

АНАЛИЗ ГРАДИЕНТНЫХ ПРОФИЛЕЙ И МОРФОЛОГИИ ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ VELA JR

© 2024 г. С. А. Проничева^{1,2,*}, А. Ф. Июдин^{1,**}

¹НИИ ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический факультет, Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: proncof@yandex.ru

**E-mail: aiyyudin@srd.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 12.04.2024 г.

После доработки 22.05.2024 г.

Принята в печать 04.06.2024 г.

В работе были изучены градиентные профили северо-западного лимба Vela Jr. в рентгеновском излучении и морфология остатка в различных спектральных диапазонах электромагнитного излучения для оценки расстояния до объекта и его возраста. Были использованы пространственные распределения интенсивности излучения северо-западного лимба остатка сверхновой RX J0852.0–4622 в диапазоне энергий рентгеновского излучения 1000.0–2000.0 эВ, полученные по измерениям EPIC-рп камеры космического телескопа XMM-Newton для четырех последовательных временных промежутков. Из рассчитанных смещений профилей интенсивности рентгена вдоль северо-западного лимба Vela Jr. с 2004 по 2018 г. были получены пределы на угловую скорость расширения ударной волны данной области остатка в облаке газа, вероятно водорода: минимальная скорость $V_{\theta}^{\max} = 0.29'' \pm 0.04'' \text{ год}^{-1}$ и максимальная $V_{\theta}^{60} = 0.82'' \pm 0.11'' \text{ год}^{-1}$. Облако водорода, с которым взаимодействует ударная волна сверхновой вдоль северо-западного лимба Vela Jr., очень неоднородно. Верхние границы возраста остатка и расстояния до него по оценке плотности облака равны, соответственно, 1920 лет и 450 парсек. Более жесткие ограничения на такие параметры RX J0852.0–4622, как его возраст и расстояние до него, были получены в результате анализа двух-кольцевой морфологии остатка по его изображениям в ультрафиолете, рентгене, радио и гамма-диапазонах: 1190 ± 250 лет и 280 ± 60 парсек.

Ключевые слова: остаток сверхновой, RX J0852.0–4622, Vela Jr., рентгеновские градиентные профили

DOI: 10.31857/S0004629924080053 **EDN:** ITFAOF

1. ВВЕДЕНИЕ

Впервые молодой остаток сверхновой Vela Junior (G266.2–1.2, RX J0852.0–4622) был обнаружен по его рентгеновскому излучению при энергиях $E > 1.3$ кэВ в наблюдениях космической обсерватории ROSAT [1]. Форма остатка представляет собой почти идеальный круг с угловым радиусом в $60'$ и центром в точке с координатами $8\text{ч}52\text{м}3\text{с}$ (RA), $-46^{\circ}22'$ (DEC). Наиболее яркими областями остатка в различных диапазонах, от радио до гамма-излучения, являются северо-западный (СЗ) и юго-восточный (ЮВ) лимбы, наиболее вероятно вызванные взаимодействием ударной волны с облаками нейтрального газа, расположенными в непосредственной близости от объекта [2, 3].

Модели, наиболее точно аппроксимирующие спектр Vela Jr., различаются для разных областей остатка. Так, СЗ и ЮВ лимбы характеризуются в

основном жестким рентгеновским нетепловым излучением и хорошо аппроксимируется степенной моделью с фотонным индексом в диапазоне от 2.6 до 3.15 для разных энергий [4, 5]. У остальных же областей остатка спектр наилучшим образом описывается комбинацией степенной модели для нетеплового излучения Vela Jr. и двухтемпературной тепловой модели для фонового излучения от старого остатка Vela [6]. Кроме того, в спектре RX J0852.0–4622 были обнаружены линии излучения от радиоактивного распада ^{44}Ti с $E = 1.156$ МэВ, что позволило оценить возраст остатка в 680 лет, а расстояние до него в 200 парсек, а также рентгеновская линия 4 кэВ [7, 8].

Основной трудностью в изучении RX J0852.0–4622, его спектра, и причиной указанных выше ограничений на диапазон энергий наблюдения остатка является его расположение в плотно заселенной об-

ласти неба. На луче зрения в направлении Vela Jr. находится комплекс молекулярных облаков в созвездиях Паруса и Кормы, а также старый остаток Vela диаметром 8° , подсвечивающий RX J0852.0–4622 своим тепловым рентгеновским излучением при энергиях $E < 1$ кэВ [9, 10]. Подобное соседство приводит к трудностям оценки возраста изучаемого объекта и расстояния до него. Одним из возможных способов определения указанных величин конкретно для Vela Jr. является измерение скорости движения ударной волны в межзвездной среде (МЗС) СЗ лимба остатка. Структура данного лимба отчетливо видна в рентгеновском диапазоне и позволяет увидеть ведущий передний ударный фронт [11, 12]. В результате подобного анализа были получены противоречивые оценки для величин возраста остатка и расстояния до него [13, 14]. Так, оценки возраста варьируются от 1700 до 5100 лет, а оценки расстояния до остатка от 200 до 1000 парсек.

В свете выше сказанного анализ движения СЗ лимба Vela Jr. с целью оценки возраста объекта и расстояния до него, а также проверка полученных результатов на основании морфологии остатка сверхновой в различных диапазонах излучения представляются актуальными. Данной проблеме и посвящена настоящая работа.

2. ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В работе анализировались данные, полученные при наблюдении области СЗ лимба остатка сверхновой Vela Jr. камерой EPIC-pn (ПЗС-матрица с pn-переходом) космического рентгеновского телескопа XMM-Newton в диапазоне энергий от 1.0 до 2.0 кэВ. Для анализа в данной работе использовались четыре периода наблюдений объекта, каждый длительностью несколько лет для набора статистики: 2001–2004, 2005–2008, 2010–2013, 2014–2018. На рис. 1 представлена область СЗ лимба Vela Jr., обрабатываемая в текущей работе, в RGB комбинации цвета для отображения объекта в использованных интервалах энергии наблюдения, с сеткой сферических координат. На изображении можно четко увидеть яркую нитевидную структуру, внешнюю границу остатка, и вторую более слабую, по-видимому, являющуюся обратной ударной волной, которая образовалась при взаимодействии ударного фронта с облаком водорода. Обе структуры соединяются друг с другом на северо-восточном конце лимба.

Далее указанная область СЗ лимба была разбита на десять прямоугольных областей, примерно перпендикулярных плоскости фронта ударной волны. Они изображены на рис. 2. На наибольшем удалении от центра остатка сверхновой ударный фронт находится в районе областей под номерами 4, 5 и 6.

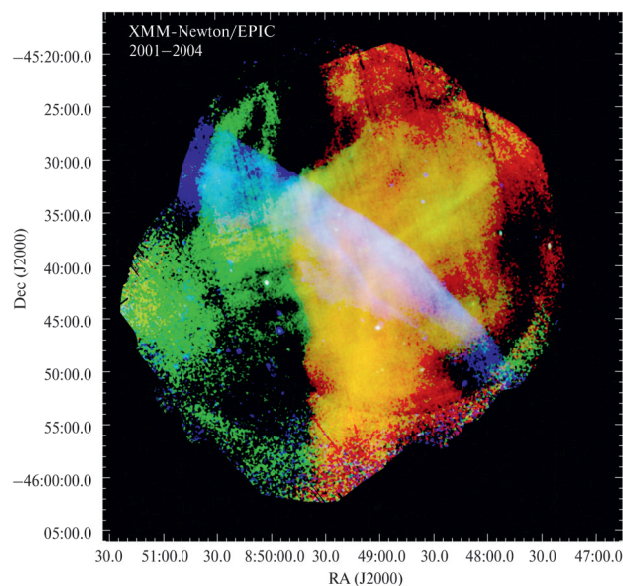


Рис. 1. СЗ лимб остатка сверхновой RX J0852.0–4622 в диапазоне энергий $E = 1.0$ – 2.0 кэВ (XMM-Newton, EPIC-pn CCD camera). По осям рисунка — прямое восхождение и склонение (J2000). Период наблюдения — с 2001 по 2004 г. На фоне присутствуют точечные рентгеновские источники.

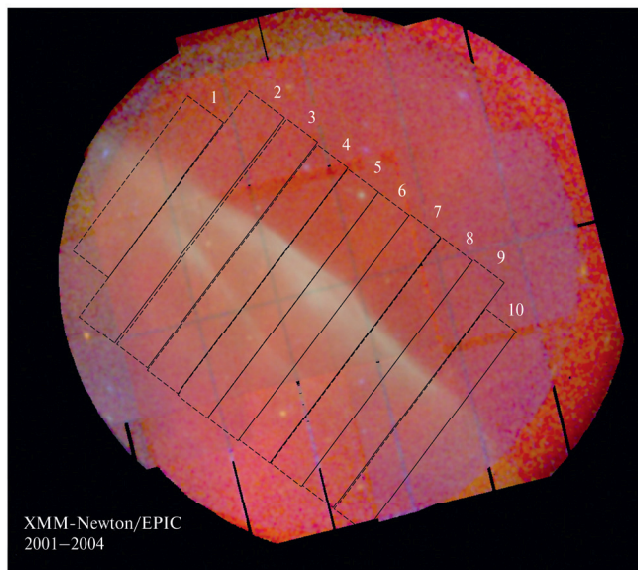


Рис. 2. Набор областей для расчета градиентных профилей по СЗ лимбу (XMM-Newton, EPIC-pn CCD camera). Нумерация областей соответствует нумерации градиентных профилей далее в тексте работы.

В свою очередь, профили интенсивности рентгена были получены вдоль продольной оси каждой из этих десяти областей путем проекции интенсивности излучения в каждом пикселе на данную ось и последующего суммирования проекций вдоль выделенных, перпендикулярных ей, отрезков.

Анализ морфологии остатка сверхновой RX J0852.0–4622 проводился по изображениям остатка в экстремальном ультрафиолете, рентгене [10, 11], радио и гамма-диапазонах [15].

3. МЕТОДЫ

Для построения и обработки рентгеновских градиентных профилей был написан программный код на языке программирования Python. Основные этапы выполнения кода описаны далее.

Первым шагом в анализе являлась аппроксимация градиентных профилей для каждой области и для каждого временного интервала наблюдений наилучшей комбинацией кривых Лоренца по формуле (1). При этом обязательным условием было выделение всех пиков интенсивности, а также градиентного спада переднего ударного фронта, как раз характеризующего распространение оболочки остатка сверхновой в окружающую среду. Отбор наилучших аппроксимаций проводился по параметру R^2 (коэффициент детерминации).

$$I_v(x) = \sum_{i=1}^n I_v^i(x) = \sum_{i=1}^n I_0^i + \frac{2A^i}{\pi} \frac{w^i}{4(x - x_c^i)^2 + (w^i)^2}, \quad (1)$$

где I_v — относительная интенсивность излучения в диапазоне энергий $E = 1.0$ – 2.0 кэВ, x — порядковый номер пикселя вдоль продольной оси областей 1–10, x_c^i — положение максимума пика, w^i — ширина на полувысоте, A^i — амплитуда, I_0^i — начальное значение.

Из аппроксимаций для каждого ведущего пика, соответствующего переднему ударному фронту, были определены положение максимума, x_c^i , и точка с 60% значением от максимального, x_{60}^i : $I_v^i(x_{60}^i) = 0.6 I_v^i(x_c^i)$. Далее, исходя из указанных величин для двух периодов измерения, 2001–2004 и 2010–2013, для каждой области лимба (кроме № 9) были определены изменения x_c^i и x_{60}^i в угловых секундах. Затем были рассчитаны угловые скорости, V_θ , и переведены в линейные, V_{cs} , для четырех значений расстояния до Vela Jr.: $D = 200, 400, 600, 800$ парсек.

Следующим этапом являлось определение плотности облака водорода, находящегося на пути распространения ударного фронта, для областей лимба с рис. 1. Для этого была использована система уравнений (2), основанная на уравнении баланса давлений [16]:

$$\begin{cases} P_{st} \equiv F_{st} P_i \\ P_1 \equiv F_1 P_{st} \equiv F_1 F_{st} P_i \end{cases}, \quad (2)$$

где $P_i = \frac{3}{4} \rho_i v_b^2$ — давление в МЗС вдали от облака при распространении в ней ударной волны от остатка сверхновой, ρ_i — плотность МЗС вне облака, v_b — скорость распространения ударной волны в МЗС; P_{st} — давление в точке стагнации, то есть точке взаимодействия ударной волны и передней границы облака; $P_1 = \frac{2\rho_{c0} v_s^2}{\gamma_c + 1}$ — давление сразу за ударной волной в еще невозмущенном облаке, ρ_{c0} — плотность невозмущенного облака, v_s — скорость распространения ударной волны в облаке, $\gamma_c = 5/3$ — показатель адиабаты для облака. Схема распространения ударной волны в МЗС с облаком и области указанных давлений изображены на рис. 3.

Коэффициент F_1 равен 1 в начале взаимодействия облака с ударным фронтом и постепенно увеличивается по мере торможения ударной волны в облаке (уменьшения v_s) до значения 1.3, однако в текущей работе было взято его начальное значение. Фактор F_{st} в случае сильной ударной волны ($M = v_b/c_s \gg 1$, c_s — скорость звука в потоке) и плотного облака ($\chi = \rho_{c0}/\rho_i \gg 1$), что справедливо и для нашей задачи, выражается по формуле (3).

$$F_{st} \simeq 1 + \frac{2.16}{1 + 10.7[(\gamma_c + 1)\chi]^{-1/2}}. \quad (3)$$

С учетом формул (2), (3) и приведенных выше выражений для давлений можно получить выражение для плотности облака ρ_{c0} :

$$\rho_{c0} = \rho_i \left(\frac{v_b}{v_s} \right)^2 \left[1 + \frac{2.16}{1 + 10.7[(\gamma_c + 1)\chi]^{-1/2}} \right]. \quad (4)$$

Так как данная формула не позволяет аналитически выразить ρ_{c0} , был использован метод последовательных приближений, где в качестве нулевой итерации было взято значение $\chi = (v_b/v_s)^2$.

Во всех расчетах в качестве скорости ударной волны v_b использовались скорости расширения RX J0852.0–4622 из диапазона возможных значений

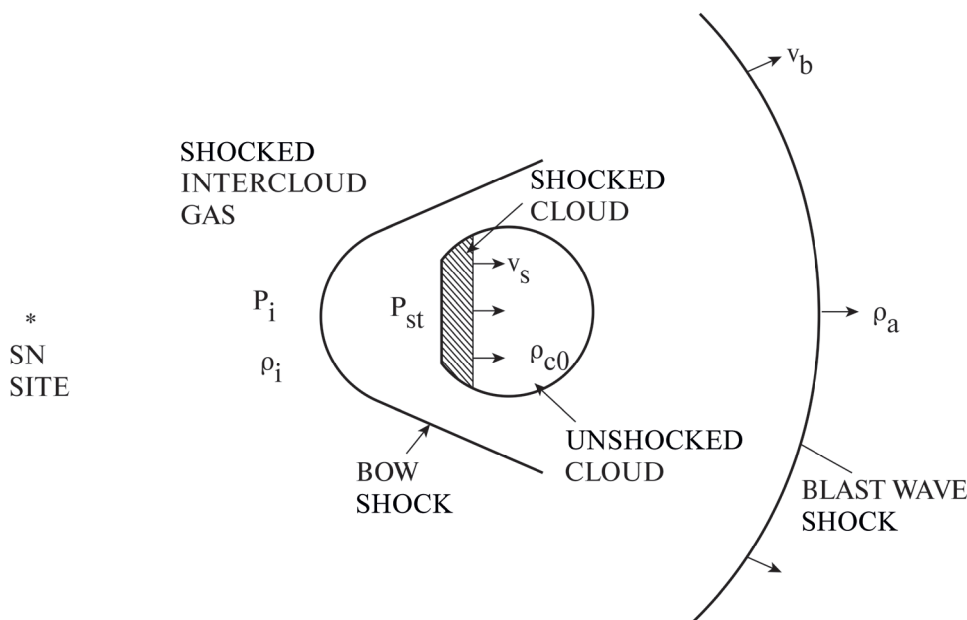


Рис. 3. Схема взаимодействия ударной волны с облаком в МЗС [McKee, Hollenbach, Seab, 1987]. Слева находится источник взрыва. Ударная волна распространяется направо. Перед облаком возникает головная ударная волна, так как налетающий фронт от взрыва сверхновой — сверхзвуковой.

$v_b = 2000 \div 15300 \text{ км с}^{-1}$ (далее V_{snr}), полученные из рентгеновских температур, а плотность МЗС, нагретой прошедшей ударной волной, была оценена как $\rho_i = 0.06(D/200 \text{ пк})^{-1/2} [\text{см}^{-3}]$ [4].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе обработки снимков СЗ лимба Vela Jr. для четырех временных интервалов наблюдений для 9 областей были получены графики рентгеновских профилей — распределение интенсивности излучения при энергиях 1.0–2.0 кэВ перпендикулярно ударному фронту. Примеры полученных графиков и их аппроксимаций приведены на рис. 4.

Из рис. 4 можно заметить особенности излучения СЗ лимба. Так, в рентгеновских профилях области 1 присутствует только один пик, в области 2 уже два пика интенсивности, которые объясняются двумя нитевидными структурами в строении лимба, описанные в п. 2 данной работы. В области 5 наиболее интенсивен передний фронт, причем уже он разделяется на два пика. А в области 8 остается только один ведущий пик. На всех графиках аппроксимации были проведены с акцентом именно на передний фронт, а точнее его пик и спад. В результате анализа пиков полученных кривых были рассчитаны угловые и линейные скорости для каждой области, графики которых приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, в значениях скорости есть разброс, что говорит о неоднородности облака во-

дорода вдоль СЗ лимба. При этом V_θ и V_{cs} постепенно растут до максимума в областях 4–6, что говорит о минимальной плотности облака в данном месте. Подобная обратная зависимость измеренной скорости распространения ударного фронта и рассчитанной плотности облака видна на рис. 6. Кроме того, в силу прямой зависимости линейной скорости от предполагаемого расстояния до Vela Jr. при одной и той же угловой скорости с увеличением D плотность облака N_c , соответствующая данной скорости V_θ , будет падать.

На приведенных выше графиках (рис. 6) замечен резкий спад плотности облака в районе областей 4–6 и общее падение значений плотности при увеличении величины D , что и предсказывалось ранее.

Рассчитанные значения N_c далее были использованы для получения физически разумных ограничений на расстояние D . Как известно, средняя плотность межзвездного пространства примерно равняется 1 частице нейтрального атома водорода на см^3 . Плотность облака, находящегося на пути распространения ударной волны Vela Jr., никак не может быть ниже этого значения. Поэтому для областей СЗ лимба, обозначенных на рис. 2 и используемых в нашей работе, были построены трехмерные зависимости значений N_c от скорости ударной волны V_{snr} и от расстояния до остатка в диапазоне от 200 до 1000 парсек.

В результате анализа подобных зависимостей для всех областей и для всех значений N_c , рассчитанных как из V_θ^{60} , так и из $V_\theta^{\max}$, были получены границы расстояния до Vela Jr., выше которых плотность облака становится уже меньше 1 см^{-3} . В сводной табл. 1 приведены значения этих границ для скоростей ударной волны $V_{\text{snr}} = 2000, 5000, 10000, 15300 \text{ км с}^{-1}$ касательно области с наименьшей плотностью облака,

а точнее области 5, так как очевидно, если для нее выполняется условие $N_c > 1 \text{ см}^{-3}$ на некотором расстоянии D , то это же условие автоматически будет выполняться для всех остальных, более плотных областей. Кроме этого, в табл. 1 приведены рассчитанные по формуле (5) значения возраста RX J0852.0–4622, соответствующие граничным расстояниям D_{max} .

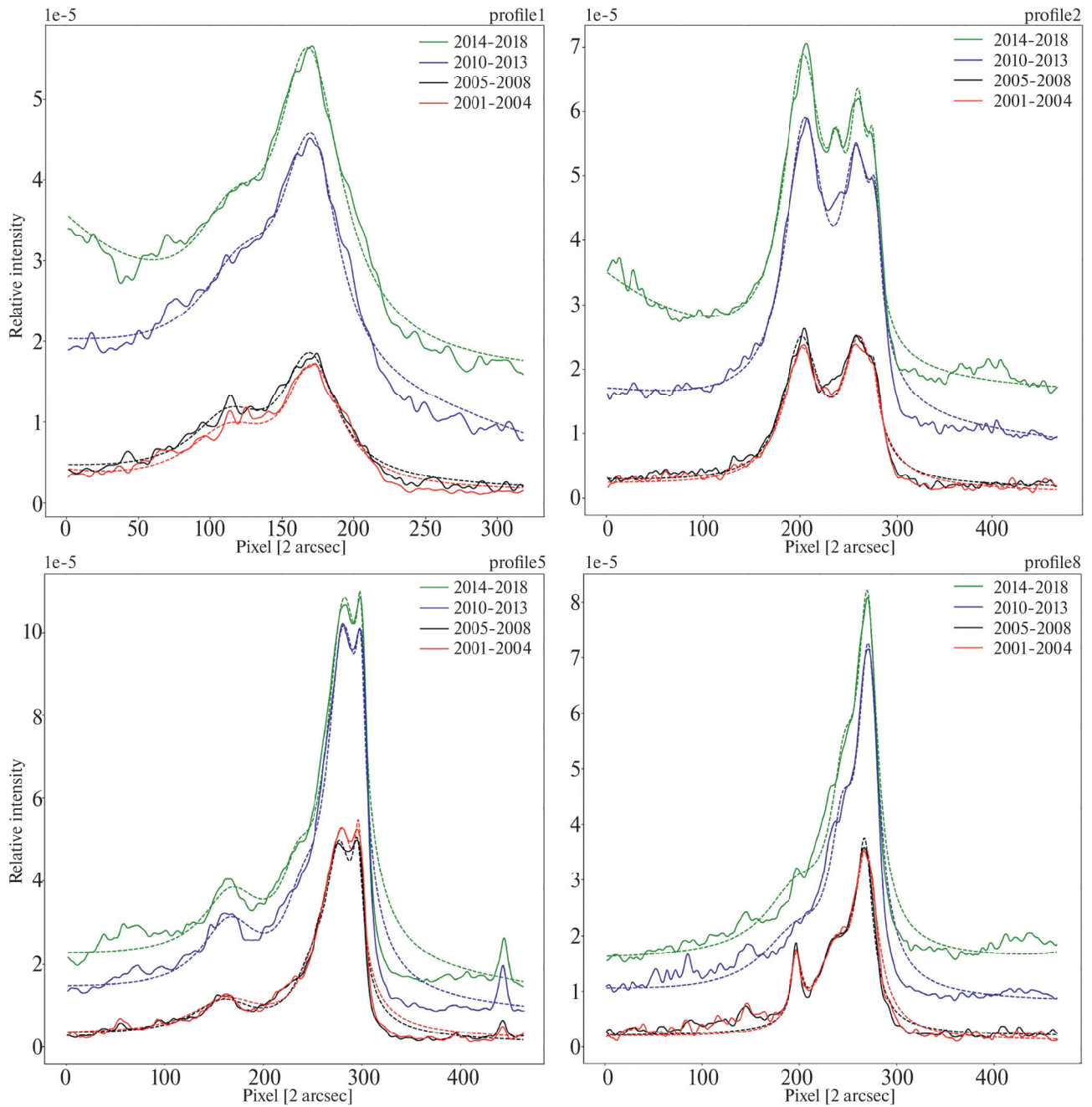


Рис. 4. Градиентные профили и их аппроксимации для областей № 1, 2, 5, 8. Сплошные линии — экспериментальные кривые, пунктирные — аппроксимации. По оси y — интенсивность излучения, по оси x — пространственная координата в пикселях, 1 пиксель = $2''$. Верхний левый рисунок — для области № 1, верхний правый — для № 2, нижний левый — для № 5, нижний правый — для № 8.

Таблица 1. Предельные значения расстояния до Vela Jr., удовлетворяющие условию $N_c > 1 \text{ см}^{-3}$ в области 5.

$V_{\text{snr}},$ км с^{-1}	$D: N_c(V, V_{\text{snr}}, D) > 1 \text{ см}^{-3}$					
	$V = V_{\theta}^{\text{max}}$			$V = V_{\theta}^{60}$		
	$D_{\text{max}}, \text{ Пк}$	$V_{\text{cs}}^{\text{max}},$ 10^3 км с^{-1}	$T_{\text{max}},$ 10^3 год	$D_{\text{max}},$ пк	$V_{\text{cs}}^{60},$ 10^3 км с^{-1}	$T_{\text{max}},$ 10^3 год
2000	210	0.65 ± 0.11	2.24	175	0.68 ± 0.09	1.87
5000	450	1.40 ± 0.22	1.92	380	1.48 ± 0.20	1.62
10000	790	2.5 ± 0.4	1.69	660	2.6 ± 0.4	1.41
15300	1120	3.5 ± 0.5	1.56	930	3.6 ± 0.5	1.30

$$T_{\text{max}} = \frac{R}{V_{\text{snr}}} = \frac{D_{\text{max}} \cdot \text{tg}(\theta/2)}{V_{\text{snr}}}. \quad (5)$$

где R — линейный радиус остатка сверхновой, $\theta = 2.5^\circ$ — угловой диаметр Vela Jr.

Как видно из сводной табл. 1, при росте величины V_{snr} значение D_{max} также увеличивается, так как разница между скоростью налетающего потока и скоростью ударной волны в облаке определяется тормозной способностью МЗС с фиксированной плотностью в 1 см^{-3} , а $V_{\text{cs}}^{\text{max}}(V_{\text{cs}}^{60})$ линейно зависит

от расстояния до Vela Jr. для определенного значения $V_{\theta}^{\text{max}}(V_{\theta}^{60})$.

Проверка полученных ограничений на расстояние D и возраст остатка была проведена через анализ морфологии Vela Jr. совместно в рентгене и экстремальном ультрафиолете, а также гамма и радиодиапазоне. Была выявлена двухкольцевая структура остатка сверхновой, которая представлена на рис. 7. На изображении Vela Jr. в гамма-излучении с радио-контурами данная структура лишь намечается, а более отчетливо видна уже в ультрафиолете

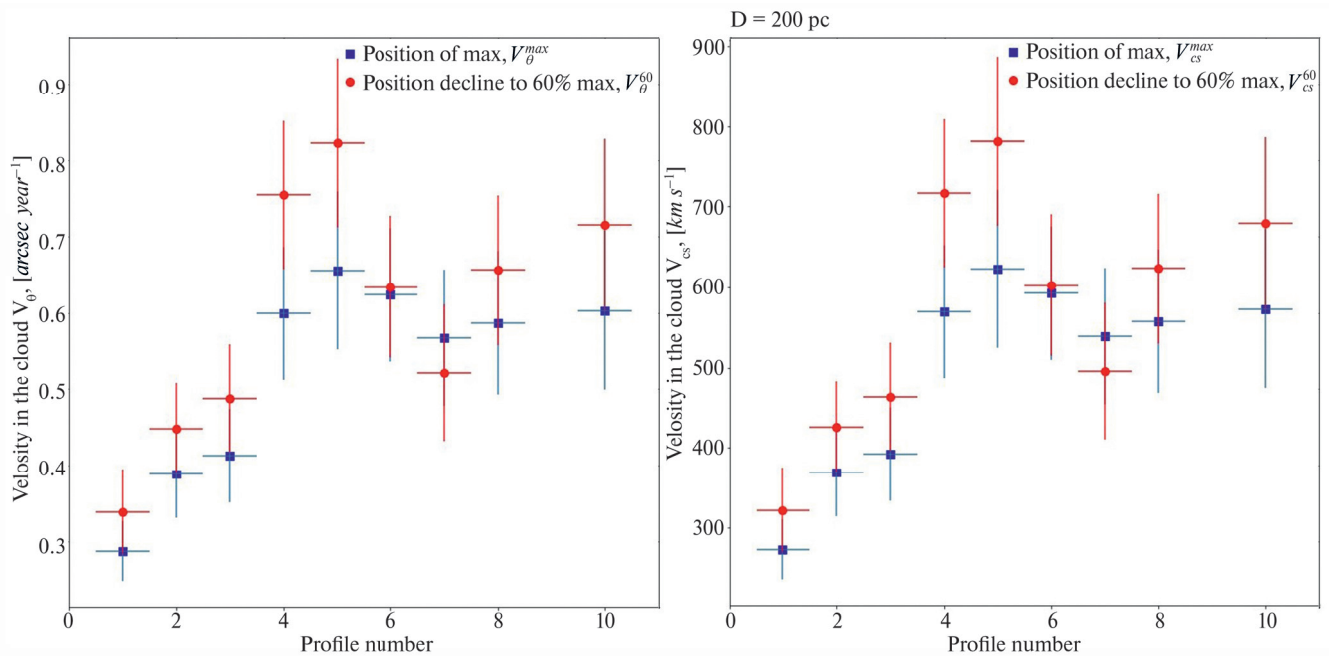


Рис. 5. Скорость расширения ударной волны в облаке водорода для разных областей СЗ лимба остатка сверхновой Vela Jr. Слева: угловая скорость V_{θ} в ед. [угл. с год $^{-1}$]. Справа: линейная скорость V_{cs} в ед. [км с $^{-1}$] для расстояния до Vela Jr., $D = 200$ пк. По оси x — номера областей от 1 до 10. Красный цвет — скорости, определенные из значений x_{60}^i (V_{θ}^{60} и V_{cs}^{60}), синий — из значений x_c^i (V_{θ}^{max} и $V_{\text{cs}}^{\text{max}}$).

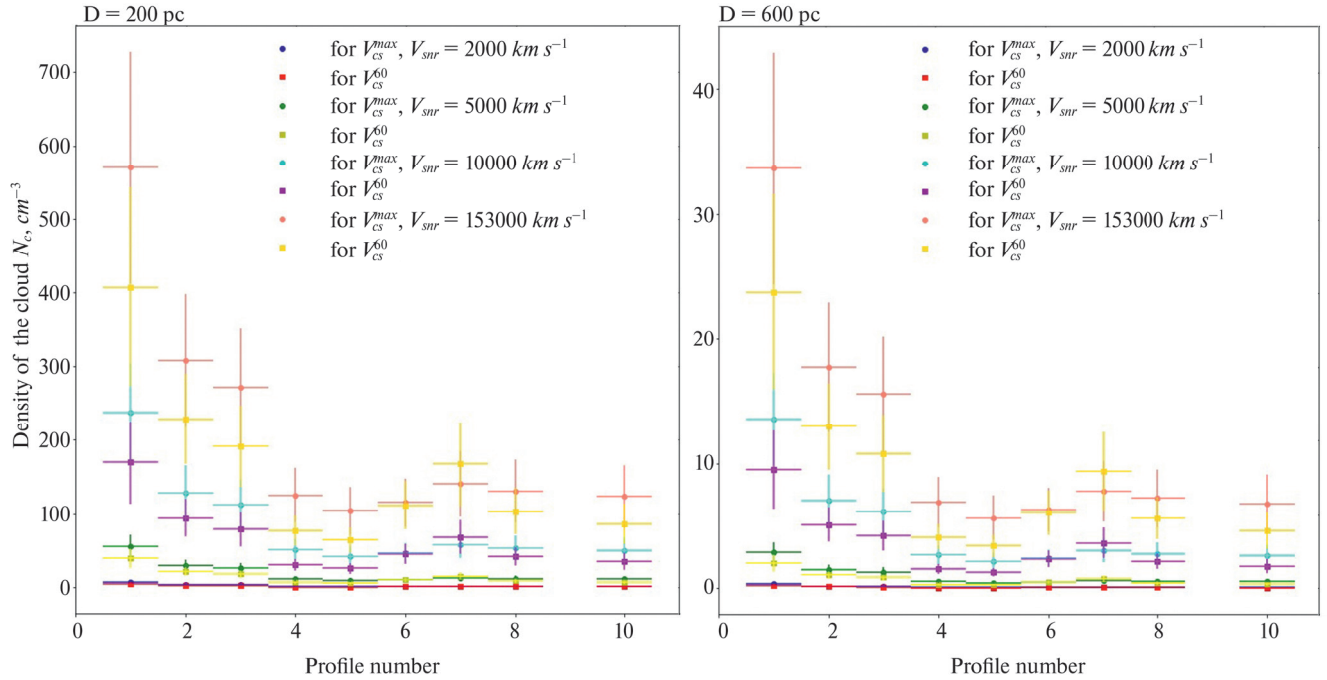


Рис. 6. Плотность облака водорода для разных областей СЗ лимба остатка сверхновой Vela Jr. Слева: в случае расстояния $D = 200$ пк. Справа: в случае $D = 600$ пк. По оси y — плотность облака в ед. $[\text{cm}^{-3}]$, по оси x — номера областей от 1 до 10 (кроме 9). Квадратами обозначены значения, определенные из V_{cs}^{60} , кругами — из $V_{\text{cs}}^{\text{max}}$. В качестве скорости ударной волны: $V_{\text{snr}} = (2, 5, 10, 15.3)10^3 \text{ км с}^{-1}$.

на длине волны $83 \text{ \AA}$ с наложенными поверх рентгеновскими контурами.

Подобная морфология двойного круга возникает в начале эволюции остатка, сохраняется по мере его расширения и является результатом несферичности потока или звездного ветра звезды-прародителя, и/или выброса самой сверхновой, что подтверждается часто наблюдаемой корреляцией теплового рентгеновского излучения с радиоизлучением и наличием в изображениях обоих излучений одинаковой кольцевой структуры [17, 18]. Кроме того, указанная несферичность потока, конкретно для остатка Vela Jr., проявляется и в смещении контуров радиоизлучения на разных частотах — 1384 и 2496 МГц [15]. Исходя из этого, с учетом углового размера RX J0852.0–4622 в $\theta = 2.5^\circ$ и возможного размера области, заполненной ветром от фазы красного сверхгиганта звезды-предшественницы, по формуле (6) было оценено расстояние D [19]. При этом скорость ветра была взята как $v_{\text{sw}} = 20 \text{ км с}^{-1}$, а время жизни звезды в фазе красного сверхгиганта: $T = 3 \times 10^5 \text{ лет}$ [17]. В качестве ошибки определения диаметра θ остатка сверхновой был взят угловой размер ярких лимбов на границе Vela Jr., составляющий примерно 20% от θ , что видно на рис. 7 и

также упоминалось после первых наблюдений объекта в рентгене [1].

$$D = \frac{v_{\text{sw}} T}{\text{tg}(\theta/2)} \cong 280 \pm 60 \text{ пк.} \quad (6)$$

Кроме того, если учесть проекционный эффект через углы наклона к небесной плоскости осей биполярных джетов выброса ^{44}Ti (30° или 60° из [20]), то расстояние D до Vela Jr. будет лежать в диапазоне 320–560 парсек.

Далее, аналогично значениям в табл. 1, по формуле (5) для полученного расстояния в 280 парсек был оценен возраст остатка. Так, при скоростях $V_{\text{snr}} = 2000, 5000, 10000, 15300 \text{ км с}^{-1}$ он должен составлять $3000 \pm 600, 1190 \pm 250, 600 \pm 130$ и $390 \pm 80 \text{ лет}$, соответственно.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В представленной работе были получены градиентные профили рентгеновского излучения при энергиях 1.0–2.0 кэВ для СЗ лимба. На рис. 4 четко виден резкий спад интенсивности по направлению к центру остатка, что свидетельствует о его значительном отклонении от сферической симметрии. Аналогичный результат был получен ранее при ап-

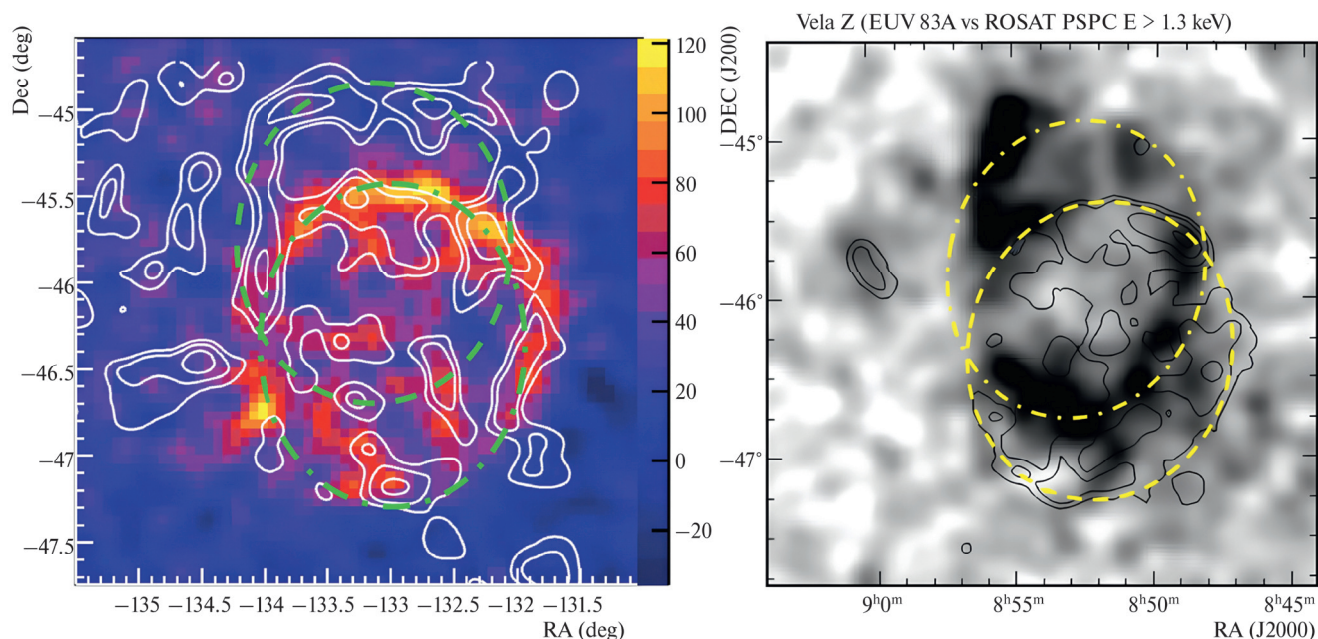


Рис. 7. Снимок остатка сверхновой RX J0852.0–4622 в различных диапазонах с двухкольцевой структурой. Слева: в гамма-диапазоне при энергиях $E > 0.5$ ТэВ с радио-контурами на частоте 1384 МГц (Н.Е.С.С., АТСА). Размерность цветовой шкалы — отсчеты. Адаптировано из [15]. Справа: в экстремальном УФ с $\lambda = 83$ Å с рентгеновскими контурами при энергиях $E > 1.3$ кэВ (EUVE, ROSAT PSPC). Адаптировано из [11].

проксимации асимметричной моделью радиального профиля рентгеновского потока, полученного XMM-Newton для СЗ лимба [21]. В рамках этой модели предполагается несимметричное увеличение числа электронов, наиболее заметное в определенном телесном угле Ω , там, где есть повышенная плотность вещества МЗС, в результате чего синхротронное рентгеновское излучение в СЗ лимбе преобладает именно в той области ударного фронта, где он взаимодействует с облаком водорода. Если же рассматривать сферически симметричную модель, то даже в предположении нахождения всех электронов непосредственно возле ударной волны из-за проекционного эффекта профиль рентгеновского потока был бы сглажен и напоминал плато. Подобная несимметричность выброса частиц при взрыве сверхновой RX J0852.0–4622 в СЗ лимбе подтверждается пространственной корреляцией рентгеновского и радиоизлучения, а также ТэВ-ого гамма-излучения с наличием облака HI [11, 22]. Последний факт косвенно свидетельствует в пользу адронного происхождения гамма-излучения, что ранее было получено при сравнении модельного спектра с потоком экстремального ультрафиолета от Vela Jr., предложенным в работе [23].

Кроме этого, в нашей работе мы рассчитали скорости движения СЗ лимба остатка сверхновой Vela Jr. в облаке водорода. Минимальное значение угловой скорости движения лимба вглубь облака достигается для области 1, где угловая скорость равна $V_{\theta}^{\max} = 0.29'' \pm 0.04''$ год⁻¹ и $V_{\theta}^{60} = 0.34'' \pm 0.06''$ год⁻¹. А максимальное значение угловой скорости движения было измерено для области 5, в которой $V_{\theta}^{\max} = 0.66'' \pm 0.10''$ год⁻¹ и $V_{\theta}^{60} = 0.82'' \pm 0.11''$ год⁻¹. Более ранние оценки угловых скоростей были сделаны по данным XMM-Newton и Chandra, соответственно, в 2008 [13] и 2015 г. [14], для районов СЗ лимба, которые примерно соответствуют областям 5 и 3–4, изображенным на рис. 2. Полученные скорости лежат в тех же диапазонах значений, что и в нашей работе: $V_{\theta}^1 = 0.84'' \pm 0.23''$ год⁻¹ и $V_{\theta}^2 = 0.42'' \pm 0.10''$ год⁻¹. Подобное различие значений примерно в два раза заключается в азимутальном изменении скорости расширения вдоль СЗ лимба из-за взаимодействия ударной волны остатка сверхновой с неоднородным распределением плотности газового облака.

Расчетная плотность участка облака, где происходит взаимодействие с ударной волной, по результатам, представленным на рис. 6, сильно варьируется в зависимости от участка лимба и значений свободных параметров D и V_{snr} . Так, для наиболее плотной

области 1 величина N_c , оцененная из $V_{cs}^{\max}$ при расстоянии до Vela Jr. в 200 парсек и скорости ударной волны 10000 км с^{-1} , равняется $240 \pm 60 \text{ см}^{-3}$. А для наименее плотной области 5 при тех же параметрах плотность составляет всего $42 \pm 13 \text{ см}^{-3}$. При любых значениях расстояния D и скорости ударной волны V_{snr} подобное различие примерно в 6 раз сохраняется.

Из физически разумных ограничений на плотность облака водорода в области 5 были оценены максимально допустимые расстояния до остатка. Так, по расчетам, для наиболее вероятной скорости ударной волны $V_{snr} = 5000 \text{ км с}^{-1}$, остаток сверхновой Vela Jr. удален от нас не более, чем на 450 парсек, а его звезда-предшественница взорвалась не позже, чем 1920 лет назад. Данная верхняя граница возраста лежит практически вне диапазонов 1700–4300 и 2400–5100 лет, рассчитанных из упомянутых выше значений V_θ^1 и V_θ^2 , полученных по результатам измерений XMM-Newton и Chandra, соответственно, в 2008 [13] и 2015 г. [14]. Подобное расхождение объясняется тем, что величины V_θ^1 и V_θ^2 были взяты как средние скорости расширения остатка сверхновой, без учета торможения ударной волны в области СЗ лимба, в облаке водорода. В связи с этим, из-за малых скоростей ударного фронта, но при том же угловом диаметре объекта, Vela Jr. был определен, как остаток более ранней сверхновой. Кроме того, верхней границе расстояния до остатка по результатам текущей работы в 450 парсек удовлетворяет только диапазон расстояний, полученный из V_θ^1 (200–1000 парсек), а из величины V_θ^2 (500–900 парсек) нет.

Более точные значения для параметров остатка, расстояния и возраста, были получены нами из рассмотрения двухкольцевой морфологии RX J0852.0–4622: расстояние было определено равным 280 ± 60 парсек, а возраст для $V_{snr} = 5000 \text{ км с}^{-1}$ — 1190 ± 250 лет, что соответствует верхним границам, оцененным из плотности облака. Кроме того, при учете проекционных эффектов наклона осей биполярных джетов выброса ^{44}Ti к небесной плоскости [20] расстояние до Vela Jr. увеличивается до 320–560 парсек. В связи с этим отметим, что область Vela OB2, к которой, по всей вероятности, принадлежала массивная звезда, давшая рождение сверхновой, образовавшей остаток Vela Jr., находится на расстоянии 350–400 парсек от солнечной системы [24].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С развитием космических обсерваторий и улучшением их спектрального и пространственного разрешения стало возможным более детальное ис-

следование далеких объектов нашей Вселенной. Это открыло ученым новые пути анализа и обработки экспериментальных данных. Используя эти данные, в нашей работе были изучены некоторые свойства остатка сверхновой Vela Jr., вызывающего споры с момента своего обнаружения и по сей день. Нами установлено, что RX J0852.0–4622, а точнее его СЗ лимб в данный момент взаимодействует с сильно неоднородным облаком водорода, анализ минимальной плотности которого ограничивает возраст остатка величиной 2000 лет, а расстояние до него 500 парсек.

Изучение загадочных, нетипичных объектов, таких как остаток сверхновой Vela Jr., крайне важно для развития физики космоса, в частности для лучшего понимания происхождения сверхновых, механизмов их взрыва и этапов эволюции. Кроме того, одним из важных аспектов данной области науки является возможность исследования процессов ускорения космических лучей на ударных волнах остатков сверхновых, взаимодействующих с плотными облаками водорода, или в других объектах, что помогло бы объяснить образование космических лучей с энергиями вплоть до 10^{20} эВ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №23-42-10005.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны сотрудникам Института Макса Планка по внеземной физике, г. Гархинг, Германия, Конраду Деннерлу и Франку Хаберлу за помощь в обработке данных рп-камеры рентгеновского телескопа XMM-Ньютон и интерес к проекту, а также Ф. Хаберлу за помощь в построении профилей рентгеновского излучения остатка сверхновой Vela Jr.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Aschenbach, Nature 396, 141 (1998).
2. M. Obergaulinger, A. F. Iyudin, E. Mueller, G. F. Smoot, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 437, 976 (2014).
3. N. Tsuji, Y. Uchiyama, D. Khangulyan, F. Aharonian, Astrophys. J. 907, 21 (2021).
4. B. Aschenbach, A. F. Iyudin, V. Schönfelder, Astron. and Astrophys. 350, 997 (1999).
5. S. Takeda, A. Bamba, Y. Terada, M.S. Tashiro, S. Katsuda, R. Yamazaki, Y. Ohira, W. Iwakiri, Publ. Astron. Soc. Japan. 68, 11 (2016).

6. *F. Camilloni, W. Becker, P. Predehl, K. Dennerl, M. Freyberg, M.G.F. Mayer, M. Sasaki*, *Astron. and Astrophys.* 673, 17 (2023).
7. *A. F. Iyudin, V. Schönfelder, K. Bennett, H. Bloemen, R. Diehl, W. Hermsen, G. G. Lichti, R. D. van der Meulen, J. Ryan, C. Winkler*, *Nature* 396, 142 (1998).
8. *H. Tsunemi, E. Miyata, B. Aschenbach, H. Junko, A. Daisuke*, *Publ. Astron. Soc. Japan.* 52, 887 (2000).
9. *F. J. Lu, B. Aschenbach*, *Astron. and Astrophys.* 362, 1083 (2000).
10. *Il-Joong Kim, Kwang-Il Seon, Kyoung-Wook Min, W. Han, J. Edelstein*, *Astrophys. J.* 761, 10 (2012).
11. *A. F. Iyudin, B. Aschenbach, V. Burwitz, K. Dennerl, M. Freyberg, F. Haberl, M. Filipovic*, *The Obscured Universe (Proceedings of the VI INTEGRAL Workshop, Moscow, Russian Federation, July 2–8, 2006. Editor: S. Grebenev, R. Sunyaev, C. Winkler. ESA SP-622, Noordwijk: ESA Publication Division, p. 91, 2007).*
12. *T. G. Pannuti, G. E. Allen, M. D. Filipović, A. De Horta, M. Stupar, R. Agrawal*, *Astrophys. J.* 721, 1492 (2010).
13. *S. Katsuda, H. Tsunemi, K. Mori*, *Astrophys. J.* 678, L35–L38 (2008).
14. *G. E. Allen, K. Chow, T. DeLaney, M. D. Filipović, J. C. Houck, T. G. Pannuti, M. D. Stage*, *Astrophys. J.* 798, 82 (2015).
15. *H. E. S. S. Collaboration: F. Aharonian, A. G. Akhperjanian, A. R. Bazer-Bachi, et al.*, *Astrophys. J.* 661, 236 (2007).
16. *R. I. Klein, C. F. McKee, C. Philip*, *Astrophys. J.* 420, 213 (1994).
17. *N. Smith*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* 52, 487 (2014).
18. *R. N. Manchester*, *Australian J. Phys.* 40, 823 (1987).
19. *А. Ф. Иудин* *Успехи российской астрофизики 2021: Теория и Эксперимент (Москва, МГУ, Россия, 17 декабря 2021).*
20. *A. F. Iyudin, Yu. V. Pakhomov, N. N. Chugai, J. Greiner, M. Axelsson, S. Larsson, T. A. Ryabchikova*, *Astron. and Astrophys.* 519, A86 (2010).
21. *I. Sushch, R. Brose, M. Pohl*, *Astron. and Astrophys.* 618, A155 (2018).
22. *Y. Fukui, H. Sano, J. Sato, R. Okamoto, T. Fukuda, S. Yoshiike, K. Hayashi, K. Torii, T. Hayakawa, G. Rowell, M. D. Filipović, N. Maxted, N. M. McClure-Griffiths, A. Kawamura, H. Yamamoto, T. Okuda, N. Mizuno, K. Tachihara, T. Onishi, A. Mizuno, H. Ogawa*, *Astrophys. J.* 850, 71 (2017).
23. *С. А. Проничева*, *Ученые записки физического факультета Московского Университета* 4, 2241601 (2022).
24. *N. J. Wright*, *New Astron. Rev.* 90, id. 101549 (2020).

ANALYSIS OF GRADIENT PROFILES AND MORPHOLOGY OF THE VELA JR. SUPERNOVA REMNANT

S. A. Pronicheva^{1,2,*}, A. F. Iyudin^{1,}**

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

*E-mail: proncof@yandex.ru

**E-mail: aiyudin@srd.sinp.msu.ru

We present the study of gradient profiles of the Vela Jr. northwestern rim in X-ray emission and the morphology of this supernova remnant in various spectral ranges of electromagnetic radiation to estimate the distance to the object and its age. In this work were used radiation intensity spatial distributions for the northwestern rim of the supernova remnant RX J0852.0–4622 in the X-ray energy range, 1000.0–2000.0 eV, obtained from measurements of the EPIC-pn camera of the XMM-Newton space observatory for four consecutive time intervals. From the calculated shifts over the period from 2004 to 2018 of the X-ray intensity profiles along the northwestern rim of Vela Jr., limits were obtained on the angular expansion rate of the shock wave of this remnant's region into a cloud of gas, probably hydrogen: minimum speed $V_0^{\max} = 0.29'' \pm 0.04'' \text{ year}^{-1}$ and maximum $V_0^{60} = 0.82'' \pm 0.11'' \text{ year}^{-1}$. The hydrogen cloud with which the supernova shock wave interacts along the northwestern rim of Vela Jr. is very inhomogeneous. The upper limits for the age of the remnant and the distance to it based on the cloud density estimate are 1920 years and 450 parsecs, respectively. More stringent restrictions on such parameters of RX J0852.0–4622 as its age and distance to it were obtained by analyzing the remnant's two-ring morphology based on its images in ultraviolet, X-ray, radio and gamma rays: 1190 ± 250 years and 280 ± 60 parsecs.

Keywords: supernova remnant, RX J0852.0–4622, Vela Jr., X-ray gradient profiles