

Две сверхновые в NGC 4666: ASASSN-14lr и 2019ugt

Д.Ю. Цветков,^{1,*} Н.Н. Павлюк,¹ Н.П. Иконникова,¹ М.А. Бурлак,¹
 А.А. Белинский,¹ А.В. Додин,¹ С.А. Потанин,¹ Н.И. Шатский,¹ И.М. Волков,¹
 П.В. Бакланов,^{1,2,3} М.Г. Ушакова,^{1,2} В.А. Ечеистов,¹ В.М. Липунов¹

¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
 Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ)
 Россия, 119234 Москва, Университетский пр-т, д. 13

²Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
 Москва 123182, Россия

³Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН. Москва 125047, Россия

(Поступила в редакцию 19.11.2024; после доработки 02.12.2024; подписана в печать 09.12.2024)

Представлены результаты фотометрии двух сверхновых в NGC 4666: SN Ia ASASSN-14lr и SN Ib 2019ugt, а также спектроскопические наблюдения SN 2019ugt. Построены кривые блеска и определены их основные параметры. Сверхновая ASASSN-14lr оказалась достаточно типичным объектом класса Ia с пониженной скоростью падения блеска после максимума и большим поглощением света. Используя зависимость абсолютных звездных величин SNe Ia от параметров кривых блеска, получена оценка расстояния до галактики NGC 4666. Спектр SN 2019ugt в период около максимума блеска, максимальная светимость и характер кривых блеска в первые 90 суток после максимума демонстрировали признаки типичной сверхновой класса Ib, причем поглощение света оказалось больше, чем у ASASSN-14lr. Обнаружено уменьшение скорости падения блеска при фазе около 90 суток. Осуществлено моделирование кривых блеска с помощью кода STELLA, определены физические параметры оптимальной модели. Показано, что согласие модели с наблюдениями нарушается через ~40 суток после максимума, для объяснения расхождения предложена модель с дополнительным источником энергии за счет замедления вращения сформировавшегося при взрыве магнитара.

PACS: 97.30.Qt УДК: 524.35

Ключевые слова: сверхновые: SN 2019ugt, ASASSN-14lr.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2520803

ВВЕДЕНИЕ

Вспышки нескольких сверхновых (SNe) в одной галактике представляют повышенный интерес, позволяя уточнить методы определения расстояния по SN и некоторые характеристики галактик. В близкой яркой галактике NGC 4666, входящей в южное продолжение скопления галактик в Деве, в течение 5 лет были открыты две SNe: SN Ia ASASSN-14lr и SN Ib 2019ugt.

SNe типа Ib принадлежат к коллапсирующим сверхновым, вспыхивающим в результате коллапса ядра массивной ($M > \sim 8M_{\odot}$) звезды. От наиболее распространенных коллапсирующих SNe типа II они отличаются тем, что перед взрывом потеряли водородную оболочку звездным ветром или в результате взаимодействия в двойной системе. В их спектрах около максимума блеска отсутствуют линии водорода, наиболее интенсивными являются линии поглощения гелия. Кривые блеска имеют характерную куполообразную форму, источником энергии служит радиоактивный распад элементов группы железа, синтезированных при взрыве.

Кривые блеска сверхновых типа Ia похожи по форме на кривые SNe Ib, источником энергии также является процесс радиоактивного распада ($^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$), однако природа этих сверхновых отличается. Считается, что вспышки SNe Ia — термоядерный взрыв белого карлика, аккрецирующего вещество со спутника, либо взрыв при слиянии двух белых карликов.

Сверхновая ASASSN-14lr была открыта программой обзора неба ASAS-SN 9 декабря 2014 г. (JD 2457001.11), блеск SN в полосе V составил $14^m.3$, координаты объекта $\alpha = 12^h45^m09^s.10$, $\delta = -00^{\circ}27'32''.5$ (J2000), расстояние от центра галактики $7''.5$ к востоку, $10''.5$ к северу [1]. Объект был классифицирован как SN Ia на основании спектра, полученного 11 декабря 2014 г. на 2.4-метровом телескопе обсерватории MDM [2]. Исследование SN в околомаксимальной стадии проведено в работе [3]. Были построены кривые блеска в диапазонах $uVgri$ в интервале фаз от -16 до 88 сут относительно максимума блеска, получена серия спектров в этот же период. Показано, что ASASSN-14lr была типичной сверхновой класса Ia, скорость падения блеска после максимума несколько меньше средней. Спектроскопические исследования SN опубликованы в работах [4, 5], фотометрия ASASSN-14lr на поздней стадии ~ 850 – 960 сут после максимума

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

с помощью космического телескопа «Хаббл» опубликована в работе [6].

SN 2019увт была открыта 27 декабря 2019 г. (JD 2458845.02) программой ATLAS [7], блеск SN в фильтре «orange» составил $15^m.88$, координаты $\alpha = 12^h45^m09^s.10$, $\delta = -00^\circ27'32''.5$ (J2000), расстояние от центра галактики $10''.1$ к северу, $6''.9$ к западу. Спектр SN, полученный на 4.1-метровом телескопе SOAR 29 декабря 2019 г., показал, что объект относится к классу Ib [8].

Фотометрические и спектроскопические наблюдения приведены в [9], кривые блеска получены в интервале фаз от -8 до 23 суток относительно максимума блеска. Спектры в околоредукционной стадии типичны для сверхновых Ib. На изображениях, полученных космическим телескопом «Хаббл» за 2.5 лет до вспышки зарегистрирована звезд-предсверхновая, для которой даны оценки светимости, температуры и радиуса $L = 2 \times 10^5 L_\odot$, $T_{eff} = 6800K$, $R = 320R_\odot$.

Фотометрия в полосах *BVgri* в период от -10 до 350 сут относительно максимума и спектры, охватывающие период от максимума до фазы ~ 400 суток, представлены в [10]. Показано, что скорость падения блеска уменьшилась после фазы ~ 90 сут, примерно в то же время в спектрах появилась узкая эмиссия $H\alpha$, что свидетельствует о начале взаимодействия выброса с богатым водородом околосредней звездной массой. Сделаны оценки скорости потери массы предсверхновой $\sim 3 - 7 \times 10^{-5} M_\odot$ в год и начальной массы предсверхновой $13 - 15 M_\odot$.

Исследование окрестностей SN 2019увт в галактике и анализ данных о предсверхновой проведены в [11]. Высказано предположение, что предсверхновая с массой около $10M_\odot$ входила в двойную систему, вторым компонентом был желтый сверхгигант.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Фотометрические наблюдения ASASSN-14lp проводились на 1-метровом телескопе Симеизской обсерватории [12] и 70-сантиметровом рефлекторе ГАИШ в Москве с 4 февраля 2015 г. до 10 июня 2015 г. в фильтрах *BVRI*. SN была также зарегистрирована на изображениях без фильтра, полученных телескопами МАСТЕР [13] с 20 января по 12 марта 2015 г. при проведении обзора неба.

Наблюдения SN 2019увт в фильтрах *UBVRI* были осуществлены на 60-сантиметровом телескопе КГО ГАИШ [14] с 31 декабря 2019 г. по 8 июня 2020 г.

Первичная обработка ПЗС-кадров и фотометрия осуществлялись с помощью пакета программ IRAF¹

Для вычитания фона галактики использовались изображения, полученные на 60-см телескопе КГО в декабре 2021 г., когда SN 2019увт перестала быть видимой. Величины звезд сравнения взяты из баз данных APASS², SDSS³, Pan-STARSS⁴.

Величины *ugri* преобразованы в *UBVRI* с помощью соотношений из работ [15, 16].

Для изображений без фильтра использовались величины звезд сравнения в полосе *R*.

Изображения сверхновых показаны на рис. 1.

Результаты фотометрии ASASSN-14lp и SN 2019увт приведены в табл. 1, 2, ошибки указаны в скобках, обозначения телескопов: M40 — телескопы сети МАСТЕР, S100 — 1-метровый телескоп Симеизской обсерватории, M70 — 70-сантиметровый телескоп в Москве.

Спектроскопические наблюдения SN 2019увт проводились на 2.5-метровом телескопе КГО ГАИШ [17] с помощью двухлучевого спектрографа TDS [18]. Использовалась щель шириной $1''$, дисперсия для синего и красного каналов составила, соответственно, 1.21 и $0.87 \text{ \AA}/\text{pix}$. Первоначальная редукция включала учет темнового тока, космических лучей и плоского поля. Калибровка по длине волны проводилась с помощью стандартной Ne-Al-Si лампы, для уточнения калибровки использовались линии ночного неба. Затем осуществлялось сложение отдельных кадров, экстракция спектра, определение спектральной чувствительности и калибровка потока с использованием спектрофотометрических стандартов. Для редукций использован пакет программ, разработанный в ГАИШ. Было получено 4 спектра: 16 и 19 января, 10 февраля и 1 марта 2020 г., что соответствует фазам 9, 12, 34 и 54 сут после максимума в фильтре *V*.

Предварительные результаты фотометрических и спектроскопических наблюдений SN 2019увт опубликованы в [19].

2. КРИВЫЕ БЛЕСКА И ЦВЕТА

2.1. ASASSN-14lp

Кривые блеска ASASSN-14lp представлены на рис. 2.

Показаны также результаты [3], величины *gri* из данной работы переведены в *BVRI* с помощью соотношений из [15]. Результаты достаточно хорошо согласуются. Согласно [3] ASASSN-14lp относится к SNe Ia с пониженной скоростью падения блеска. Параметр Δm_{15} , характеризующий падение блеска за первые 15 сут после максимума, для нее составляет около 0.8, в то время как его среднее значение для SN Ia примерно 1.05. Мы сравнили кривые блеска ASASSN-14lp

² <https://www.aavso.org>

³ <https://skyserver.sdss.org/dr16/tools/search/radial.aspx>

⁴ <https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/>

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

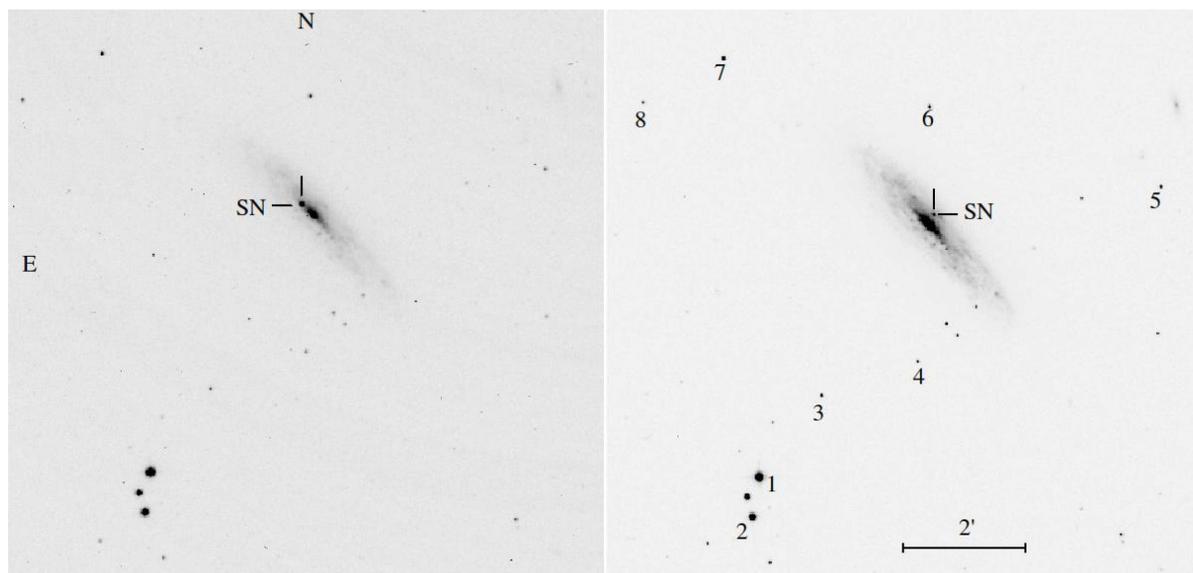


Рис. 1. Изображения ASASSN-14lr (слева) и SN2019ugt. На правом изображении отмечены звезды сравнения

 Таблица 1. *BVRI*-фотометрия ASASSN-14lr

JD-2457000	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>	Телескоп
42.50			12.82 (0.04)		M40
57.63	15.24 (0.04)	14.00 (0.03)	13.53 (0.03)	13.17 (0.03)	S100
69.33			14.01 (0.06)		M40
71.52	15.48 (0.03)	14.38 (0.04)	13.98 (0.04)	13.77 (0.04)	S100
72.63	15.40 (0.08)	14.40 (0.03)	14.03 (0.04)	13.80 (0.03)	S100
74.56	15.53 (0.04)	14.46 (0.04)	14.05 (0.03)	13.93 (0.03)	S100
76.61	15.52 (0.06)	14.50 (0.03)	14.17 (0.03)	14.04 (0.04)	S100
93.51			14.60 (0.06)		M40
97.47		14.94 (0.04)	14.81 (0.04)	14.86 (0.04)	M70
99.47	15.81 (0.03)	15.09 (0.04)	14.80 (0.03)	14.90 (0.03)	M70
132.46	16.23 (0.04)	15.86 (0.03)	15.92 (0.03)	16.02 (0.04)	S100
135.42	16.33 (0.04)	15.89 (0.03)	15.93 (0.05)	16.10 (0.06)	S100
141.42		15.97 (0.06)	15.95 (0.06)		M70
142.46	16.43 (0.05)	15.98 (0.03)	16.08 (0.03)	16.21 (0.05)	S100
147.41		16.15 (0.07)	16.15 (0.05)		M70
149.33	16.54 (0.04)	16.10 (0.05)	16.35 (0.07)	16.22 (0.06)	S100
153.36	16.54 (0.04)	16.25 (0.03)	16.46 (0.04)	16.34 (0.05)	S100
161.37	16.63 (0.13)	16.48 (0.05)	16.44 (0.06)		S100
175.41	16.83 (0.07)	16.69 (0.04)	17.09 (0.06)	16.75 (0.06)	S100
182.41	16.90 (0.06)	16.76 (0.04)	17.05 (0.04)	16.96 (0.06)	S100
184.31	16.98 (0.04)	16.69 (0.06)	17.09 (0.06)	16.88 (0.07)	S100

с кривыми для SN 2009ig, имеющей близкий показатель $\Delta m_{15}=0.85$ [20]. Сравнение показывает, что кривые блеска этих двух SN очень близки друг к другу. Максимум блеска ASASSN-14lr в фильтрах *B, V, R* наступил в JD 2457016, в полосе *I* на 3 суток раньше. Звездные величины в максимуме $B_{max} = 12^m.45 \pm 0^m.1$, $V_{max} = 12^m.0 \pm 0^m.05$, $R_{max} = 12^m.0 \pm 0^m.1$, $I_{max} = 12^m.2 \pm 0^m.1$. Наши наблюдения начались только через 26 суток после

максимума, однако они продолжались дольше, чем в работе [3], до фазы 168 сут после максимума, помогая установить поведение кривых блеска на стадии линейного «хвоста».

Кривые цвета ASASSN-14lr показаны на рис. 3. Они сравниваются с кривыми цвета четырех SNe Ia, имеющих близкие значения Δm_{15} и небольшое поглощение света: 1992bc, 2005eq, 2009ig, 2018gv [20–22]. Кривые совмещались по оси абс-

Таблица 2. *UBVRI*-фотометрия SN 2019увг на 60-см телескопе КГО

JD-2450000	<i>U</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>	<i>I</i>
8848.65	17.37 (0.12)	16.92 (0.04)	15.96 (0.02)	15.35 (0.02)	14.87 (0.03)
8849.57	17.28 (0.06)	16.92 (0.02)	15.84 (0.02)	15.24 (0.02)	14.76 (0.02)
8851.55	17.08 (0.04)	16.77 (0.02)	15.70 (0.02)	15.08 (0.02)	14.59 (0.02)
8852.61	17.05 (0.05)	16.72 (0.02)	15.63 (0.02)	15.03 (0.01)	14.55 (0.02)
8853.56	17.09 (0.06)	16.69 (0.03)	15.60 (0.02)	14.99 (0.02)	14.46 (0.02)
8865.56	18.26 (0.10)	17.67 (0.03)	16.01 (0.02)	15.17 (0.01)	14.46 (0.02)
8866.61	18.71 (0.16)	17.82 (0.04)	16.08 (0.02)	15.23 (0.02)	14.52 (0.02)
8867.56	18.34 (0.15)	17.93 (0.04)	16.16 (0.02)	15.29 (0.01)	14.55 (0.02)
8868.54	18.50 (0.14)	18.01 (0.04)	16.24 (0.02)	15.32 (0.01)	14.59 (0.02)
8874.55		18.61 (0.04)	16.61 (0.02)	15.63 (0.02)	14.85 (0.02)
8884.52		18.94 (0.06)	16.92 (0.02)	15.93 (0.02)	15.09 (0.02)
8889.56		18.81 (0.07)	17.02 (0.03)	16.04 (0.02)	15.19 (0.02)
8890.44		18.91 (0.14)	17.01 (0.03)	16.06 (0.02)	15.18 (0.04)
8894.25		18.91 (0.10)	17.16 (0.04)	16.18 (0.03)	15.25 (0.03)
8896.51		18.94 (0.06)	17.20 (0.03)	16.24 (0.02)	15.34 (0.02)
8897.52		18.97 (0.09)	17.21 (0.03)	16.30 (0.03)	15.35 (0.03)
8898.52		19.11 (0.08)	17.27 (0.03)	16.29 (0.02)	15.39 (0.02)
8899.50		19.07 (0.08)	17.28 (0.03)	16.33 (0.02)	15.39 (0.02)
8901.53		19.08 (0.08)	17.33 (0.03)	16.37 (0.02)	15.49 (0.04)
8905.46		19.25 (0.05)	17.44 (0.03)	16.48 (0.02)	15.51 (0.02)
8906.47		19.27 (0.07)	17.43 (0.03)	16.51 (0.02)	15.55 (0.03)
8910.50		19.16 (0.09)	17.41 (0.04)	16.49 (0.04)	15.51 (0.03)
8911.45		19.14 (0.09)	17.47 (0.04)	16.52 (0.03)	15.54 (0.03)
8917.47			17.44 (0.04)		
8921.47		19.21 (0.08)	17.47 (0.03)	16.58 (0.02)	15.60 (0.03)
8931.38		19.30 (0.10)	17.81 (0.04)	16.91 (0.04)	15.88 (0.04)
8934.42		19.42 (0.20)	17.82 (0.08)	16.80 (0.06)	15.91 (0.08)
8937.40		19.52 (0.15)	17.98 (0.04)	17.03 (0.04)	15.99 (0.04)
8943.39		19.61 (0.15)	17.94 (0.04)	16.92 (0.02)	15.96 (0.03)
8949.37		19.54 (0.22)	17.90 (0.04)	16.96 (0.03)	15.91 (0.03)
8950.36		19.27 (0.08)	17.94 (0.06)	17.03 (0.03)	16.06 (0.03)
8953.36		19.72 (0.10)	18.07 (0.03)	17.15 (0.03)	16.14 (0.03)
8957.35		19.60 (0.13)	18.13 (0.04)	17.20 (0.03)	16.18 (0.04)
8958.33		19.55 (0.08)	18.06 (0.03)	17.09 (0.03)	16.08 (0.03)
8959.33		19.51 (0.10)	18.07 (0.04)	17.09 (0.06)	16.09 (0.04)
8964.31		19.62 (0.20)	18.14 (0.09)	17.11 (0.06)	16.21 (0.06)
8965.31		19.56 (0.13)	18.10 (0.05)	17.20 (0.04)	16.21 (0.04)
8966.34		19.70 (0.18)	18.24 (0.07)	17.22 (0.06)	16.26 (0.05)
8969.34		19.56 (0.12)	18.13 (0.08)	17.09 (0.06)	16.17 (0.04)
8981.38		19.52 (0.16)	18.23 (0.06)	17.31 (0.03)	16.40 (0.03)
8984.34		19.57 (0.13)	18.15 (0.04)	17.12 (0.03)	16.27 (0.03)
9009.31		19.77 (0.12)	18.23 (0.06)	17.13 (0.03)	16.31 (0.03)

цисс по точкам максимума блеска, затем для цвета $B-V$ для каждой из четырёх SNe определялось смещение по оси ординат для наилучшего совпадения с кривой ASASSN-14lp, что давало оценки избытка цвета $B-V$ для ASASSN-14lp. Усредненная оценка избытка цвета ASASSN-14lp $E(B-V) = 0.^m20 \pm 0.^m04$, что существенно меньше

оценки из [3], $E(B-V) = 0.^m33$, однако близко к величине, принятой в [5] $E(B-V) = 0.^m25$. Кривые цветов $(V-R), (R-I)$ SNe из выборки для сравнения смещались по оси ординат на величины, соответствующие определенным по этим SNe избыткам цвета $B-V$, принимая отношение полного поглощения к селективному $R_V = 3.1$.

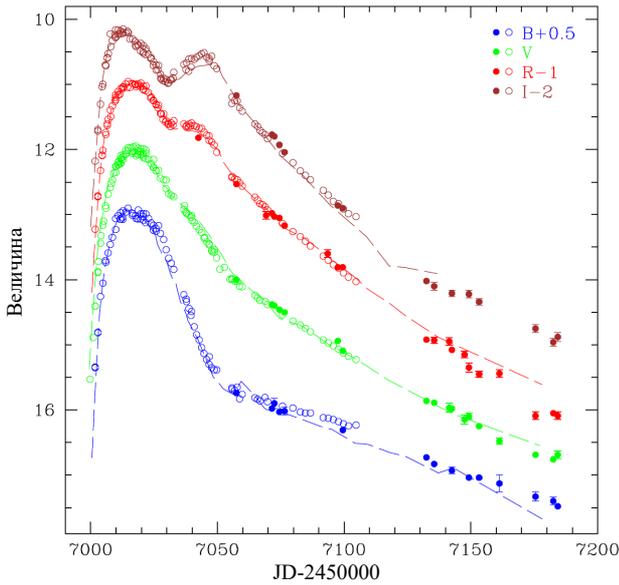


Рис. 2. Кривые блеска ASASSN-141p в фильтрах $BVRI$. Точки — наши данные, кружки — результаты [3], штриховые линии — кривые блеска SN 2009ig

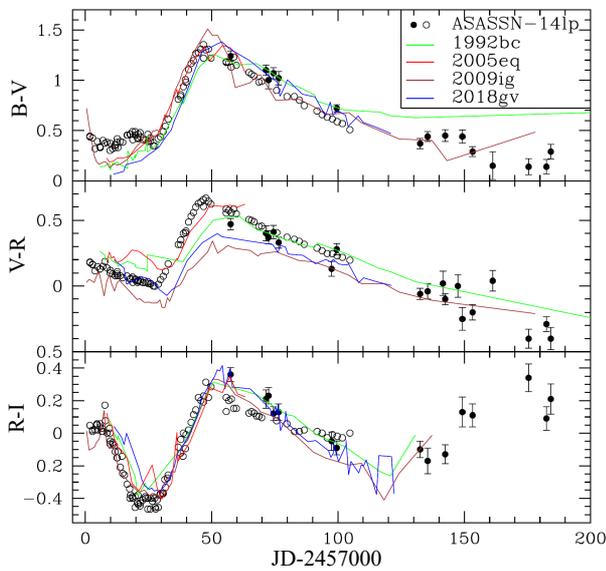


Рис. 3. Кривые цвета ASASSN-141p. Точки — наши данные, кружки — результаты [3]. Кривые цвета SNe из выборки для сравнения показаны цветными линиями

Используя калибровку зависимости абсолютной величины SNe Ia от параметра Δm_{15} согласно [23], можно получить оценку модуля расстояния до ASASSN-141p $\mu = 31.14 \pm 0.3$. Эта оценка больше, чем полученная в [3] $\mu = 30.8$, и лучше согласуется со средним расстоянием до южного продолжения скопления в Деве согласно [24], составляющим 17.0 Мпк ($\mu = 31.15$).

Отметим отличие кривой цвета $B-V$ ASASSN-141p от других SNe из нашей выборки в интервале JD 2457000–2457020, ASASSN-141p существенно краснее остальных SNe. Возможно, это связано с отмеченным в [4] дефицитом ультрафиолетового излучения для этой SN. Также данные показывают достаточно большой разброс кривых цвета ($V-R$), в то время как для цвета ($R-I$) разброс гораздо меньше.

трафиолетового излучения для этой SN. Также данные показывают достаточно большой разброс кривых цвета ($V-R$), в то время как для цвета ($R-I$) разброс гораздо меньше.

2.2. SN 2019yvr

Кривые блеска SN 2019yvr показаны на рис. 4. Вместе с нашими данными приведены результаты [9, 10], величины $ugri$ пересчитаны в систему $UVRI$ с помощью соотношений из [16]. Результаты достаточно хорошо согласуются во всех диапазонах, кроме U . Величины u из [9] и полученные из них величины U показывают падение блеска в интервале JD 2458849–2458852, в то время как наши данные, наоборот, демонстрируют поярчение SN. В это время блеск в других диапазонах возрастал как по нашим данным, так и по данным [9], в этой работе дата максимума блеска в фильтре B — JD 2458855. Таким образом, согласно данным [9], максимум в полосе u наступил по крайней мере на 6 суток раньше, чем в фильтре B , в то время как обычно этот интервал не превышает 2-3 суток. Можно предположить, что используемые нами формулы перехода от величин u к U неприменимы в данном случае, или в данных [9] имеются систематические ошибки.

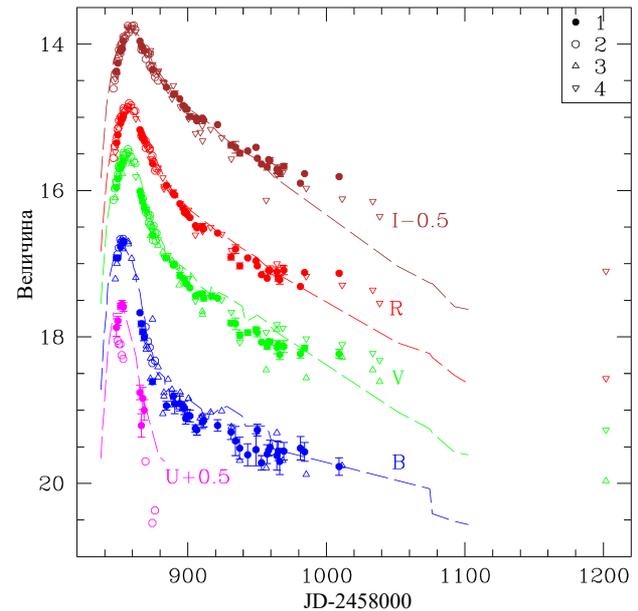


Рис. 4. Кривые блеска SN 2019yvr в фильтрах $UVBRI$. Данные в разных фильтрах показаны разными цветами, источники данных обозначены разными символами: 1 — наши данные, 2 — результаты [9], 3 — величины B, V [10] 4 — величины V, R, I , полученные из величин gri [9], штриховые линии — кривые блеска SN 2009jf

Кривые блеска SN 2019yvr сравниваются с кривыми для SN Ib 2009jf [25]. Видно, что кривые достаточно хорошо согласуются в первые 30–40 сут после максимума, однако в дальнейшем проявляются существенные различия в скорости падения блеска,

причем для SN 2019уvt в фазе >130 сут наблюдается сильное уменьшение скорости падения блеска в фильтрах V, R, I . Точки максимума блеска в разных диапазонах можно определить достаточно надежно: $B_{max} = 16^m.7 \pm 0^m.15$, $V_{max} = 15^m.4 \pm 0^m.1$, $R_{max} = 14^m.8 \pm 0^m.1$, $I_{max} = 14^m.25 \pm 0^m.1$. Максимум в полосе B наступил в JD 2458854, в фильтрах V, R, I — соответственно, на 3, 4 и 6 сут позже, точность этих оценок 2–3 сут.

Кривые цвета SN 2019уvt показаны на рис. 5, они характеризуются быстрым покраснением в первые ~ 30 сут после максимума, которое сменяется медленным поглублением или участком примерно постоянного цвета.

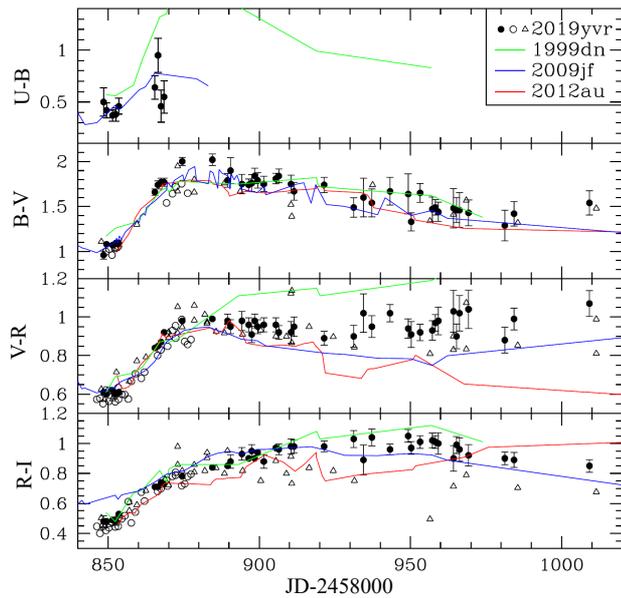


Рис. 5. Кривые цвета SN 2019уvt. Точки — наши данные, кружки — результаты [9], треугольники — данные [10]. Для сравнения приведены кривые цвета трех SNe Ib

Очень красный цвет SN 2019уvt в максимуме, очевидно, является следствием поглощения света в родительской галактике. Сравнение кривой цвета $B-V$ SN 2019уvt с кривыми цвета для 4 SNe Ib с достаточно хорошо известным и небольшим поглощением света: SNe 1999dn, 2007Y, 2009jf, 2012au [25–28] позволяет по смещению кривых для наилучшего совпадения получить оценку избытка цвета для SN 2019уvt $E(B-V) = 0^m.72 \pm 0^m.07$. На рис. 5 кривые цвета SN 2019уvt сравниваются с кривыми для трех из перечисленных выше SNe: 1999dn, 2009jf, 2012au (для 2007Y имеются только данные о цвете $B-V$).

Кривые цвета этих SNe сдвигались по оси ординат на величину разности поглощений между данной SN и SN 2019уvt, по оси абсцисс кривые совмещались по точкам максимума блеска в фильтре V .

Кривые цвета $B-V$ для рассмотренных SNe достаточно хорошо согласуются, однако для других цветов наблюдаются существенные различия как по форме кривых, так и по величине показате-

лей цвета. Особенно сильные различия — в цветах $(U-B)$ и $(V-R)$ в фазах $>30-40$ сут.

Кривая блеска SN 2019уvt в абсолютных V -величинах и сравнение с кривыми блеска 5 SNe Ib: 1999dn, 2007Y, 2009jf, 2012an, 2017iro [25–29] показаны на рис. 6. Приняв для NGC 4666 модуль расстояния $\mu = 31.14$, избыток цвета $E(B-V) = 0^m.72$ и $R_V = 3.1$, получим оценку абсолютной величины в максимуме SN 2019уvt $M_V = -18^m.0 \pm 0^m.4$, $M_B = -17^m.4 \pm 0^m.5$. Согласно [30] средняя абсолютная величина SNe Ib составляет $M_B = -17^m.54$, что очень близко к абсолютной величине SN 2019уvt. Рис. 6 подтверждает, что максимальная светимость SN 2019уvt является достаточно характерной для SNe Ib. По абсолютной величине и характеру кривой блеска до фазы ~ 100 сут после максимума наибольшее сходство с SN 2019уvt показывает SN 2017iro, однако для нее не наблюдается сильное замедление падения блеска после этой фазы. Подобное замедление демонстрируют SNe 2009jf и 2012an. Оценка блеска [10] в фазе около 340 сут позволяет предположить, что скорость падения блеска снова увеличилась в интервале фаз 200–250 сут, и стала близкой к ожидаемой для случая полной переработки энергии распада $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$ в излучение. Возможно, такой же характер имеет кривая блеска SN 2009jf, однако SNe 1999dn, 2017iro показывают на линейном хвосте кривых блеска большую скорость падения блеска и меньшую светимость. Напротив, SN 2012an демонстрирует меньшую ожидаемую скорость падения блеска и более высокую светимость.

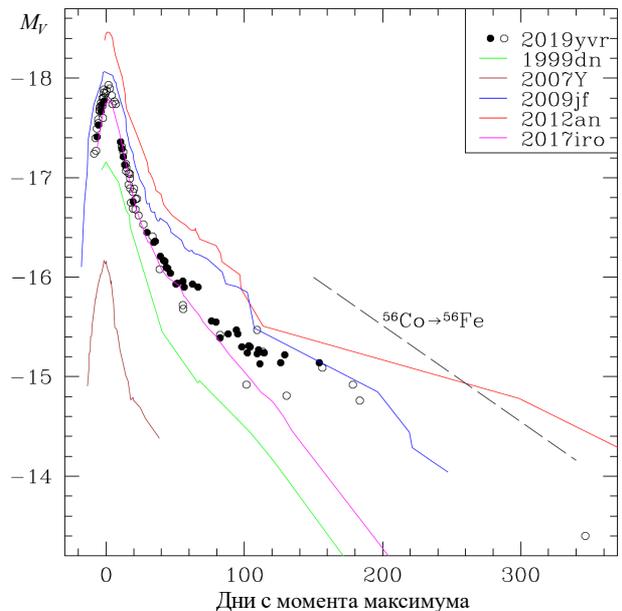


Рис. 6. Кривая блеска в абсолютных величинах M_V SN 2019уvt и сравнение с кривыми блеска 5 SNe Ib. Точки — наши данные, кружки — величины V из работ [9, 10]. Черной штриховой линией показан ожидаемый наклон кривой блеска, когда источником энергии является распад $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

3. СПЕКТРЫ SN 2019YVR

Спектрограммы показаны на рис. 7, они имеют типичный для SNe Ib вид. Наиболее интенсивные линии поглощения принадлежат гелию, самая сильная — HeI $\lambda 5876 \text{ \AA}$. Хорошо видно постепенное смещение минимума этой линии в красную сторону, объясняемое движением фотосферы вглубь оболочки, в область более медленного расширения. Оценки скорости по положению минимума: 9000, 8600, 7700 km s^{-1} для фаз 9, 12, 34 сут соответственно. Спектрограмма для фазы 54 сут недодержана и искажена фоном галактики, оценка по ней невозможна. Такие скорости являются характерными для SNe Ib на данных этапах эволюции. В спектрах зарегистрированы очень сильные межзвездные линии поглощения NaI D2, D1, возникающие в родительской галактике. Их эквивалентные ширины $EW=1.35, 0.98 \text{ \AA}$, что подтверждает сильное поглощение света SN в галактике. Эти значения EW больше границы применимости соотношений из работы [31]. Согласно соотношению из работы [32] $E(B-V) = 0^m.58$, что удовлетворительно согласуется с величиной, найденной нами по кривым цвета.

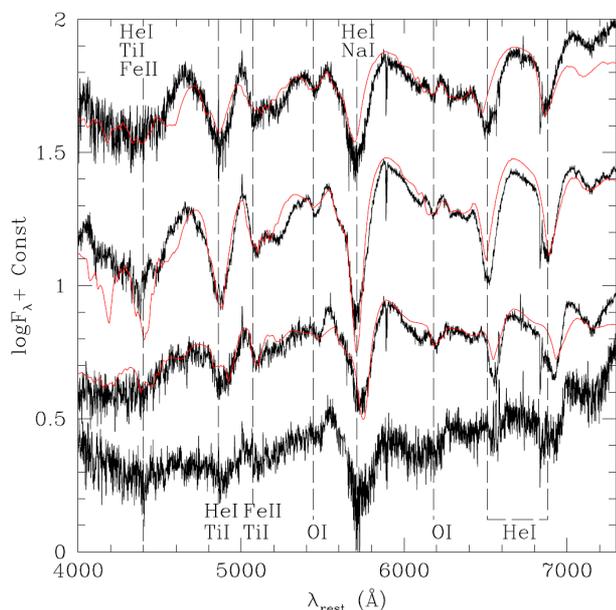


Рис. 7. Спектры SN 2019YVR, полученные в фазах 9, 12, 34, 54 сут (сверху вниз, черные линии) и результаты моделирования программой SYN++ (красные линии). Показано отождествление линий поглощения согласно результатам моделирования

Мы осуществили моделирование спектров программой SYN++ [33]. Программа рассчитывает спектр на основании набора входных данных, основными являются химический состав, температура, скорость расширения. Сравнение модельного спектра с наблюдаемым позволяет определить или уточнить эти и ряд других параметров, что важно для понимания физической природы данной SN. На рис. 7 показаны результаты моделирования, они до-

статочно хорошо представляют наблюдаемые спектры. В расчетах учитывались следующие элементы: HeI, FeII, OI, NaI, TiI. На рис. 7 показано соответствие линий в спектре определенным элементам или их блендам, согласно результатам программы SYN++. Скорости фотосферы для фаз 9, 12, 34 сут: 9000, 8000, 6000 km/s , что достаточно хорошо согласуется со скоростями, непосредственно измеренными по смещению абсорбции HeI. Температура фотосферы от 4100 до 4400 K.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА

SN 2019YVR принадлежит к сверхновым типа Ib, вспышки которых обусловлены коллапсом ядра сверхгиганта, потерявшего водородную оболочку [9].

Компактная внутренняя конфигурация предсверхновой строилась в гидростатическом равновесии близком к политропным звездам с начальным радиусом $R_0 = 30R_\odot$ и $M_{tot} = 3.2M_\odot$, см. рис. 8. Распределение химических элементов по массовой координате, демонстрируемое на рис. 8, подбиралось схожим на эволюционные расчеты сложного термоядерного горения в сверхгигантах. Полагалось формирование в центральной области нейтронной звезды с массой $M_{core} = 1.55M_\odot$. На динамику разлета выброса сверхновой нейтронная звезда влияет через собственное гравитационное притяжение. В случае магнитарной модели учитывался дополнительный подогрев вещества выброса, подпитываемый замедлением вращения нейтронной звезды. Взрыв сверхновой эмулировался выделением энергии в виде тепловой бомбы в околоцентральной области предсверхновой.

Варьируя параметры исходной модели — массу и радиус предсверхновой, энергию взрыва и массу синтезированного ^{56}Ni , — рассчитывали сетку моделей для поиска модели, наилучшим образом воспроизводящей наблюдаемые кривые блеска и скорости фотосферы. Для вычислений использовался многогрупповой радиационно-гидродинамический код STELLA [34–37].

Сравнение наблюдаемых кривых блеска и фотосферных скоростей, которые брались из работы [10], с теоретическими расчетами для подобранной оптимальной модели M1 демонстрируется на рис. 9. Параметры оптимальной модели: начальный радиус $R_0 = 31R_\odot$, масса ^{56}Ni $M(^{56}\text{Ni}) = 0.16M_\odot$, полная масса $M_{tot} = 3.2M_\odot$ и энергия взрыва $E_{burst} = 0.8 \times 10^{51}$ эрг.

Количественно наша оптимальная модель M1 неплохо воспроизводит купол кривой блеска, но после 40 дня согласие с наблюдениями портится. Модель не учитывает дополнительные механизмы нагрева оболочки сверхновой. Наиболее вероятные механизмы нагрева — столкновение выброса с околозвездной оболочкой и магнитарный нагрев.

Большая начальная масса предсверхновой, бурное истечение вещества в процессе эволюции и непо-

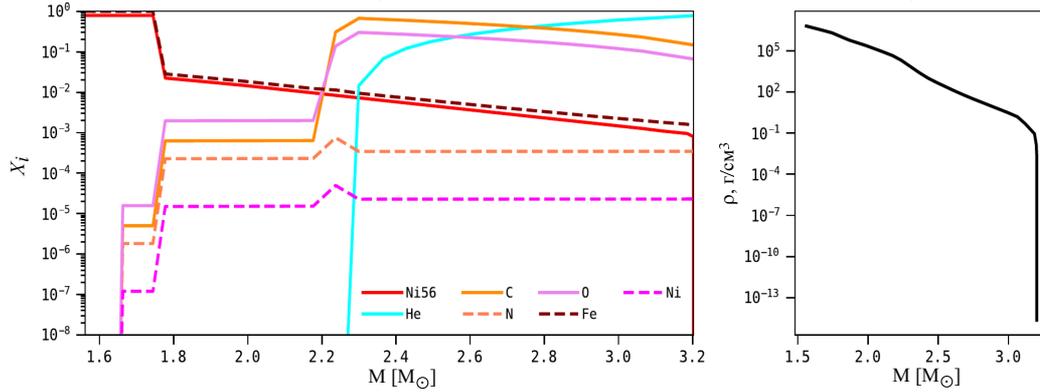


Рис. 8. Распределение химических элементов (слева) и плотности по массовой координате в модели предсверхновой

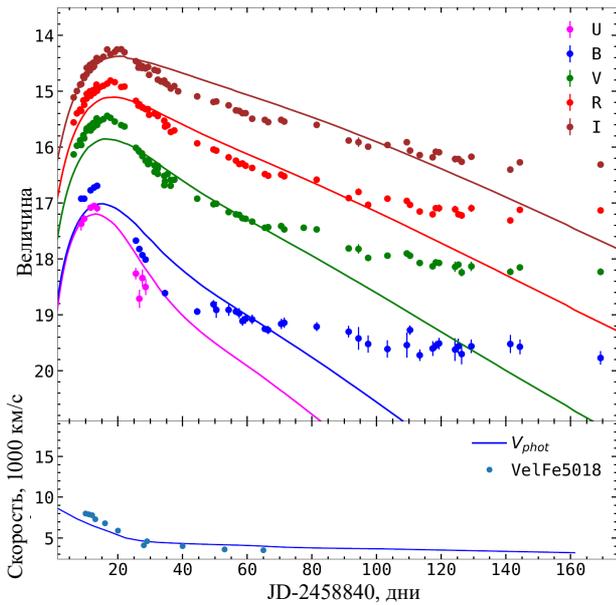


Рис. 9. Сравнение наблюдаемых кривых блеска (вверху) и скоростей фотосферы (внизу) с расчетами для модели M1 (показаны линиями)

средственно перед взрывом могут сформировать плотную околозвездную среду со сложным профилем плотности и химического состава. Поэтому столкновение выброса с околозвездной средой для сверхновых типа Ibс является одним из вероятных механизмов для объяснения их кривых блеска и спектров [38]. Эта задача сложна для моделирования и выходит за рамки данного исследования. Ее планируется выполнить в отдельной работе.

В настоящей работе мы исследовали магнитарный механизм. Часть нейтронных звезд в процессе коллапса ядер массивных звезд могут быстро раскрутиться и, возможно, по той же причине, оказаться сильно намагниченными [39, 40]. Такие нейтронные звезды называют «миллисекундными магнитарами». Они обладают большой вращательной энергией, которая выделяется в течение некоторого времени после взрыва посредством замедления вращения. Если энергия ветра магнитара эффек-

тивно термализуется внутри расширяющейся оболочки выброса сверхновой, то полученный источник энергии может значительно увеличить светимость сверхновой [41, 42]. Расчет дополнительного нагрева от магнитара в нашей модели следует работе [43] и параметризуется как

$$L_{\text{mag}}(t) = \frac{E_m}{t_m} \left(1 + \frac{t}{t_m}\right)^{-2}, \quad (1)$$

где t — время после взрыва, E_m — начальная энергия вращения магнитара, а t_m — временная шкала его замедления.

Сопоставляя наблюдения с расчетами, мы подобрали магнитарную модель M2. Ее начальные радиус R_0 , полная масса M_{tot} и химический состав такие же, как в M1. В M2 уменьшено количество ^{56}Ni по сравнению с M1 в 1.6 раза до $M(^{56}\text{Ni}) = 0.1M_{\odot}$. Это необходимо, чтобы компенсировать дополнительный нагрев от магнитара на стадии купола кривой блеска. Для параметров магнитара, выходящих в выражение (1), определены значения $E_m = 1.5 \times 10^{50}$ эрг, $t_m = 3 \times 10^7$ с. Сравнение наблюдаемых кривых блеска и модели с магнитарным подогревом M2 показано на рис. 10. Теоретический расчет показывает, что совместный нагрев оболочки от радиоактивного распада ^{56}Ni и магнитарная накачка позволяют воспроизвести наблюдаемые кривые блеска в течение $t \sim 170$ сут от начала взрыва сверхновой.

ВЫВОДЫ

Осуществлено исследование двух сверхновых, вспыхнувших в галактике NGC 4666 в 2014 и 2019 гг.: SN Ia ASASSN-14lp и SN Ib 2019uvr. Сверхновая ASASSN-14lp по фотометрическим характеристикам оказалась достаточно типичным представителем класса Ia с пониженной скоростью падения блеска после максимума. Нами определены основные параметры кривых блеска и поглощение света, получена оценка расстояния до NGC 4666 на основании зависимости светимости

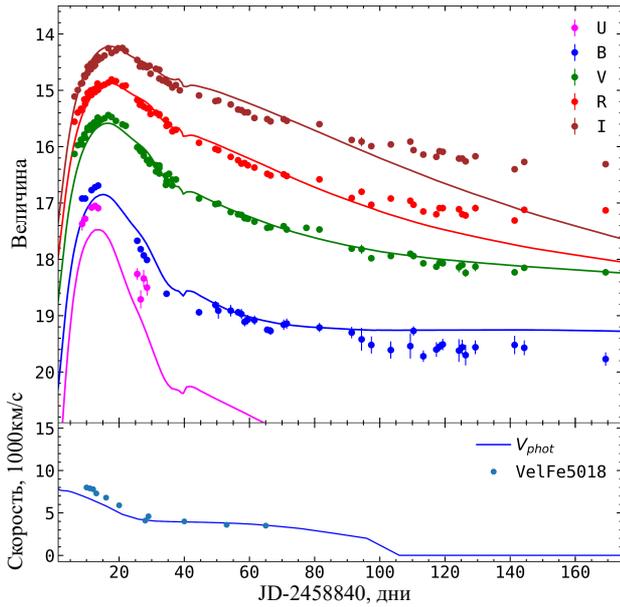


Рис. 10. Сравнение наблюдаемых кривых блеска и скоростей фотосферы с расчетами модели M2

от скорости падения блеска. Для SN 2019uyg нами получены фотометрические и спектроскопические наблюдения. Кривые блеска в первые 90 сут после максимума имеют характерную для SNe Ib форму, однако на поздних стадиях наблюдается уменьшение скорости падения блеска. Абсолютная величина в максимуме $M_B = -17^m.54$ близ-

ка к среднему значению для SNe Ib. Спектры SN 2019uyg были получены в четыре даты, соответствующие фазам от 9 до 54 суток после максимума. Спектры достаточно типичны для SNe Ib, основные линии поглощения принадлежат HeI, FeII, OI, NaI, TiI. Скорость расширения оболочки составила от 9000 до 6000 км/с. Осуществлено моделирование спектров с помощью программы SYN++, показавшее хорошее согласие с данными наблюдений. Проведено моделирование кривых блеска многогрупповым радиационно-гидродинамическим кодом STELLA, оптимальная модель имеет параметры $R_0 = 31R_\odot$, $M(^{56}\text{Ni}) \sim 0.16M_\odot$, $M_{\text{tot}} = 3.2M_\odot$, $E_{\text{burst}} = 0.8 \times 10^{51}$ эрг. Модель достаточно хорошо воспроизводит купол кривых блеска, однако согласие с наблюдениями нарушается на небулярной стадии эволюции SN 2019uyg. Нами рассчитана модель с дополнительным источником энергии в результате замедления вращения сформировавшегося после взрыва магнитара, которая хорошо согласуется с наблюдениями на интервале до ~ 170 сут после максимума.

Работа выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Работа П. Бакланова и М. Ушаковой по теоретическому моделированию кривых блеска SNe, Д. Цветкова по обработке и анализу данных наблюдений, В. Ечеистова по анализу и моделированию спектров поддержана грантом РНФ № 24-12-00141.

- [1] Holoien T.W.-S., Stanek K.Z., Kochanek C.S. et al. // Astron. Telegram. No.6795. (2014).
- [2] Thorstensen J., Alper E., Shappee B.J. et al. // Astron. Telegram. No.6801. (2014).
- [3] Shappee B.J., Piro A.L., Holoien T.W. et al. // *Astrophys. J.* **826**. 144. (2016).
- [4] Foley R.J., Pan Y.-C., Brown P. et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **461**. 1308. (2016).
- [5] Barna B., T. Pereira T., S. Taubenberger S. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **506**. 415. (2021).
- [6] Graur O., Zurek D.R., Cara M. et al.// *Astrophys. J.* **866**. 10. (2018).
- [7] Smith K.W., Srivastav S., McBrien O. et al.// Transient Name Server AstroNote. No. 2019-161. (2019).
- [8] Dimitriadis G. // Transient Name Server Classification Report. No. 2019-2736. (2019).
- [9] Kilpatrick C.D., Drouot M.R., Auchettl K. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **504**. 2073. (2021).
- [10] Ferrari L., Folatelli G., Kuncarayakti H. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **529**. L33. (2024).
- [11] Sun N.-C., Maund J.R., Crowther P.A. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **510**. 3701. (2022).
- [12] Николенко И.В., Крючков С.В., Барабанов С.И., Волков И.М.// *Научн. тр. Ин-та астроном. РАН.* **4**. 85. (2019).
- [13] Lipunov V., Kornilov V., Gorbousov E. et al.// *Advances in Astronomy*. Article id. 349171. (2010).
- [14] Бердников Л.Н., Белинский А.А., Шатский Н.И. и др. // *Астрон. Журн.* **97**. 284. (2020). (Berdnikov L.N., Belinskii A.A., Shatskii N.I. et al.// *Astron. Reports.* **64**. 310. (2020))
- [15] Kostov A., Bonev T. // *Bulgarian Astronomical Journal.* **28**. 3. (2018).
- [16] Jester S., Schneider D.P., Richards G.T. et al.// *Astron. J.* **130**. 873. (2005).
- [17] Потанин С.А., Горбунов И.А., Додин А.В. и др.// *Астрон. Журн.* **94**. 715. (2017). (Potanin S.A., Gorbunov I.A., Dodin A.V. et al.// *Astron. Rep.* **61**. 715. (2017).)
- [18] Потанин С.А., Белинский А.А., Додин А.В. и др.// *Письма в Астрон. Журн.* **46**. 894. (2020). (Potanin S.A., Belinski A.A., Dodin A.V. et al.// *Astron. Lett.* **46**. 836. (2020).)
- [19] Цветков Д.Ю., Павлюк Н.Н., Ечеистов В.А., Бакланов П.В.// *Астрофиз. Бюллетень.* **78**. 514. (2023). (Tsvetkov D.Yu., Pavlyuk N.N., Echeistov V.A., Baklanov P.V.// *Astrophys. Bull.* **78**. 541. (2023).)
- [20] Hamuy M., Phillips M.M., Suntzeff N.B. et al.// *Astron. J.* **112**. 2408. (1996).
- [21] Ganeshalingam M., Li W., Filippenko A. et al.// *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **190**. 418. (2010).
- [22] Stahl B.E., Zheng W., de Jaeger T. et al.// *Mon. Not.*

- Roy. Astron. Soc. **490**. 3882. (2019).
- [23] Prieto J.L., Rest A., Suntzeff N.B.// *Astrophys. J.* **647**. 501. (2006).
- [24] Karachentsev I.D., Nasonova O.G.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **429**. 2677. (2013).
- [25] Benetti S., Turatto M., Valenti S. et al. // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **411**. 2726. (2011).
- [26] Stritzinger M., Mazzali P., Phillips M.M. et al.// *Astrophys. J.* **696**. 713. (2009).
- [27] Valenti S., Fraser M., Benetti S. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **416**. 3138. (2011).
- [28] Pandey S.B., Kumar A., Kumar B. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **507**. 1229. (2021).
- [29] Kumar B., Singh A., Sahu D.K. et al.// *Astrophys. J.* **927**. eid 61. (2022).
- [30] Richardson D., Jenkins R.L., Wright J., Maddox L. // *Astron. J.* **147**. 118. (2014).
- [31] Poznanski D., Prochaska J.X., Bloom J.S. et al.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **426**. 1465. (2012).
- [32] Rodríguez O., Maoz D., Nakar E.// *Astrophys. J.* **955**. eid 71. (2023).
- [33] Thomas R.C., Nugent P.E., Meza J.C.// *Publ. Astron. Soc. Pacific.* **123**. 237. (2011).
- [34] Blinnikov S.I., Eastman R., Bartunov O.S. et al.// *Astrophys. J.* **496**. 454. (1998).
- [35] Blinnikov S.I., Lundqvist P., Bartunov O.S. et al.// *Astrophys. J.* **532**. 1132. (2000).
- [36] Blinnikov S.I., Ropke F.K., Sorokina E.I. et al.// *Astron. & Astrophys.* **453**. 229. (2006).
- [37] Бакланов П.В., Блинные С.И., Павлюк Н.Н.// Письма в Астрон. Журн. **31**. 483. (2005). (Baklanov P.V., Blinnikov S.I., Pavlyuk N.N. // *Astron. Lett.* **31**. 429. (2005).
- [38] Chugai N.N., Chevalier R.A.// *Astrophys. J.* **641**. 1051. (2006).
- [39] Barkov M.V., Komissarov S.S.// *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **415**. 944. (2011).
- [40] Mösta P., Ott C.D., Radice D. et al.// *Nature.* **528**. 376. (2015).
- [41] Kasen D., Bildsten L.// *Astrophys. J.* **717**. 245. (2010).
- [42] Inserra C., Smartt S.J., Jerkstrand A. et al.// *Astrophys. J.* **770** eid 128. (2013).
- [43] Moriya T.J., Metzger B.D., Blinnikov S.I. // *Astrophys. J.* **833**. eid 64. (2016).

Two Supernovae in NGC 4666: ASASSN-14lp and 2019yvr

D. Yu. Tsvetkov^{1,a}, N. N. Pavlyuk¹, N. P. Ikonnikova¹, M. A. Burlak¹, A. A. Belinskii¹,
A. V. Dodin¹, S. A. Potanin¹, N. I. Shatsky¹, I. M. Volkov¹, P. V. Baklanov^{1,2,3},
M. G. Ushakova^{1,2}, V. A. Echeistov¹, V. M. Lipunov¹

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

²National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow 123182, Russia

³Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow 119333, Russia

E-mail: ^atsvetkov@sai.msu.su

We present the results of photometric observations for two Supernovae in NGC 4666: SN Ia ASASSN-14lp and SN Ib 2019yvr, and also spectroscopic observations for SN 2019yvr. The light curves are constructed and their main parameters are derived. Supernova ASASSN-14lp is a typical object of class Ia with low rate of brightness decline and large interstellar extinction. An estimate of distance to the galaxy NGC 4666 is obtained using the dependence of maximum luminosity of SNe Ia on the parameters of the light curves. The spectra of SN 2019yvr near maximum light, the maximum luminosity and the shape of the light curves during first 90 days after maximum revealed characteristics of typical SN Ib, with interstellar extinction larger than for ASASSN-14lp. The decrease of the rate of brightness decline at phase about 90 days is found. We performed modeling of the light curves with STELLA code, the physical parameters of the optimal model are presented. The agreement of the model with observations breaks after ~40 days past maximum, the model with extra source of energy from magnetar rotation slowdown is proposed to account for this divergence.

PACS: 97.30.Qt.

Keywords: Supernovae: SN 2019yvr, ASASSN-14lp.

Received 19 November 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Цветков Дмитрий Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-83, e-mail: tsvetkov@sai.msu.su.
2. Павлюк Николай Николаевич — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-83, e-mail: pavlyuk1@gmail.com.
3. Иконникова Наталия Петровна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-26-57, e-mail: ikonnikova@gmail.com.
4. Бурлак Марина Андреевна — канд. физ.-мат. наук, науч. сотр.; тел.: (495) 939-26-57, e-mail: marina.burlak@gmail.com.
5. Белинский Александр Александрович — канд. физ.-мат. наук, зам. директора; тел.: (495) 939-16-52, e-mail: aleks@sai.msu.ru.

6. Додин Александр Владимирович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-16-63, e-mail: samsebedodin@gmail.com.
7. Потанин Сергей Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; e-mail: sr.potanin@gmail.com.
8. Шатский Николай Иванович — канд. физ.-мат. наук, зав.лабораторией; e-mail: kolja@sai.msu.ru.
9. Волков Игорь Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: hwp@yandex.ru.
10. Бакланов Пётр Валерьевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: petr.baklanov@itep.ru.
11. Ушакова Марина Геннадьевна — аспирант; e-mail: ushakova.mg17@physics.msu.ru.
12. Ечеистов Всеволод Алексеевич — вед. инженер; e-mail: echeistov.vsevolod@physics.msu.ru.
13. Липунов Владимир Михайлович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. лабораторией; тел.: (495) 939-50-63 e-mail: lipunov2007@gmail.com.