

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОРМЫ ПЛАТО СВЕРХНОВЫХ ТИПА II ОТ МЕТАЛЛИЧНОСТИ

© 2020 г. А. А. Гольдштейн<sup>1\*</sup>, С. И. Блинников<sup>2,3,4\*\*</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Аликханова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>4</sup>Центр фундаментальных и прикладных исследований Всероссийского научно-исследовательского института автоматики им. Н.Л. Духова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 21.04.2020 г.

После доработки 28.04.2020 г.; принята к публикации 28.04.2020 г.

Рассмотрен эффект изменения темпа падения блеска в полосе  $U$  для сверхновых типа II-P (SN IIP) в зависимости от металличности  $Z$ . На основе этого эффекта предлагается новый метод определения фотометрического красного смещения по форме кривой блеска SN IIP в полосе  $U$ . С помощью программы STELLA в разных полосах построены модельные кривые блеска для разных красных смещений  $z = 0.0, 0.1, 0.3$  с уменьшением металличности в моделях от  $Z \sim 10^{-3}$  до  $\sim 10^{-6}$ . Показано, что при самых низких значениях металличности поток в полосе  $U$  выходит на плато. Рассмотрено влияние и других параметров: массы предсверхновой и массы радиоактивного никеля-56.

*Ключевые слова:* сверхновые, кривые блеска, фотометрическое красное смещение.

DOI: 10.31857/S0320010820050046

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения классических сверхновых второго типа с плато — SN IIP — показывают, что в полосах  $V$ ,  $R$ ,  $I$  потоки действительно остаются постоянными в течение двух-трех месяцев, т.е. образуют “плато”, давшее название этому типу. В то же время потоки в полосе  $U$  круто линейно спадают (см., например, Леонард и др., 2002; Хикен и др., 2017). Менее крутой спад наблюдается в фильтре  $B$ .

Такое поведение кривых в разных фильтрах нельзя описать при использовании “серого” приближения в расчетах, используемого, например, в открытом коде SNEC (Морозова и др., 2015), в котором при получении кривых блеска в разных полосах применяется предположение о чернотельном излучении фотосферой (с болометрическими корректировками). Полученная таким образом кривая блеска для полосы  $U$  не воспроизводит наблюдения, так как здесь требуется учет повышенного поглощения металлами в ультрафиолетовом диапазоне холодными надфотосферными слоями выброса сверхновой.

Одним из первых успешных расчетов эффекта линейного спада потока в полосе  $U$  было применение для SN IIP кода EDDINGTON (Истман и др., 1994). Код STELLA (Блинников, Сорокина, 2000; Блинников и др., 2006), который не использует серое приближение, а опирается на многогрупповой перенос излучения, позволяет реалистично описать наблюдаемый эффект.

В зависимости от параметров предсверхновой наклон линейного спада в полосе  $U$  может меняться. В работе (Бакланов и др., 2005) было замечено, как металличность оболочки предсверхновой влияет на форму кривой, а именно, чем меньше металличность, тем медленнее спад. В настоящей работе подробно рассмотрено влияние этого параметра с целью практического применения полученных знаний к сверхновым с низкой металличностью в оболочках. С другой стороны, красное смещение  $z$  тоже влияет на наклон кривой блеска в наблюдаемых полосах фильтров, так как при достаточно большом  $z$ , например, наблюдаемая полоса  $V$  будет соответствовать полосе  $U$  в системе покоя сверхновой, и вместо плато в фильтре  $V$  будет линейный спад. Следовательно, можно связать металличность и красное смещение между собой: если металличность известна из других наблюдений,

\* Электронный адрес: [angold107@gmail.com](mailto:angold107@gmail.com)

\*\* Электронный адрес: [Sergei.Blinnikov@itep.ru](mailto:Sergei.Blinnikov@itep.ru)

Таблица 1. Основные параметры

№	Модель	$Z$	$M, M_{\odot}$	$M_{\text{Ni}}, M_{\odot}$	Число зон
1	M15_Ni004	$4 \times 10^{-3}$	15	0.04	100
2	M15_Ni004Z4e-4	$4 \times 10^{-4}$	15	0.04	100
3	M15_Ni004Z4e-5	$4 \times 10^{-5}$	15	0.04	100
4	M15_Ni004Z4e-6	$4 \times 10^{-6}$	15	0.04	100
5	M15_Ni1e-8Z4e-6	$4 \times 10^{-6}$	15	$10^{-8}$	100
6	M25_Z4e-3nc	$4 \times 10^{-3}$	25	$10^{-8}$	100
7	M25_Z4e-4nc	$4 \times 10^{-4}$	25	$10^{-8}$	100
8	M25_Z4e-5nc	$4 \times 10^{-5}$	25	$10^{-8}$	100
9	M25_Z4e-6nc	$4 \times 10^{-6}$	25	$10^{-8}$	100
10	M25_Z4e-3nc3	$4 \times 10^{-3}$	25	$10^{-8}$	300
11	M25_Z4e-4nc3	$4 \times 10^{-4}$	25	$10^{-8}$	300
12	M25_Z4e-5nc3	$4 \times 10^{-5}$	25	$10^{-8}$	300
13	M25_Z4e-6nc3	$4 \times 10^{-6}$	25	$10^{-8}$	300
14	M25_Z4e-3nc3t	$4 \times 10^{-3}$	25	$10^{-8}$	300
15	M25_Z4e-4nc3t	$4 \times 10^{-4}$	25	$10^{-8}$	300
16	M25_Z4e-5nc3t	$4 \times 10^{-5}$	25	$10^{-8}$	300
17	M25_Z4e-6nc3t	$4 \times 10^{-6}$	25	$10^{-8}$	300

то можно оценить  $z$ . И наоборот, если известно красное смещение галактики, в которой вспыхнула сверхновая, то можно оценить металличность ее оболочки.

Красные смещения галактик и сверхновых измерять гораздо труднее, чем их фотометрические потоки. Поэтому для галактик уже давно предложены методы измерения так называемых фотометрических красных смещений (Ку, 1985; Падманабхан и др., 2005). Известны попытки определения красного смещения по сверхновым, однако они касаются только типа Ia. Например, можно использовать полосы  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$  и  $z'$ , и через подобранные коэффициенты определять красное смещение по потокам в момент максимума в этих полосах (Ванг, 2007; Ванг и др., 2015). В работе (Паланк-Делабруй и др., 2018) с помощью кода SALT2 были построены кривые блеска для SN Ia в этих же полосах. Для разных наборов параметров сверхновой были определены границы для красного смещения. По примерным параметрам изучаемой кривой строились кривые блеска с заданным шагом по  $z$ , и она сравнивалась с ними методом  $\chi^2$ .

Кроме того, можно использовать знание о том, что космологическое красное смещение влияет на весь спектр, а поглощение по большей части на синюю часть спектра, и сравнить показатели блеска, как в (Кесслер и др., 2010).

Сверхновые типа II используются для космологии не так активно, как SN Ia, потому что их

абсолютная светимость ниже, чем у SN Ia. Но поскольку это самый многочисленный класс сверхновых, а мощности телескопов нарастают, задача независимого определения красных смещений до этих объектов становится все более актуальной. В настоящей заметке мы демонстрируем, что эффект изменения наклона кривой блеска несомненно имеет место. Более количественный анализ и калибровки кривых для космологических приложений будут проведены в последующих публикациях.

## ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

В коде STELLA по заданным параметрам строится модель предсверхновой. В нем используется уравнение гидростатического равновесия с предположением о слабой зависимости температуры от плотности  $T \propto \rho^{\alpha}$ . Для полностью ионизованного газа и однородного химического состава это гидростатическое состояние близко к политропе с индексом  $1/\alpha \approx 0.3$ , что удовлетворительно описывает эволюционные модели, например, из статьи (Толстов и др., 2016). Подобный подход используется во многих работах (см., например, Утробин, 2007). Отклонение от политропной модели увеличивается во внешних слоях из-за рекомбинации и неоднородного химического состава. В центре модели ограничивается точечное тяжелое ядро размером  $0.1 R_{\odot}$ . Все элементы, кроме  $^{56}\text{Ni}$ , за фронтом ударной волны считаются перемешанными равномерно. Так как распределение и количество  $^{56}\text{Ni}$ ,

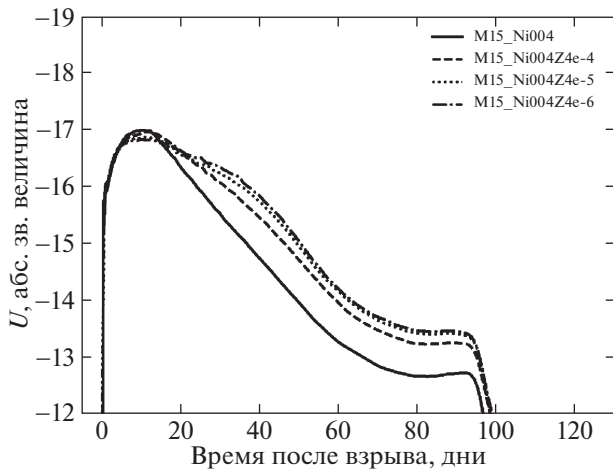


Рис. 1. Кривые блеска моделей № 1–4 в полосе  $U$ .

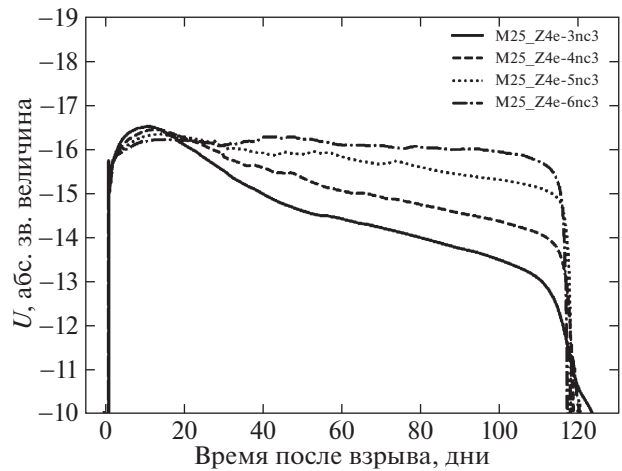


Рис. 3. Кривые блеска моделей № 10–13 в полосе  $U$ .

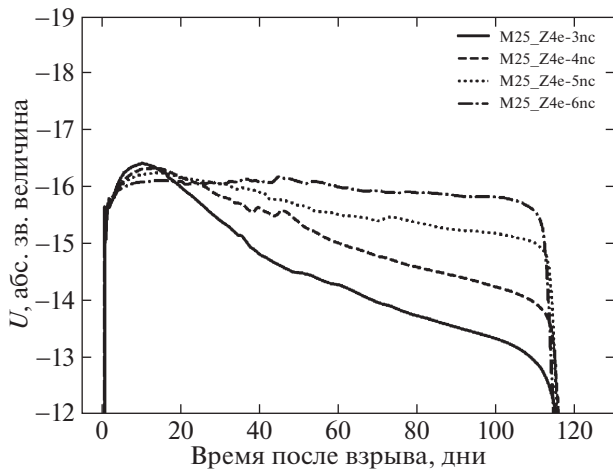


Рис. 2. Кривые блеска моделей № 6–9 в полосе  $U$ .

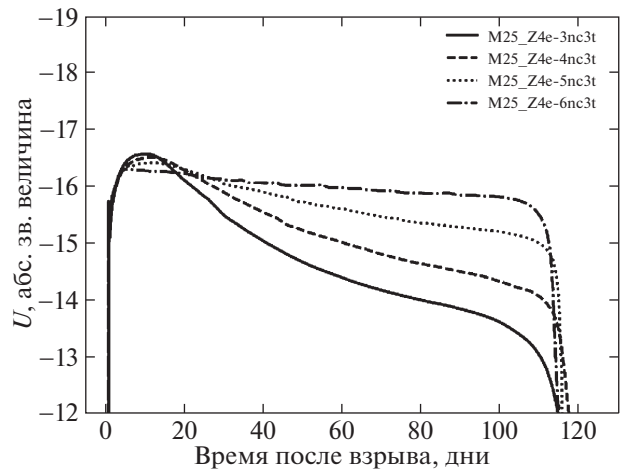


Рис. 4. Кривые блеска моделей № 14–17 в полосе  $U$ .

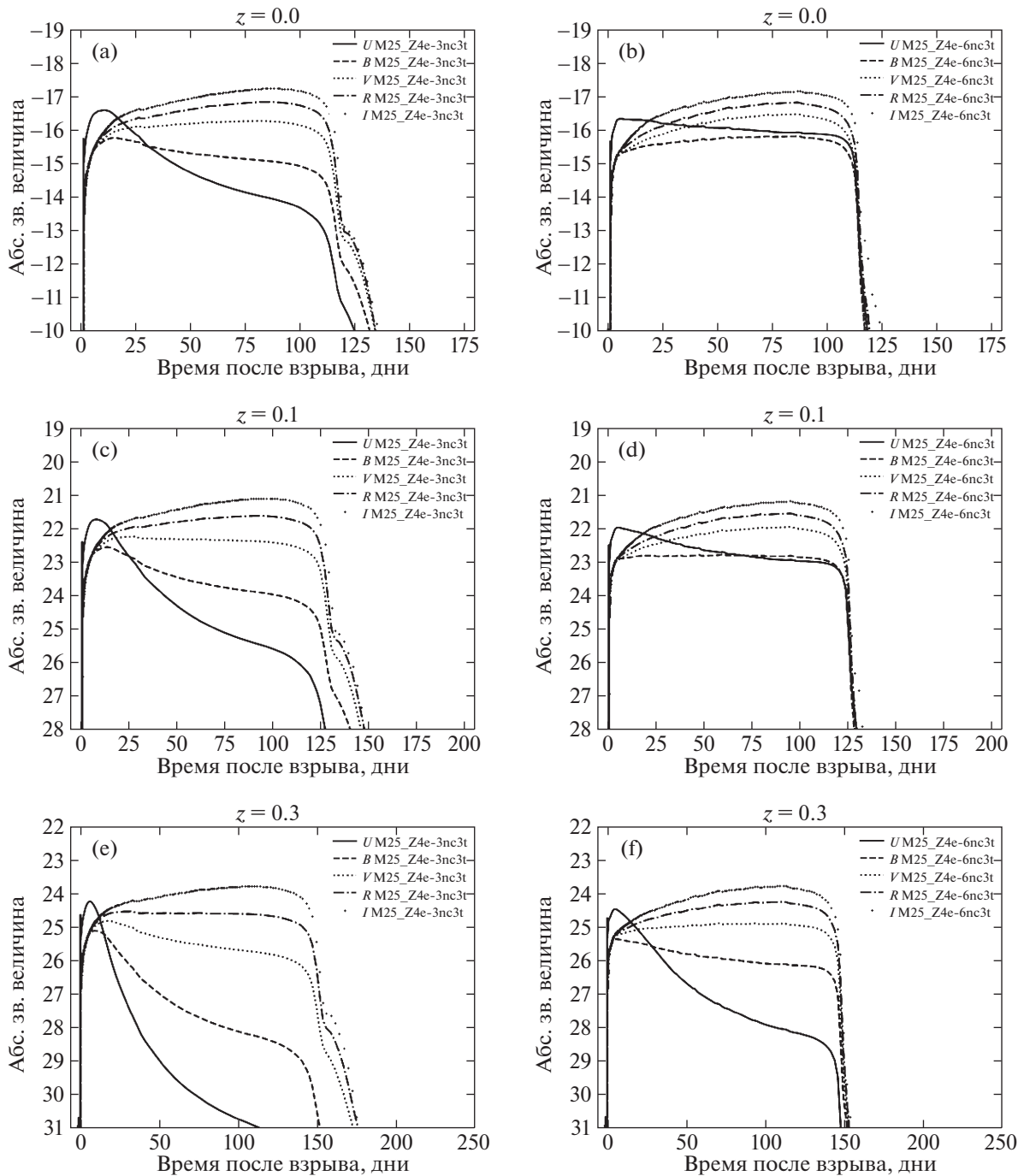
выработанного в ходе взрыва, значительно влияет на светимость, то его распределение задано как экспоненциально уменьшающееся к внешним слоям.

С помощью программы STELLA были построены несколько моделей, они перечислены в табл. 1. В первом семействе моделей (№ 1–4) взяты стандартные параметры сверхновой с разными металличностями (рис. 1). Заметим, что при понижении металличности спад становится менее резким.

Затем был рассмотрен другой набор параметров с приставкой в названии “nc” (рис. 2). Кроме увеличения общей массы и практического обнуления массы никеля-56, была искусственно уменьшена в 10 раз относительная масса ядра с тяжелыми элементами. Таким образом, мы можем в чистом виде исследовать влияние металличности в оболочке на кривую блеска. По сравнению с первым семейством зависимость от  $Z$  в этом наборе моделей гораздо сильнее, а при  $Z = 4 \times 10^{-6}$  плато в полосе  $U$  имеет крайне малый наклон. В

следующих моделях (“nc3”) использовались те же параметры, но было увеличено число зон для большей точности. В частности, немного сгладились колебания в районе 20–50 дней у модели № 13 (рис. 3) В моделях с суффиксом “с3t” (см. рис. 3, 4 и 10) была сдвинута наружу граница приближений внутреннего и внешнего слоев. Благодаря этому кривые стали более гладкими.

В разных фотометрических системах для фильтра полосы  $U$  (рис. 6) кривые выглядят схожим образом, и зависимость наклона от металличности подтверждается. В полосах  $R$ ,  $I$  и  $V$  при разных металличностях  $Z$  наклон практически не изменяется и этот эффект незаметен, поэтому их не стоит рассматривать. Например, на моделях № 1, 4 (рис. 9) наблюдается изменение наклона при разных металличностях в полосе  $U$ , но в полосе  $V$  он остается примерно таким же. Тот же самый эффект сохраняется и для моделей № 14 и 17 (рис. 10). В фильтре  $V$  можно наблюдать этот эффект, но он не так сильно проявляется, как в  $U$ .



**Рис. 5.** Кривые блеска для крайних значений металличности и разных красных смещений: (a) M25\_Z4e-3nc3t с  $z = 0$ , (b) M25\_Z4e-6nc3t с  $z = 0$ , (c) M25\_Z4e-3nc3t с  $z = 0.1$ , (d) M25\_Z4e-6nc3t с  $z = 0.1$ , (e) M25\_Z4e-3nc3t с  $z = 0.3$ , (f) M25\_Z4e-6nc3t с  $z = 0.3$ .

В полосах  $R$ ,  $I$  и  $V$  этот эффект не проявляется при разных металличностях  $Z$ , т.е. сохраняется форма плато (см., например, рис. 5). Из рис. 10 следует, что изменение  $Z$  очень слабо влияет на вид плато в фильтре  $V$ . В фильтре  $B$  эффект не такой сильный, как в  $U$ .

Из графиков следует, что при одних и тех же условиях уменьшение металличности приводит ко все более медленному спаду в полосе  $U$ , а значит

можно попробовать найти применение этой зависимости. На рис. 5 построены кривые блеска в разных полосах для моделей № 14 и 17 с разными красными смещениями:  $z = 0, 0.1, 0.3$ . При росте  $z$  кривые в полосах  $U$  и  $B$  имеют более быстрый спад за счет красного смещения. Заметим, что при  $Z = 10^{-6}$  и  $z = 0.3$  форма кривых сходна с моделью с  $Z = 10^{-3}$  и  $z = 0$ , поэтому, зная наклон, мы

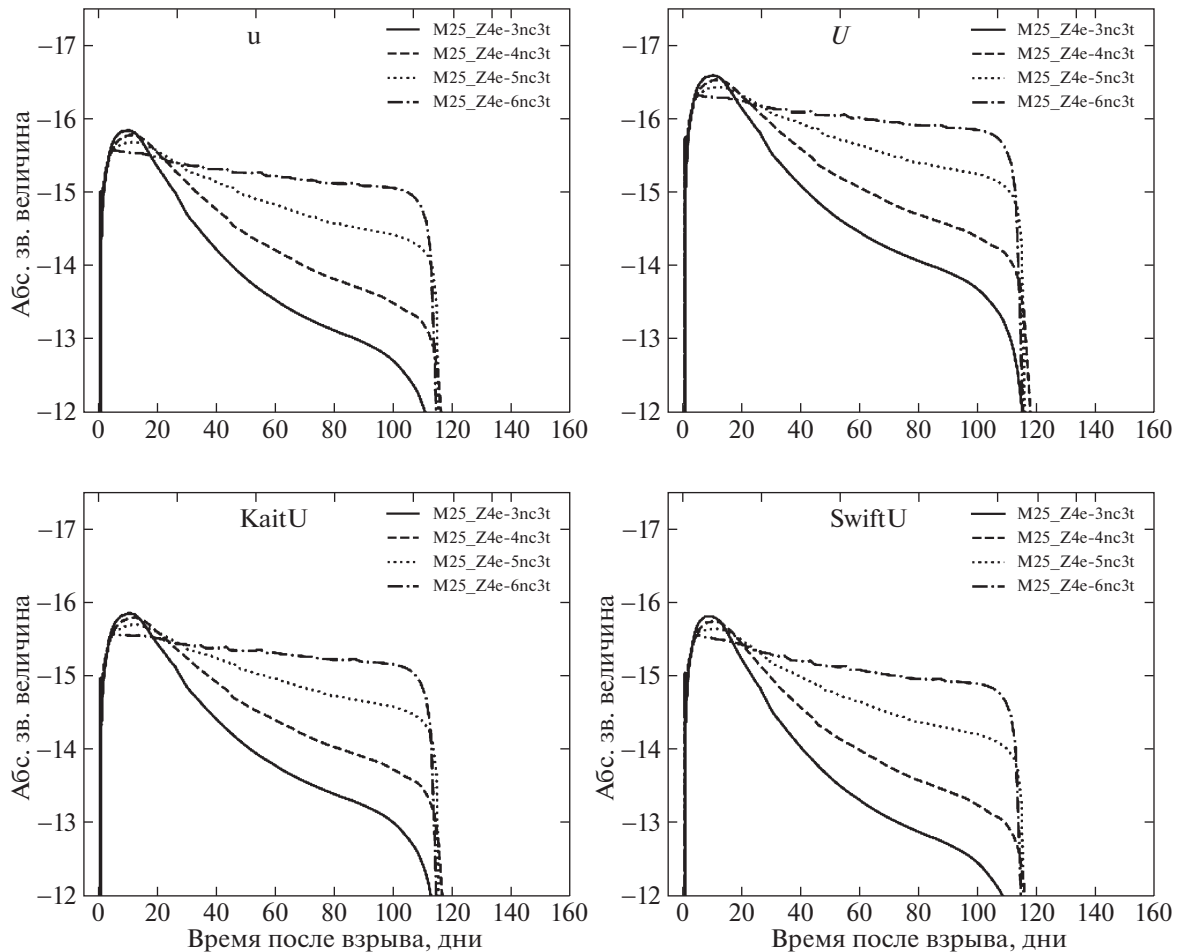


Рис. 6. Кривые блеска моделей № 6–9 в разных фотометрических системах для фильтров полосы  $U$ .

не можем однозначно определить металличность. Однако при известном красном смещении это становится возможным. Так же можно, наоборот, из наклона и металличности узнать красное смещение  $z$ . Это открывает простой способ для оценки металличности или красного смещения малометаллических сверхновых.

В работе (Толстов и др., 2016) рассматривался вид кривой при низкой или нулевой металличности, где нас интересует модель с нулевой металличностью и массой  $25 M_{\odot}$  и  $M_{Ni} = 0, 10^{-3}, 10^{-1} M_{\odot}$ . В ней при первом и втором значениях массы никеля-56 плато держится на одном уровне, как в наших моделях M25\_Z4e-3nc3t и M25\_Z4e-6nc3t. В той же статье говорится о возможности определять параметры по длине плато, однако поймать вспышку сверхновой до начала плато зачастую не удастся. В нашей работе рассматривается именно наклон, поэтому время первого измерения не играет такой большой роли.

Известна еще статья (Дессарт и др., 2013), в которой рассматривались разные металличности для SN II, но в более узком диапазоне, чем в

настоящей работе, они принимали значения ( $Z = 0.04, 0.02, 0.008, 0.002$ ). В их моделях наклон в полосе  $U$  примерно одинаков и лишь немного меньше у модели с  $Z = 0.002$ . При такой ничтожной разнице невозможно установить четкую зависимость, поэтому этот метод не может быть применим к моделям со средней или большой металличностью. Кроме того, Дессарт и др. (2013) рассматривали модели с разными кинетическими энергиями ( $E_{kin} = 0.6, 1.3, 2.9$ ) при солнечной металличности и с одинаковыми прочими параметрами. В них тоже изменяется наклон, поэтому, возможно, в дальнейшем стоит проверить ее влияние и на низких металличностях.

В недавней работе Поташова и Юдина (2020) исследовали влияние металличности на важный эффект нестационарности при формировании спектральных линий в SN II, открытый Утробиным и Чугаев (2002, 2005).

Как известно, например, из работ (Имшенник, Надёжин, 1988; Утробин, 2007), интересующий нас участок кривой наступает после прохождения различных стадий взрыва сверхновой (см. рис. 6 в статье Утробина, 2007): после момента  $t_1$  при

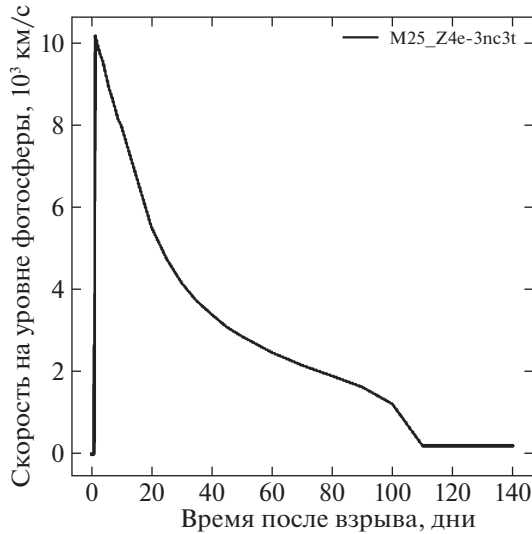


Рис. 7. Скорость на уровне фотосферы для модели № 14 (с металличностью  $10^{-3}$ ).

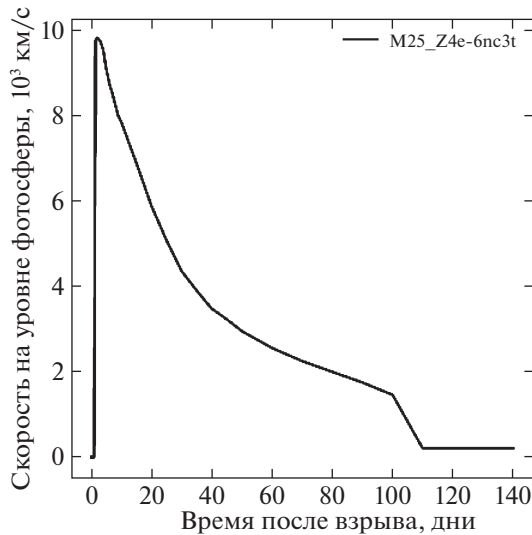


Рис. 8. Скорость на уровне фотосферы для модели № 17 (с металличностью  $10^{-6}$ ).

выходе ударной волны (shock breakout) начинается адиабатическое расширение (от  $t_1$  до точки  $t_2$ , в которой происходит замедление скорости падения блеска и начинается плато). Именно здесь на фазе волны охлаждения и рекомбинации от точки  $t_2$  до конца плато  $t_3$  и находится участок кривой блеска, изучаемый в настоящей работе.

Из рис. 7, 8 следует, что скорость на уровне фотосферы довольно типична для SN IIP, и малая металличность на нее не влияет.

Физические причины зависимости скорости спада плато от разных металличностей достаточно сложны и требуют тщательного рассмотрения. Это планируется сделать в дальнейшей работе.

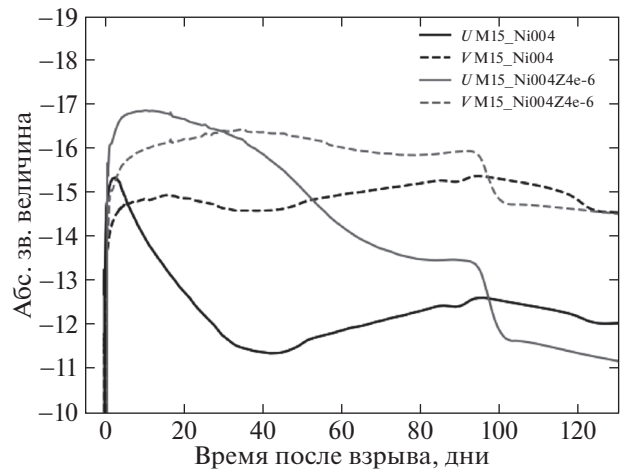


Рис. 9. Кривые блеска моделей № 1 и № 4 в полосах  $U$  и  $V$ .

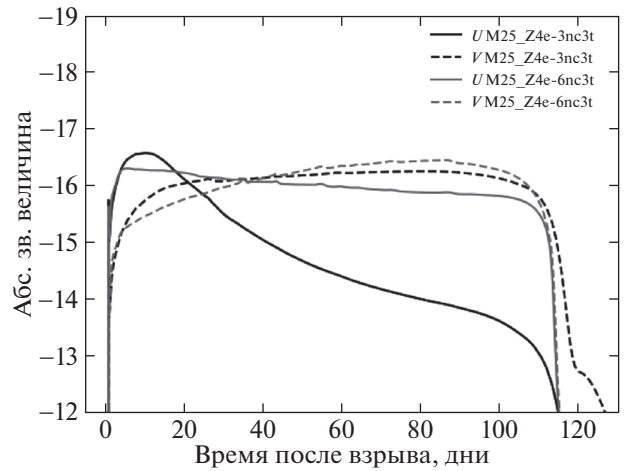


Рис. 10. Кривые блеска моделей № 14 и № 17 в полосах  $U$  и  $V$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было рассмотрено изменение формы кривой в полосе  $U$  в зависимости от низких значений металличности при равных прочих параметрах. Показано, что кривая блеска при этом изменяется схожим образом, поэтому, анализируя наклон после пика, можно найти красное смещение, зная металличность, или металличность, зная красное смещение. Этот метод не зависит от даты начала наблюдений, чем может быть очень удобен ввиду сложности обнаружения малометаллических сверхновых из-за их низкой светимости (Толстов и др., 2016). Кроме того, это правило сохраняется в разных фотометрических системах для фильтров, близких к полосе  $U$ .

У звезд околосолнечной металличности происходит малое изменение наклона в полосе  $U$ . В этом случае, сравнивая наклоны в полосах  $U$ ,

$B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $I$ , можно оценивать фотометрическое красное смещение. Прежде всего, по длинноволновым фильтрам нужно убедиться, что сверхновая не принадлежит классу SN III. У таких сверхновых, наблюдаемых локально, т.е. при малых красных смещениях, наблюдается линейный спад в полосе  $V$ . Как можно отличить их от далеких SNIIP, т.е. от спада потока, вызванного тем, что при большом красном смещении  $z$  в наблюдаемую полосу  $V$  попадают потоки из полос  $B$  и  $U$  системы покоя? Для этого необходимо смотреть потоки в полосах  $R$ ,  $I$  и ближнем ИК-диапазоне. У SN IIP они будут выходить на горизонтальное плато, а у хорошо наблюдаемых SN III имеют такой же линейный спад, как и  $V$  (Фаран и др., 2014; Бозе и др., 2018). Если длинноволновые потоки выходят на плато, тогда спад в фильтре  $V$  будет обусловлен красным смещением и после соответствующей калибровки можно измерять  $z$ . Поскольку такие телескопы, как LSST будут открывать примерно столько же SN IIP, сколько SN Ia (Коллаборация LSST, 2009), можно будет в массовом порядке сравнивать получаемые фотометрические красные смещения SN IIP с красными смещениями материнских галактик. Еще следует иметь в виду, что другие параметры, такие как радиус, масса и энергия взрыва тоже могут влиять на форму кривой, поэтому применять данный метод следует тогда, когда основные характеристики наверняка определены.

Несмотря на то что рассматриваемые значения  $Z$  очень низки, звезды с подобной металличностью действительно существуют в ближайших окрестностях. Например, в недавней работе (Нордландер и др., 2019) в нашей Галактике была открыта звезда с  $Z \approx 10^{-8}$  ( $[Fe/H] = -6.2$ ), поэтому рассмотрение моделей с такими низкими металличностями не является бесосновательным. Конечно, в наших окрестностях нет массивных звезд со столь низкими  $Z$ , которые могли бы взорваться как коллапсирующие сверхновые, но зато таких массивных звезд было очень много в первом поколении и их взрывы в ближайшем будущем будут наблюдаться на строящихся наземных и космических телескопах.

А.А. Гольдштейн благодарит П.В. Бакланова и М.Ш. Поташова за помощь при подготовке этой статьи, а также М.В. Костину за полезные обсуждения. С.И. Блинников благодарит РФФ за поддержку работы по развитию кода STELLA (грант 19-12-00229).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакланов П.В., Блинников С.И., Павлюк Н.Н., Письма в Астрон. журн. **31**, 483 (2005)

- [P.V. Baklanov, S.I. Blinnikov, N.N. Pavlyuk, *Astron. Lett.* **31**, 429 (2005)].
2. Блинников и др. (S.I. Blinnikov, F.K. Röpke, E.I. Sorokina, M. Gieseler, M. Reinecke, C. Travaglio, W. Hillebrandt, and M. Stritzinge), *Astron. Astrophys.* **453**, 229 (2006).
  3. Блинников, Сорокина (S.I. Blinnikov and E.I. Sorokina), *Astron. Astrophys.* **356**, L30 (2000).
  4. Бозе и др. (S. Bose, S. Dong, C.S. Kochanek, A. Pastorello, B. Katz, D. Bersier, J.E. Andrews, J.L. Prieto, et al.), *Astrophys. J.* **862**, 107 (2018).
  5. Ванг (Y. Wang), *Astrophys. J. Lett.* **654**, L123 (2007).
  6. Ванг и др. (Y. Wang, E. Gjergo, and S. Kuhlmann), *MNRAS* **451**, 1955 (2015).
  7. Дессарт и др. (L. Dessart, D.J. Hillier, R. Waldman, and E. Livne), *MNRAS* **433**, 1745 (2013).
  8. Имшенник В.С., Надёжин Д.К., *Успехи физ. наук* **156**, 561 (1988).
  9. Истман и др. (R.G. Eastman, S.E. Woosley, T.A. Weaver, and P.A. Pinto), *Astrophys. J.* **430**, 300 (1994).
  10. Кесслер и др. (R. Kessler, et al.), *Astrophys. J.* **717**, 40 (2010).
  11. Коллаборация LSST, LSST Science Collaboration 247 colleagues. LSST Science Book, Version 2.0. arXiv e-prints arXiv:0912.0201 (2009).
  12. Ку (D.C. Koo), *Astron. J.* **90**, 418 (1985).
  13. Леонард и др. (D.C. Leonard, A.V. Filippenko, W. Li, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **114**, 35 (2002).
  14. Морозова и др. (V. Morozova, et al.), *Astrophys. J.* **814**, 83 (2015).
  15. Нордландер и др. (T. Nordlander, M.S. Bessell, G.S. Da Costa, et al.), *MNRAS* **488**, L109 (2019).
  16. Падманабхан и др. (N. Padmanabhan, T. Budavari, D.J. Schlegel, et al.), *MNRAS* **359**, 237 (2005).
  17. Паланк-Делабруй и др. (N. Palanque-Delabrouille, V. Ruhlmann-Kleider, S. Pascal, J. Rich, J. Guy, G. Bazin, P. Astier, C. Balland, et al.), *Astron. Astrophys.* **514**, A63 (2010).
  18. Поташов, Юдин (M. Potashov and A. Yudin), *MNRAS* **491**, 2674 (2020).
  19. Толстов и др. (A. Tolstov, K. Nomoto, N. Tominaga, M.N. Ishigaki, S. Blinnikov, and T. Suzuki), *Astrophys. J.* **821**, 124 (2016).
  20. Утробин В.П. (V.P. Utrobin), *Astron. Astrophys.* **461**, 233 (2007).
  21. Утробин В.П., Чурай Н.Н., Письма в Астрон. журн. **28**, 440 (2002) [V.P. Utrobin, N.N. Chugai, *Astron. Lett.* **28**, 386 (2002)].
  22. Утробин, Чурай (V.P. Utrobin and N.N. Chugai), *Astron. Astrophys.* **441**, 271 (2005).
  23. Фаран и др. (T. Faran, D. Poznanski, A.V. Filippenko, et al.), *MNRAS* **445**, 554 (2014).
  24. Хикен и др. (M. Hicken, A.S. Friedman, S. Blondin, P. Challis, P. Berlind, M. Calkins, G. Esquerdo, Th. Matheson, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 6 (2017).