

КРИВЫЕ БЛЕСКА СВЕРХНОВЫХ Ia

© 2021 г. А. В. Лютых^{1,2*}, М. В. Пружинская^{2,3}, С. И. Блинников^{4,5}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, Москва, Россия

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

³Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

⁴Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова Национального
исследовательского центра “Курчатовский институт”, Москва, Россия

⁵Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 06.11.2020 г.

После доработки 18.11.2020 г.; принята к публикации 26.11.2020 г.

Мы исследовали кривые блеска сверхновых типа Ia (СН Ia), а также получаемые из них физические параметры. В ходе выполнения работы были построены как аналитические, так и численные кривые блеска СН Ia. Используя эмпирическое соотношение, связывающее светимость сверхновых с параметрами кривых блеска, нам удалось наложить ограничения на гидродинамические решения, получаемые кодом STELLA, и создать выборку моделей, максимально точно описывающих наблюдаемые проявления реальных сверхновых. С помощью данной выборки мы установили взаимосвязь между значением непрозрачности в оболочке СН Ia и параметрами, непосредственно определяемыми из наблюдений. Метод был апробирован на примере двух классических сверхновых типа Ia: 2011fe и 2012fg. Представленный подход позволяет находить непрозрачность, не прибегая к ресурсоемким вычислениям.

Ключевые слова: сверхновые, кривые блеска, параметр Хаббла–Леметра.

DOI: 10.31857/S032001082101006X

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхновые типа Ia (СН Ia) успешно используются в качестве индикаторов космологических расстояний, поскольку имеют высокую светимость в максимуме блеска (Бетуль и др., 2014; Скольник и др., 2018; Аббот и др., 2019). Важно и то, что значение этой светимости может быть “стандартизовано”, т.е. приведено к одной и той же величине. Впервые эмпирическое соотношение между светимостью сверхновых в максимуме блеска и формой их кривых блеска было опубликовано в Рафт (1974) и Псковский (1977, 1984). На небольшой выборке сверхновых в этих работах было показано, что блеск СН Ia с большей светимостью медленнее спадает после максимума, т.е. кривая блеска выглядит более полого. Позже было обнаружено, что светимость СН Ia так же зависит от их цвета (Хамуй и др., 1996; Трипп, 1998). К настоящему времени разработано несколько методов и моделей стандартизации сверхновых, среди них метод Δm_{15}

(Филлипс, 1993; Филлипс и др., 1999), SALT2 (Гай и др., 2007), SNEMO (Сондерс и др., 2007), SUGAR (Легет и др., 2007).

Существует несколько сценариев взрыва сверхновых типа Ia. Обычно это термоядерный взрыв С-О белого карлика, масса которого стала больше Chandrasekhar в результате аккреции (механизм Шацмана; Уилан, Ибен, 1973; Хатису и др., 1996), или слияние двух белых карликов, с общей массой больше предела устойчивости (Ибен, Тутуков, 1984; Веббинк, 1984). Чтобы объяснить все многообразие наблюдаемых подтипов СН Ia (91bg-like, Iax, 91T-like, 03fg-like и др.), существуют некоторые альтернативные сценарии, такие как суб-Чандрасекаровский сценарий, который обычно ассоциируется со слабыми взрывами, или супер-Чандрасекаровский — для более ярких событий (Полин и др., 2019; Хатису и др., 2012; Финк и др., 2018; Сяо и др., 2020). Важно подчеркнуть, что еще неизвестно, какой из сценариев реализуется в природе, а если же работают несколько из них, то в какой пропорции.

*Электронный адрес: lutixalex1998@gmail.com

Благодаря сверхновым типа Ia удалось открыть ускоренное расширение Вселенной (Рис и др., 1998; Перлмуттер и др., 1999), а точнее, необходимость введения в космологические модели лямбда-члена или темной энергии. Это открытие в дальнейшем было подтверждено на основе измерений анизотропии реликтового излучения по данным миссий WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, Шпергель и др., 2003) и Planck (Сотрудничество Планка и др., 2014, 2020), а также на основе барионных акустических осцилляций (Андерсон др., 2014). Более детально ознакомиться с современным состоянием теории и наблюдений ускоренного расширения Вселенной можно в обзоре (Блинников, Долгов, 2019).

В последнее время было найдено расхождение между параметрами Хаббла—Леметра, получаемыми различными методами (Верде и др., 2019). Так, измеряя расстояния по сверхновым Ia, получают следующий параметр Хаббла—Леметра (Рис и др., 2019):

$$H_0 = 74.0 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}. \quad (1)$$

В то время как данные Planck (Сотрудничество Планка и др., 2020) дают значение

$$H_0 = 67.4 \pm 0.5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}. \quad (2)$$

Таким образом, разница между двумя шкалами расстояний составляет $\sim 10\%$. Для того чтобы понять, почему возникает расхождение в значениях параметра Хаббла—Леметра, необходимо тщательно исследовать природу возможных систематических ошибок в обоих подходах (Ковальски и др., 2008; Сотрудничество Планка и др., 2016; Рис и др., 2016; Фридман и др., 2019).

Важным источником информации о звездепрародителе сверхновой, а также деталях взрыва являются кривые блеска. Существуют различные способы описания кривых блеска СН Ia: аналитический подход (Арнетт, 1979), полуаналитический подход (Сухболд, 2019), а также с помощью численных расчетов (STELLA, Блинников и др., 2019; LUCY, Люси, 2005; TARDIS, Керзендорф, Сим, 2019; SEDONA, Касен и др., 2006; ARTIS, Кромер, Сим, 2009). Все эти подходы так или иначе сталкиваются с необходимостью калибровки кривых блеска, а также требуют применения определенных допущений о характере распространения излучения сквозь оболочку сверхновой. Более того, не всегда возможно точно определить значение непрозрачности, кардинально влияющей на форму кривой блеска.

В данной работе мы используем наблюдательные проявления кривых блеска СН Ia, такие как

закон Псковского—Филлипса, чтобы найти ограничения на гидродинамические решения, получаемые с помощью расчетов на STELLA. В результате, используя ограниченную выборку моделей, которые наилучшим образом описывают реальные сверхновые, мы рассматриваем взаимосвязь между непрозрачностью сверхновых и характерными временами на кривой блеска.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ И РАСЧЕТ КРИВЫХ БЛЕСКА КОДОМ STELLA

Для расчета кривых блеска сверхновых с помощью гидродинамического кода STELLA (Блинников и др., 2006) мы используем модели Вусли и др. (Вусли и др., 2007). Данные модели представлены в табл. 1.

Модели отличаются между собой по химическому составу. Все они имеют чандрасекаровскую массу $1.4 M_{\odot}$. Буква m в названии отражает то, что химический состав слегка смешан (mixed), т.е. нет полной гомогенизации звезды, стратификация состава сохраняется, но один слой переходит в другой не скачком, а плавно. Цифры имеют следующий смысл. Первые две — это масса радиоактивного ^{56}Ni сразу после взрыва в центральных слоях. Например, 02 означает $0.2 M_{\odot}$, 06 означает $0.6 M_{\odot}$ и т.д. (см. табл. 1). Далее таким же образом обозначаются слои с нерадиоактивными элементами железного пика. Потом идет слой промежуточных элементов (кремний и сера). Остальные буквы (mh) — это техническое обозначение использованного зонирования в конечно-разностной схеме. Например, m040301mh имеет $0.4 M_{\odot}$ радиоактивного ^{56}Ni , затем слой $0.3 M_{\odot}$ железного пика, $0.1 M_{\odot}$ — кремния и серы. Остальное — внешние слои — это несгоревшие исходные углерод и кислород в равных долях. Здесь это $0.6 M_{\odot}$. Кинетическая энергия разлета начальной модели точно соответствует калорийности перехода CO смеси в конечный состав за вычетом гравитационной энергии связи белого карлика перед взрывом.

Непосредственный расчет кривых блеска сверхновых на основе данных моделей производится с помощью радиационного гидродинамического кода STELLA (Блинников и др., 2006). Код STELLA успешно применялся для моделирования сверхновых звезд разных типов, включая сверхновые типа Ia (Блинников и др., 1998; Бакланов и др., 2005; Фолателли и др., 2006; Томинага и др., 2009; Цветков и др., 2012; Таврис и др., 2013; Вольнова и др., 2017; Балакина и др., 2020). В работах Вусли и др. (2007), Кромер, Сим (2009), Сим и др. (2010), Козырева и др. (2017), Цанг и др. (2020) было показано, что STELLA хорошо согласуется с другими известными кодами, которые используются для моделирования кривых блеска сверхновых.

Таблица 1. Модели сверхновых типа Ia

№ Модели	Имя модели	Масса радиоактивного никеля, $M_{56\text{Ni}}$ (M_{\odot})	Согласование с уравнением стандартизации (4)	E_{kin} (foe)	v_{CO} , тыс. км/с
0	m020209mh	0.2	нет	1.380	11.80
1	m020205mh	0.2	да	0.864	7.12
2	m010309mh	0.1	да	1.394	11.87
3	m050203mh	0.5	нет	1.104	8.02
4	m010305mh	0.1	да	0.880	6.10
5	m030307mh	0.3	нет	1.466	12.17
6	m060201mh	0.6	да	1.012	6.73
7	m070201mh	0.7	нет	1.176	8.31
8	m050205mh	0.5	нет	1.359	10.93
9	m040301mh	0.4	да	0.863	5.24
10	m020305mh	0.2	да	1.045	7.71
11	m070203mh	0.7	нет	1.435	11.30
12	m060203mh	0.4	нет	1.269	9.63
13	m040303mh	0.4	нет	1.117	8.07
14	m010209mh	0.1	да	1.214	10.32
15	m060205mh	0.6	нет	1.524	12.42
16	m070301mh	0.7	нет	1.354	9.97
17	m020303mh	0.2	да	0.787	4.95
18	m020207mh	0.2	да	1.122	8.94
19	m040305mh	0.4	нет	1.375	11.01
20	m050201mh	0.5	да	0.847	5.21
21	m080103mh	0.8	нет	1.419	11.23
22	m010307mh	0.1	да	1.135	8.99

3. ВЫБОР МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА

На следующем этапе работы мы проверяем, удовлетворяют ли представленные модели эмпирическому закону Псковского—Филлипса:

$$M_V = -20.883(0.417) + \quad (3) \\ + 1.949(0.292)\Delta m_{15}(B),$$

где M_V — абсолютная звездная величина СН Ia в фильтре V , а параметр Δm_{15} показывает, на сколько звездных величин падает блеск сверхновой в синих лучах за первые 15 дней после максимума

(Филлипс, 1993; Филлипс и др., 1999). Результаты проверки приведены на рис. 1. Каждой точке на графике соответствует определенная модель из табл. 1. Как видно из графика, не все представленные модели согласуются с наблюдательными проявлениями сверхновых типа Ia.

Однако в современном космологическом анализе для стандартизации сверхновых используются более сложные модели параметризации их кривых блеска. Наиболее популярной моделью является модель SALT2 (Гай и др., 2007). Основными па-

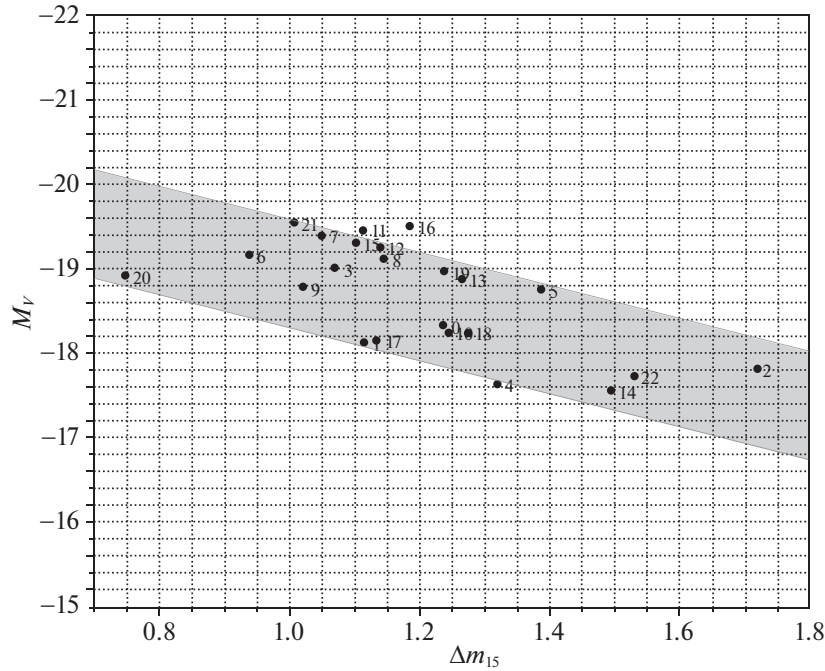


Рис. 1. Зависимость абсолютной звездной величины в полосе V в максимуме блеска от параметра Δm_{15} . Закрашенная область соответствует разбросу значений M_V в $1-\sigma$. Точками обозначены модели из табл. 1.

параметрами модели SALT2 являются параметр x_1 (стретч) и c (цвет). Параметр x_1 характеризует форму кривой блеска, а параметр c определяется как разница между цветом $(B - V)_{\text{max}}$ в максимуме в B полосе и средним $\langle B - V \rangle$. С учетом этих параметров уравнение стандартизации сверхновых

выглядит следующим образом:

$$M_B^* = M_B - \alpha x_1 + \beta c, \quad (4)$$

где M_B^* — абсолютная звездная величина в B полосе в максимуме блеска, а M_B , α и β — параметры уравнения стандартизации.

Для подгонки кривых блеска, рассчитанных STELLA, моделью SALT2 используется библиотека на языке PYTHON — SNCOSMO¹. Подгонка происходит в трех фотометрических полосах: B , V , R (Бессель и др., 1990).

Используя уравнение (4) и приняв следующие значения параметров стандартизации: $M_B = -19.48$, $\alpha = 0.154$, $\beta = 3.02$ (Скольник и др., 2018), построим двумерную зависимость абсолютной звездной величины M_B^* от параметра цвета c и параметра формы кривой блеска x_1 (рис. 2). Плоскости ограничивают область в одно стандартное отклонение от среднего значения M_B^* . Модели, попавшие в $1-\sigma$ интервал, мы будем использовать для дальнейшего анализа (см. табл. 1, столбец 4).

Проверим, согласуются ли отобранные модели с соотношением Псковского—Филлипа (рис. 3).

Резюмируя, можно сказать, что кривые блеска отобранных моделей с разумной точностью удовлетворяют современному уравнению стандартизации (уравнение (4), Скольник и др., 2018), а

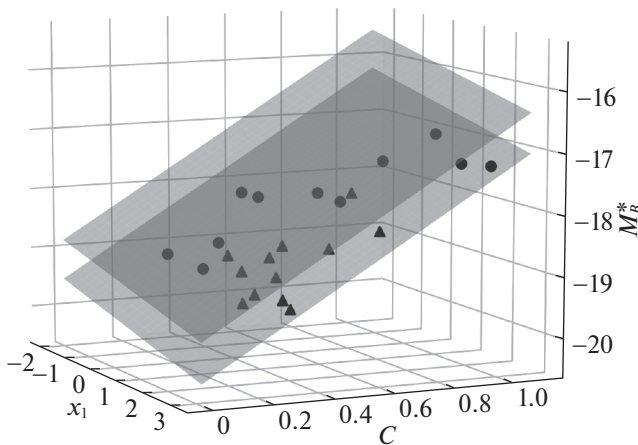


Рис. 2. Зависимость звездной величины в полосе B в максимуме блеска от параметра цвета (c) и параметра формы кривой блеска (x_1). Плоскости ограничивают область в одно стандартное отклонение от среднего значения M_B^* . Точками обозначены модели, удовлетворяющие уравнению стандартизации (4) с выбранными параметрами. Треугольниками обозначены модели, не вошедшие в исследуемую выборку.

¹ <https://sncosmo.readthedocs.io/en/latest/index.html>

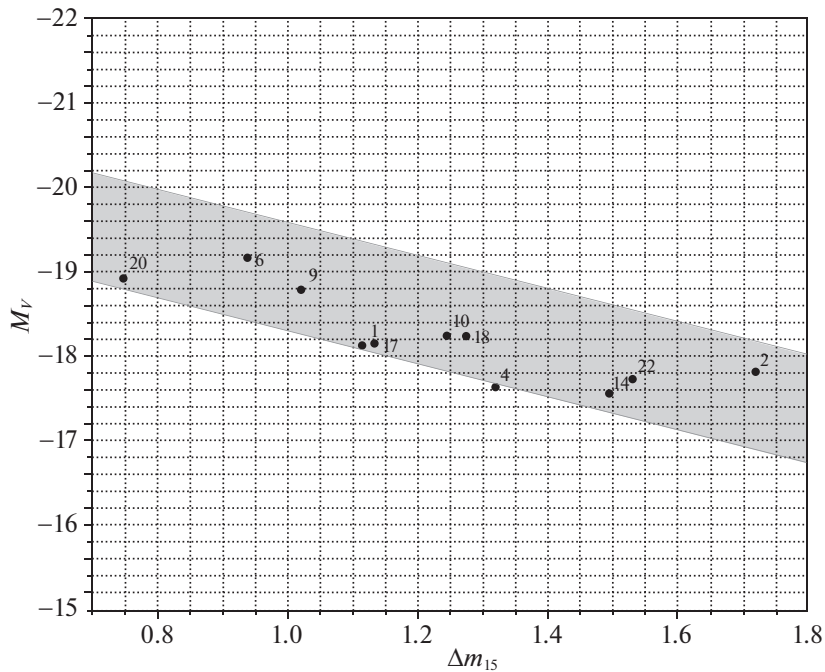


Рис. 3. Зависимость абсолютной звездной величины в полосе V в максимуме блеска от параметра Δm_{15} . Закрашенная область соответствует разбросу значений M_V в $1 - \sigma$. Точками обозначены модели, удовлетворяющие уравнению стандартизации (4) с выбранными параметрами, числовые значения соответствуют номеру модели из табл. 1.

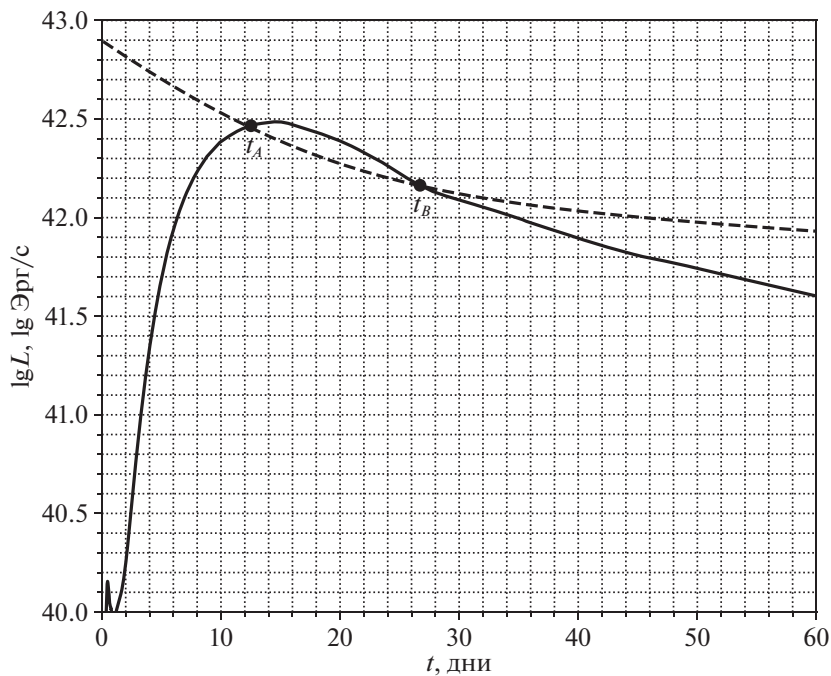


Рис. 4. Болومترическая кривая блеска L_{bol} , полученная на основе расчетов на STELLA, и полная излученная мощность в гамма-диапазоне L_γ (Арнетт, 1979) — на примере модели m020205mh.

также соотношению Псковского—Филлипса (уравнение (3)). Как было показано в Вусли и др. (2007), полный набор из сотен моделей никоим образом не удовлетворяет наблюдаемой зависимости “абсолютная звездная величина—форма кривой

блеска”, в природе происходит их естественный отбор. Детали такого отбора пока не установлены теорией, однако это не мешает нам делать полезные предсказания с помощью нашей выборки моделей сверхновых.

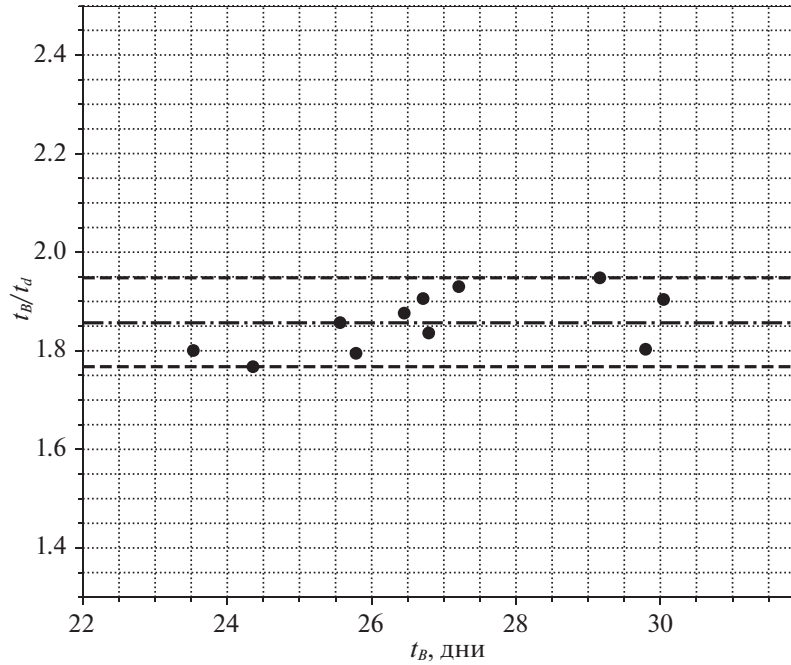


Рис. 5. Зависимость t_B/t_d от t_B , рассчитанная для исследуемой выборки моделей. Пунктирные линии ограничивают разброс значений t_B/t_d , а штрихпунктирная — соответствует среднему значению $\langle t_B/t_d \rangle \simeq 1.86$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН НА КРИВОЙ БЛЕСКА

В этом разделе мы обсуждаем, какие безразмерные параметры могут быть получены на основе аналитического описания кривых блеска сверхновых.

Для моделей из табл. 1 построим болометрические кривые блеска, рассчитанные гидродинамическим кодом STELLA. Кроме того, используя аналитическое описание Арнетта (1979), рассчитаем для каждой из них кривую, обусловленную радиоактивным распадом никеля и кобальта, L_γ , по формуле

$$L_\gamma = \frac{M_{\text{Ni}}}{M_\odot} (\epsilon_{\text{Ni}} e^{-\frac{t}{t_{\text{Ni}}}} + \epsilon_{\text{Co}} e^{-\frac{t}{t_{\text{Co}}}}), \quad (5)$$

где M_{Ni} — масса образовавшегося радиоактивного ^{56}Ni в долях солнечной массы; ϵ_{Ni} , ϵ_{Co} — удельная энергия, высвобождаемая при радиоактивном распаде ^{56}Ni и ^{56}Co соответственно; t_{Ni} , t_{Co} — времена полураспада. Значения ϵ_{Ni} , ϵ_{Co} , t_{Ni} , t_{Co} определяются на основе ядерных данных (см. табл. 2).

Построим болометрическую кривую блеска L_{bol} и полную излученную мощность L_γ , вычисляемую из уравнения (5). Кривые L_{bol} и L_γ пересекаются друг с другом в моменты времени t_A и t_B (рис. 4).

Далее для исследуемых моделей рассмотрим отношение t_B/t_d , где t_B — момент второго пересечения болометрической кривой блеска с кривой L_γ ,

а t_d — время диффузии, определяемое как

$$t_d = \sqrt{\frac{3\kappa M_{ej}}{4\pi c v}}, \quad (6)$$

где M_{ej} — масса сброшенной оболочки, v — скорость фотосферы, κ — непрозрачность, которые вычисляются с помощью STELLA, c — скорость света (Арнетт, 1979). Как видно на рис. 5, значения t_B/t_d для рассматриваемой выборки моделей лежат в интервале [1.77, 1.95]. Среднее значение $\langle t_B/t_d \rangle$ составляет 1.86, что согласуется со значением ~ 1.7 , найденным в работе Сухболд (2019).

Аналогичным образом для выборки моделей определяем момент первого пересечения кривых L_{bol} и L_γ (точка t_A) и строим зависимость t_B/t_d от t_A/t_d (рис. 6). Как видно, среднее значение отношения $\langle t_A/t_d \rangle \simeq 0.99$, что и следовало ожидать, поскольку нагрев оболочки происходит на временных масштабах порядка времени диффузии.

В следующем разделе, на основе полученного отношения t_B/t_d , мы рассчитаем значения непрозрачности для моделей исследуемой выборки.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕПРОЗРАЧНОСТИ

В данном разделе мы получаем ограничение на величину непрозрачности κ в зависимости от момента времени t_B . Для этого мы используем полученную в предыдущем разделе зависимость t_B/t_d от t_B (см. рис. 5), а также взаимосвязь

Таблица 2. Ядерные данные для ^{56}Ni и ^{56}Co

Данные	^{56}Ni	^{56}Co
Время полураспада	$t_{\text{Ni}} = 8.8$ дней	$t_{\text{Co}} = 111.3$ дней
Высвобождаемая энергия	$\epsilon_{\text{Ni}} = 6.45 \times 10^{43}$ Эрг/(г с)	$\epsilon_{\text{Co}} = 1.45 \times 10^{43}$ Эрг/(г с)

Таблица 3. Значения непрозрачности и параметры наилучших моделей STELLA для SN 2011fe и SN 2012fr

Сверхновые	Модель	t_B , дни	$M_{^{56}\text{Ni}}, M_{\odot}$	κ , cm^2/g
SN 2011fe	m050201mh	~ 26.9	0.5	0.10 ± 0.01
SN 2012fr	m060201mh	~ 23.7	0.6	0.08 ± 0.01

непрозрачности и времени диффузии (уравнение (6)). Таким образом, мы получаем зависимость, показанную на рис. 7.

Среднее значение непрозрачности оказывается $\langle \kappa \rangle \simeq 0.1$. Так как M_{ej} для всех моделей имеет одно и то же численное значение, то наибольшее влияние на полученную зависимость оказывает скорость фотосферы v . Поскольку непрозрачность сложно определить без привлечения ресурсоемких вычислений, представленный подход может помочь в первичной оценке ее численного значения.

6. СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

В данном разделе вышеописанный подход применяется для определения непрозрачности наблюдавшихся сверхновых типа Ia.

В качестве примера рассмотрим две сверхновые: SN 2011fe, SN 2012fr. Оба объекта являются классическими сверхновыми, а значит, они удовлетворяют уравнению стандартизации. Болометрическая кривая блеска для SN 2011fe взята из работы Дадо, Дар (2015), а для SN 2012fr — из работы Контерас и др. (2018). Среди моделей, представленных в табл. 1, мы выбираем наилучшую модель, описывающую наблюдаемую кривую блеска каждой сверхновой. Массовая доля ^{56}Ni для расчета полной излученной мощности в гамма-диапазоне по формуле (5) берется из параметров наилучшей модели. Наблюдения, подобранная модель и L_{γ} для SN 2011fe и SN 2012fr представлены на рис. 8 и 9 соответственно.

Используя зависимость величины непрозрачности κ от времени t_B , представленной на рис. 7, мы определяем величину непрозрачности. Значение t_B определяется как второй момент пересечения болометрической модельной кривой блеска и L_{γ} . Найденные значения непрозрачности, а также параметры подобранных к SN 2011fe и SN 2012fr моделей STELLA представлены в табл. 3.

7. ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном разделе обсуждаются полученные результаты, а также их практическая значимость.

В ходе выполнения работы были рассчитаны кривые блеска сверхновых типа Ia на основе моделей Вусли и др. (2007) с помощью гидродинамического кода STELLA. Из полученных моделей были отобраны только те модели, которые удовлетворяют современному уравнению стандартизации (уравнение (4), Скольник и др., 2018), а также соотношению Псковского—Филлипса (уравнение (3)).

С помощью отобранных моделей и аналитического описания Арнетта нам удалось наложить ограничения на отношение характерных времен t_A и t_B , получаемых из кривых блеска сверхновых, и времени диффузии t_d . Среднее значение отношения времени t_B к диффузионному времени t_d согласуется с результатом, представленным в статье (Сухболд, 2019). Данное отношение было использовано для определения зависимости значения непрозрачности κ от времени t_B .

Время t_B определяется из пересечения болометрической кривой блеска и полной излученной мощности в гамма-диапазоне L_{γ} . Значение κ можно дальше определить двумя способами. Первый способ — использование отношения t_B/t_d , второй способ основан на непосредственном определении непрозрачности, исходя из найденной зависимости на рис. 7. Второй метод предпочтительнее, поскольку скорость фотосферы, входящая в определение времени диффузии, является плохо определяемым параметром. Данный подход был апробирован на реальных сверхновых: 2011fe и 2012fr. Теоретические модели, подобранные с помощью кода STELLA для этих сверхновых, показали хорошее согласие с наблюдениями. Важно отметить,

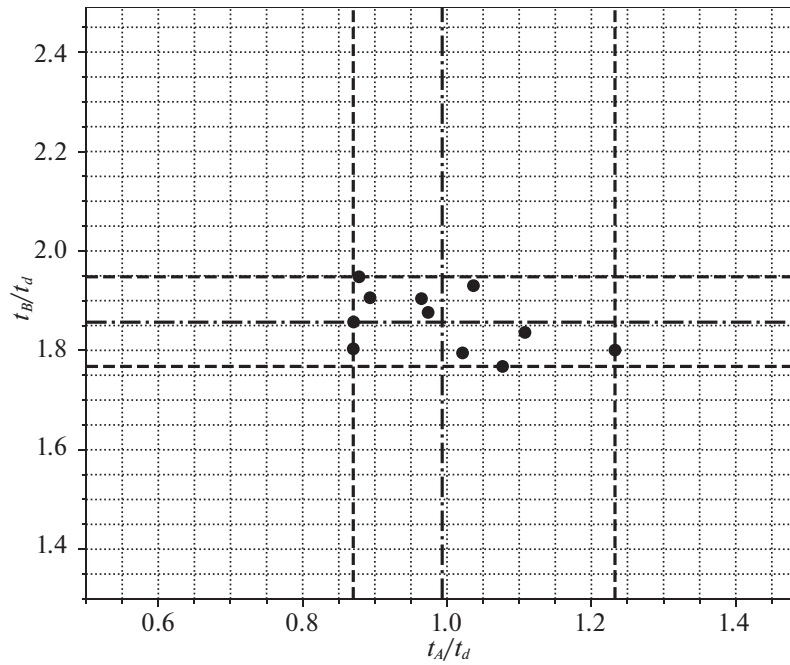


Рис. 6. Зависимость t_B/t_d от t_A/t_d , рассчитанная для исследуемой выборки моделей. Пунктирные линии ограничивают разброс значений t_B/t_d и t_A/t_d , а штрихпунктирные соответствуют средним значениям $\langle t_B/t_d \rangle \simeq 1.86$ и $\langle t_A/t_d \rangle \simeq 0.99$.

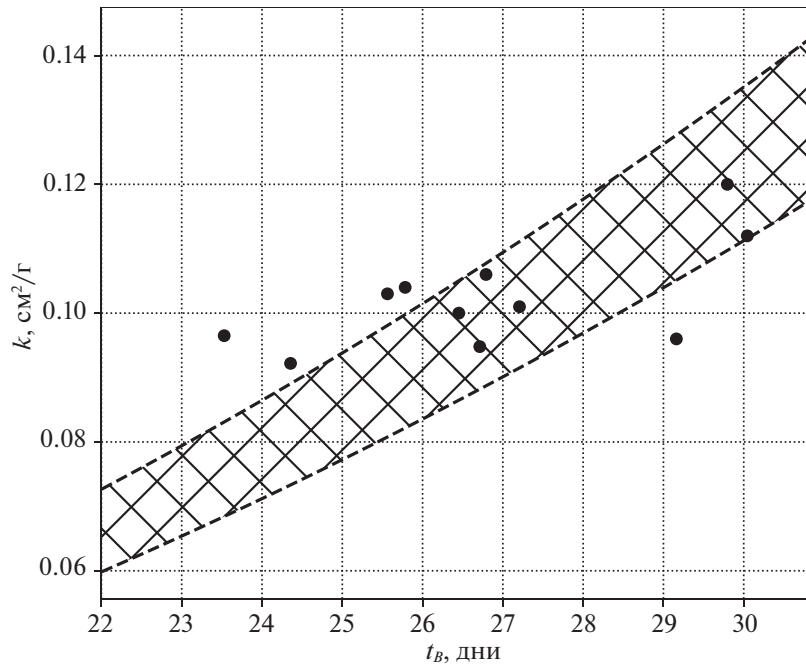


Рис. 7. Зависимость величины непрозрачности κ от времени t_B . Заштрихованная область соответствует области допустимых значений t_B/t_d при скорости фотосферы $v = 14$ тыс. км/с. Точками обозначены модели исследуемой выборки.

что в ближайшем будущем будет возможно открывать сверхновые в течение нескольких дней после взрыва (Джонс и др., 2020). Тогда мы сможем с самого начала получать детальную широкополосную фотометрию, что значительно улучшит точность наблюдаемых болометрических кривых блеска.

Используемые модели рассчитаны в предпо-

ложении сферически-симметричного взрыва С-О белого карлика, однако, например, DD сценарий взрыва предполагает наличие большого удельного углового момента в отличие от SD сценария. Это, в свою очередь, ведет к асимметрии взрыва. Регистрация значительной поляризации оптического излучения в континууме могла бы свидетельство-

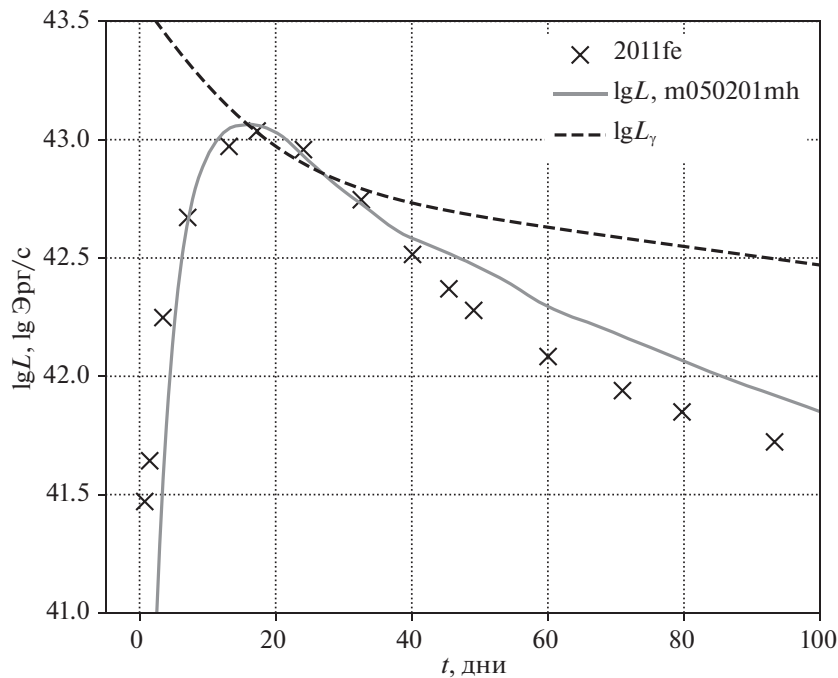


Рис. 8. Боллометрическая кривая блеска (крестики; Дадо, Дар, 2015), наилучшая подобранная модель STELLA (сплошная линия) и полная излученная мощность в гамма-диапазоне L_γ (штриховая линия) для СН 2011fe.

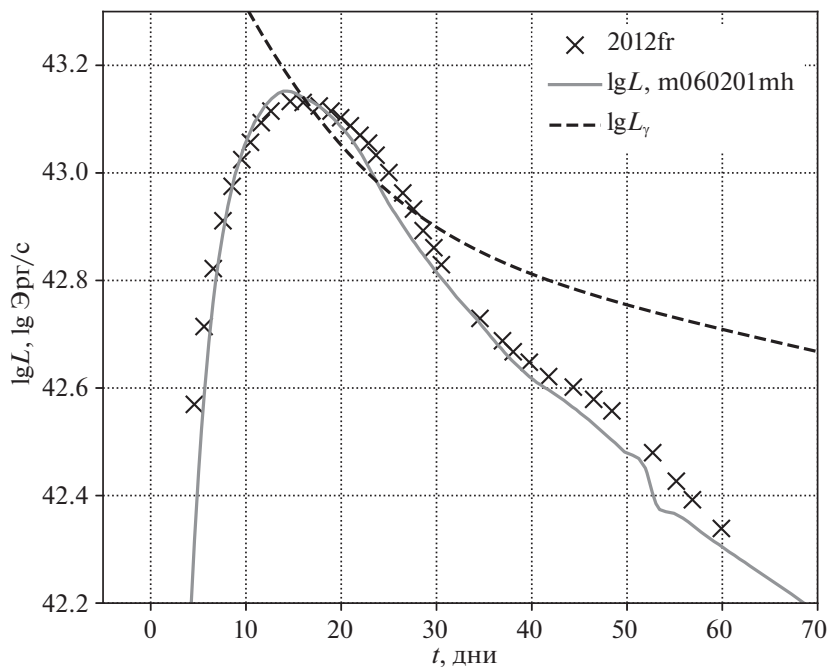


Рис. 9. Боллометрическая кривая блеска (крестики; Контрерас и др., 2018), наилучшая подобранная модель STELLA (сплошная линия) и полная излученная мощность в гамма-диапазоне L_γ (штриховая линия) для СН 2012fr.

вать об асимметрии взрыва и служить независимым аргументом в пользу сценария сливающихся белых карликов. Однако до сих пор поляризации в континууме у СН Ia обнаружено не было (Ван, Уилер, 2008), что указывает на сферичность взрыва или на существование нескольких сценариев и механизмов взрыва СН Ia (Чикота и др., 2019).

Найденная зависимость позволяет без привлечения ресурсоемких вычислений, на основе одних лишь наблюдений, находить значения непрозрачности для СН Ia. Поскольку для отбора моделей сверхновых мы использовали уравнение стандартизации, параметры которого были вычислены на основе большой выборки реальных сверхновых, то

мы ожидаем, что полученная зависимость применима к большинству сверхновых типа Ia.

Задача будущей теории — объяснить из первых принципов, какой сценарий и механизм взрыва СН Ia обеспечивают найденную в настоящей работе закономерность для непрозрачности.

Авторы благодарны анонимному рецензенту за важные замечания.

А.В. Лютых благодарен финансовой поддержке РФФИ и ЯОПН в рамках научного проекта № 19-52-50014 за поддержку в выполнении расчетов кривых блеска кодом STELLA. М.В. Пружинская благодарит грант Российского научного фонда (проект № 18-12-00522) за подгонку модельных кривых блеска кодом SNCOSMO. С.И. Блинные благодарит грант Российского научного фонда (проект № 19-12-00229) за поддержку разработки и сопровождения кода STELLA.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аббот и др. (T.M.C. Abbott, S. Allam, P. Andersen, C. Angus, J. Asorey, A. Avelino, S. Avila, et al.), *Astrophys. J.* **872**, L30 (2019).
2. Андерсон и др. (L. Anderson, E. Aubourg, S. Bailey, F. Beutler, V. Bhardwaj, M. Blanton, A.S. Bolton, J. Brinkmann, et al.), *MNRAS* **441**, 24 (2014).
3. Арнетт (W.D. Arnett), *Astrophys. J.* **230**, L37 (1979).
4. Арнетт и др. (W.D. Arnett, Ch. Fryer and Th. Matheson), *Astrophys. J.* **33**, 846 (2017).
5. Бакланов П.В., Блинные С.И., Павлюк Н.Н., Письма в Астрон. журн. **31**, 483 (2005) [P.V. Baklanov, et al., *Astron. Lett.* **31**, 429 (2005)].
6. Балакина и др. (E.A. Balakina, et al.), arXiv e-prints **230**, L37 (1979).
7. Бессель (M.S. Bessell), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **102**, 1181 (1990).
8. Бетуль и др. (M. Betoule, R. Kessler, J. Guy, J. Mosher, D. Hardin, R. Biswas, P. Astier, P. El-Nage, et al.), *Astron. Astrophys.* **568**, A22 (2014).
9. Блинные С.И., Долгов А.Д., Успехи физ. наук **6**, 189 (2019).
10. Блинные и др. (S.I. Blinnikov, F.K. Röpke, E.I. Sorokina, M. Gieseler, M. Reinecke, C. Travaglio, W. Hillebrandt, and M. Stritzinger), *Astron. Astrophys.* **453**, 229 (2006).
11. Блинные, Сорокина (S.I. Blinnikov and E.I. Sorokina), *Astron. Astrophys.* **356**, L30 (2000).
12. Блинные и др. (S.I. Blinnikov, R. Eastman, O.S. Bartunov, V.A. Popolitov, and S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **496**, 454 (1998).
13. Ван, Уилер (L. Wang and J.C. Wheeler), *Astron. J.* **46**, 433 (2008).
14. Веббинк (R.F. Webbink), *Astrophys. J.* **277**, 355 (1984).
15. Верде и др. (L. Verde, T. Treu, and A.G. Riess), *Nature Astron.* **3**, 891 (2019).
16. Вольнова и др. (A.A. Volnova, M.V. Pruzhinskaya, A.S. Pozanenko, S.I. Blinnikov, P.Yu. Minaev, O.A. Burkhonov, A.M. Chernenko, Sh.A. Ehgamberdiev, et al.), *MNRAS* **467**, 3500 (2017).
17. Вусли и др. (S.E. Woosley, D. Kasen, S. Blinnikov, and E. Sorokina), *Astrophys. J.* **662**, 487 (2007).
18. Гай и др. (J. Guy, P. Astier, S. Baumont, D. Hardin, R. Pain, N. Regnault, S. Basa, R.G. Carlberg, et al.), *Astron. Astrophys.* **466**, 11 (2007).
19. Дадо, Дар (S. Dado and A. Dar), *Astrophys. J.* **809**, 32 (2015).
20. Джонс и др. (D.O. Jones, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **54**, 335 (1984).
21. Ибен мл., Тутуков (I. Iben, Jr. and A.V. Tutukov), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **54**, 335 (1984).
22. Касен и др. (D. Kasen, R.C. Thomas, and P. Nugent), *Astrophys. J.* **651**, 366 (2006).
23. Керзendorф, Сим (W.E. Kerzendorf and S.A. Sim), *MNRAS* **440**, 387 (2014).
24. Ковальски и др. (M. Kowalski, D. Rubin, G. Aldering, R.J. Agostinho, A. Amadon, R. Amanullah, C. Balland, et al.), *Astrophys. J.* **686**, 749 (2008).
25. Козырева и др. (A. Kozyreva, M. Gilmer, R. Hirschi, C. Frohlich, S. Blinnikov, R.T. Wollaeger, U.M. Noebauer, D.R. van Rossum, et al.), *MNRAS* **464**, 2854 (2017).
26. Контрерас и др. (C. Contreras, M.M. Phillips, Ch.R. Burns, A.L. Piro, B.J. Shappee, M.D. Stritzinger, C. Baltay, P.J. Brown, et al.), *Astrophys. J.* **859**, 24 (2018).
27. Кроммер, Сим (M. Krommer and S.A. Sim), *MNRAS* **398**, 1809 (2009).
28. Лерет и др. (P.F. Leget, E. Gangler, F. Mondon, G. Aldering, P. Antilogus, C. Aragon, S. Bailey, C. Baltay, et al.), *Astron. Astrophys.* **636**, A46 (2020).
29. Люси (L.V. Lucy), *Astron. Astrophys.* **429**, 19 (2005).
30. Перлмуттер и др. (S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R.A. Knop, P. Nugent, P.G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, et al.), *Astrophys. J.* **517**, 565 (1999).
31. Полин и др. (A. Polin, P. Nugent, and D. Kasen), *Astrophys. J.* **873**, 84 (2019).
32. Псковский (I.P. Pskovskii), *Sov. Astron.* **28**, 658 (1984).
33. Псковский (I.P. Pskovskii), *Sov. Astron.* **21**, 675 (1977).
34. Раст (B.W. Rust), The use of supernovae light curves for testing the expansion hypothesis and other cosmological relations (Univ. of Illinois, ORNL-4953, Ph.D. thesis, Oak Ridge National Lab., TN., 1974).
35. Рис и др. (A.G. Riess, L.M. Macri, S.L. Hoffmann, D. Scolnic, S. Casertano, A.V. Filippenko, B.E. Tucker, M.J. Reid, et al.), *Astron. J.* **826**, 56 (2016).
36. Рис и др. (A.G. Riess, A.V. Filippenko, P. Challis, A. Clocchiatti, A. Diercks, P.M. Garnavich, R.L. Gilliland, C.J. Hogan, et al.), *Astron. J.* **116**, 1009 (1998).

37. Рис и др. (A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L.M. Macri, and D. Scolnic), *Astron. J.* **876**, 85 (2019).
38. Руст (B.W. Rust), *PhD thesis* (1974).
39. Сим и др. (S.A. Sim, M. Kromer, F.K. Röpkе, E.I. Sorokina, S.I. Blinnikov, D. Kasen, and W. Hillebrandt), *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **429**, 148 (2010).
40. Скольник и др. (D.M. Scolnic, D.O. Jones, A. Rest, Y.C. Pan, R. Chornock, R.J. Foley, M.E. Huber, R. Kessler, et al.), *Astrophys. J.* **859**, 101 (2018).
41. Сондерс и др. (C. Saunders, et al.), *Astrophys. J.* **869**, 167 (2018).
42. Сотрудничество Планка (Planck Collaboration), *Astron. J.* **641**, A1 (2020).
43. Сотрудничество Планка (Planck Collaboration), *Astron. J.* **594**, A1 (2016).
44. Сотрудничество Планка (Planck Collaboration), *Astron. J.* **571**, A16 (2014).
45. Сухболд (T. Sukhbold), *Astrophys. J.* **874**, 62 (2019).
46. Сяо и др. (E.Y. Hsiao, P. Hoeflich, C. Ashall, J. Lu, C. Contreras, C.R. Burns, M.M. Phillips, L. Galbany, et al.), *Astrophys. J.* **900**, 140 (2020).
47. Таврис и др. (T.M. Tauris, N. Langer, T.J. Moriya, Ph. Podsiadlowski, S.C. Yoon, and S.I. Blinnikov), *Astrophys. J.* **778**, 23 (2013).
48. Томинага и др. (N. Tominaga, et al.), *Astrophys. J.* **705**, L10 (2009).
49. Трипп (R. Tripp), *Astron. Astrophys.* **331**, 815 (1998).
50. Уилан, Ибен (J. Whelan and I. Iben, Jr.), *Astrophys. J.* **186**, 1007 (1973).
51. Филлипс (M.M. Phillips), *Astrophys. J.* **413**, L105 (1993).
52. Филлипс и др. (M.M. Phillips, P. Lira, N.B. Suntzeff, R.A. Schommer, M. Hamuy, and J. Maza), *Astron. J.* **118**, 1766 (1999).
53. Финк и др. (M. Fink, M. Kromer, W. Hillebrandt, F.K. Röpkе, R. Pakmor, I.R. Seitenzahl, and S.A. Sim), *Astron. Astrophys.* **618**, A124 (2018).
54. Фолателли и др. (G. Folatelli, C. Contreras, M.M. Phillips, S.E. Woosley, S. Blinnikov, N. Morrell, N.B. Suntzeff, B.L. Lee, et al.), *Astrophys. J.* **641**, 1039 (2006).
55. Фридман и др. (W.L. Freedman, B.F. Madore, D. Hatt, T.J. Hoyt, In Sung Jang, R.L. Beaton, Ch.R. Burns, M.G. Lee, et al.), *Astrophys. J.* **882**, 34 (2019).
56. Хамуй и др. (M. Hamuy, M.M. Phillips, N.B. Suntzeff, R.A. Schommer, J. Maza, and R. Aviles), *Astron. J.* **112**, 2391 (1996).
57. Хатису и др. (I. Hachisu, M. Kato, H. Saio, and K. Nomoto), *Astrophys. J.* **744**, 69 (2012).
58. Хатису и др. (I. Hachisu, M. Kato, and K. Nomoto), *Astrophys. J.* **470**, L97 (1996).
59. Цанг и др. (B.T.H. Tsang, J.A. Goldberg, L. Bildsten, and D. Kasen), *Astrophys. J.* **898**, 29 (2020).
60. Цветков и др., *Переменные звезды* **32**, 6 (2012).
61. Чикота и др. (A. Cikota, F. Patat, L. Wang, J.C. Wheeler, M. Bulla, D. Baade, P. Höflich, S. Cikota, A. Clocchiatti, J.R. Maund, et al.), *MNRAS* **490**, 578 (2019).
62. Чурай и др. (N.N. Chugai, S.I. Blinnikov, R.J. Cumming, P. Lundqvist, A. Bragaglia, A.V. Filippenko, D.C. Leonard, Th. Matheson, and J. Sollerman), *MNRAS* **352**, 1213 (2004).
63. Шнепгель и др. (D.N. Spergel, L. Verde, H.V. Peiris, E. Komatsu, M.R. Nolta, C.L. Bennett, M. Halpern, G. Hinshaw, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **148**, 175 (2003).