

## ВСПЫШКИ 2012 ГОДА СВЕРХНОВОЙ 2009ip: ОТ СЦЕНАРИЯ К МОДЕЛИ

© 2022 г. Н. Н. Чугай<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 03.08.2022 г.

После доработки 03.08.2022 г.; принята к публикации 03.08.2022 г.

Представлены сферическая и несферическая модели двух наблюдавшихся вспышек 2012 г. уникальной сверхновой 2009ip. Модели основаны на сценарии, в котором вспышка в августе 2012 г. порождается взрывным выбросом оболочки LBV-предсверхновой. Модель предсказывает существование ненаблюдавшейся вспышки, связанной с выходом ударной волны на поверхность LBV и последующим диффузионным высвечиванием сброшенной оболочки. Первая наблюдавшаяся вспышка в августе 2012 г. — результат свечения оболочки сверхновой, вызванного дополнительным выделением тепловой энергии центральным источником, а более мощная вспышка в конце сентября 2012 г. — результат ударного взаимодействия сверхновой с околозвездной оболочкой. Получены оценки массы сброшенной оболочки сверхновой и кинетической энергии в рамках сферической и несферической моделей.

*Ключевые слова:* звезды — эволюция, сверхновые, SN 2009ip.

DOI: 10.31857/S0320010822080022

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхновая SN 2009ip в галактике NGC7259 — это комплекс явлений, последовавший после обнаружения вспышки 28/08/2009 (Маза и др., 2009) с абсолютной величиной  $-14.5$  зв. вел. Предсверхновая найдена на архивном изображении галактики NGC7259, полученном телескопом им. Хаббла (в дальнейшем *HST*), с абсолютной величиной  $-9.5$  (Смит и др., 2010), и эти авторы сделали вывод, что предсверхновая была LBV-звездой с массой  $50-80 M_{\odot}$  (Смит и др., 2010). Через два года после обнаружения SN 2009ip испытала серию вспышек в интервале  $-10.5...-13.5$  зв. вел. на протяжении 160 дней (Пасторелло и др., 2013).

Ключевые события случились после 8 августа 2012 г., когда SN 2009ip вначале вспыхнула до  $-15$  зв. вел. (вспышка 2012a), а затем в конце сентября 2012 г. произошла основная мощная вспышка с максимумом  $-18$  зв. вел. (вспышка 2012b) (Пасторелло и др., 2013) с последующим монотонным падением светимости. В декабре 2021 г. в фильтре F606W *HST* абсолютная величина составила  $-8.5$  зв. вел., на одну звездную величину слабее по сравнению с  $-9.5$  в 1999 г. (Смит и др.,

2022), и авторы пришли к заключению, что LBV-звезда исчезла.

Начиная с момента обнаружения, в спектре присутствовали сильные водородные эмиссионные линии с полушириной  $800-1000 \text{ км с}^{-1}$  (Пасторелло и др., 2013; Маргутти и др., 2014), указывающие на мощную потерю массы. Первый спектр (09/08/2012) вспышки 2012a показал широкие водородные линии с профилями типа P Cyg и скоростями в крыльях до  $14000 \text{ км с}^{-1}$  (Пасторелло и др., 2013). Этот факт лег в основу сценария, в котором вспышка 2012a вызвана взрывом предсверхновой, а последующая более мощная оптическая вспышка 2012b обусловлена ударным взаимодействием сброшенной оболочки сверхновой с околозвездной оболочкой (Мауэрхан и др., 2013; Пасторелло и др., 2013). Альтернативная возможность предполагает два взрывных события, связанных, соответственно, со вспышками 2012a и 2012b и с ударным околозвездным взаимодействием после второго взрыва, который предположительно имел место 13/09/2012 (Маргутти и др., 2014). Детализация данного сценария ограничена аналитическими оценками. Для сценария взрыва сверхновой в начале августа 2012 г. также отсутствует моделирование кривой блеска, и, более того, нет оценок энергии взрыва и сброшенной массы

\*Электронный адрес: [nchugai@inasan.ru](mailto:nchugai@inasan.ru)

сверхновой. Между тем этот сценарий заслуживает серьезного внимания, поскольку он допускает лишь один взрыв.

Идентификация предсверхновой SN 2009ip с массивной звездой LBV-класса предполагает, что наблюдаемые в этом случае явления, вероятно, связаны с термоядерными вспышками в кислородном ядре, которые инициируются неустойчивостью из-за образования пар (Вусли, 2017; Смит и др., 2022). Сверхновые, порождаемые такими вспышками, сокращенно именуются PPISN (pulsational pair-instability supernovae). Вместе с тем следует подчеркнуть, что полного подобия между вспышкой 2012a, которая ассоциируется со вспышкой сверхновой, и моделями вспышек PPISN (Вусли, 2017) нет. Основное несоответствие состоит в том, что спектры SN 2009ip в период вспышки 2012a показывают высокие скорости, до 13 000–14 000 км с<sup>-1</sup>, в синем крыле абсорбции H $\alpha$  (Пасторелло и др., 2013), которые в 5–10 раз выше скорости сброшенной оболочки в моделях PPISN.

В предлагаемой работе исследуется сценарий одиночного взрыва LBV-звезды, связанного со вспышкой 2012a сверхновой SN 2009ip. Будет представлена модель, предполагающая взрывной выброс оболочки (вспышка 2012a) и последующее ее взаимодействие с околозвездной оболочкой (вспышка 2012b). Поскольку излучение SN 2009ip показывает значительную поляризацию (Мауэрхан и др., 2014), будут исследованы две модели, со сферическим и несферическим распределением околозвездного вещества.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОЙ БЛЕСКА

### 2.1. Предварительные соображения

Исходя из того, что вспышка 2012a обусловлена взрывным выбросом массы LBV-предсверхновой, мы примем начальный радиус равным  $70 R_{\odot}$  в соответствии с эволюционными моделями LBV-звезд с массой 80–90  $M_{\odot}$  (Вусли, 2017). При таком радиусе начальная вспышка, связанная с выходом ударной волны (назовем ее вспышкой 2012a0), может заметно превысить светимость вспышки 2012a. Поскольку к тому же кривая блеска начальной вспышки будет иметь довольно острый начальный пик, непохожий на кривую блеска вспышки 2012a, следует допустить, что начальная вспышка 2012a0 не наблюдалась и, следовательно, взрыв сверхновой произошел заметно раньше начала вспышки 2012a, но после вспышки 24/07/2012 со звездной величиной  $V \approx 17.4$  (Дрейк, 2012).

Наряду со взрывным выбросом оболочки сверхновой (вспышка 2012a), как увидим ниже, приходится допустить дополнительное продолжительное выделение тепловой энергии в оболочке  $\sim 2 \times 10^{48}$  эрг. Кривая блеска сверхновой рассчитывается в рамках аналитической модели диффузионного высвечивания гомологически расширяющейся оболочки с учетом адиабатического охлаждения и выделения дополнительной тепловой энергии (Арнетт, 1982). Последующее ударное взаимодействие оболочки сверхновой с околозвездным газом описывается численно в приближении тонкого слоя (Джулиани, 1982; Шевалье, 1982). Конкретная реализация модели взаимодействия и кривой блеска описана ранее (Чугай, 2001, 2021). По этой причине детальное описание модели опустим, но напомним, что торможение оболочки сверхновой в плотном околозвездном газе сопровождается формированием внешней (прямой) и обратной ударных волн с образованием холодной плотной оболочки (CDS = cold dense shell) между ними. CDS-оболочка может быть оптически толстой, и в этом случае мы увидим гладкий континуум без широких абсорбционных линий; такая картина имела место в SN 1998S в течение первого месяца (Чугай, 2001).

Мы рассмотрим сферический и несферический варианты распределения околозвездного газа. В пользу несферичности свидетельствует значительная поляризация излучения SN 2009ip (Мауэрхан и др., 2014), а также относительно малая величина фотометрического радиуса фотосферы на стадии вспышки 2012b по сравнению с радиусом CDS-оболочки (см. ниже). Несферическая модель будет рассчитана с использованием сферической модели, в которой светимость будет уменьшена на фактор несферичности, равный отношению видимых площадей несферичной фотосферы и площади поверхности сферической фотосферы  $\xi = A_{ns}/A_s < 1$ . В первом приближении это отношение равно отношению квадратов фотометрического радиуса фотосферы (Маргутти и др. 2014) и радиуса сферической модельной фотосферы. В действительности, однако, фотометрический радиус, определяемый на основе чернотельного приближения, меньше геометрического, поскольку выходящий поток из атмосферы с рассеянием и поглощением меньше чернотельного на фактор  $\sqrt{\epsilon}/(1 + \sqrt{\epsilon}) < 1$ , где  $\epsilon$  — вероятность гибели кванта на один акт экстинкции (Михалас, 1978). Подчеркнем, что в несферической модели оболочка сверхновой является сферической, а отклонение от сферичности предполагается только для околозвездной оболочки.

Предварительное моделирование вспышки 2012b показывает, что приемлемое описание крутого подъема светимости вспышки 2012b

**Таблица 1.** Параметры модели сверхновой и околозвездной оболочки

Модель	$E_{51}^a$	$M/M_{\odot}$	$t_{inj}$ (d)	$L_{0,40}^b$	$M_{cs}/M_{\odot}$	$r_{1,15}^c$	$r_{2,15}$
sm	0.34	0.2	24	90	1.3	8.4	13
nsm	2	0.8	22	110	3.2	8.8	13.4

**Примечание.** Единицы:  $a$   $10^{51}$  эрг;  $b$   $10^{40}$  эрг  $s^{-1}$ ;  $c$   $10^{15}$  см.

достигается при резком падении плотности в оболочке сверхновой во внешних слоях  $\rho \propto v^{-\omega}$  with  $\omega \geq 20$ . Распределение плотности внутри предполагается однородным. Околозвездная оболочка также должна иметь резкую внутреннюю границу для того, чтобы гарантировать быстрый начальный рост светимости. Зона внутри околозвездной оболочки предположительно образована ветром умеренной плотности с параметром плотности  $w = \dot{M}/u = 10^{14}$  г  $cm^{-1}$ , что соответствует темпу потери массы  $1.5 \times 10^{-4} M_{\odot}$ ,  $год^{-1}$  при скорости 1000 км  $s^{-1}$ . Околозвездная оболочка расширяется также со скоростью  $u = 1000$  км  $s^{-1}$ . При массе околозвездной оболочки  $\sim 1 M_{\odot}$  оптическая толщина околозвездной оболочки по томсоновскому рассеянию  $\tau < 1$ , что позволяет пренебречь эффектами диффузионной задержки излучения по сравнению со световым временем  $r/c$  и использовать приближение мгновенного выхода излучения. Моделирование показало, что эффект конечной скорости света также не влияет заметно на форму кривой блеска.

Значения параметров модели (кинетическая энергия, масса оболочки сверхновой, масса и радиус околозвездной оболочки) ограничиваются кривой блеска и максимальной скоростью расширения невозмущенной оболочки сверхновой, которая определена по лучевой скорости синего крыла абсорбционных компонентов  $H\alpha$ ,  $H\beta$  на стадии 2012a и линии He I 10830 Å на стадии 2012b.

## 2.2. Результаты моделирования

Для описания кривой блеска сверхновой (вспышка 2012a), как отмечалось, нужно допустить, помимо взрыва, еще и медленную накачку тепловой энергии в оболочку. Зависимость мощности источника от времени взята в виде

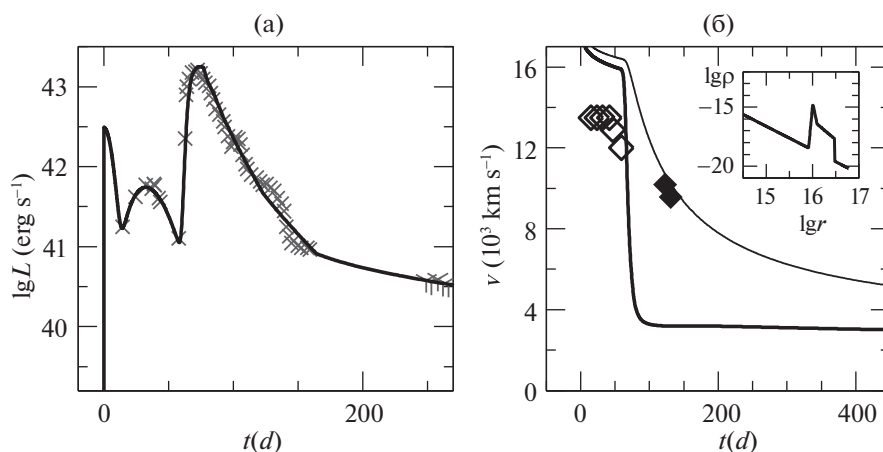
$$L = L_0(t/t_{inj})^p \exp[-(t/t_{inj})^2], \quad (1)$$

где показатель степени  $p$  заключен в пределах 1.5–2, а время  $t$  отсчитывается от принятого нами момента взрыва сверхновой JD 2456133.5 (25/07/2012).

В интервале около месяца после максимума вспышки 2012b CDS является оптически толстой, судя по гладкому континууму. Поскольку в

сферической модели масса и оптическая толщина CDS падают с уменьшением энергии, то должна быть минимальная величина энергии сферической модели; моделирование показало, что кинетическая энергия сверхновой в сферической модели не должна быть заметно ниже  $4 \times 10^{50}$  эрг. Для сферической модели sm (табл. 1) принята величина  $E = 3.4 \times 10^{50}$  эрг. В несферической модели (nsm) с параметром несферичности  $\xi = 0.05$  минимальная величина энергии оказывается значительно выше  $E = 2 \times 10^{51}$  эрг (табл. 1, рис. 1). Таблица 1 содержит энергию, массу сброшенной оболочки сверхновой, характерное время дополнительной инъекции тепловой энергии в оболочку, параметр мощности центрального источника, массу околозвездной оболочки ( $M_{cs}$ ), внутренний и внешний радиусы околозвездной оболочки.

Обе модели описывают болометрическую кривую блеска вспышки 2012a и 2012b и удовлетворительно согласуются с наблюдаемыми максимальными скоростями на стадии около 100 дней, когда CDS-оболочка уже прозрачна в континууме. Подчеркнем, что модельная скорость расширения невозмущенной оболочки может превышать максимальную измеренную по линиям поглощения, но не может быть меньше оценки скорости невозмущенной оболочки сверхновой. На очень поздней стадии (400 дней) в спектре, полученном на Кеск-2 (Грэхам и др., 2017), скорость излучающего газа, оцениваемая по крыльям эмиссионных линий  $H\beta$ , He I 7065 Å и Fe II 5018 Å, составляет 1500–2000 км  $s^{-1}$ , что заметно ниже скорости CDS и максимальной скорости невозмущенной оболочки сверхновой в сферической модели (рис. 1). В рамках сферической модели это означает, что вклад CDS и оболочки сверхновой в излучение указанных линий сравнительно мал, а доминирующим источником излучения линий могли бы быть плотные облака околозвездного газа, испытавшие ударное взаимодействие с оболочкой сверхновой, в соответствии с моделью промежуточной компоненты эмиссионных линий в SN 1988Z (Чугай, Данziger, 1994). В несферической модели, однако, скорость CDS на 400 день (1400 км  $s^{-1}$ ) близка к полуширине эмиссионных линий, а следовательно, в этом



**Рис. 1.** (а) — Болومترическая кривая блеска (толстая линия) в сферической модели (модель *sm*, табл. 1) в сравнении с наблюдательной кривой блеска (кресты — Маргутти и др., 2014, Y-символы — Грэхам и др., 2017). Первый ненаблюдавшийся максимум соответствует диффузионному высвечиванию сверхновой после выхода ударной волны, второй максимум соответствует вспышке 2012a и отражает свечение сверхновой, связанное с дополнительным выделением тепловой энергии центральным источником, третий максимум — результат ударного взаимодействия оболочки сверхновой с околозвездной оболочкой. (б) — Модельная скорость CDS-оболочки (толстая линия) и граничная скорость невозмущенной оболочки сверхновой (тонкая линия) в сравнении с максимальной скоростью в синем крыле абсорбции по линиям H $\alpha$  и H $\beta$  (незаполненные ромбы) и He I 10830 Å (заполненные ромбы). На вкладке показано распределение плотности в околозвездной оболочке.

случае CDS может быть источником эмиссионных линий.

Заметим, что кривая блеска вспышки 2012b обусловлена в основном светимостью обратной ударной волны. Это позволяет понять, почему в сферической модели требуется большая масса околозвездной оболочки по сравнению с оболочкой сверхновой (табл. 1). В самом деле, при небольшой массе оболочки сверхновой кинетическая светимость обратной ударной волны и радиационная эффективность малы из-за низкой плотности оболочки сверхновой. Компенсация светимости достигается в модели за счет более эффективного торможения сгребенной оболочки, и, следовательно, большей скорости обратной ударной волны из-за большей массы околозвездной оболочки.

Естественной реализацией несферической модели могло бы быть взаимодействие сферической оболочки сверхновой с околозвездной оболочкой, имеющей геометрию плотного экваториального диска (тора). Подобная структура околозвездной среды рассматривалась для объяснения сосуществования широких эмиссионных линий и линий с промежуточной шириной (*intermediate component*) в спектре сверхновой *In SN 1988Z* (Чугай, Данziger, 1994). Похожий сценарий привлекается для объяснения поляризации псевдоконтинуума *SN 2009ip*, предположительно возникающего в области ударного взаимодействия сверхновой с внутренней границей тороидальной околозвездной оболочки (Мауэрхан и др., 2014). В модели дисковой (тороидальной) околозвездной оболочки

параметр несферичности  $\xi = 0.05$  соответствует экваториальному поясу на сфере в интервале широт  $\pm 3^\circ$ , при угле наклона  $90^\circ$ . Выбранная величина  $\xi = 0.05$  приблизительно отражает соотношение между квадратами фотометрического радиуса фотосферы и радиуса околозвездной оболочки с учетом возможной поправки на отличие реального потока излучения от чернотельного.

При высоком контрасте плотности диска (тора) относительно разреженного набегающего потока оболочки сверхновой вещество околозвездного диска практически не ускоряется, и возникает картина, в которой область ударного взаимодействия на внутренней границе тора “проваливается” вглубь гомологически расширяющейся оболочки сверхновой. В рассматриваемой картине ударное взаимодействие сверхновой с внутренней границей тора может играть роль внутреннего источника энергии для излучения квазиконтинуума, на фоне которого будут формироваться абсорбционные компоненты широких линий в оболочке сверхновой. С другой стороны, присутствие абсорбционных линий в спектре является серьезной проблемой для сферической модели без внутреннего источника квазиконтинуума и это обстоятельство можно рассматривать как дополнительный аргумент в пользу несферической модели.

Интересно, что падение светимости вспышки 2012b после максимума хорошо описывается степенным законом  $L \propto t^{-6}$ , который вытекает из модели ударного взаимодействия гомологически расширяющейся однородной оболочкой сверхновой с

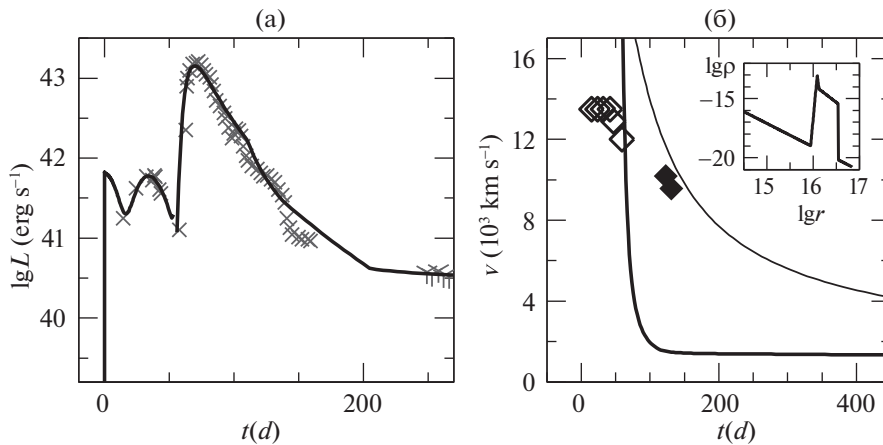


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но для несферической модели (модель psn, табл. 1).

неподвижной сферической стенкой радиуса  $R$ . В самом деле, скорость набегающего потока сверхновой на радиусе  $R$  уменьшается со временем как  $v \propto R/t$ , а плотность падает как  $\rho \propto t^{-3}$ . Следовательно, светимость обратной ударной волны  $L \propto R^2 \rho v^3 \propto t^{-6}$ . Эта простая модель может отражать ситуацию ударного взаимодействия с плотной тороидальной околозвездной оболочкой, которая слабо ускоряется разреженным потоком сверхновой.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы заключалась в моделировании двух вспышек сверхновой 2009ip в 2012 г. в рамках сценария взрывного выброса оболочки LBV-предсверхновой. В основе моделирования лежит предположение, по которому вспышка сверхновой соответствует слабой вспышке в августе 2012 г. (вспышка 2012a), тогда как мощная вспышка 2012b в конце сентября 2012 г. — результат ударного взаимодействия оболочки сверхновой с околозвездной оболочкой (Пасторелло и др., 2013; Мауэрхан, 2013). Модель предсказывает, что взрывной выброс оболочки LBV-предсверхновой неизбежно приводит к интенсивной, но ненаблюдавшейся, начальной вспышке 2012a0 со светимостью  $\sim 10^{42}$  эрг  $s^{-1}$  и длительностью около недели, которая предшествовала вспышке 2012a.

Кривые блеска обеих вспышек 2012a и 2012b и скоростей расширения оболочки сверхновой могут быть воспроизведены как в сферической модели, так и в модели с тороидальной (дисковой) околозвездной оболочкой. Однако, если в сферической модели достаточно энергии взрыва  $\sim 3 \times 10^{50}$  эрг, то в несферической модели требуется гораздо большая энергия взрыва,  $\sim 2 \times 10^{51}$  эрг, что может оказаться не вполне совместимым с моделями вспышек PPISN (Вусли, 2017). Таким образом,

с феноменологической точки зрения асферическая модель предпочтительна, хотя она ставит серьезную проблему для теории.

Подчеркнем две особенности представленных моделей. Во-первых, модельная кривая блеска сверхновой (вспышка 2012a, рис. 1 и 2) нуждается в дополнительной продолжительной инъекции тепловой энергии. Источником энергии предположительно служит продолжающаяся термоядерная вспышка. Во-вторых, взрывной выброс оболочки, связанный со вспышкой 2012a, сопровождается начальной вспышкой длительностью около недели сразу после выхода ударной волны (вспышка 2012a0). Существование этой вспышки в SN 2009ip около 25/07/2012 пока не исключается наблюдениями.

Начальная модельная вспышка 2012a0 по сути является родовым признаком сценария взрыва LBV-предсверхновой с радиусом  $\sim 70 R_{\odot}$  и может быть использована для тестирования этого сценария. В этой связи важно подчеркнуть, что при малом радиусе предсверхновой, например  $10 R_{\odot}$ , начальный пик светимости 2012a0 в модели оказывается довольно слабым, на уровне начальной светимости вспышки 2012a. Поскольку полной аналогии между SN 2009ip и моделями PPISN нет, возможность малого радиуса предсверхновой полностью исключить нельзя. Это замечание имеет непосредственное отношение к тесту сценария LBV-предсверхновой, основанному на присутствии/отсутствии начального пика 2012a0 в наблюдениях.

После завершения вспышки 2012a оставшаяся звезда с массой предсверхновой за вычетом  $\sim 4 M_{\odot}$  оболочки сверхновой и околозвездной оболочки через некоторое время, вероятно, испытала коллапс с образованием черной дыры, так как по данным фотометрии декабря 2021 г. LBV-предсверхновая исчезла (Смит и др., 2022).

Поскольку масса предсверхновой по данным *HST*-фотометрии 1999 г. составляла 50–80  $M_{\odot}$  (Смит и др., 2010), то масса черной дыры должна быть в том же интервале, 50–80  $M_{\odot}$ .

SN 2009ip уникальна лишь отчасти, благодаря длительному ряду наблюдательных данных. Что же касается явлению вспышки 2012a и основной вспышки 2012b, то сходное фотометрическое и спектральное поведение показывает сверхновая SN 2010mc (Офек и др., 2013; Смит и др., 2010). Впрочем, о полной аналогии говорить преждевременно, поскольку для SN 2010mc отсутствуют спектры на стадии, соответствующей вспышке 2012a SN 2009ip, по которым можно было бы сказать, что взрыв сверхновой SN 2010mc имел место задолго до основной вспышки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 19-12-00229 и РФФИ и Немецкого научно-исследовательского сообщества в рамках научного проекта 21-52-12032.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнетт (W.D. Arnett), *Astrophys. J.* **253**, 785 (1982).
2. Вусли (S.E. Woosley), *Astrophys. J.* **836**, 244 (2017).
3. Грэхэм и др. (M.L. Graham, A. Bigley, J.C. Mauerhan, I. Arcavi, D.A. Howell, S. Valenti, C. McCully, A.V. Filippenko, and G. Hosseinzadeh), *MNRAS* **469**, 1559 (2017).
4. Джулиани (J.L. Giuliani), *Astrophys. J.* **245**, 903 (1981).
5. Дрейк (A.J. Drake), *Astron. Telegram*. 4334 (2012).
6. Маза и др. (J. Maza, et al.), *Cent. Bur. Electron. Telegram*. 1928 (2009).
7. Маргутти и др. (R. Margutti, D. Milisavljevic, A.M. Soderberg, R. Chornock, B.A. Zauderer, K. Murase, C. Guidorzi, N.E. Sanders, et al.), *Astrophys. J.* **780**, 21 (2014).
8. Мауэрхан и др. (J. Mauerhan, G. Williams, N. Smith, P.S. Smith, A.V. Filippenko, J.L. Hoffman, P. Milne, D.C. Leonard, K.I. Clubb, O.D. Fox, and P.L. Kelly), *MNRAS* **442**, 1166 (2014).
9. Мауэрхан и др. (J. Mauerhan, N. Smith, A.V. Filippenko, et al.), *MNRAS* **430**, 1801 (2013).
10. Михалас (D. Mihalas), *Stellar atmospheres* (San Francisco: Freeman and Co., 1978).
11. Офек и др. (E.O. Ofek, M. Sullivan, S.B. Cenko, et al.), *Nature* **494**, 66 (2013).
12. Пасторелло и др. (A. Pastorello, E. Cappellaro, C. Inserra, et al.), *Astrophys. J.* **767**, 1 (2013).
13. Смит и др. (N. Smith, J. Andrews, A.V. Filippenko, et al.), *MNRAS* **515**, 715 (2022).
14. Смит и др. (N. Smith, J.C. Mauerhan, and J.L. Prieto), *MNRAS* **438**, 1191 (2014).
15. Смит и др. (N. Smith, A. Miller, W. Li, A.V. Filippenko et al.), *Astron. J.* **139**, 1452 (2010).
16. Чугай (N.N. Chugai), *MNRAS* **508**, 6023 (2021).
17. Чугай (N.N. Chugai), *MNRAS* **326**, 1448 (2001).
18. Чугай, Данцигер (N.N. Chugai and I.J. Danziger), *MNRAS* **268**, 173 (1994).
19. Шевалье (R.A. Chevalier), *Astrophys. J.* **259**, 302 (1982).