitudes, une seule acquisition n'est pas suffisante. On s'intéresse à l'évolution de la luminosité d'une supernova à partir du moment de son explosion. Cette analyse permet de définir plusieurs paramètres (cf. figure 1) **Rajouter références !**

- 1) Le paramètre de *color*, défini par la différence de magnitude au maximum d'émission entre les bandes vertes et bleues ;
- 2) Le paramètre de *stretch*, définissant la durée de l'explosion de la supernova ; il s'apparente à la largeur à mi-hauteur d'une gaussienne mais pour une distribution non symétrique.

La définition de ces paramètres n'est pas anodine : il a en effet été montré qu'une corrélation forte existe entre la valeur de ces paramètres et la magnitude absolue M_B^{\max} d'une supernova. Notamment, les SNe Ia avec une grande durée d'explosion (grand stretch) ont une luminosité intrinsèque plus grande (relation appelée "brighter-slower"), et que les SNe Ia les plus bleues sont également plus lumineuses (relation "brighter-bluer"). On peut voir ces corrélations figure 2.

On peut alors inclure ces relations linéaires dans l'expression de la magnitude absolue, *via* la relation

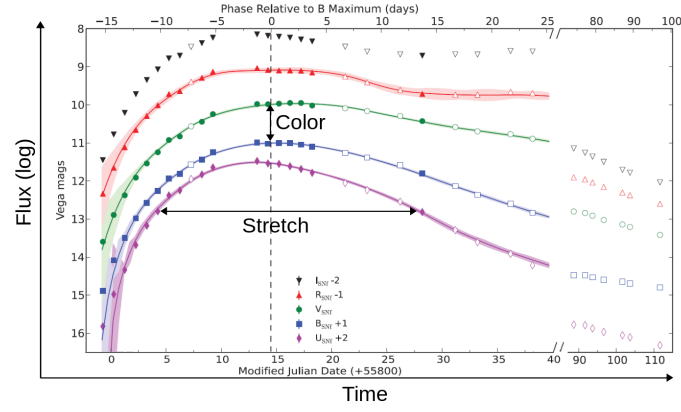


FIGURE 1 – Exemple de courbe de lumière d’une supernova depuis son explosion pour différentes longueurs d’ondes. On peut y définir un paramètre de couleur et un paramètre de *stretch* qui estime la durée d’explosion de ladite SNe Ia.

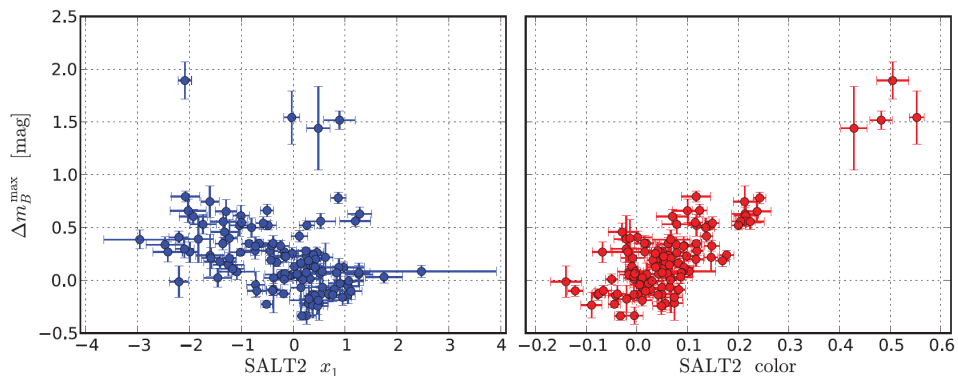


FIGURE 2 – Corrélations entre la différence de luminosité maximale d’une supernova dans le bleu et les paramètres de stretch (« x_1 ») et de couleur (« color ») d’après l’algorithme SALT2.

$$\Delta M_B^{\text{corr}} \equiv (M_B^{\text{max}} - M_B^0) + (\alpha x_1 - \beta c) \quad (7)$$

où α est le coefficient du stretch, et β celui de la couleur, tous les deux positifs, avec M_B^0 la magnitude moyenne des SNe Ia. Tous ces paramètres sont ajustés simultanément sur l'ensemble des données disponibles. Ces relations supplémentaires permettent de réduire l'incertitude sur le paramètre de magnitude absolue, et d'avoir une détermination de la distance dont l'erreur est diminuée à 8% (cf figure 3) *via* la relation

$$\mu = m - M + \alpha x_1 - \beta c \quad (8)$$

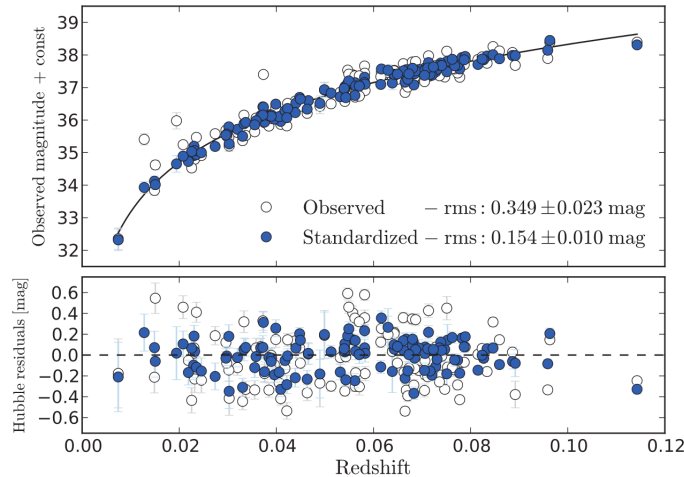


FIGURE 3 – Diagramme de Hubble avec, en haut, la magnitude apparente avant et après le processus de standardisation, qui consiste à inclure les corrélations entre la magnitude absolue et les paramètres de stretch et de couleur, respectivement en blanc et en bleu. En bas, on a le *résidu* ne montrant que la dispersion autour de la courbe noire, indiquant l'évolution de la luminosité prédite par la loi de Hubble.

L'utilisation de cette relation a alors permis d'améliorer la précision des mesures de distance, et ainsi discriminer différentes valeurs possibles pour les paramètres cosmologiques : cela a mené à la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers *via* une valeur non-nulle de Ω_Λ pour laquelle un prix Nobel a été discerné. Avant cette étude, l'évolution attendue du module de distance des SNe Ia était indiqué par la courbe grise dans la figure 4.

- Définitions ;
- Relations empiriques, équation corrigée.

I - 5. Incertitudes systématiques

Cette avancée monumentale dans la cosmologie a pu montrer la puissance des SNe Ia dans la détermination de paramètres cosmologiques. Depuis cette découverte, qui ne se basait que sur une centaine de données de SNe Ia, plus de données ont été accumulées, et la précision sur les mesures de Ω_M et Ω_Λ s'est améliorée. Cependant, sur la totalité de l'incertitude sur ces paramètres, la part des incertitudes systématiques est très importante. C'est non seulement une limitation à la précision des mesures, mais également un danger pour la justesse de celles-ci. Par exemple, dans le but d'étudier l'énergie noire, et notamment son paramètre d'état ω qui devrait être de -1 pour correspondre à un fluide de pression négative et sa dérivée ω_a qui traduit l'évolution de ce comportement au cours du temps, il convient de tester leur concordance avec différents modèles cosmologiques. Il a été montré

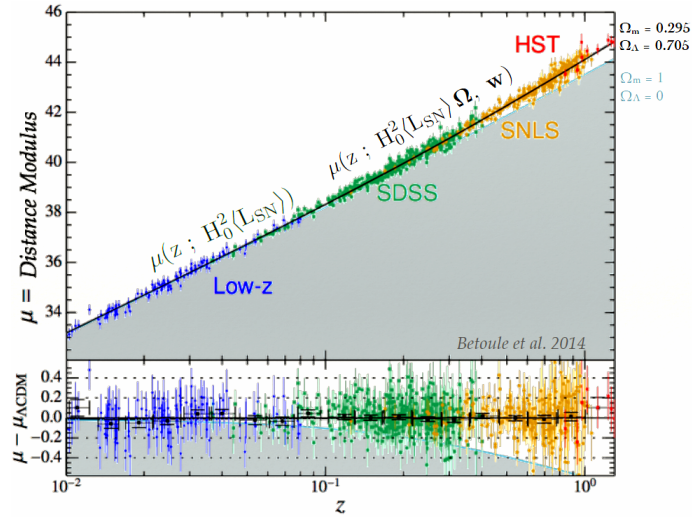


FIGURE 4 – Diagramme de Hubble actuel (en couleurs, une par échantillon d’observation) comparé au diagramme de Hubble avant la découverte de l’expansion accélérée de l’Univers (en gris) en haut, et diagramme résiduel où l’on a retiré l’évolution théorique du module de distance.

que si les erreurs systématiques ne sont pas prises en compte et qu’on les considère comme négligeable devant les incertitudes statistiques, l’ajout de nouvelles données (qui est le but de la collaboration LSST qui amènera environ 100 000 données de SNe Ia à commencer dans 3 ans) nous mènerait forcément à un résultat éloigné du modèle que l’on souhaite tester (cf. figure 6).

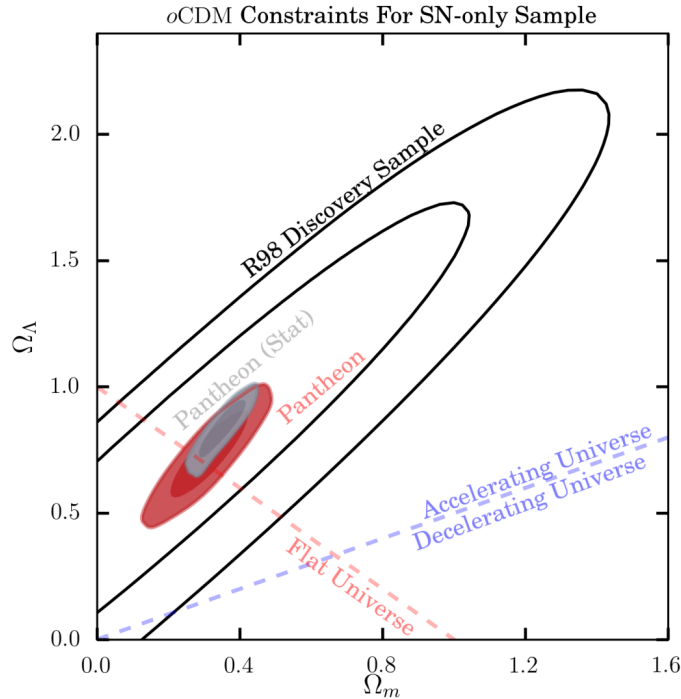


FIGURE 5 – *Contour plot* indiquant la précision à 68 et 90% de la mesure des paramètres Ω_M et Ω_Λ pour la découverte historique de RIESS ET. AL (R98, en blanc) se basant sur 100 données de SNe Ia, et pour les échantillons actuels utilisant environ 1000 SNe Ia (en rouge). En gris est indiqué la part des incertitudes systématiques à l’incertitude totale. [4]

Ainsi, si l’ajout de données permet de réduire les incertitudes statistiques, il paraît nécessaire de travailler sur la physique à l’origine de ces variations de magnitudes absolues pour pouvoir, dans l’idéal, réaliser le même travail qui a été fait avec le stretch et la couleur mais pour d’autres paramètres. C’est l’objet de ce stage et de la thèse qui en découle.

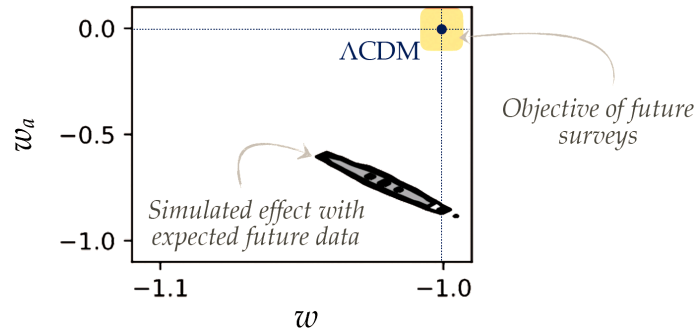


FIGURE 6 – Erreur attendue sur la mesure de w et w_a en ne considérant que la réduction des erreurs statistiques sans prendre en compte les erreurs systématiques.

- Importance dans les mesures actuelles ;
- Importance dans les mesures futures.

I - 6. Problème du progéniteur

Un des problèmes majeurs à la réalisation de ce but est que l'on n'a jamais accès aux supernovae avant qu'elles explosent, sous leur forme de *progéniteur*, étant donné que les courbes de lumière sont acquises à partir du moment de l'explosion. Il est donc impossible d'étudier directement les propriétés des progéniteurs (âge, métallicité...). Pourtant, la physique de l'explosion à l'origine des SNe Ia dépend de ces propriétés, et on sait que les propriétés des *étoiles* d'une manière générale évoluent en fonction du temps ; par exemple, à un redshift de $z \approx 1$, il y avait 40 fois plus de formation stellaire, et donc de formation de jeunes étoiles. En supposant que les propriétés des progéniteurs évoluent également avec le temps, et donc avec z , on s'attend à avoir une variation de la magnitude absolue avec le redshift, ce qui fausserait les mesures du diagramme de Hubble.

- Progéniteur inconnus :
- L moyennes différentes avec z ou échantillon ;
- Évolution du $lsSFR$.

Dans la suite de ce rapport, et pour éviter la surcharge de lignes de code, le-a lecteur-ice pourra se référer aux ressources mises en ligne publiquement sur [GitHub](https://github.com/Nora-n/variaIa/tree/master/variaIa) (<https://github.com/Nora-n/variaIa/tree/master/variaIa>).

II - Construction d'un échantillon complet

II - 1. Effets de sélection

La première étape à l'établissement de lois physiques tentant de relier les variations de magnitudes absolues avec des paramètres mesurable consiste à travailler sur des données sans effet de sélection qui biaiserait potentiellement les données recueillies. Or, l'observation du nombre de SNe Ia analysée en fonction du redshift nous montre l'existence d'un effet de sélection : en supposant une répartition homogène et isotrope des supernovae dans l'espace, on s'attend à avoir un nombre de SNe Ia à une certaine distance comme étant proportionnel au volume de l'espace entre l'observateur et cette distance. En terme de redshift, on s'attend à la relation $\#SNe\ Ia \propto z^3$. Si cette relation est vérifiée

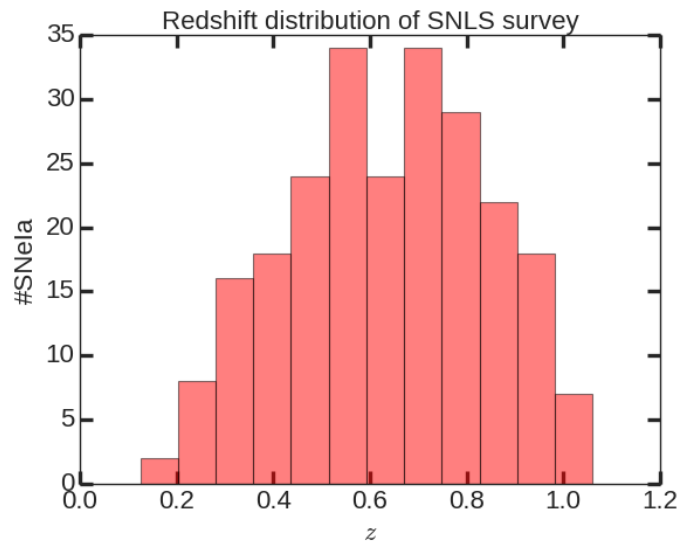


FIGURE 7 – Histogramme du nombre de SNe Ia observées en fonction du redshift pour les données de l'échantillon SNLS (SuperNova Legacy Survey).

jusqu'à une certaine distance, la figure 7 nous montre qu'à partir d'un moment, il n'y a plus de nouvelles supernovae observées.

Cette évolution est due au fait que notre moyen d'observation des supernovae est la mesure de flux, comme discuté dans l'introduction (partie 1.2). Ainsi, la luminosité totale de la supernova est divisée sur sa surface de rayonnement, proportionnelle au carré de la distance, et il arrive une distance où les SNe Ia de luminosités intrinsèques les plus faibles vont être les premières à ne pas pouvoir être captée par les éléments CCD des instruments de mesure. Or, comme discuté dans la partie 1.4, les supernovae de grandes durées d'explosion sont également plus lumineuses (relation "brighter_slower"), *ce qui veut dire que les supernovae les moins lumineuses sont également celles de petite durée d'explosion*.

- Histogramme échantillons ;
- Rappel relation **brighter-slower** et conclusion.

II - 2. Méthode de détermination

Pour trouver cette distance à partir de laquelle on commence à sélectionner les supernovae analysées, en l'absence de données précises sur les capacités des capteurs CCD de chaque échantillon à capter un flux lumineux, l'approche qui a été choisie repose sur la comparaison entre l'évolution attendue et l'évolution observée.

- Modèle d'évolution ;
- Statistique poissonnienne, itérations pour chaque échantillon.

III - Modèle d'évolution

III - 1. Origine du modèle

- Données **SNF** ;
- Définition jeune/vieille d'après RIGAULT ET AL. 2018

III - 2. Implémentation aux échantillons

- Concordance avec SNF seulement
- Modèle SNF sur toutes les données

III - 3. Modifications et comparaisons

- Modification du modèle ;
- Implémentation d'autres modèles et résultats

IV - Conclusion

Conclusion

Références

- [1] S. PERLMUTTER, G. ALDERING, G. GOLDBERGER, R. A. KNOP, P. NUGENT, P. G. CASTRO, S. DEUSTUA, S. FABBRO, A. GOOBAR, D. E. GROOM, I. M. HOOK, A. G. KIM, M. Y. KIM, J. C. LEE, N. J. NUNES, R. PAIN, C. R. PENNYPACKER, R. QUIMBY, C. LIDMAN, R. S. ELLIS, M. IRWIN, R. G. MCMAHON, P. RUIZ-LAPUENTE, N. WALTON, B. SCHAEFER, B. J. BOYLE, A. V. FILIPPENKO, T. MATHESON, A. S. FRUCHTER, N. PANAGIA, H. J. M. NEWBERG, AND W. J. COUCH, Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae, *The Astrophysical Journal*, 517 (1999), pp. 565–586. arXiv : astro-ph/9812133.
- [2] A. G. RIESS, A. V. FILIPPENKO, P. CHALLIS, A. CLOCCHIATTIA, A. DIERCKS, P. M. GARNAVICH, R. L. GILLILAND, C. J. HOGAN, S. JHA, R. P. KIRSHNER, B. LEIBUNDGUT, M. M. PHILLIPS, D. REISS, B. P. SCHMIDT, R. A. SCHOMMER, R. C. SMITH, J. SPYROMILIO, C. STUBBS, N. B. SUNTZEFF, AND J. TONRY, Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant, *The Astronomical Journal*, 116 (1998), pp. 1009–1038. arXiv : astro-ph/9805201.
- [3] B. P. SCHMIDT, N. B. SUNTZEFF, M. M. PHILLIPS, R. A. SCHOMMER, A. CLOCCHIATTI, R. P. KIRSHNER, P. GARNAVICH, P. CHALLIS, B. LEIBUNDGUT, J. SPYROMILIO, A. G. RIESS, A. V. FILIPPENKO, M. HAMUY, R. C. SMITH, C. HOGAN, C. STUBBS, A. DIERCKS, D. REISS, R. GILLILAND, J. TONRY, J. MAZA, A. DRESSLER, J. WALSH, AND R. CIARDULLO, The High-Z Supernova Search : Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type Ia Supernovae, *The Astrophysical Journal*, 507 (1998), p. 46.
- [4] D. M. SCOLNIC, D. O. JONES, A. REST, Y. C. PAN, R. CHORNOCK, R. J. FOLEY, M. E. HUBER, R. KESSLER, G. NARAYAN, A. G. RIESS, S. RODNEY, E. BERGER, D. J. BROUT, P. J. CHALLIS, M. DROUT, D. FINKBEINER, R. LUNNAN, R. P. KIRSHNER, N. E. SANDERS, E. SCHLAFLY, S. SMARTT, C. W. STUBBS, J. TONRY, W. M. WOOD-VASEY, M. FOLEY, J. HAND, E. JOHNSON, W. S. BURGETT, K. C. CHAMBERS, P. W. DRAPER, K. W. HODAPP, N. KAISER, R. P. KUDRITZKI, E. A. MAGNIER, N. METCALFE, F. BRESOLIN, E. GALL, R. KOTAK, M. MCCRUM, AND K. W. SMITH, The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample, *The Astrophysical Journal*, 859 (2018), p. 101.