

КАССИОПЕЯ А: МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА И РАЗЛЕТА СВЕРХНОВОЙ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ НЕСИММЕТРИИ

Р. А. Яхин^{a}, В. Б. Розанов^a, Н. В. Змитренко^b, Р. В. Степанов^a*

*^a Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
119991, Москва, Россия*

*^b Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук
125047, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 14 февраля 2016 г.

Предложена модель взрыва и разлета остатков сверхновой звезды при наличии сильной начальной несимметрии (на момент взрыва) центральной части звезды (ядра), а также возможной мелкомасштабной несимметрии периферийных областей. Проведен анализ результатов наблюдения остатков сверхновой Кассиопея А обсерваториями Chandra и NuSTAR. На основании одномерного и двумерного численного моделирования, проведенного с использованием кодов DIANA и NUTSY, предложена модель взрыва и разлета остатков, которая объясняет наблюдаемые экспериментальные данные, когда на периферии облака остатков оказываются вещества, изначально расположенные в центральной области звезды.

DOI: 10.7868/S0044451016090066

1. ВВЕДЕНИЕ

Данная статья является продолжением работ [1, 2], где представлена модель процессов, которые могли бы привести к развитию крупномасштабной несимметрии, когда крупные скопления тяжелых элементов оказываются на краю облака остатков. Развитие модели неоднородного взрыва позволило предложить такую возможную структуру начальной несимметрии оболочек различных веществ перед взрывом, которая могла бы привести к экспериментально наблюдаемой картине разлета вещества, когда внутри большой области наблюдаются мелкомасштабные струйные узконаправленные структуры.

В рамках данной работы мы не рассматривали подробно возможные процессы, которые могли бы привести к возникновению несимметрии сверхновой в момент перед взрывом. Представлены такие возможные условия на момент начала разлета остатков сверхновой Кассиопеи А, которые приводят к наблюдаемому обсерваторией Chandra результату. Отметим, что для понимания природы явления крайне

необходимы аналогичные наблюдательные данные, полученные для других сверхновых.

Опубликованные результаты анализа измерений рентгеновского излучения облака остатков при взрыве сверхновой Кассиопея А [3–6] свидетельствуют о несимметричном характере разлета. На периферии облака наблюдаются значительные области веществ, предположительно изначально сформированные в центральных слоях звезды (Fe, Ti, Ca, S, Si). При этом их положение на момент наблюдения (порядка 300 лет с момента взрыва) оказывается различным. На рис. 1, построенном по данным работ [3, 5], приводятся результаты распределения интенсивности излучения, относящегося к Fe, S и Si. Следует обратить внимание на подобие и различие излучения различных элементов (см. рис. 1). Последние наблюдения, проведенные обсерваторией Chandra, показывают, что сгустки, образованные Fe, которое перед взрывом предположительно находилось ближе к центру сверхновой, чем Si, в облаке остатков оказываются расположенными дальше от центра звезды.

Нетривиальным результатом наблюдений рентгеновского телескопа NuSTAR явился тот факт, что помимо крупномасштабной несимметрии, в результате которой элементы из центральной области звезды оказались на периферии области разлета, в картине облака наблюдаются мелкомасштабные струк-

* E-mail: yakhin.rafael@gmail.com

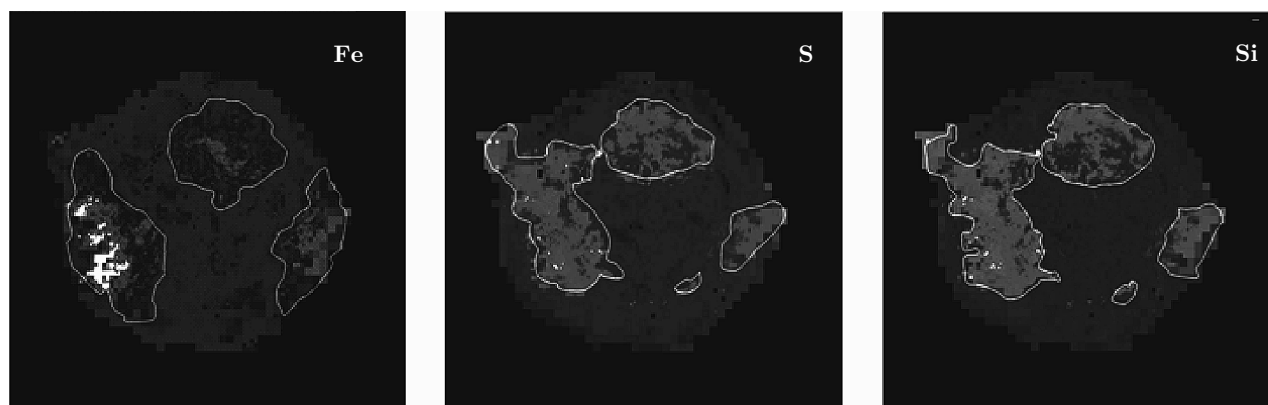


Рис. 1. Результаты распределения интенсивности излучения, относящегося к Fe, S и Si. Линией выделены области, в которых наблюдается соответствующее вещество

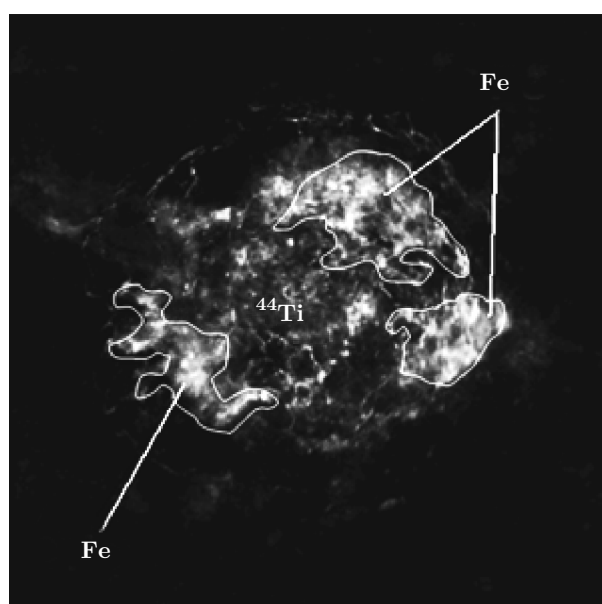


Рис. 2. Результаты распределения интенсивности излучения, относящегося к радиоактивному ^{44}Ti и стабильным изотопам Fe

туры, когда вещество (например, радиоактивный ^{44}Ti) разлетается в виде узконаправленных струй, которые расположены в центральной части облака остатков и не коррелируют с распределением рентгеновского излучения Fe (рис. 2). Такая корреляция, казалось бы, ожидаема — Fe и Ti относятся к элементам «железного пика», которые синтезируются в центре звезды [5]. Отметим, что наблюдаемый ^{44}Ti является радиоактивным элементом с периодом полураспада около 60 лет [7].

Вспышка сверхновой звезды является результатом эволюции ядра звезды, которая инициируется

нарушением гидростатического равновесия в звезде. Затем следует период интенсивных термоядерных реакций, который завершается гравитационным коллапсом ядра. Конечное состояние — разлет вещества звезды или гравитационный коллапс с образованием нейтронной звезды или черной дыры. Результаты последних наблюдений сверхновой Кассиопея А позволяют сформулировать вопросы, такие что ответ на них даст возможность уточнить характер и, возможно, происхождение несимметрии процессов при взрыве сверхновых.

2. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РАЗЛЕТ ПРИ ВЗРЫВЕ СВЕРХНОВОЙ. НИЗКОМОДОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Опираясь на результаты работ [1, 2], в которых проведен анализ процессов, связанных с разлетом остатков сверхновой Кассиопея А, предложено объяснение экспериментально наблюдаемому факту, когда тяжелые элементы из центральной области звезды Fe, Ca, S, Si оказываются на периферии облака остатков.

На основе данных, приведенных в работах [3–6], можно предположить распределение вещества в звезде непосредственно перед взрывом (см. таблицу). Возможно, что легкая оболочка из гелия He и водорода H или ее часть была потеряна в процессе эволюции до взрыва.

На рис. 3 по данным [4] представлена картина распределения вещества перед взрывом без учета возможной начальной несимметрии.

Таблица. Возможное распределение вещества в сверхновой Кассиопея А перед взрывом

Внешний радиус границы, км	1400	6000	$7 \cdot 10^5$	$2.1 \cdot 10^6$
Масса слоя, M_s (M_s — масса Солнца)	0.5–1.0	0.35–0.5	2–2.5	0.07–3
Преобладающее вещество слоя	Fe, Ti	Ca, S, Si	Ne, Mg, O	He, H
Плотность вещества в слое, г/см ³	$(1-2) \cdot 10^8$	$(0.8-1.2) \cdot 10^6$	3–3.5	$0.18-4 \cdot 10^{-3}$
Показатель адиабаты, γ	4/3	4/3	5/3	5/3

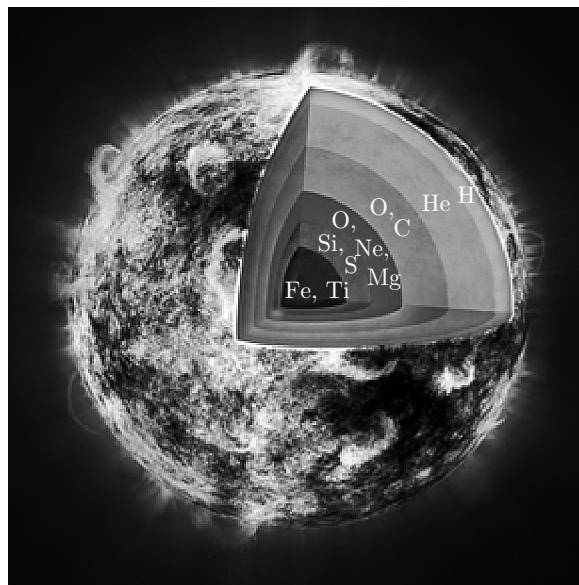


Рис. 3. Возможная картина распределения вещества перед взрывом без учета начальной несимметрии (по данным [4])

Проведена серия одномерных и двумерных расчетов, демонстрирующих развитие мелкомасштабных струйных течений вещества. Расчеты проводились по коду NUTCY [8], который позволяет рассчитывать цилиндрически-симметричные задачи в двумерной эйлеровой геометрии. В программе не учитывалась гравитация. Оценить влияние гравитации позволяет число Фруда $Fr = U_i^2/gR$. Оно характеризует отношение силы инерции к силе гравитации и демонстрирует роль гравитации, которая явно присутствует в астрофизических объектах. По данным работы [9] и таблицы для радиуса $R = 6000$ км ускорение силы гравитации составляет $g = 5 \cdot 10^3$ км/с². Далее, для $U = 2 \cdot 10^4$ км/с, $R = 10^4$ км и $g = 5 \cdot 10^3$ км/с² имеем $Fr = 8$. При разлете остатков сверхновой этот радиус за 1–2 с увеличивается в несколько раз (3–5), гравитационное ускорение уменьшается, число Фруда возрастает до

значений 10–20. Таким образом, даже для внутренних областей звезды гравитация является относительно малой добавкой к силам инерции, тем более это утверждение верно для внешних слоев сверхновой, расположенных на больших радиусах. Это позволяет (с определенными ограничениями) моделировать процессы после взрыва сверхновых звезд, не учитывая собственную гравитацию объекта [1].

На рис. 4 приведены результаты расчета, демонстрирующие случай симметричного разлета остатков сверхновой звезды. Симметричный расчет необходим для сравнения с результатами двумерного расчета, в котором включены условия, приводящие к несимметрии. Отметим, что выбор тех или иных начальных условий в силу недостаточности наблюдательных данных достаточно произволен. При моделировании использовались начальные условия (перед взрывом), представленные в таблице: в центре звезды расположено ядро плотностью $\rho = 10^8$ г/см³ и радиусом $R = 1400$ км, состоящее из элементов «железного пика», оно окружено слоем вещества, состоящего из Ca, S и Si, плотностью $\rho = 10^6$ г/см³ и радиусом $R = 6000$ км, далее следует сравнительно малоплотный слой ($\rho = 3$ г/см³), содержащий Ne, Mg и O, он занимает область от 6000 км до $7 \cdot 10^5$ км. В момент времени $t = 0$ в ядре ($R \leq 1400$ км) выделялась энергия $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг (энергию нейтринного излучения не учитываем, считая, что к моменту взрыва она уже выделилась), в остальных слоях распределение давления p (и соответствующей ему температуры T) определялось, исходя из условия, что $p = c\rho^\gamma$, c — константа, γ — показатель адиабаты. Отметим, что значение кинетической энергии взрыва несколько различается для нескольких источников и лежит в диапазоне от 10^{51} эрг до 10^{52} эрг [3–6].

Цель данной работы — подобрать такие начальные распределения оболочек разноплотных веществ, которые могли бы привести к экспериментально наблюдаемой картине. Напомним, что в ра-

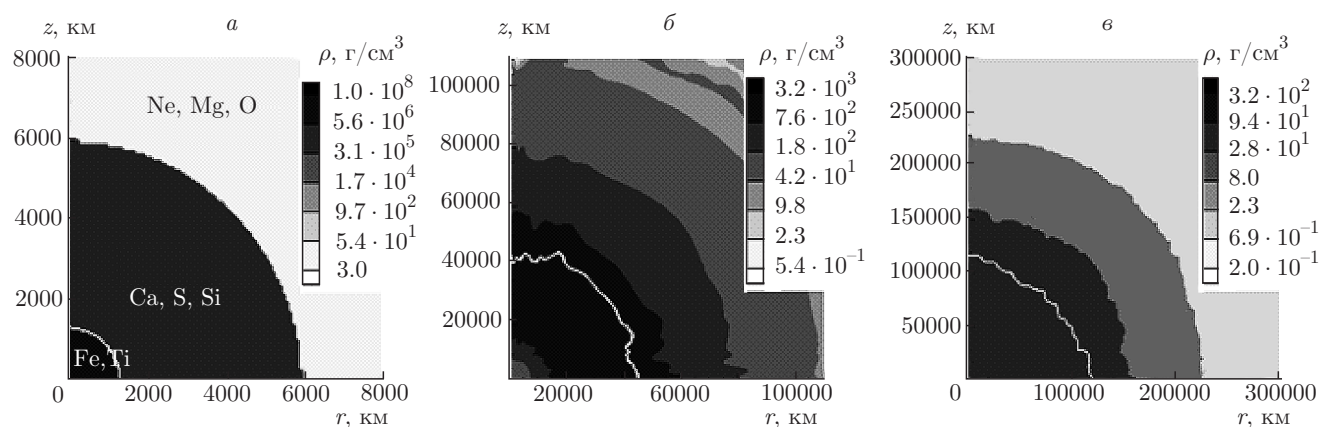


Рис. 4. Двумерная картина симметричного разлета сверхновой звезды; представлены моменты времени 0 (а), 5 (б), 10 (в) с — эволюция поля плотности. Сплошной белой линией выделена внешняя граница тяжелого вещества (Fe, Ti) центральной области на уровне концентрации $C = 0.95$

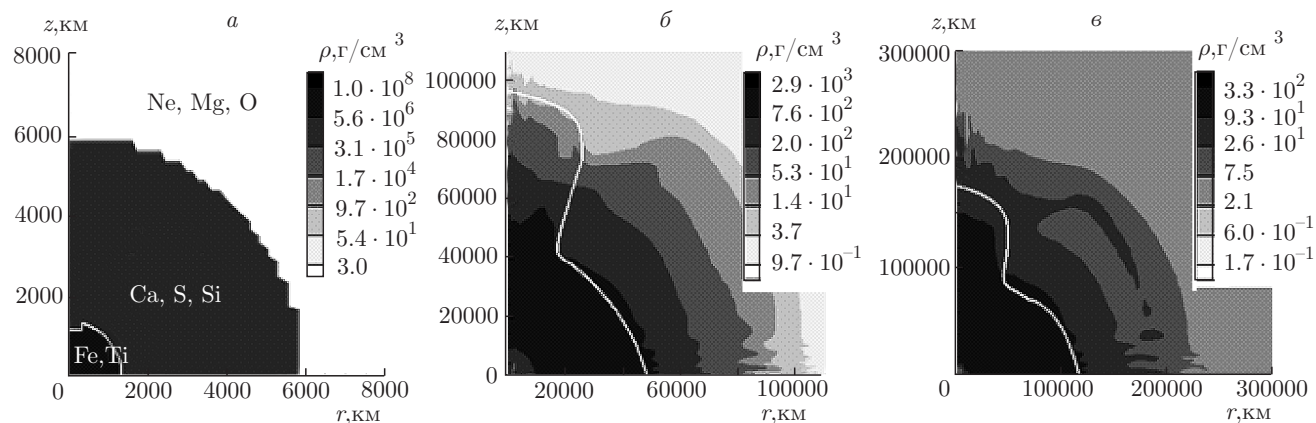


Рис. 5. Двумерная картина несимметричного разлета сверхновой звезды; представлены моменты времени 0 (а), 5 (б), 10 (в) с — эволюция поля плотности. Сплошной белой линией выделена внешняя граница вещества (Fe, Ti) центральной области ($C = 0.95$): а) $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг, $M = 5.85 M_s$, $\Delta R = 200$ км

ботах [1,2] были представлены результаты численного моделирования взрыва и разлета остатков сверхновой звезды, по своим параметрам (плотность, давление, пространственные масштабы) близкой к сверхновой Кассиопея А при несимметричных начальных условиях. На рис. 5 приведены результаты численного расчета разлета сверхновой звезды при несимметричных начальных условиях, задаваемых в виде возмущения на контактной границе тяжелого ядра (элементы «железного пика») и слоя, содержащего Ca, S и Si. Угловой размер возмущенной области равен 20° , энергия взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг, амплитуда возмущения на границе составила 200 км. Отметим, что в расчетах рассматривались различные варианты возмущений по амплитуде, форме и

размеру области. Здесь приведен один из вариантов, который хорошо иллюстрирует образование быстро летящих структур.

Развитая на момент взрыва низкомодовая несимметрия центральных слоев звезды может привести к наблюдаемой в расчетах ситуации, при которой скорость разлета в одном и том же веществе (на рис. 5 в центральном ядре) в секторе с меньшим радиусом ($R_{Fe} = 1200$ км) оказывается существенно выше ($V_{Fe} \approx 17000$ км/с), чем в том же веществе с радиусом $R_{Fe} = 1400$ км ($V_{Fe} \approx 10000$ км/с в момент времени $t = 10$ с). В результате тяжелое вещество (Fe или Ti) проникает сквозь более легкие внешние слои. Искривление границы Ca, S, Si также приводит к ситуации, когда более тонкие слои веще-

ства приобретают скорость, большую по сравнению с другими участками, и начинают проникать сквозь более легкие внешние слои.

В ряде работ [3, 10] для случая сверхновой Кассиопея А отмечается возможность в процессе эволюции потери части внешних оболочек из He и H (от $(15-25)M_s$ до порядка $4M_s$, где M_s — масса Солнца), вероятно, из-за наличия второго компаньона у сверхновой. Это не влияет на вероятность сохранения высоких скоростей разлета внутренних слоев сверхновой по отношению к внешним при наличии несимметрии указанного типа.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОГО ^{44}Ti

Наблюдения облака остатков сверхновой звезды Кассиопея А позволили обнаружить несколько интересных и нетривиальных результатов [4]. Было найдено, что, вопреки ожиданиям, распределение радиоактивного ^{44}Ti , присутствующего в облаке остатков, не коррелирует с распределением стабильного Fe, хотя принято считать, что оба эти элемента синтезируются в «железном пике» [3], который наблюдается в ядрах сверхновых перед гравитационным коллапсом (рис. 3).

В отличие от Fe, Ca, S, Si, радиоактивный ^{44}Ti распределен относительно равномерно по диску, соответствующему облаку остатков, включая области пятен, соответствующих Fe, Ca, S, Si. Размер областей, в которых наблюдается излучение ^{44}Ti при энергии квантов 68 кэВ и 78 кэВ, составляет примерно 1/5–1/10 от размера пятен (рис. 2).

Еще одно интересное наблюдение состоит в том, что рентгеновское излучение различных элементов реализуется в виде излучения узких струй, поперечный размер которых составляет несколько угловых секунд [11].

Таким образом, результаты наблюдений сверхновой Кассиопея А, не имеющие до сих пор адекватного объяснения, можно суммировать следующим образом.

1. Наблюдается выброс элементов ядра сверхновой — Fe, S, Si на периферию облака остатков в виде трех пятен, не соответствующих, однако, существенно несимметричному взрыву возможного вращающегося предшественника сверхновой. Площадь пятен составляет около 5 % от площади облака остатков ([4], см. рис. 1).

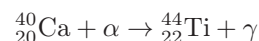
2. Рентгеновское излучение «больших» пятен (рис. 1) состоит из излучения многочисленных уз-

ких струй. Таким образом, если причиной наблюдаемой несимметрии является несимметрия взрыва или/и несимметрия распределения вещества перед взрывом, то мы наблюдаем комбинацию низкомодовых и высокомодовых процессов.

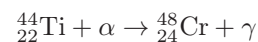
3. Распределение радиоактивного ^{44}Ti не коррелирует ни с распределением «предшественников» титана по заряду ядер элементов ^{14}Si , ^{16}S , ^{20}Ca , ни с последующим элементом ^{26}Fe .

Ранее мы показали, что низкомодовая несимметрия распределения элементов по облаку остатков может быть связана с несимметрией распределения вещества вблизи границы плотного ядра сверхновой перед взрывом. Образование узких струй можно объяснить наличием возмущений вещества периферийных оболочек. Далее мы приведем результаты расчетов, иллюстрирующих этот эффект.

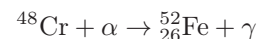
Для объяснения отсутствия корреляции распределений титана ^{44}Ti и Fe следует учесть следующие факторы. Схема образования титана ^{44}Ti в реакции



исследована в работе [12]. Изотоп $^{40}_{20}\text{Ca}$ является стабильным и в сверхновой может образоваться в предшествующей взрыву эволюции в оболочках, окружающих ядро. При этом при взрыве условий для протекания реакций типа (α, γ) с образованием стабильных изотопов ^{54}Fe и ^{56}Fe недостаточно, с учетом того, что эти реакции проходят через радиоактивные ядра с малым временем полураспада:



(для хрома $^{48}_{24}\text{Cr}$ период полураспада составляет 23 ч),



(для $^{52}_{26}\text{Fe}$ период полураспада приблизительно 8 ч). Для образования стабильного изотопа ^{56}Fe необходимо участие по меньшей мере четырех реакций типа (n, γ) . Поэтому в зонах образования радиоактивного ^{44}Ti образование изотопов Fe маловероятно. Радиоактивный $^{44}_{22}\text{Ti}$ распадается по схеме $^{44}_{22}\text{Ti} \rightarrow ^{44}_{21}\text{Sc} \rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca}$ с периодом полураспада 60 лет [7].

С учетом изложенного выше можно предложить для рассмотрения два сценария образования $^{44}_{22}\text{Ti}$ при взрыве сверхновой. Первый сценарий: оболочка, содержащая $^{40}_{20}\text{Ca}$ до начала разлета, попадает в периферийную зону нуклеосинтеза, в ней происходят реакции с образованием $^{44}_{22}\text{Ti}$ ($^{40}_{20}\text{Ca} + \alpha \rightarrow ^{44}_{22}\text{Ti} + \gamma$). Однако ее размеры существенно больше размеров ядра (см. таблицу) и ее разлет не реплицирует разлет «железного» ядра и не воспроизводит низко-

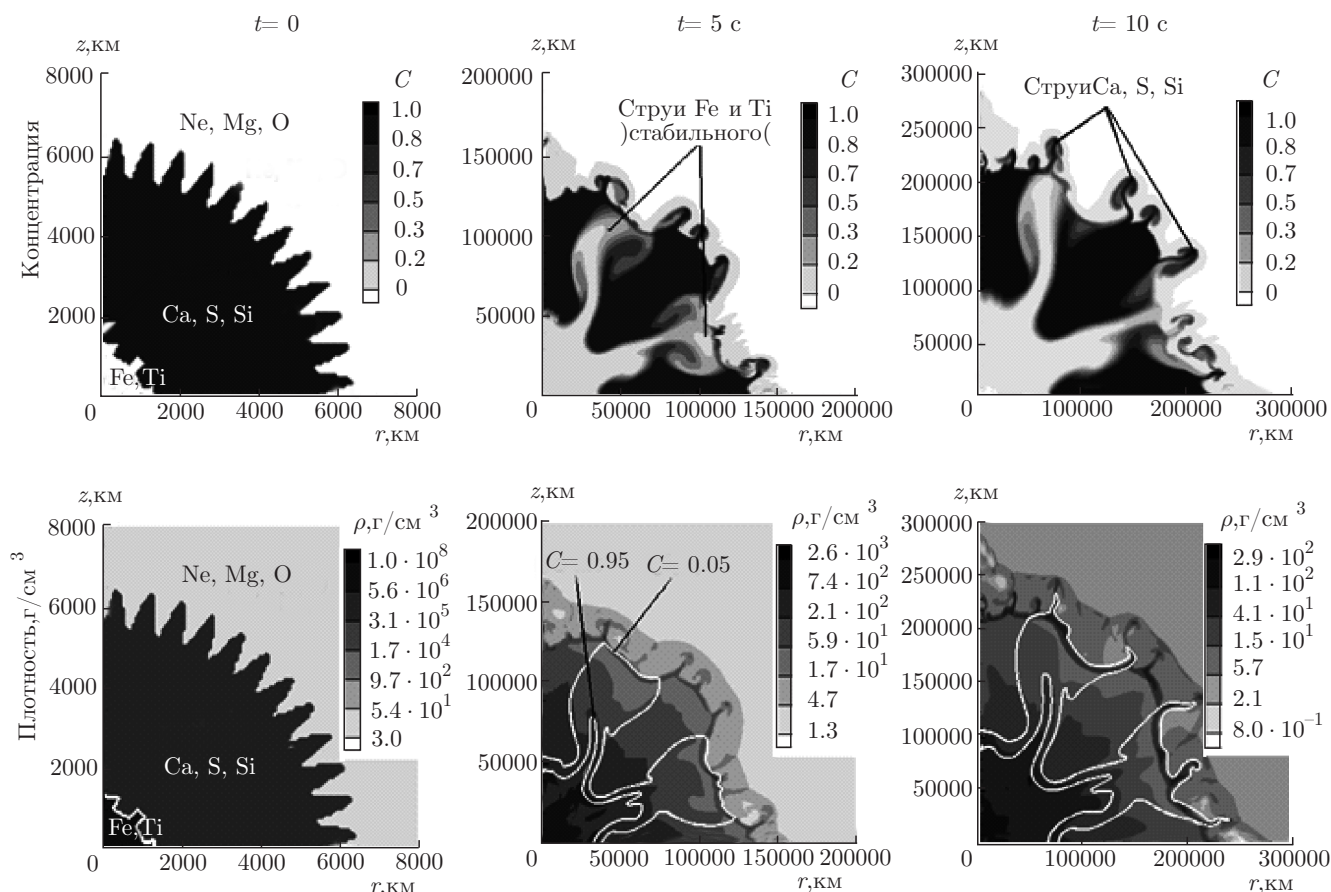


Рис. 6. Двумерная картина несимметричного разлета сверхновой звезды: поле концентрации и плотности (концентрация $C = 1$ соответствует ячейке, в которой находятся Ca, S и Si; в ячейках с другими элементами $C = 0$; представлены моменты времени 0, 5 с и 10 с). Сплошными белыми линиями на картине распределения плотности приведена внешняя граница вещества из центральной области (Fe и Ti) на уровне концентраций 0.05 и 0.95. Энергия взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг

модовое распределение в виде пятен. Второй сценарий: независимо от попадания или непадания оболочки, содержащей ^{40}Ca , в зону нуклеосинтеза, ядра/ионы ^{40}Ca при разлете летят со скоростью оболочки 5000–15000 км/с и имеют энергию 5–45 МэВ. Эта энергия соответствует энергии ядер He в системе центра масс 0.84–7.5 МэВ, что в точности соответствует условиям измерения скорости реакций $^{40}\text{Ca} + \alpha \rightarrow ^{44}\text{Ti} + \gamma$ [12]. Ti может образовываться при столкновении разлетающейся оболочки, содержащей Ca, с периферийной оболочкой, содержащей He. Его распределение в облаке остатков определяется движением всей оболочки (а не отдельных пятен) и в большей степени отражает высокоимпульсный характер возмущений.

Заметим, что излучающие ядра в облаке остатков разлетаются от центра со скоростью порядка 10000 км/с и их излучение всегда будет регистри-

роваться наблюдателем как излучение струй, движущихся ему навстречу. Это замечание относится также и к Ti.

4. НЕСИММЕТРИЧНЫЙ РАЗЛЕТ ПРИ ВЗРЫВЕ СВЕРХНОВОЙ. ВЫСОКОМОДОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Мы уже говорили, что начальная крупномасштабная несимметрия в центральной области вещества (граница Fe–Si) приводит к ситуации, когда образуются отдельные слои тяжелого ядра (Fe или Ti), которые начинают двигаться значительно быстрее (в сравнении с симметричным разлетом) и проникают в более удаленные от центра области легких элементов. Если допустить, что в результате движения, близкого к баллистическому, на пути такого слоя встречается некоторая неоднородность, то

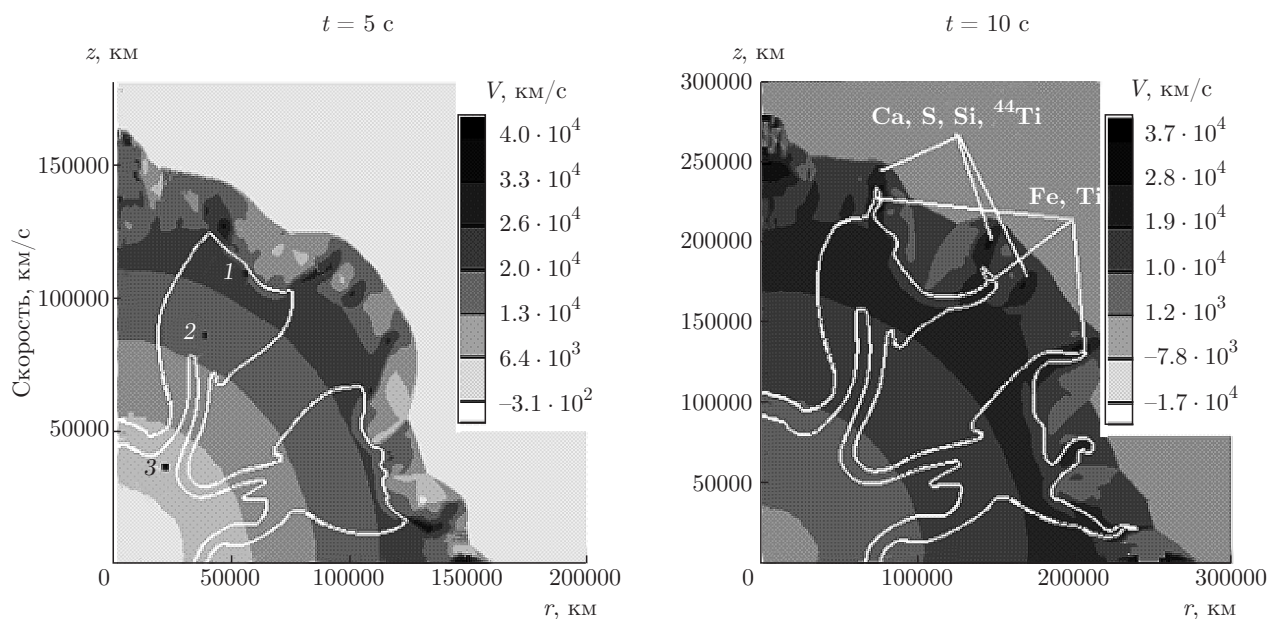


Рис. 7. Двумерная картина несимметричного разлета сверхновой звезды: поле скорости; представлены моменты времени 5 с и 10 с (скорость в начальный момент равна нулю). Сплошными белыми линиями приведена внешняя граница вещества из центральной области (Fe и Ti) на уровне концентраций 0.05 и 0.95. Энергия взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг

может сложиться ситуация, когда единая область тяжелого вещества распадается на много отдельно летящих мелкомасштабных струй.

В рамках данной работы в существующую модель несимметричного взрыва и разлета центральной области звезды с целью определения возможной природы возникновения в облаке остатков мелкомасштабных струй наряду с крупномасштабной несимметрией в начальное распределение вещества добавлены мелкомасштабные возмущения, имеющие место на различных границах оболочек.

На рис. 6 для энергии взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг приведен вариант расчета (поля концентрации и плотности вещества), в котором в начальный момент ($t = 0$) помимо крупномасштабной несимметрии центральной области (Fe, Ti), заданной в форме «шестеренки» с внешним радиусом $R = 1400$ км и амплитудой $\Delta R = 300$ км (высота «шестеренки»), на границе «Ca, S, Si–Ne, Mg, O» ($R = 6000$ км) задавалось мелкомасштабное высокочастотное возмущение ($n = 48$, где n определяет количество длин волн возмущений на всей окружности) с амплитудой $\Delta R = 500$ км. Размер возмущений выбирался, исходя из условия

$$k\Delta R = \frac{2\pi\Delta R}{\lambda} = \frac{n\Delta R}{R} = 1-4,$$

где k — волновое число, ΔR — амплитуда возмущения, λ соответствует поперечному размеру возмущения [13, 14]. Согласно эволюционной модели развития неустойчивостей [13, 14], при $k\Delta R < 1$ возмущения развиты слабо; при $k\Delta R > 4$ размер возмущения практически не возрастает из-за образования грибообразных структур. Помимо этого, в связи с ограничением на минимальный размер ячейки счетной области для проведения расчетов удобнее выбрать большую амплитуду.

Из рис. 6 видно, что вследствие начальной несимметрии формы поверхности границы оболочек крупномасштабные струи вещества из центрального «железного» ядра начинают проникать в соседнюю область и достигают внешней границы слоя, содержащего Ca, S, Si (к моменту времени приблизительно 5 с). Далее, достигнув границы, некоторые из «кусков» ядра, сохранившие максимальную скорость, оказываются в области, содержащей Ne, Mg, O и углубляются в нее. В слое, изначально содержащем Ca, S, Si, в свою очередь, вследствие мелкомасштабного возмущения внешней границы, наблюдаются отдельные узконаправленные струи вещества, имеющие большую, чем соседние области, плотность (в 2–5 раз).

Скорость внешней границы невозмущенного ядра на момент взрыва составляет около

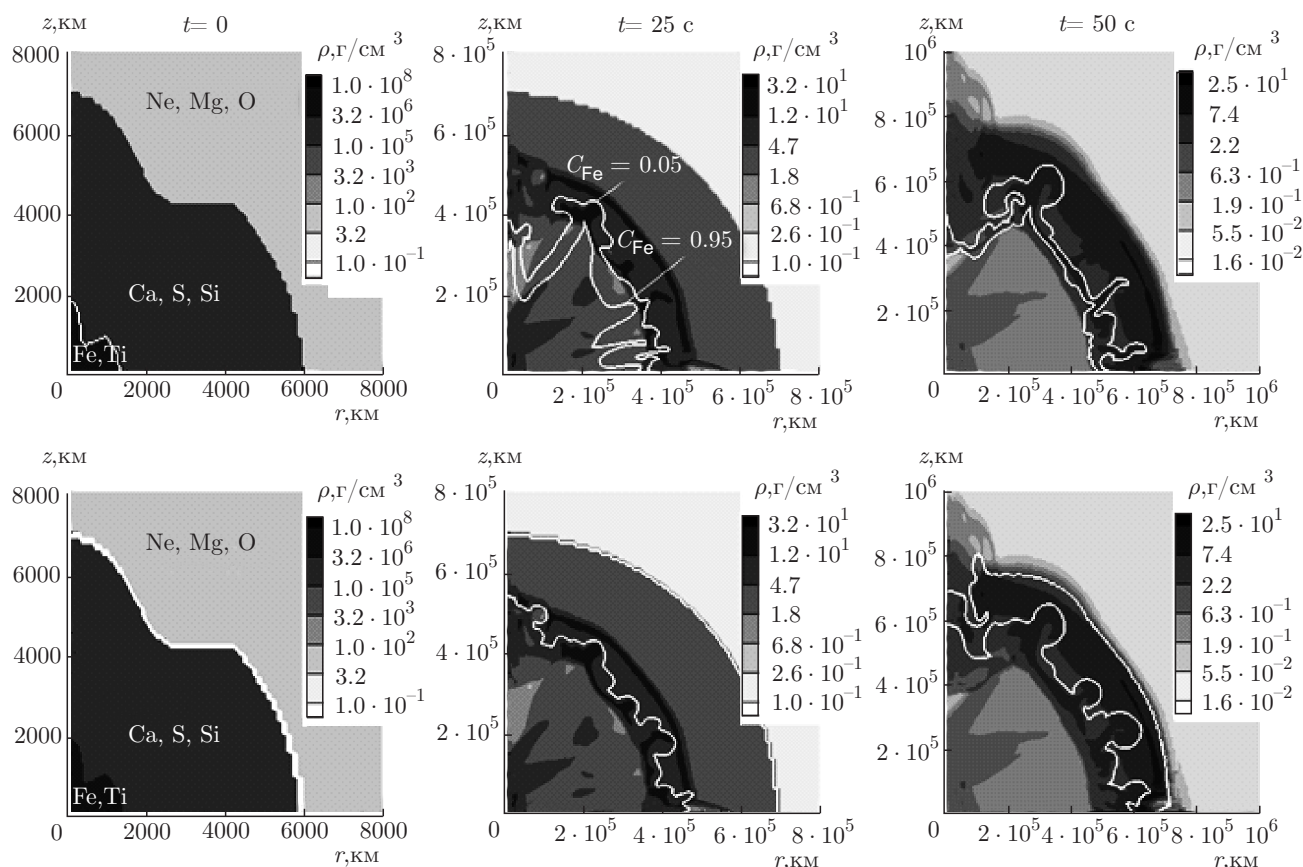


Рис. 8. Двумерная картина несимметричного разлета сверхновой звезды: поле плотности; представлены моменты времени 0, 25 с и 50 с. Дополнительно сплошными линиями на верхних рисунках распределения поля плотности приведены границы концентрации элементов центрального ядра Fe, Ti на уровне концентраций 0.05 и 0.95; на нижних — внутренняя и внешняя границы концентрации Ne, Mg, O на уровне 0.95. Энергия взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг

7000–8000 км/с, а скорость струй — 7000–25000 км/с (ближе к внешней границе скорость увеличивается). Со временем значения скоростей остаются практически неизменными. Тем не менее, наблюдаются участки вещества (см. рис. 7, $t = 10$ с), движущиеся значительно быстрее соседних областей (в 1.5–2 раза). Это замечание относится как к элементам ядра, так и к слою Ca, S, Si.

Отметим значения скоростей движения вещества из центральной области в различных зонах разлетающейся звезды. Точка 1 на рис. 7 находится на внешней границе области Fe и Ti (стабильного) и в момент времени $t = 5$ с ее скорость равна 24600 км/с; в точке 2 скорость равна 17600 км/с, что соответствует промежуточному значению внутри струйного выброса; скорость разлета в точке 3 равна 7900 км/с, что соответствует скорости разлета внешней границы невозмущенной области центрального ядра.

Газодинамические вопросы достаточно сложных течений, представленных на рис. 6 и 7, в принципе, можно моделировать в экспериментах с лазерным импульсом (масштаба килоджоуля и выше) и мишенью, форма которой может имитировать несимметрию сверхновой. Эти вопросы обсуждались в ряде работ [2, 15, 16].

В данной работе мы не предполагали обсуждать возможные причины возникновения несимметрии. Для постановки и обсуждения такой задачи было бы крайне полезно иметь аналогичные результаты по характеристикам излучения облака остатков для других сверхновых. Однако, одну возможность мы укажем. Допуская существование в случае сверхновой Кассиопея А бинарного компаньона, мы предполагаем длительное существование бинарной системы. Возможная потеря оболочки из гелия Ne является доводом «за» существование бинарного компаньона. При определенных расстоянии (достаточно

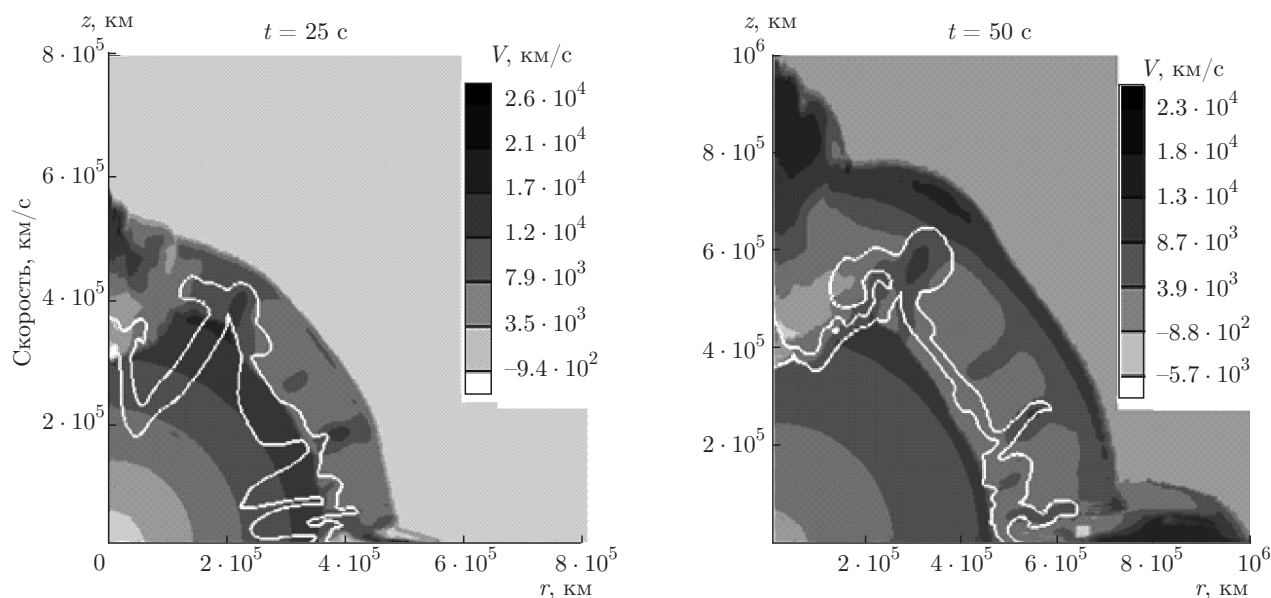


Рис. 9. Двумерная картина несимметричного разлета сверхновой звезды: поле скорости; представлены моменты времени 25 с и 50 с (скорость в начальный момент равна нулю). Сплошными белыми линиями на картине распределения скорости приведена внешняя граница вещества из центральной области Fe и Ti (на уровне концентраций 0.05 и 0.95). Энергия взрыва $E = 1.7 \cdot 10^{51}$ эрг

стабильном) между компаньонами и массах в бинарной системе возникнут приливные волновые процессы, которые могут привести к заметным отклонениям от сферической симметрии оболочек звезд.

Следует отметить возможность участия в приливных процессах сгустков темной материи — гравитационно-связанных структур, имеющих массы порядка масс звезд. Характеристики таких мелко-масштабных объектов обсуждаются в работе [17] во многом с позиций влияния неоднородного гравитационного поля на эволюцию сгустков (см. также [18]). Однако интересным является исследование влияния сгустков темной материи на процессы в барионных структурах. Так, например, в работах [19, 20] рассматривается возможность для сгустка темной материи способствовать инициированию взрыва «белого карлика», приводящего к образованию сверхновой.

На рис. 8 и 9 представлены результаты модельного расчета, демонстрирующего разлет остатков сверхновой в случае начальной несимметрии, связанной с наличием гравитационных сил второго компаньона. Целью являлось продемонстрировать качественную иллюстрацию возможного эффекта. Форма и размер начальной несимметрии выбирались достаточно произвольно: амплитуда возмущения центральной области (Fe, Ti с радиусом $R =$

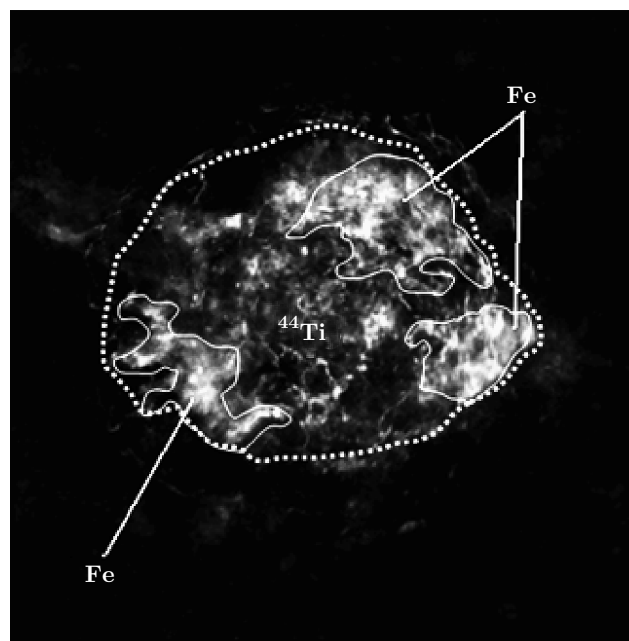


Рис. 10. Результаты распределения интенсивности излучения, относящегося к радиоактивному ^{44}Ti и Fe. Пунктирной линией показана возможная кольцевая полоса, образованная элементами ядра из центра звезды

$= 1400$ км) составила $\Delta R = 500$ км, а границы «Ca, S, Si–Ne, Mg, O» ($R = 6000$ км) — $\Delta R = 1000$ км.

Завершая обсуждение результатов моделирования, отметим, что «пятна» тяжелых элементов из центра звезды расположены так, что они могли бы образовать кольцевую полосу, показанную на рис. 10. Предположим, что кольцевая структура существует, но (по неизвестным нам причинам или из-за дополнительной несимметрии) не во всех ее частях осуществляется выброс элементов из центра. Тогда «кольцевая структура» является сильным аргументом «за» приливные волновые процессы как возможный источник несимметрии взрыва и разлета сверхновой. Кроме того, структура «пятен» в облаке остатков (подобная той, что наблюдается в сверхновой Кассиопея А) может содержать информацию об объекте (или объектах), способствующем развитию процессов.

В связи с обзором [17] представляет интерес оценка возможного вклада темной материи в распределение гравитирующего вещества в окрестности сверхновой, генерирующего приливные волны. Еще раз отметим, что для выяснения характера, причин и влияния отклонений от симметрии при взрыве сверхновой необходимой и полезной представляется информация и статистика по характеристикам излучения облака остатков различных сверхновых.

5. ВЫВОДЫ

1. Применительно к результатам по распределению излучения различных элементов в облаке остатков, опубликованных в последние годы для сверхновой Кассиопея А [1, 3–6], мы рассмотрели возможность интерпретации этих результатов на основе сочетания низкомодовых и высокомодовых возмущений в распределении вещества оболочек сверхновой перед взрывом.

2. Расчеты, моделирующие реальные процессы, проводились по коду NUTCY, который позволяет рассчитывать цилиндрически-симметричные задачи в двумерной эйлеровой геометрии.

3. Показано, что при определенном, физически оправданном выборе начальных возмущений удастся воспроизвести наблюдаемые распределения элементов в облаке остатков: крупномасштабные области веществ, предположительно расположенные в центральной части звезды перед взрывом, а также отдельные узконаправленные структуры.

Отметим, что выброс вещества из центра на периферию возможно моделировать в экспериментах при доступной энергии лазерного импульса (не менее сотен джоулей) при облучении мишени, имитирующей отклонения от симметрии сверхновой.

Можно предположить, что одной из причин несимметричного характера развития процессов при взрыве сверхновых являются приливные волны, отражающие распределение гравитирующей материи в окрестности сверхновой.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-02-270 и № 14-01-00828, гранта Президента РФ № МК-922.2014.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Змитренко, В. Б. Розанов, Р. В. Степанов и др., ЖЭТФ **145**, 3 (2014).
2. N. V. Zmitrenko, P. A. Kuchugov, V. B. Rozanov et al., J. Rus. Laser Res. **35**, 4 (2014).
3. T. Delaney et al., *Astrophys. J.* **725**, 2038 (2010).
4. U. Hwang and J. M. Laming, *Astrophys. J.* **746**, 130 (2012).
5. B. W. Grefenstette, F. A. Harrison, S. E. Boggs et al., *Nature* **506**, 339 (2014).
6. F. A. Harrison, W. W. Craig, F. E. Christensen et al., *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).
7. I. Ahmad et al., *Phys. Rev. C* **74**, 065803 (2006).
8. В. Ф. Тишкин, В. В. Никишин, И. В. Попов и др., Матем. моделирование **7**(5), 15 (1995).
9. K. Kifonidis, T. Plewa, H.-Th. Janka et al., *Astron. Astrophys.* **408**, 621 (2003).
10. A. Rest, R. J. Foley, B. Sinnott et al., arXiv:1003.5660v3 [astro-ph.SR] 4 Feb 2011.
11. J. M. Laming and U. Hwang, *Astrophys. J.* **597**, 347 (2003).
12. H. H. Nassar, M. Paul, I. Ahmad et al., *Phys. Rev. Lett.* **96**, 041102 (2006).
13. Н. В. Змитренко, Н. Г. Прончева, В. Б. Розанов, Препринт ФИАН № 65 (1997).
14. Н. В. Змитренко, Н. Г. Прончева, В. Б. Розанов и др., КЭ **37**, 784 (2007).
15. A. R. Miles, M. J. Edwards, and J. A. Greenough, *Astrophys. Space Sci.* **298**, 17 (2005).
16. R. P. Drake, C. C. Kuranz, A. R. Miles et al., *Phys. Plasmas* **16**, 041004 (2009).
17. В. С. Березинский, В. И. Докучаев, Ю. Н. Ерошенко, УФН **184**, 1 (2014).
18. В. Лукаш, Е. Михеева, Наука и жизнь **5**, 102 (2006).
19. J. Bramante, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 141301 (2015).
20. P. W. Graham, S. Rajendran, and J. Varela, *Phys. Rev. D* **92**, 063007 (2015).