
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	3
1.5 Incertitudes systématiques	4
1.6 Problème du progéniteur	4
2 Construction d'un échantillon complet	4
2.1 Effets de sélection	4
2.2 Méthode de détermination	5
3 Modèle d'évolution	5
3.1 Origine du modèle	5
3.2 Implémentation aux échantillons	5
3.3 Modifications et comparaisons	5
4 Conclusion	5
Bibliographie	6

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%, comme le montre la figure ci-après :

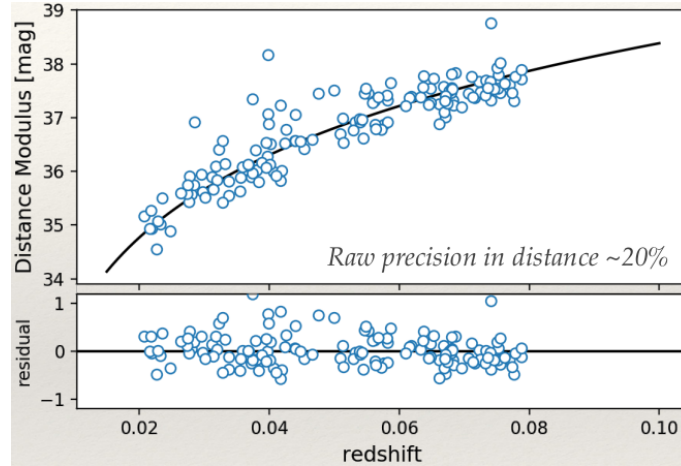


FIGURE 1 – Effet de la dispersion naturelle de la magnitude absolue des SNe Ia sur la mesure du module de distance par rapport à l'évolution attendue (en noir).

- 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 2) [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'un gaussienne mais pour une distribution non symétrique.

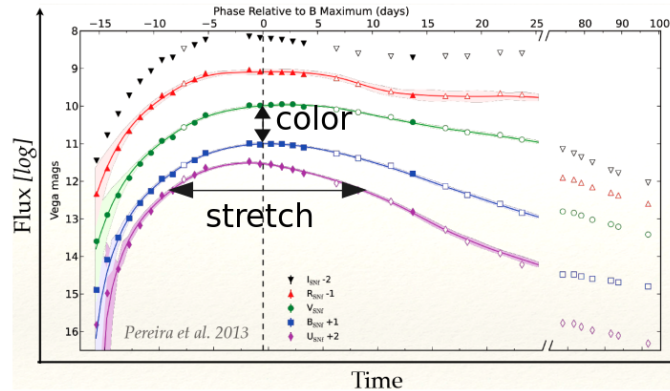


FIGURE 2 – Exemple de courbe de lumière d'une supernova depuis son explosion pour différentes longueurs d'ondes. On peut y définir un paramètre de couleur et un paramètre de *stretch* qui estime la durée d'explosion de ladite SNe Ia.

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 bleus sont également plus lumineux (relation "brighter-bluer"). On peut voir ces corrélations figure 3.

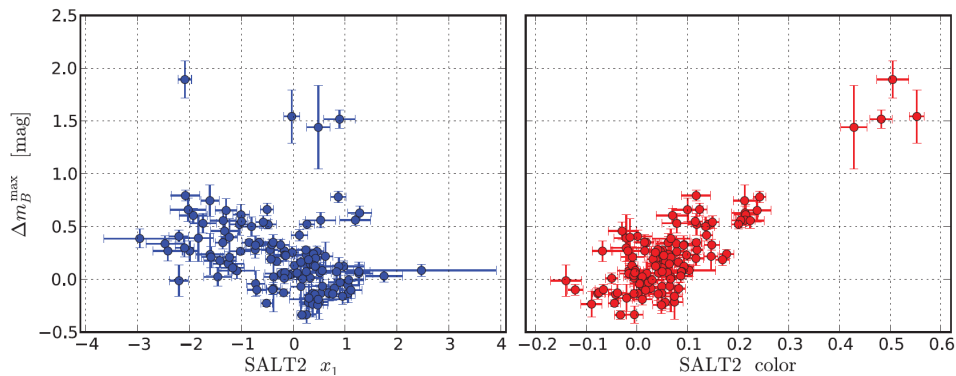


FIGURE 3 – Corrélations entre la différence de luminosité maximale d'une supernova dans le bleu et les paramètres de stretch (« x_1 ») et de couleur (« color ») d'après l'algorithme SALT2.

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

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

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 4

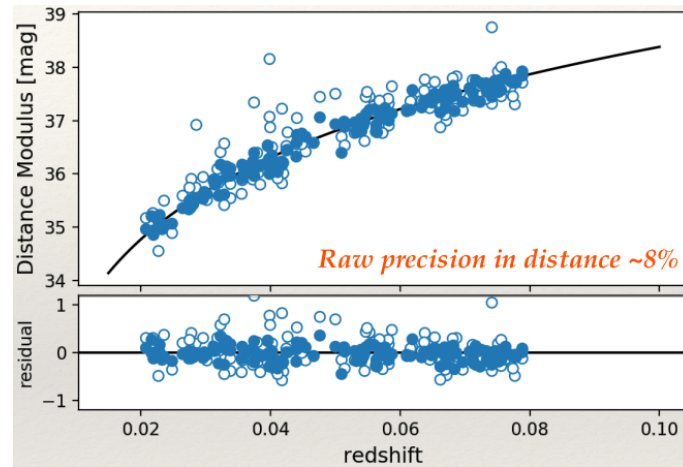


FIGURE 4 – Diagramme de Hubble avec, en haut, la magnitude apparente avant et après le processus de standardisation, qui consiste à inclure les corrélations entre la magnitude absolue et les paramètres de stretch et de couleur, respectivement en blanc et en bleu. En bas, on a le *résidu* montrant que la dispersion autour de la courbe noire, représentant l'évolution de la luminosité prédite par la loi de Hubble.

- Définitions ;
- Relations empiriques, équation corrigée.

I - 5. Incertitudes systématiques

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

I - 6. Problème du progéniteur

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

Parler du fait que le code est sur GitHub, et faire des références dans la suite.

II - Construction d'un échantillon complet

II - 1. Effets de sélection

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

II - 2. Méthode de détermination

- 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. Goldhaber, 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(2) :565–586, June 1999. arXiv : astro-ph/9812133.
- [2] Adam G. Riess, Alexei V. Filippenko, Peter Challis, Alejandro Clocchiattia, Alan Diercks, Peter M. Garnavich, Ron L. Gilliland, Craig J. Hogan, Saurabh Jha, Robert P. Kirshner, B. Leibundgut, M. M. Phillips, David Reiss, Brian P. Schmidt, Robert A. Schommer, R. Chris Smith, J. Spyromilio, Christopher Stubbs, Nicholas B. Suntzeff, and John Tonry. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *The Astronomical Journal*, 116(3) :1009–1038, September 1998. arXiv : astro-ph/9805201.

- [3] Brian P. Schmidt, Nicholas B. Suntzeff, M. M. Phillips, Robert A. Schommer, Alejandro Clocchiatti, Robert P. Kirshner, Peter Garnavich, Peter Challis, B. Leibundgut, J. Spyromilio, Adam G. Riess, Alexei V. Filippenko, Mario Hamuy, R. Chris Smith, Craig Hogan, Christopher Stubbs, Alan Diercks, David Reiss, Ron Gilliland, John Tonry, José 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(1) :46, November 1998.