

УДК 524.352.7-13

SN 2022PRV: ЯРКАЯ СВЕРХНОВАЯ ТИПА II С ПРИЗНАКАМИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОКОЛОЗВЕЗДНЫМ ВЕЩЕСТВОМ

© 2024 Д. Ю. Цветков^{1*}, В. П. Горанский^{1,2}, Е. А. Барсукова²,
А. Ф. Валеев², Н. Н. Павлюк¹, А. В. Додин¹, Н. И. Шатский¹,
С. А. Потанин¹, Н. П. Иконникова¹, М. А. Бурлак¹, А. А. Белинский¹,
В. А. Ечеистов¹, А. С. Винокуров², А. Н. Саркисян², А. В. Жарова¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, 119234 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 11 января 2024 года; после доработки 6 февраля 2024 года; принята к публикации 1 марта 2024 года

Представлены результаты фотометрических и спектроскопических наблюдений сверхновой SN 2022prv, осуществленных на шести телескопах, в том числе на 6-м телескопе САО РАН и 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Определены даты и звездные величины в максимуме блеска и параметры кривых блеска. Фотометрическая эволюция SN 2022prv характеризуется постоянным падением блеска после максимума с довольно высокой для сверхновых II типа скоростью. Примерно через 55 суток после максимума скорость падения блеска увеличилась. Светимость в максимуме достигла $M_V = -18^m1$, что выше средней для SN II. В предмаксимальных спектрах наблюдались эмиссионные линии высокого возбуждения, характерные для ионизации околозвездного вещества вспышкой при выходе ударной волны на поверхность звезды. Однако примерно через 20 суток после максимума спектр не отличался от типичного для SN II. Скорость расширения оболочки составила на этой стадии около 3500 км с^{-1} , что немного ниже средних для SN II значений.

Ключевые слова: *сверхновые; индивидуальные; SN 2022prv*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время считается, что вспышки сверхновых (SNe) II типа происходят в результате коллапса ядер массивных звезд, что подтверждается обнаружением предсверхновых звезд (Smartt, 2015). Самыми распространенными среди SNe II являются SNe II-P (с плато), болометрическая светимость которых остается постоянной почти 100 суток после максимума; их спектры характеризуются сильными линиями водорода. По кривым блеска от них отличаются SNe II-L (линейные), блеск которых после максимума падает почти линейно (в звездных величинах) (Barbon et al., 1979). Однако между этими подтипами нет четкой границы, многие SNe II можно отнести к промежуточным между крайними случаями SNe II-L и SNe II-P (Anderson et al., 2014).

В особую группу выделяют SNe II, имеющие в спектрах узкие эмиссионные линии, которые свидетельствуют о взаимодействии оболочки сверхновой (SN) с существовавшим до вспышки око-

лозвездным веществом, они обозначаются SNe IIp (Schlegel, 1990). В последнее время, когда гораздо больше SNe обнаруживается на ранних стадиях, было обнаружено несколько SNe II, у которых спектр, типичный для SNe IIp, наблюдался только в течение нескольких суток после взрыва, а затем превращался в обычный для SNe II. К таким объектам принадлежат недавно открытая близкая SN 2023ixf (Zimmerman et al., 2023) и ряд других SNe, в том числе и SN 2022prv.

SN 2022prv была открыта в ходе программы «Young Supernova Experiment» 2022/07/27.32 UT, величина при открытии $AB = 18^m73$ в фильтре $z-P1$, координаты транзиента $\alpha = 15^h40^m07^s748$, $\delta = +20^\circ40'31''78$ (J2000) (Jones et al., 2022). Сверхновая вспыхнула в галактике IC 1132 типа SA(rs)c на расстоянии $13''8$ к западу и $18''4$ к югу от центра галактики, что в линейных единицах составляет около 7 кпк.

Спектр SN был получен в Ликской обсерватории 28 июля 2022 г. Объект был классифицирован как сверхновая II типа или возможная

*E-mail: tsvetkov@sai.msu.su

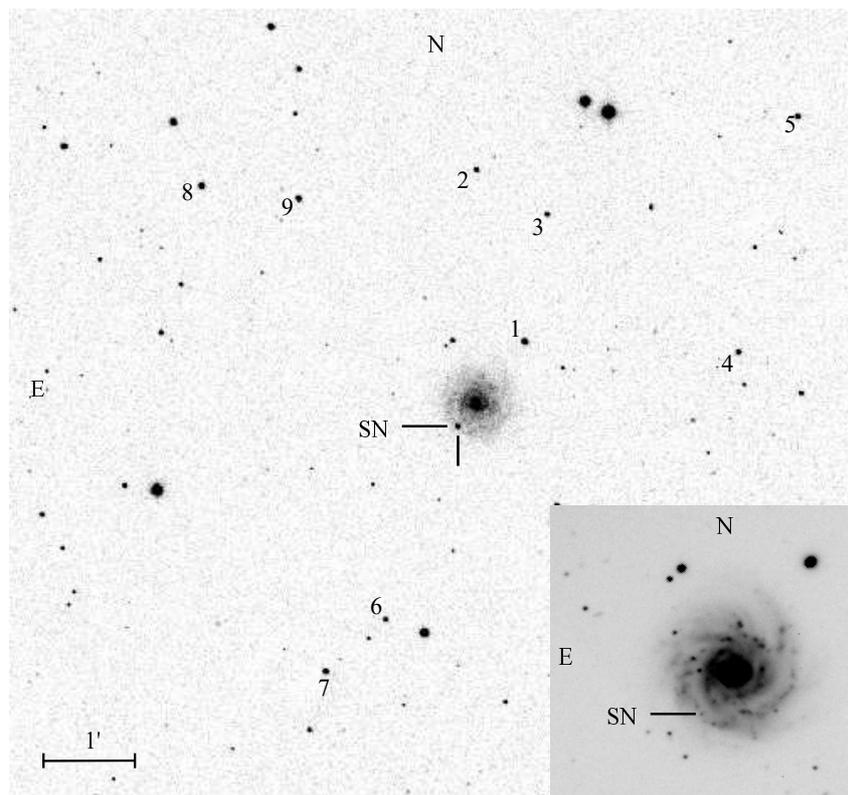


Рис. 1. Изображение SN 2022prv и звезд сравнения, полученное на 60-см телескопе КГО в фильтре R . На врезке в нижнем правом углу показан фрагмент изображения, полученного на 6-м телескопе CAO РАН в фазе 132^d после максимума SN, демонстрирующий ее положение в слабом спиральном рукаве галактики IC 1132.

вспышка LBV; сделана оценка ширины линии $H\alpha$ $FWHM = 3200 \text{ km s}^{-1}$ (Taggart et al., 2022).

Фотометрические и спектроскопические наблюдения SN 2022prv на 6-м телескопе CAO РАН были проведены 1 и 3 августа 2022 г. (Barsukova et al., 2022). Блеск SN возрастал, была получена оценка абсолютной величины $M_V = -17^m.58$. В спектрах наблюдался горячий континуум и эмиссионные линии водорода, а также He II и N III. В линиях выделялись узкие центральные пики и широкие крылья. Ширина центральных пиков линий водорода увеличилась примерно от 400 km s^{-1} до 900 km s^{-1} , крылья линий достигали полной ширины $FWZI$ от 8500 km s^{-1} до 11000 km s^{-1} . Было отмечено сходство спектров SN 2022prv с SN II_p 1998S (Liu et al., 2000) и высказано предположение о том, что взрыв произошел внутри богатой водородом оболочки.

Объект относится к редкому по численности классу сверхновых, поэтому мы организовали дальнейшие фотометрические и спектральные наблюдения на телескопах CAO РАН и ГАИШ МГУ.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Фотометрические наблюдения SN 2022prv проводились на следующих телескопах:

- 6-м БТА и 1-м Цейссе CAO РАН (S600 и S100);
- 2.5-м и 60-см телескопах Кавказской Горной обсерватории ГАИШ МГУ (K250 и K60 соответственно) (Potanin et al., 2017; Berdnikov et al., 2020);
- 60-см телескопе Крымской станции ГАИШ МГУ (С60);
- 70-см телескопе ГАИШ МГУ в Москве (M70).

Наблюдения продолжались в течение 144 суток; оценки блеска в фильтрах $UBVRI$ получены в 29 эпох, в фильтрах gri — в шесть эпох.

Изображение поля SN 2022prv на эпоху 8^d после максимума показано на рис. 1. Отмечены SN и звезды сравнения. Здесь же, на врезке, приведен фрагмент изображения галактики IC 1132 в фазе 132 дня после максимума сверхновой. Видно, что SN 2022prv расположена в спиральном рукаве невысокой поверхностной яркости.

Для стандартной обработки и фотометрии мы использовали пакет программ IRAF¹⁾. Звездные

¹⁾IRAF распространяется NOAO, управляемой AURA по соглашению с NSF.

величины SN были определены методами апертурной или PSF-фотометрии относительно местных стандартов, для которых величины $ugri$ были получены из баз данных Pan-STARRS²⁾ и SDSS³⁾. Величины $UBVRI$ были вычислены с помощью соотношений из работ Kostov and Bonev (2018) и Jester et al. (2005).

Поверхностная яркость галактики в месте вспышки SN не очень высока, однако для надежности фотометрии производилось вычитание фона галактики на основании изображений, полученных на телескопе K60 в мае 2023 г., когда блеск SN упал ниже предела обнаружения.

Фотометрия была приведена к стандартной системе $UBVRI$ Джонсона–Казинса с помощью инструментальных цветовых уравнений, полученных по наблюдениям фотометрических стандартов. Инструментальная система gri оказалась достаточно близкой к стандартной, редукции данных не потребовалось. Результаты фотометрии представлены в Таблицах 1 и 2.

Спектральные данные были получены при наблюдениях SN 2022grv на 6-м телескопе САО РАН 1 и 3 августа, а также 25 декабря 2022 г. Использовался спектрограф SCORPIO-1 (Afanasiev and Moiseev, 2005) с гризмами VPHG 1200G и VPHG 1200R для синего и красного спектральных диапазонов соответственно. Диапазон длин волн в синей области 4000–5355 Å, спектральное разрешение — 5.7 Å, в красной области диапазон 5619–7336 Å, разрешение — 5.0 Å. Обработка данных спектроскопии выполнена с помощью пакета программ ESO MIDAS. Стандартная редукция включала учет электронного смещения (bias), удаление следов космических частиц, калибровку по длинам волн, экстракцию спектра с учетом фона неба и галактики, а также учет поглощения атмосферы. Абсолютная калибровка по потокам осуществлена с использованием спектрофотометрического стандарта Feige 56.

На 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ спектры были получены 3 и 18 сентября 2022 года с помощью двухлучевого спектрографа TDS (Potanin et al., 2020). Использовалась щель шириной 1", дисперсия составила 1.21 и 0.87 Å на пиксель для синего и красного каналов соответственно. Обработка проводилась с помощью пакета программ, разработанного в ГАИШ МГУ. Его подробное описание приведено в работе Potanin et al. (2020).

²⁾<https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/>

³⁾<http://skyserver.sdss.org/dr16/en/tools/search/radial.aspx>

3. КРИВЫЕ БЛЕСКА

Полученные кривые блеска SN 2022grv представлены на рис. 2. Результаты для всех телескопов нашей программы достаточно хорошо согласуются. Представлены также результаты наблюдений ZTF⁴⁾ в фильтрах g и r , которые показывают хорошее согласие с нашими данными в этих полосах. К сожалению, наши наблюдения не охватывают точку максимума блеска, однако небольшие отличия на раннем этапе эволюции SN величин g от V и r от R позволяют, используя данные ZTF, достаточно надежно определить эти точки с точностью около 0^m1 : $V_{\max} = 16^m1$; $R_{\max} = 16^m0$. Дата максимума в полосе фильтра V — JD 2459805.2, а в фильтре R — JD 2459810, с точностью около 1 дня.

Наблюдения ZTF в полосе r охватывают значительную часть восходящей ветви кривой блеска. Они достаточно хорошо описываются соотношением

$$F_{\lambda} = A(t - t_0)^2,$$

где F_{λ} — поток, A — постоянная, t — время, t_0 — время начала поярчения SN. Наилучшее согласие с наблюдениями достигается при $t_0 = \text{JD } 2459783$. Таким образом, период возрастания блеска в полосе r составляет около 27 суток, а в полосах g и V — около 22 суток, что значительно больше средних значений для SNe II.

Скорость падения блеска после максимума в фильтрах $UBVRI$ составила 0^m055 , 0^m033 , 0^m017 , 0^m011 , 0^m004 в сутки соответственно, точность оценок около 10%. Быстрое падение блеска в фильтрах $BVRI$ началось около JD 2459860 примерно через 55 суток после максимума, что значительно короче обычного интервала для SNe II, но окончание этого этапа эволюции наблюдениями не охвачено. Последние полученные нами точки относятся к фазе 132 дня после максимума и, вероятно, лежат на финальном линейном участке кривой блеска.

Отсутствие в спектрах SN 2022grv заметных межзвездных линий поглощения, возникающих в родительской галактике, голубой цвет около максимума и положение SN достаточно далеко от ядра в галактике, видимой практически «плашмя», позволяют предположить, что поглощение в IC 1132 для нее практически отсутствует. Поглощение в нашей Галактике, согласно Schlafly and Finkbeiner (2011), составляет $E(B - V) = 0^m05$.

На рис. 3 приведены кривые наблюдаемых, не исправленных за поглощение показателей цвета SN 2022grv. Все показатели цвета этой сверхновой плавно возрастают в течение всего времени

⁴⁾<https://lasair-tf.lsst.ac.uk/objects/ZTF22aavobvq/>

Таблица 1. *UBVRI*-фотометрия SN 2022prv

JD–2459000	$U \pm \sigma_U$	$B \pm \sigma_B$	$V \pm \sigma_V$	$R \pm \sigma_R$	$I \pm \sigma_I$	Telescope*
793.38	–	16.73 ± 0.02	16.97 ± 0.02	16.79 ± 0.03	16.84 ± 0.03	S600
793.39	–	16.75 ± 0.02	16.96 ± 0.02	–	–	S600
795.37	–	16.46 ± 0.02	16.64 ± 0.02	16.47 ± 0.03	16.55 ± 0.03	S600
813.14	15.33 ± 0.04	16.24 ± 0.02	16.15 ± 0.02	16.06 ± 0.02		K250
813.14	15.14 ± 0.04	16.28 ± 0.02	16.09 ± 0.02	15.97 ± 0.02	15.97 ± 0.02	C60
813.26	15.39 ± 0.06	16.21 ± 0.02	16.17 ± 0.02	16.05 ± 0.02	15.96 ± 0.02	K60
815.14	15.46 ± 0.04	16.32 ± 0.02	16.12 ± 0.02	15.95 ± 0.02	16.02 ± 0.02	C60
816.25	–	16.36 ± 0.03	16.18 ± 0.04	16.09 ± 0.03	15.98 ± 0.06	M70
819.11	–	16.34 ± 0.02	16.17 ± 0.02	15.99 ± 0.02	16.00 ± 0.02	C60
819.25	15.81 ± 0.06	16.35 ± 0.02	16.22 ± 0.02	16.10 ± 0.02	15.95 ± 0.02	K60
821.13	15.77 ± 0.04	16.41 ± 0.02	16.18 ± 0.02	16.03 ± 0.02	15.95 ± 0.02	C60
823.23	15.83 ± 0.06	16.48 ± 0.02	16.28 ± 0.02	16.12 ± 0.02	15.97 ± 0.02	K60
824.13	15.92 ± 0.05	16.57 ± 0.02	16.26 ± 0.02	16.11 ± 0.02	15.97 ± 0.02	C60
827.14	–	–	16.33 ± 0.03	–	–	C60
832.27	–	–	16.41 ± 0.06	16.17 ± 0.04	–	M70
834.22	16.41 ± 0.12	16.74 ± 0.04	16.40 ± 0.02	–	15.98 ± 0.08	K60
838.21	–	16.96 ± 0.06	16.56 ± 0.03	16.25 ± 0.03	16.08 ± 0.04	M70
841.21	16.81 ± 0.09	17.01 ± 0.02	16.52 ± 0.02	16.29 ± 0.02	16.05 ± 0.02	K60
848.20	–	–	–	16.31 ± 0.03	16.14 ± 0.03	C60
849.17	–	17.35 ± 0.03	16.70 ± 0.03	16.37 ± 0.03	–	S100
850.17	17.37 ± 0.15	17.38 ± 0.04	16.73 ± 0.03	16.42 ± 0.02	16.16 ± 0.02	K60
851.22	–	17.49 ± 0.03	16.72 ± 0.03	16.33 ± 0.03	16.10 ± 0.03	C60
863.15	–	–	17.05 ± 0.06	16.56 ± 0.07		M70
869.15	–	–	17.53 ± 0.05	16.91 ± 0.05		M70
874.16	–	18.88 ± 0.06	17.64 ± 0.04	17.26 ± 0.06	–	S100
875.17	–	19.02 ± 0.05	17.77 ± 0.03	17.20 ± 0.02	16.98 ± 0.06	S100
878.14	–	–	–	17.46 ± 0.12	–	M70
936.62	–	23.36 ± 0.16	21.75 ± 0.10	21.14 ± 0.12	–	S600
937.58	–		21.99 ± 0.13	21.16 ± 0.14	–	S600

*S600 и S100 — 6-м и 1-м телескопы CAO РАН; K250 и K60 — 2.5-м и 60-см телескопы КГО ГАИШ МГУ; C60 — 60-см телескоп Крымской станции ГАИШ МГУ; M70 — 70-см телескоп ГАИШ МГУ.

наблюдений. Мы сравнили их с кривыми показателей цвета для SNe 2014G, 2018zd, 2020tlf и 2023ixf, которые имели на ранних стадиях спектр SNe II_p, быстро эволюционировавший в нормальный для SNe II (Bose et al., 2016; Zhang et al., 2020; Jacobson-Galán et al., 2022; Tsvetkov et al., 2022; Zimmerman et al., 2023). Значение поглощения света для этих SNe взято из цитируемых выше работ, их наблюдаемые показатели цвета

приведены к принятому нами поглощению света для SN 2022prv, совмещение по времени проведено по точкам максимума блеска.

Кривые показателей цвета всех рассмотренных SNe имеют одинаковый характер. Однако наибольшее сходство с SN 2022prv показывают SNe 2018zd и 2020tlf, а наибольшее отличие (особенно в $(U - B)$ -цвете) — SN 2014G. Достаточно хорошее совпадение показателей цвета в близкой к макси-

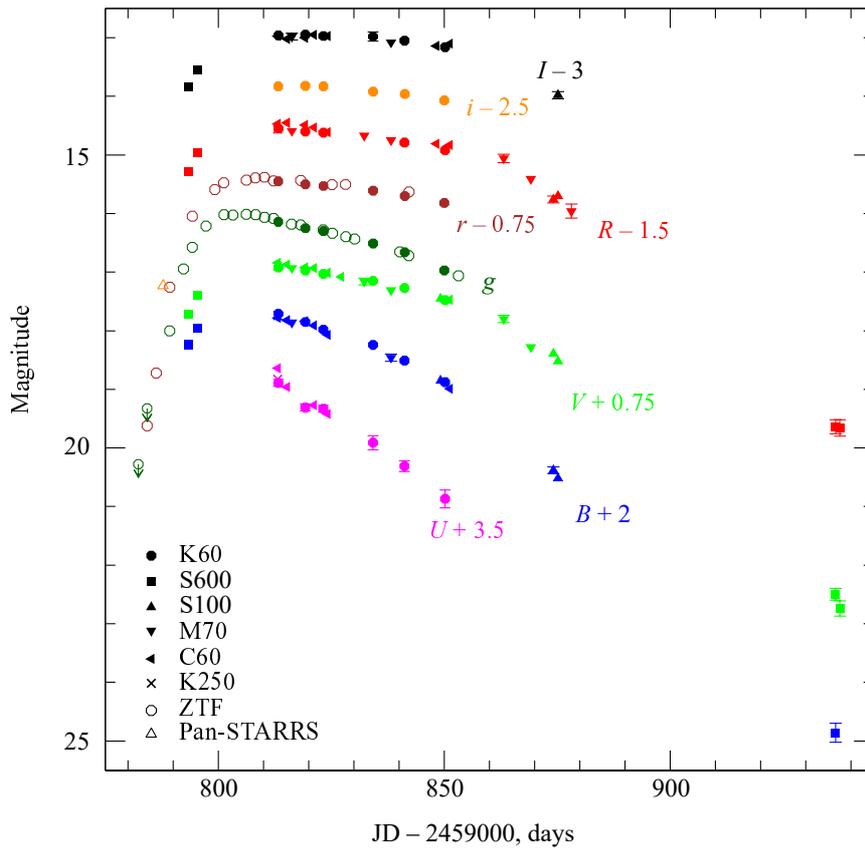


Рис. 2. Кривые блеска SN 2022rgv в полосах U , B , V , R , I , g , r , i . Названия фильтров и смещения соответствующих кривых приведены на графике. Форма символов показывает источники данных, их обозначения соответствуют приведенным в тексте. Верхние пределы блеска показаны стрелками вниз.

Таблица 2. Фотометрия SN 2022rgv на телескопе K60 в полосах gri

JD-2459000	$g \pm \sigma_g$	$r \pm \sigma_r$	$i \pm \sigma_i$
813.26	16.14 ± 0.02	16.20 ± 0.02	16.33 ± 0.02
819.25	16.25 ± 0.02	16.25 ± 0.02	16.32 ± 0.02
823.24	16.30 ± 0.02	16.28 ± 0.02	16.33 ± 0.02
834.22	16.51 ± 0.03	16.36 ± 0.02	16.42 ± 0.02
841.21	16.66 ± 0.02	16.45 ± 0.02	16.46 ± 0.02
850.18	16.97 ± 0.03	16.57 ± 0.02	16.57 ± 0.02

муму стадии для всех SNe свидетельствует о правильности принятой нами величины межзвездного поглощения для SN 2022rgv.

Кривая блеска SN 2022rgv в абсолютных V -величинах и сравнение ее с кривыми для SNe II 2014G, 2018zd, 2020tlf и 2023ixf приведены на рис. 4. Здесь же показаны результаты фотометрии SN 2022rgv по данным ZTF в фильтре g . Эти

величины на стадии вблизи максимума достаточно хорошо согласуются с нашими величинами V . Две первые оценки блеска SN 2022rgv были получены ZTF в фильтре r , однако мы также нанесли их на график, так как последующие наблюдения показали, что в это время показатель цвета ($g - r$) ≈ 0 .

Расстояние до SN 2022rgv, 63.6 Мпк, вычислено по лучевой скорости галактики IC 1132 с поправкой за движение относительно реликтового фона из базы данных NED⁵⁾ при $H_0 = 73 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$. Расстояния для SNe, используемые для сравнения, взяты из цитируемых выше работ. Максимальная абсолютная величина SN 2022rgv составляет $M_V = -18^m1$, что ярче большинства SNe II, среднее значение M_V которых составляет -16^m74 (Anderson et al., 2014), но слабее SNe II с наибольшей светимостью. Сравнение с кривыми блеска нашей выборки SNe II показывает сходство максимальной светимости и этапа падения блеска после максимума для всех этих объектов. Однако продолжительность стадии постоянного медленного падения блеска сильно различается, для

⁵⁾<https://ned.ipac.caltech.edu/>

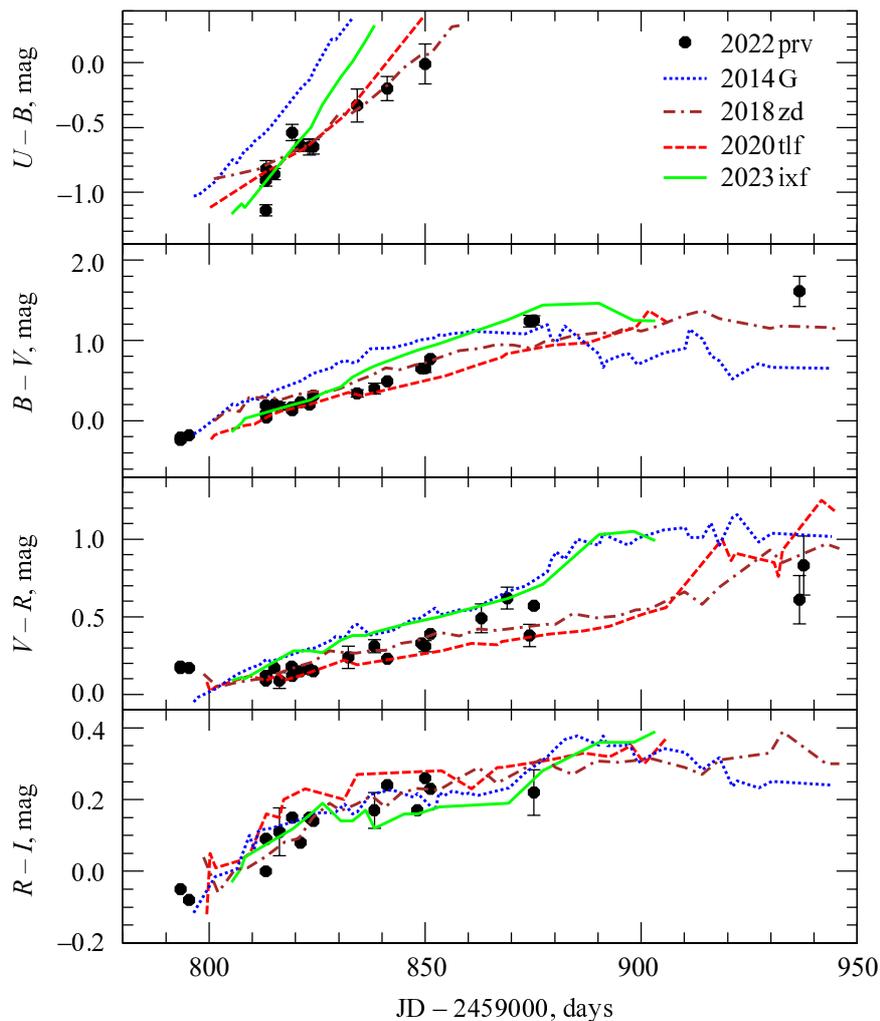


Рис. 3. Кривые показателей цвета SN 2022prv и их сравнение с SNe II 2014G, 2018zd, 2020tlf и 2023ixf.

SN 2022prv она очень мала, всего около 55 суток. Примерно такая же продолжительность этого этапа у SNe 2014G и 2023ixf, в то время как у других SNe она гораздо больше и для SN 2018zd достигает 120 суток. Сильно различаются и восходящие ветви кривых блеска: SN 2022prv выделяется очень большим промежутком времени от начала появления до максимума — около 25 суток. По этому параметру на нее похожа SN 2020tlf, в то время как самый быстрый подъем блеска наблюдался для SN 2023ixf — всего 5 суток. Светимости SNe из нашей выборки в начале стадии финального линейного падения блеска различаются достаточно сильно: от -15^m до -13^m . Отметим, что SN 2022prv в фазе около 130 суток имеет наименьшую светимость среди всех SNe выборки.

4. СПЕКТРЫ

Полученные нами спектры SN 2022prv показаны на рис. 5. Спектры исправлены за крас-

ное смещение галактики и поглощение света $E(B - V) = 0^m05$. Указаны эпохи спектров относительно максимума блеска в фильтре V. В фазе -12^d спектр в CAO был получен только в синем диапазоне, а в фазе 132^d — в красном. На первых двух спектрах (фазы -12^d и -10^d) видны интенсивные эмиссии водорода и деталь около 4700 \AA , идентифицируемая как бленда эмиссий He II, N III. В фазе 21^d сильные эмиссии пропадают, выделяется только линия $H\alpha$, у которой появляется абсорбционный компонент; можно заметить также линию поглощения $H\beta$. Следующий спектр (фаза 36^d) показывает развитие линий поглощения, которые могут принадлежать FeII, NaI, ScII, BaII и их блендам. На последнем спектре (фаза 132^d), полученном только в красном диапазоне, надежно отождествляется лишь сильная эмиссия $H\alpha$.

В некоторых спектрах хорошо заметны уз-

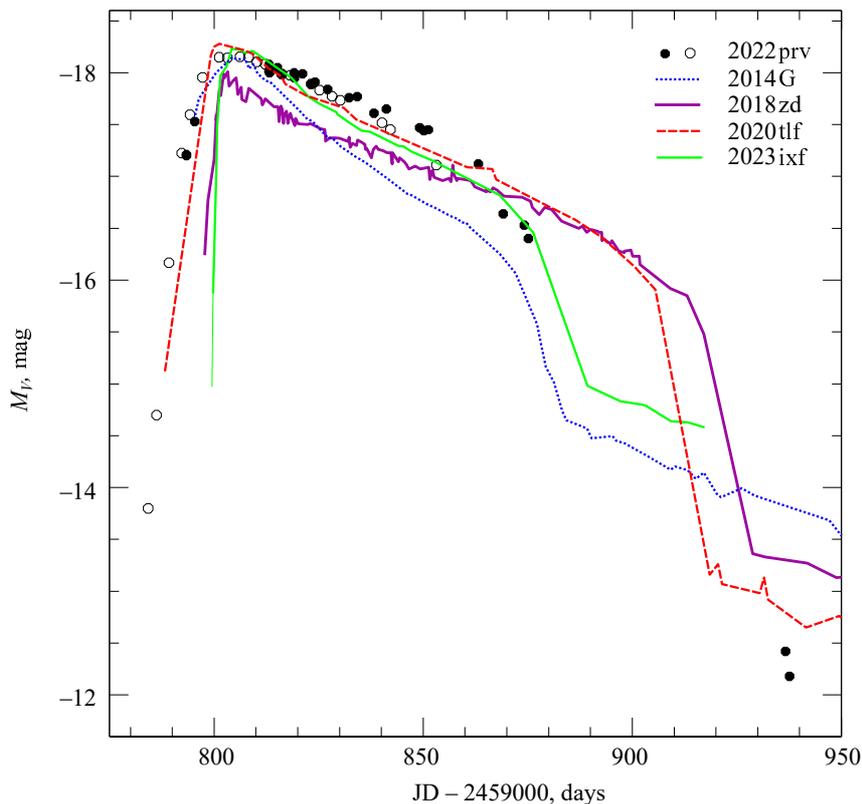


Рис. 4. Кривая блеска SN 2022prv в абсолютных V -величинах и сравнение с кривыми для четырех SNe II. Для SN 2022prv: заполненные кружки — наши данные, пустые — g -величины ZTF.

кие эмиссионные линии от галактики: $H\alpha$, $H\beta$, $[O III] \lambda 5007$, $[N II] \lambda 6548, 6583$, $[S II] \lambda 6716, 6730$.

Эволюция профиля линии водорода $H\alpha$ показана на рис. 6.

В спектре в фазе -10^d эмиссионный пик и широкие крылья можно представить суммой гауссиан и лоренцевского профиля с ширинами на половине максимальной интенсивности $FWHM = 1020 \text{ км с}^{-1}$ и $FWHM = 4570 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. В красном крыле линии наблюдается небольшой избыток излучения. Возможно, он объясняется наложением линии $He I \lambda 6678$, линий от галактики $[S II] \lambda 6716, \lambda 6730$, и неопределенностью положения континуума из-за сильных теллурических полос в области $\lambda > 6760 \text{ \AA}$. В голубом крыле линии заметна слабая абсорбция. Если она принадлежит водороду, то ее смещение соответствует скорости около 8360 км с^{-1} . В фазах 21^d и 36^d профили похожи, эмиссионные пики имеют более плавно спадающие красные крылья. Как показали Pessi et al. (2023), такие профили можно аппроксимировать асимметричным обобщенным нормальным распределением Гаусса. Параметры аппроксимации эмиссионных пиков для фаз 21^d и 36^d : $FWHM = 2150 \text{ км с}^{-1}$, $FWHM = 2300 \text{ км с}^{-1}$, а максимумы смещены

в голубую область спектра на 100 км с^{-1} и 360 км с^{-1} соответственно. Абсорбции представлены гауссианами с $FWHM \approx 750 \text{ км с}^{-1}$ и $FWHM \approx 1400 \text{ км с}^{-1}$, смещенные на 4000 км с^{-1} и 3800 км с^{-1} соответственно. Точность этих оценок около 10%.

В фазе 132^d абсорбционный компонент отсутствует, эмиссия представляется асимметричной гауссианой с $FWHM = 2400 \text{ км с}^{-1}$, а максимум смещен в голубую область спектра на 600 км с^{-1} .

Узкие эмиссионные линии от галактики $[N II] \lambda 6548, \lambda 6583$ и $H\alpha$ хорошо заметны на вершине широкой эмиссии от SN, они уменьшают надежность определения профиля линии $H\alpha$.

Профиль бленды линий $He II, N III, H\beta$ в спектре в фазе -10^d показан на рис. 7.

В фазе -12^d профиль практически идентичен, однако этот спектр имеет существенно большие шумы. Профиль представлен суммой гауссиан для узких компонентов и лоренцевских профилей для крыльев. Характерные ширины узких компонентов $FWHM \approx 1000\text{--}1200 \text{ км с}^{-1}$, а для крыльев $FWHM \approx 5300\text{--}6800 \text{ км с}^{-1}$.

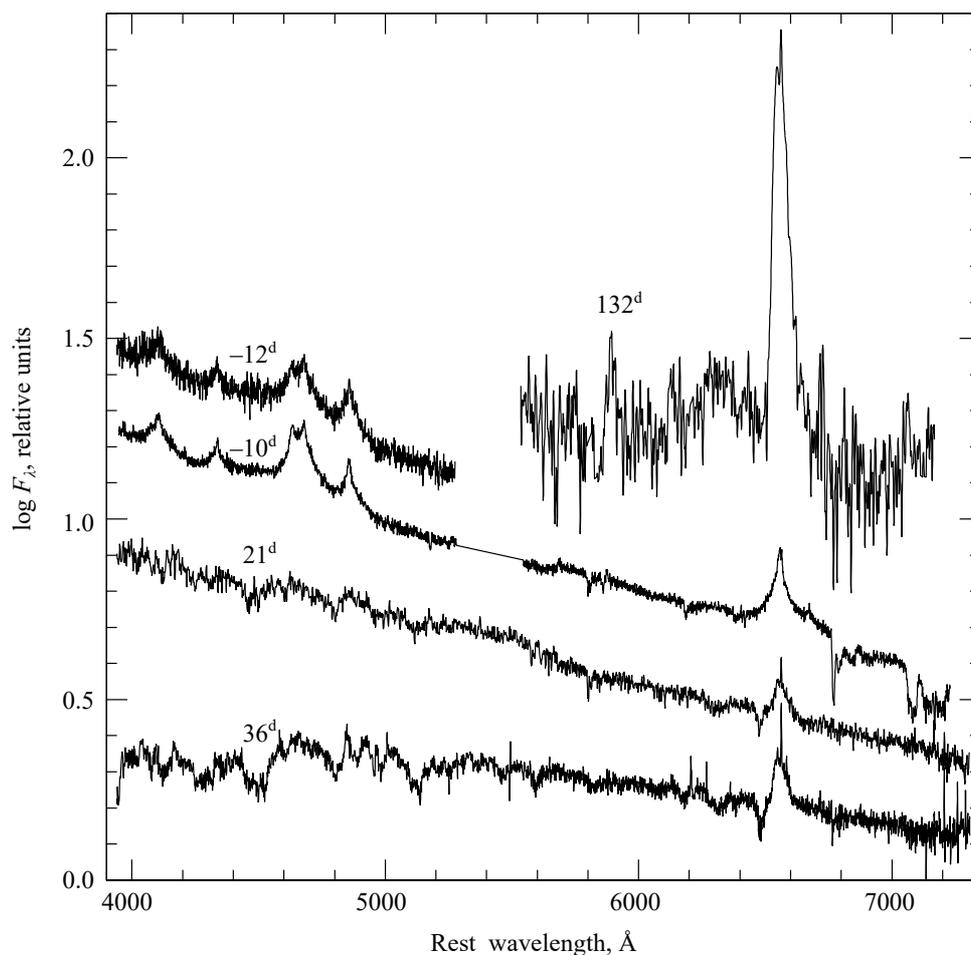


Рис. 5. Спектры SN 2022prv, полученные на 6-м телескопе CAO РАН и 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, исправленные за красное смещение и поглощение света.

На спектрах в фазах 21^d и 36^d довольно четко отождествляются линии поглощения $H\beta$, определенные по ним скорости расширения составляют 3580 км с^{-1} и 3390 км с^{-1} соответственно, с точностью порядка 100 км с^{-1} .

Мы осуществили моделирование спектра в фазе 36^d с помощью программы SYN++ (Thomas et al., 2011); результаты показаны на рис. 8.

Моделирование с помощью стандартного варианта программы показало достаточно хорошее согласие для большинства линий поглощения. Основные параметры модели: скорость фотосферы $3600 \pm 100 \text{ км с}^{-1}$, температура фотосферы $7100 \pm 200 \text{ К}$, химический состав оболочки не отличается от обычного для SN II на данной стадии. Однако выявилось сильное расхождение для линии $H\alpha$, а также не согласуется с наблюдениями структура около линий поглощения Fe II $\lambda 4970$, $\lambda 5120$ и $\lambda 5240$. В наблюдаемых спектрах видна двойная структура минимумов, которая не описывается моделью. Для наилучшего согласия в модель было

включено добавочное излучение в линиях водорода, а затем — два слоя поглощающего вещества в оболочке со скоростями $3600\text{--}5400 \text{ км с}^{-1}$ и $2000\text{--}3300 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Показанная на верхнем графике рис. 8 модель хорошо описывает профиль линий водорода и двойную структуру линий поглощения Fe II.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фотометрическая эволюция SN 2022prv характеризуется постоянным падением блеска после максимума с довольно высокой скоростью. Согласно Anderson et al. (2014), средняя скорость ослабления блеска в полосе V для SNe II на этом этапе 0^m0127 в сутки, для SN 2022prv она несколько выше — 0^m017 в сутки. Примерно через 55 суток после максимума скорость падения блеска увеличилась. Этап довольно медленного постоянного ослабления блеска у SNe II часто называют плато, хотя такие SNe существенно отличаются от прототипов SNe II-P, у которых на этой стадии блеск в

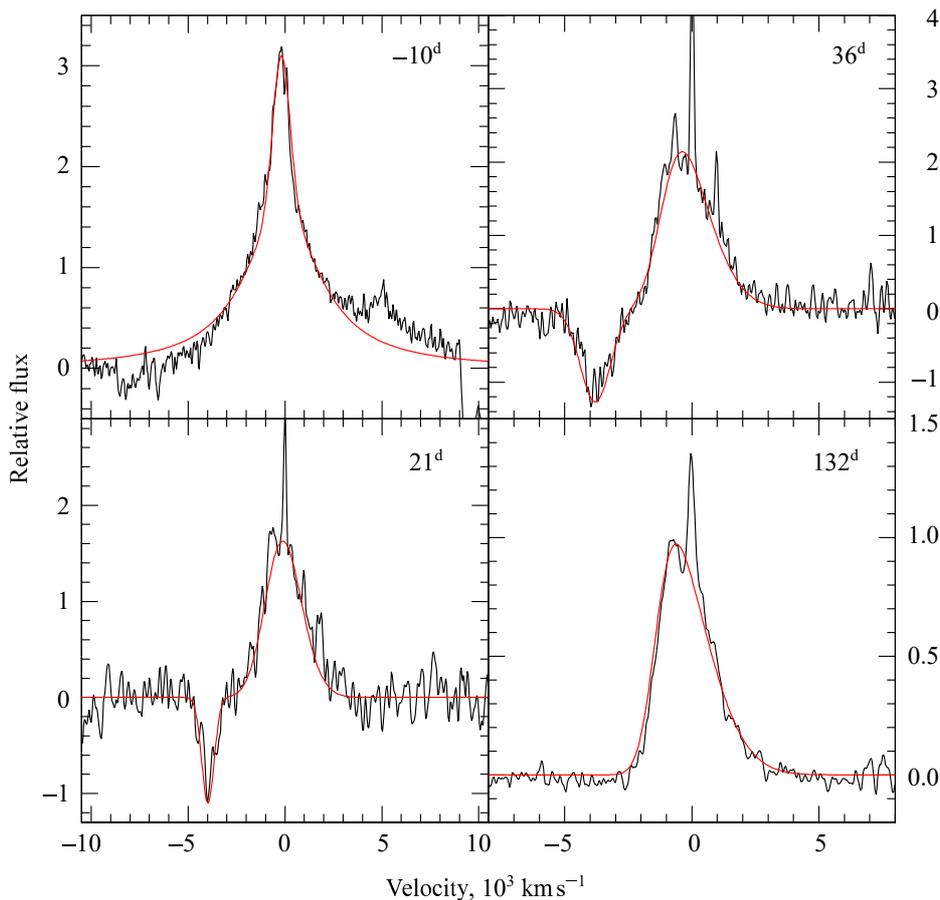


Рис. 6. Профили линии $H\alpha$ после вычитания континуума (черные линии) и их представление суммами гауссовских и лоренцевских профилей (красные линии).

фильтрах VRI почти постоянен или даже растет. Таким образом, длина плато для SN 2022prv была значительно меньше средней, которая, согласно Anderson et al. (2014), равна 84 суткам. Отсутствие наблюдений в интервале 75–130 суток после максимума не позволяет определить скорость падения блеска после плато, фазу и звездную величину начала линейного участка кривой. Сравнение с кривыми блеска SNe II, имевших сходный характер начальной эволюции, позволяет предположить, что последние наблюдения в фазе 132 суток относятся к финальному линейному участку кривой блеска, и показывает, что на этой стадии светимость SN 2022prv была меньше, чем у SNe II, использовавшихся для сравнения.

Другими особенностями SN 2022prv являются достаточно высокая светимость в максимуме $M_V = -18^m1$ и очень большой, по сравнению с другими SNe II-P, промежуток времени от момента взрыва до максимума блеска.

В ранних спектрах в фазе около 10 суток до максимума, что соответствует около 15 дням после взрыва, наблюдались интенсивные эмиссии водорода, He II, N III, характерные для SNe, в кото-

рых происходит взаимодействие с околозвездной оболочкой. В фазах 20–30 дней после максимума эти линии исчезли, и спектр похож на обычный для SNe II на данном этапе эволюции. В целом, характер эволюции спектра SN 2022prv похож на наблюдавшийся для SNe II 2018zd, 2020tlf, 2023ixf (Jacobson-Galán et al., 2022; Tsvetkov et al., 2022; Zhang et al., 2020; Zimmerman et al., 2023). Характерные ширины линий не сильно отличаются от наблюдавшихся для этих SNe. Скорости расширения оболочки, оцененные по смещению абсорбций водорода, несколько меньше средних значений. Результаты моделирования спектра в фазе 36^d программой SYN++ показали, что стандартная версия программы не позволяет достаточно точно описать некоторые особенности наблюдаемого спектра. Вероятно, строение оболочки отличается от принятой в программе модели свободного разлета с экспоненциальным падением плотности по радиусу, что может быть следствием продолжающегося взаимодействия с окружающим веществом или асимметрии взрыва.

Сравнение кривых блеска в абсолютных V -величинах SN 2022prv с четырьмя SNe II, которые по

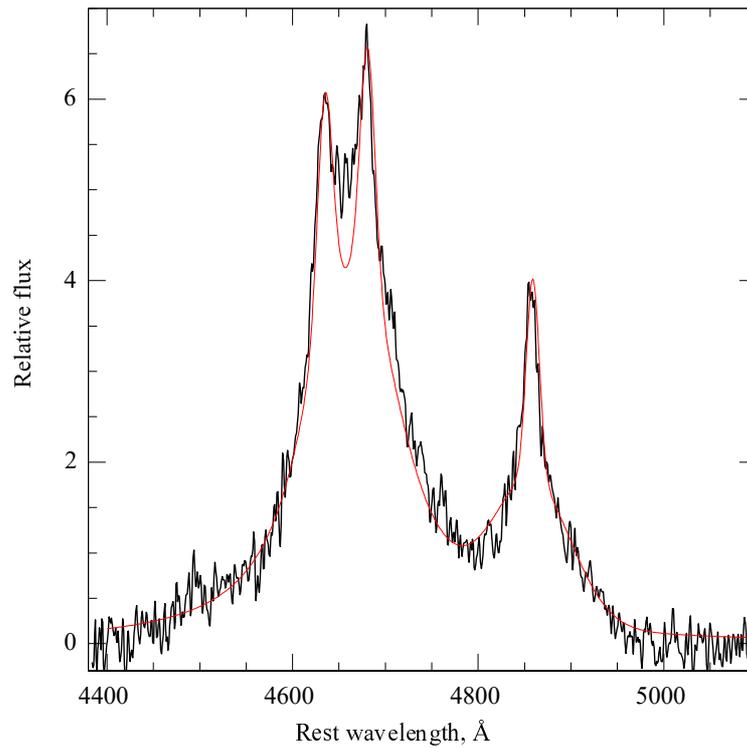


Рис. 7. Профили эмиссионных линий в диапазоне 4500–5000 Å после вычитания континуума (черная линия) в спектре для фазы -10^d и их представление суммами гауссовских и лоренцевских профилей (красная линия).

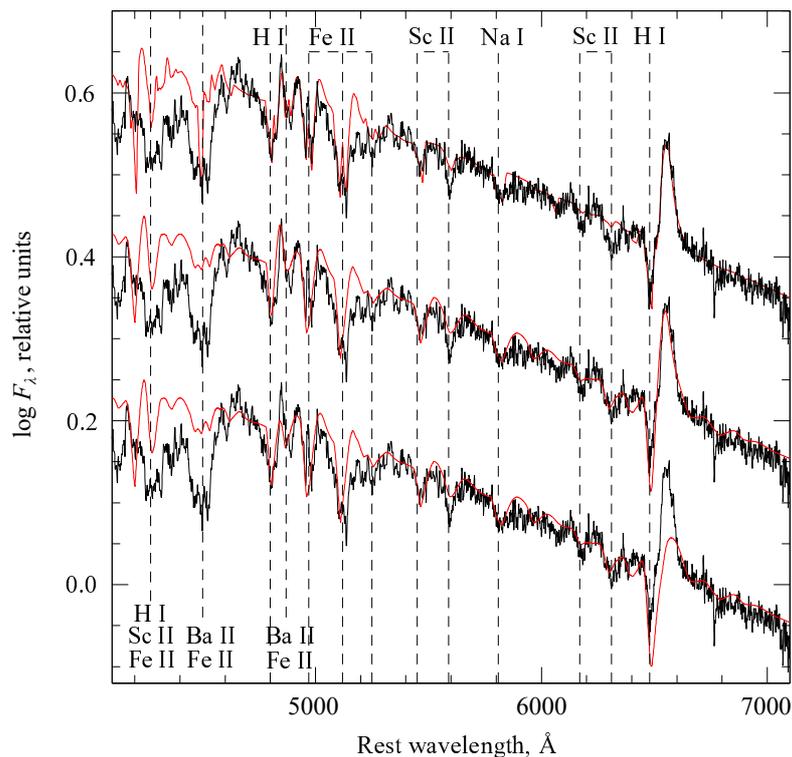


Рис. 8. Результат моделирования спектра в фазе 36^d программой SYN++. Черные линии — наблюдаемый спектр (линии галактики удалены), красные линии — модели. Нижний график — стандартная модель SYN++, средний — модель с добавочным излучением в линиях водорода, верхний — модель с двумя слоями и добавочным излучением. Показаны наиболее вероятные отождествления основных линий поглощения и их бленд, согласно результатам программы SYN++.

характеру эволюции спектров и фотометрии показывают некоторое сходство с SN 2022pgrv, демонстрирует и существенные различия между ними. В частности, SN 2023ixf, у которой стадия плато почти идентична по продолжительности, светимости и скорости падения блеска с SN 2022pgrv, сильно отличается от нее коротким этапом роста блеска и гораздо большей светимостью на поздней стадии.

Эти различия, а также особенности формирования спектров SN 2022pgrv следует объяснить при теоретическом моделировании строения оболочки, кривых блеска и спектров, которое будет осуществлено в последующих работах.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была поддержана Научно-образовательной школой МГУ имени М. В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса». Авторы выражают благодарность за поддержку от Программы развития МГУ имени М. В. Ломоносова. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты».

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Работа В. Ечеистова поддержана Минобрнауки РФ в рамках программы финансирования крупных научных проектов национального проекта «Наука», грант № 075-15-2020-778.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005). DOI:10.1134/1.1883351
2. J. P. Anderson, S. González-Gaitán, M. Hamuy, et al., *Astrophys. J.* **786** (1), article id. 67 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/786/1/67
3. R. Barbon, F. Ciatti, and L. Rosino, *Astron. and Astrophys.* **72**, 287 (1979).
4. E. A. Barsukova, A. S. Vinokurov, A. F. Valeev, and V. P. Goranskij, *The Astronomer's Telegram* **15547**, 1 (2022).
5. L. N. Berdnikov, A. A. Belinskii, N. I. Shatskii, et al., *Astronomy Reports* **64** (4), 310 (2020). DOI:10.1134/S1063772920040010
6. S. Bose, B. Kumar, K. Misra, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (3), 2712 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2351
7. W. V. Jacobson-Galán, L. Dessart, D. O. Jones, et al., *Astrophys. J.* **924** (1), id. 15 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/ac3f3a
8. S. Jester, D. P. Schneider, G. T. Richards, et al., *Astron. J.* **130** (3), 873 (2005). DOI:10.1086/432466
9. D. O. Jones, K. D. French, A. Agnello, et al., *Transient Name Server Discovery Report* **2022-2115**, 1 (2022).
10. A. Kostov and T. Bonev, *Bulgarian Astronomical Journal* **28**, 3 (2018). DOI:10.48550/arXiv.1706.06147
11. Q. Z. Liu, J. Y. Hu, H. R. Hang, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **144**, 219 (2000). DOI:10.1051/aas:2000208
12. P. J. Pessi, J. P. Anderson, G. Folatelli, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **523** (4), 5315 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad1822
13. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020). DOI:10.1134/S1063773720120038
14. S. A. Potanin, I. A. Gorbunov, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Reports* **61** (8), 715 (2017). DOI:10.1134/S106377291707006X
15. E. F. Schlafly and D. P. Finkbeiner, *Astrophys. J.* **737** (2), article id. 103 (2011). DOI:10.1088/0004-637X/737/2/103
16. E. M. Schlegel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **244**, 269 (1990). DOI:1990MNRAS.244..269S
17. S. J. Smartt, *Publ. Astron. Soc. Australia* **32**, id. e016 (2015). DOI:10.1017/pasa.2015.17
18. K. Taggart, S. Tinyanont, K. W. Davis, and R. J. Foley, *The Astronomer's Telegram* **15530**, 1 (2022).
19. R. C. Thomas, P. E. Nugent, and J. C. Meza, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **123** (900), 237 (2011). DOI:10.1086/658673
20. D. Y. Tsvetkov, V. P. Goranskij, E. A. Barsukova, et al., *Astrophysical Bulletin* **77** (4), 407 (2022). DOI:10.1134/S1990341322040162
21. J. Zhang, X. Wang, V. József, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **498** (1), 84 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa2273
22. E. A. Zimmerman, I. Irani, P. Chen, et al., *arXiv e-prints astro-ph:2310.10727* (2023). DOI:10.48550/arXiv.2310.10727

SN 2022prv: Bright Type-II Supernova with Signs of Interaction with Circumstellar Matter

D. Yu. Tsvetkov¹, V. P. Goranskij^{1,2}, E. A. Barsukova², A. F. Valeev², N. N. Pavlyuk¹, A. V. Dodin¹, N. I. Shatsky¹, S. A. Potanin¹, N. P. Ikonnikova¹, M. A. Burlak¹, A. A. Belinslii¹, V. A. Echeistov¹, A. S. Vinokurov², A. N. Sarkisyan², and A. V. Zharova¹

¹Sternberg Astronomical Institute, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

The results of photometric and spectroscopic observations of supernova SN 2022prv carried out with six telescopes including the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences and the 2.5-m telescope of the Caucasus Mountain Observatory of SAI MSU are presented. The dates and magnitudes at the brightness maximum and the parameters of the light curves are determined. The photometric evolution of SN 2022prv is characterized by a constant decrease in brightness after the maximum at a rate quite high for a type II supernovae. Approximately 55 days after the maximum, the rate of the decrease in brightness increased. The maximum luminosity has reached $M_V = -18^m1$ which is higher than average for SN II. In the pre-maximum spectra, high-excitation emission lines were observed characteristic of the ionization of the circumstellar matter by a burst during the shock wave emergence onto the surface of the star. However, approximately 20 days after the maximum, the spectrum did not differ from that typical of SN II. The rate of the envelope expansion at this stage was about 3500 km s^{-1} which is a little smaller than average for SN II values.

Keywords: *supernovae: individual: SN 2022prv*