#### СТАНДАРТИЗАЦИЯ СВЕРХНОВЫХ С УЧЕТОМ ПОПРАВКИ ЗА ОКРУЖЕНИЕ

## А. Ю. Балута<sup>1,2</sup>, М. В. Пружинская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, <sup>2</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга

Стандартизация сверхновых типа Ia (CH Ia) необходима для более точного измерения космологических параметров Вселенной с помощью диаграммы Хаббла. В модели CH Ia SALT2 используются два параметра стандартизации — параметр цвета c и параметр растяжения  $x_1$ . Из предыдущих работ известна зависимость параметра растяжения от морфологии родительской галактики и других параметров окружения сверхновых. В нашей работе мы воспроизводим фит диаграммы Хаббла по данным Pantheon, а также исследуем возможность введения различных уравнений стандартизации для CH, взорвавшихся в галактиках ранних и поздних морфологических типов.

#### ENVIRONMENTAL CORRECTION IN SUPERNOVAE STANDARDIZATION

## A. Yu. Baluta<sup>1,2</sup>, M. V. Pruzhinskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, <sup>2</sup>Sternberg Astronomical Institute

Standardization of type Ia supernovae (SNe Ia) is necessary for a more accurate measurement of the cosmological parameters of the Universe using the Hubble diagram. In the SALT2 SN Ia light-curve fitting model 2 standardization parameters are used — the color parameter c and the stretch parameter  $x_1$ . The stretch parameter dependence on the host galaxy morphology and other supernova environment parameters is known from previous works. In our work we reproduce the Hubble diagram fit according to Pantheon data, and also explore the possibility of introducing various standardization equations for SN exploded in early-type and late-type galaxies.

# Введение

Известно, что сверхновые типа Ia (CH Ia) являются хорошими индикаторами расстояний во Вселенной, точность измерения расстояний по CH Ia составляет ~5%. Сверхновые стандартизуемые объекты, то есть с помощью различных моделей стандартизации, которые, как правило, используют параметры кривых блеска, можно унифицировать значение абсолютной звездной величины CH в максимуме. В рамках модели SALT2 [1] используются два параметра стандартизации: параметр цвета  $c = (B - V)_{MAX} - \langle B - V \rangle$  и  $x_1$  – параметр растяжения. Наблюдаемый модуль расстояния с учетом уравнения стандартизации в статье [2] выглядит следующим образом:

$$\mu = m_B - M_B^\star + \alpha x_1 - \beta c + \Delta_M(\gamma) + \Delta_B, \qquad (1)$$

где  $m_B$  — видимая звездная величина в максимуме в фильтре B;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $M_B^*$  — параметры уравнения стандартизации;  $\Delta_M$  — поправка за звездную массу родительской галактики;  $\Delta_B$  — поправка, учитывающая эффекты селекции.

Поправка за цвет и растяжение не позволяет полностью избавиться от дисперсии модуля расстояния на диаграмме Хаббла. В современном космологическом анализе удается

<sup>©</sup> Балута А. Ю., Пружинская М. В., 2022

Сравнение результатов фита диаграммы Хаббла с результатами Scolnic et al., 2018 (модель C11) [2]

Параметр	Эта работа	Scolnic et al., 2018 [2]
$\Omega_m$	$0.302 \pm 0.028$	$0.298 \pm 0.022$
$\alpha$	$0.155 \pm 0.007$	$0.156 \pm 0.005$
$\beta$	$3.686 \pm 0.108$	$3.689 \pm 0.089$
$\gamma$	$0.055\pm0.012$	$0.054 \pm 0.009$

стандартизовать СН Ia с точностью 0.05—0.10<sup>m</sup> [2, 3]. Остаточный разброс может быть связан с эффектами окружения, которые не учитываются в текущих моделях стандартизации сверхновых. В качестве параметров окружения в литературе рассматривают звездную массу родительской галактики [4], ее скорость звездообразования [5], металличность [5], морфологический тип [6, 7], локальный цвет [8]. Все эти параметры коррелируют между собой, показывая, что в старом, пассивном, или в молодом, активном, звездном окружении взорвалась сверхновая.

В работе [7] впервые было рассмотрено влияние морфологии родительской галактики на параметры кривых блеска CH Ia для космологической выборки Pantheon [2]. Целью данной работы является воспроизведение диаграммы Хаббла для данных Pantheon и усовершенствование уравнения стандартизации с учетом фактора окружения. Мы хотим проверить, можно ли ввести различные уравнения стандартизации для двух популяций сверхновых, а именно CH, взорвавшихся в галактиках ранних морфологических типов (E–S0/a), и CH, взорвавшихся в галактиках поздних типов (Sa–Sd, Ir). Для достижения цели мы использовали 330 CH Ia Pantheon и информацию о морфологическом типе их родительских галактик из статьи [7], где была найдена зависимость параметра растяжения от окружения CH Ia.

# Построение диаграммы Хаббла

Все СН из выборки Pantheon мы нанесли на диаграмму Хаббла. Для нахождения параметров стандартизации сверхновых и космологических параметров мы минимизировали  $\chi^2$ , рассчитанный по формуле

$$\chi^2(\alpha, \beta, \gamma, M_B, \Omega_m) = \Delta \vec{\mu}^T \cdot \mathbf{C}^{-1} \cdot \Delta \vec{\mu}, \qquad (2)$$

где  $\Delta \vec{\mu} = \vec{\mu} - \vec{\mu}_{model}$ , а **С** — это ковариационная матрица ошибок, включающая в себя статистические и систематические ошибки. Теоретический модуль расстояния  $\vec{\mu}_{model}$  рассчитывался в предположении плоской  $\Lambda$ CDM космологии, где  $\Omega_m$  — плотность барионной и темной материи, а наблюдаемый  $\vec{\mu}$  — по формуле 1. Минимизация осуществлялась с помощью пакета Python IMINUIT. Значение постоянной Хаббла  $H_0$  было принято равным 73.04 км/с/Мпк [9].

Как видно из таблицы, наши результаты хорошо согласуются с оригинальными значениями, полученными в работе [2].

# Введение различных параметров стандартизации для галактик раннего и позднего типов

В работе [7] найдена зависимость между параметром растяжения  $x_1$  и морфологическим типом родительской галактики CH; для родительских галактик раннего типа характерны меньшие значения параметра растяжения по сравнению с галактиками позднего типа. Интересно посмотреть, будут ли разными углы наклона зависимости  $M_B$  от параметров цвета и растяжения для двух популяций сверхновых. В случае наблюдения характерного излома на графике мы можем сделать вывод о целесообразности введения различных уравнений стандартизации сверхновых в галактиках ранних (PA) и поздних (SF) типов. Тогда

$$M_B = M_B^* - \alpha_1 x_{1,PA} - \alpha_2 x_{1,SF} + \beta_1 c_{PA} + \beta_2 c_{SF}, \qquad (3)$$

где  $\alpha_1 x_{1,PA}$  и  $\beta_1 c_{PA}$  применяются к галактикам раннего типа, а  $\alpha_2 x_{1,SF}$  и  $\beta_2 c_{SF}$  соответственно к галактикам позднего типа.

На графиках (см. рисунок) представлены 330 CH с известными морфологическими типами родительских галактик. Значения  $\alpha = 0.155 \pm 0.007$  и  $\beta = 3.686 \pm 0.108$  для расчета абсолютных звездных величин CH Ia были взяты из таблицы. Мы не наблюдаем существенных различий в значениях угла наклона для двух популяций CH. Однако на графике  $M_B(c)$  наблюдается сдвиг средних значений  $M_B^*$  между сверхновыми в галактиках ранних и поздних типов. Наша дальнейшая работа будет посвящена более детальному изучению этих различий.



Зависимость между абсолютной звездной величиной СН Ia выборки Pantheon и параметрами цвета и растяжения. Синие точки соответствуют СН в галактиках раннего типа (PA), красные — СН в галактиках позднего типа (SF).

# Результаты и перспективы исследования

Мы успешно воспроизвели фит диаграммы Хаббла для CH Ia выборки Pantheon. В дальшейшем планируется отдельно выполнить фит диаграммы Хаббла для CH, взорвавшихся в галактиках ранних и поздних морфологических типов, и сравнить значения параметров фита между собой.

Также будет продолжено исследование возможности введения различных уравнений стандартизации для разных популяций сверхновых. В качестве критерия отнесения к той или иной популяции могут быть рассмотрены не только морфологический тип родительской галактики, но и ее звездная масса или функция звездообразования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального центра научных исследований Франции в рамках научного проекта 21-52-15024, а также при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

#### Библиографические ссылки

- Guy J., Astier P., Baumont S. et al. SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators // Astron. Astrophys. - 2007. - Vol. 466, № 1. - P. 11-21. astro-ph/0701828.
- [2] Scolnic D. M., Jones D. O., Rest A. et al. The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample // Astrophys. J. - 2018. - Vol. 859, № 2. - P. 101. 1710.00845.
- [3] Scolnic Dan, Brout Dillon, Carr Anthony et al. The Pantheon+ Type Ia Supernova Sample: The Full Dataset and Light-Curve Release // arXiv e-prints. - 2021. - P. arXiv:2112.03863. 2112.03863.
- [4] Lampeitl Hubert, Smith Mathew, Nichol Robert C. et al. The Effect of Host Galaxies on Type Ia Supernovae in the SDSS-II Supernova Survey // Astrophys. J. − 2010. − Vol. 722, № 1. − P. 566− 576. 1005.4687.
- [5] Sullivan M., Conley A., Howell D. A. et al. The dependence of Type Ia Supernovae luminosities on their host galaxies // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2010. - Vol. 406, № 2. - P. 782-802. 1003.5119.
- [6] Sullivan M., Ellis R. S., Aldering G. et al. The Hubble diagram of type Ia supernovae as a function of host galaxy morphology // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 2003. - Vol. 340, № 4. - P. 1057-1075. astro-ph/0211444.
- [7] Pruzhinskaya M. V., Novinskaya A. K., Pauna N., Rosnet P. The dependence of Type Ia Supernovae SALT2 light-curve parameters on host galaxy morphology // Mon. Not. R. Astron. Soc. – 2020. – Vol. 499, № 4. – P. 5121–5135. 2006.09433.
- [8] Roman M., Hardin D., Betoule M. et al. Dependence of Type Ia supernova luminosities on their local environment // Astron. Astrophys. - 2018. - Vol. 615. - P. A68. 1706.07697.
- [9] Riess Adam G., Yuan Wenlong, Macri Lucas M. et al. A Comprehensive Measurement of the Local Value of the Hubble Constant with 1 km/s/Mpc Uncertainty from the Hubble Space Telescope and the SH0ES Team // arXiv e-prints. - 2021. - P. arXiv:2112.04510. 2112.04510.