

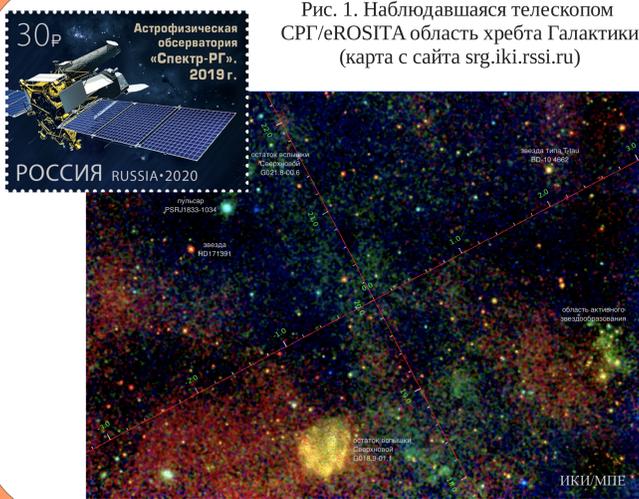
Рентгеновские спектры богатых кремнием фрагментов остатков сверхновых G18.95-1.1, G18.1-0.1: наблюдения eROSITA СРГ

А.М. Быков¹, Ю.А. Уваров¹, Е.М. Чуразов^{2,3}, М.Р. Гильфанов^{2,3}, П.С. Медведев^{2,3}

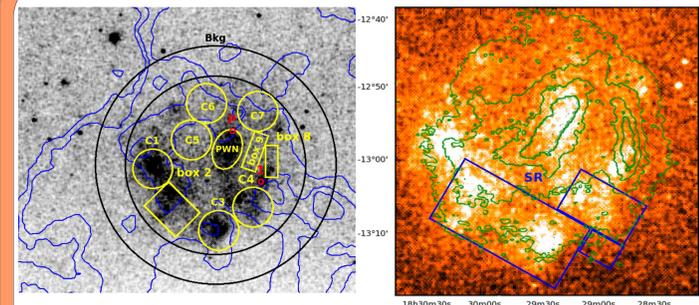
¹ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург; ²ИКИ РАН, Москва; ³Max Planck Institute for Astrophysics, Garching, Germany

Абстракт

В докладе представлены результаты наблюдений телескопом eROSITA обсерватории СРГ остатков сверхновых (ОСН) G18.95-1.1 и G18.1-0.1. Широкое поле сканирования СРГ, целиком покрывающее окрестности остатков, а также его хорошая чувствительность в диапазоне энергий 0.3-2.3 кэВ и угловое разрешение, позволили впервые получить рентгеновское изображение оболочки остатка G18.1-0.1, а также выполнить спектральный анализ излучения обоих остатков. Существенно асимметричная форма остатка G18.95-1.1 свидетельствует о вероятном асимметричном взрыве звезды прародителя. Спектр излучения ярких рентгеновских сгустков в южной части G18.95-1.1 указывает на существенное обогащение кремнием. Высокое отношение обилий Si и O указывает на то, что яркие сгустки являются фрагментами эжекты внутренних слоев коллапсировавшей звезды. В спектре ОСН G18.1-0.1, который в целом хорошо аппроксимируется моделью излучения тепловой плазмы, впервые обнаружено значимое превышение обилия Si относительно солнечного. Обсуждаются физические особенности остатков сверхновых.



ОСН G18.95-1.1



ОСН G18.95-1.1. Спектральный анализ. Однокомпонентные спектральные модели с солнечным обилием элементов.

region	N_H	T	dof	χ^2/dof
	10^{22} cm^{-2}	keV		
SNR	$1.38^{+0.03}_{-0.02}$	$0.30^{+0.01}_{-0.01}$	315	1.77
C1	$1.17^{+0.06}_{-0.06}$	$0.30^{+0.02}_{-0.02}$	126	1.08
box2	$1.29^{+0.08}_{-0.06}$	$0.28^{+0.02}_{-0.02}$	117	1.38
C3	$1.28^{+0.07}_{-0.06}$	$0.29^{+0.02}_{-0.02}$	93	1.03
C4	$1.08^{+0.07}_{-0.08}$	$0.31^{+0.03}_{-0.02}$	100	1.18
C5	$1.67^{+0.14}_{-0.13}$	$0.30^{+0.05}_{-0.04}$	89	1.26
C6	$1.76^{+0.26}_{-0.25}$	$0.27^{+0.07}_{-0.06}$	38	0.97
C7	$1.51^{+0.24}_{-0.18}$	$0.39^{+0.09}_{-0.09}$	62	1.08
box8	$1.23^{+0.21}_{-0.15}$	$0.43^{+0.11}_{-0.11}$	55	1.06
box9	$1.74^{+0.25}_{-0.24}$	$0.25^{+0.07}_{-0.07}$	84	0.86
SR	$1.27^{+0.05}_{-0.03}$	$0.29^{+0.02}_{-0.01}$	227	1.45

region	N_H	T	τ_w	dof	χ^2/dof
	10^{22} cm^{-2}	keV	s/cm^3		
SNR	$1.08^{+0.03}_{-0.03}$	$0.62^{+0.03}_{-0.03}$	$3.6^{+0.9}_{-0.7} \cdot 10^{11}$	314	1.72
box2	$0.92^{+0.08}_{-0.08}$	$0.73^{+0.11}_{-0.09}$	$1.9^{+1.1}_{-1.1} \cdot 10^{11}$	116	1.19
C3	$0.94^{+0.53}_{-0.10}$	$0.63^{+0.09}_{-0.08}$	$3.4^{+1.6}_{-1.1} \cdot 10^{11}$	92	1.17
C4	$0.85^{+0.15}_{-0.10}$	$0.57^{+0.08}_{-0.12}$	$5.1^{+3.1}_{-1.8} \cdot 10^{11}$	99	1.13
C5	$1.25^{+0.12}_{-0.13}$	$0.71^{+0.15}_{-0.11}$	$4.7^{+3.2}_{-2.2} \cdot 10^{11}$	88	1.25
SR	$0.93^{+0.05}_{-0.05}$	$0.67^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+1.0}_{-1.8} \cdot 10^{11}$	226	1.18

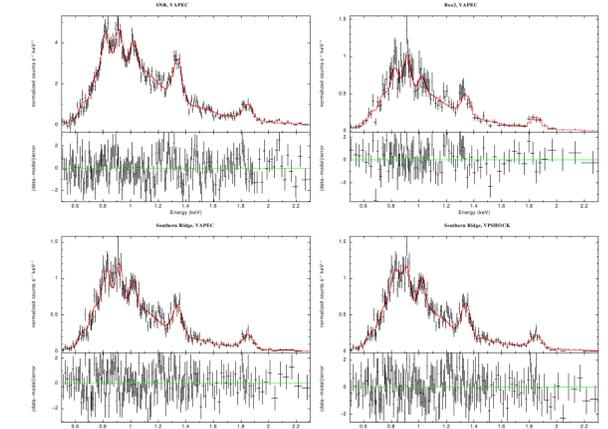
В верхней таблице представлены параметры спектральных моделей излучения равновесно ионизованной плазмы T τ_{abs} *арес. В нижней - параметры спектральных моделей с неравновесной ионизацией T τ_{abs} *pshock. Ошибки приведены на уровне значимости 90%. Таблицы из работы [1] (Bykov et al. 2021). Аппроксимация спектров допускает два локальных минимума, с температурами ~0.3 и ~0.6 кэВ. Для низкотемпературных аппроксимаций время ионизации оказывается больше или порядка 10^{12} s/cm^3 , то есть в этом случае оправданно использовать модель излучения равновесно ионизованной плазмы. Для высокотемпературных аппроксимаций время ионизации оказывается ~ $3 \times 10^{12} \text{ s/cm}^3$, что говорит о необходимости использовать модели неравновесно ионизованной плазмы.

ОСН G18.95-1.1. Спектральный анализ. Однокомпонентные спектральные модели с варьируемым обилием элементов. Параметры.

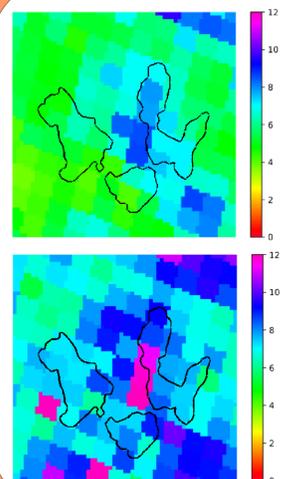
model	SR	SR	box2	SNR
parameters	$t\tau_{\text{abs}} * v\text{pshock}$	$t\tau_{\text{abs}} * v\text{aprec}$	$t\tau_{\text{abs}} * v\text{aprec}$	$t\tau_{\text{abs}} * v\text{aprec}$
$N_H, 10^{22} \text{ cm}^{-2}$	$0.74^{+0.09}_{-0.09}$	$1.00^{+0.09}_{-0.09}$	$0.92^{+0.15}_{-0.14}$	$1.07^{+0.08}_{-0.06}$
$T, \text{ keV}$	$0.59^{+0.07}_{-0.08}$	$0.31^{+0.02}_{-0.02}$	$0.30^{+0.04}_{-0.04}$	$0.31^{+0.02}_{-0.01}$
Ne	$2.3^{+1.6}_{-0.9}$	$1.5^{+0.9}_{-0.5}$	$1.8^{+4.2}_{-0.8}$	$1.1^{+0.5}_{-0.3}$
Mg	$2.7^{+2.0}_{-1.1}$	$1.7^{+1.5}_{-0.6}$	$2.2^{+6.3}_{-1.3}$	$1.6^{+0.8}_{-0.5}$
Si	$3.6^{+3.8}_{-1.8}$	$5.4^{+5.0}_{-2.3}$	$8.5^{+28.5}_{-5.5}$	$3.9^{+2.3}_{-1.3}$
Fe	$1.4^{+0.9}_{-0.5}$	$0.9^{+0.8}_{-0.3}$	$1.0^{+2.0}_{-0.5}$	$0.8^{+0.3}_{-0.2}$
dof	234	235	122	332
χ^2/dof	1.01	1.01	1.00	1.17
$\tau_w, \text{ s/cm}^3$	$4.1^{+1.6}_{-1.1} \cdot 10^{11}$	-	-	-
Norm. $10^{-14} \int n_e n_H dV$	$6.3^{+5.2}_{-2.8} \cdot 10^{-3}$	$4.0^{+3.2}_{-1.9} \cdot 10^{-2}$	$6.7^{+11.3}_{-5.2} \cdot 10^{-3}$	$1.1^{+0.6}_{-0.4} \cdot 10^{-1}$

Ошибки приведены на уровне значимости 90%.
Таблица из работы [1] (Bykov et al. 2021).

ОСН G18.95-1.1. Спектральный анализ. Однокомпонентные спектральные модели с варьируемым обилием элементов. Спектры.



ОСН G18.95-1.1. Оценка расстояния до остатка.



ОСН G18.95-1.1. Основные результаты и выводы I.

Обнаружена существенная асимметрия остатка G18.95-1.1, которая указывает на асимметрию взрыва сверхновой.

Слабое рентгеновское излучение северных областей ОСН (кроме области пульсарной туманности) может быть описано моделью излучения тепловой плазмы с температурой ~0.3 кэВ и солнечным составом элементов. Рентгеновские спектры ярких сгустков, расположенных вдоль южной оболочки остатка, могут быть удовлетворительно аппроксимированы однотемпературной моделью излучения тепловой плазмы, находящейся в состоянии ионизационного равновесия, обогащенной Si и имеющей температуру ~0.3 кэВ. Допустима также аппроксимация моделью излучения неравновесно ионизованной плазмы с температурой ~0.6 кэВ и повышенным обилием Si. Повышенное отношение обилий Si/O (относительно солнечного) указывает на то, что яркие сгустки представляют собой куски эжекты, сформированные в глубоких слоях звезды-предшественника.

Проведенный анализ показывает, что спектры южных сгустков, богатых Si, и их состав, очень похожи на случай обнаруженных в ОСН Вела шрапнелей A и G. Рентгеновская морфология и спектры G18.95-1.1, обнаруженные с помощью eROSITA, могут быть объяснены в рамках сценария взрыва сверхновой с коллапсом ядра с богатыми Si фрагментами выброса, которые расширяются в ветер массивной звезды-прародителя.

ОСН G18.95-1.1. Основные результаты и выводы II.

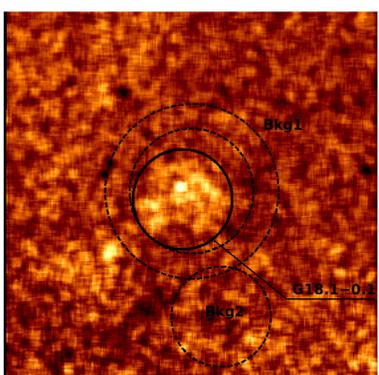
Высокие значения N_H , полученные при анализе рентгеновских данных eROSITA и проведенный нами анализ галактических карт поглощения bayestar19 (Green et al. 2019), указывают на то, что расстояние до G18.95-1.1 составляет примерно 3 кпк.

В спектрах ярких сгустков, южной оболочки и всего остатка G18.95-1.1 на энергиях фотонов 1.2-1.3 кэВ обнаружены слабые спектральные особенности (превышения наблюдаемого излучения в отдельных линиях над модельным значением на уровне ~3 сигма). Эти спектральные особенности могут быть объяснены излучением спектральных линий комплекса Fe L (Fe XVII - Fe XX), или излучением линий Ne X (Ly-бета, Ly-гамма и Ly-дельта).

Оценка массы излучающего в рентгене вещества оболочки G18.95-1.1, проведенная в рамках анализа его пространственного распределения и спектральных характеристик излучения, даёт величину порядка нескольких солнечных масс, причем большая часть массы сосредоточена в южной части остатка, в ядрах наблюдаемых ярких рентгеновских сгустков.

Подробности описаны в работе [1] (Bykov et al. 2021).

ОСН G18.1-0.1

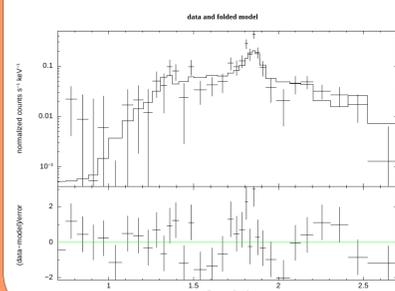


Впервые построена карта диффузного рентгеновского излучения окрестности остатка G18.1-0.1.

ОСН G18.1-0.1. Спектральный анализ.

Модель равновесно ионизованной плазмы T τ_{abs} *арес

region	N_H	T	N_{Si}	dof	χ^2/dof
	10^{22} cm^{-2}	keV	$10^{-14} \int n_e n_H dV$		
SNR	$5.8^{+1.3}_{-1.0}$	$0.49^{+0.34}_{-0.35}$	$4.8^{+14.2}_{-2.8} \cdot 10^{-2}$	37	1.14
SNR*	$5.5^{+1.7}_{-1.2}$	$0.46^{+0.15}_{-0.16}$	$3.9^{+22.6}_{-2.4} \cdot 10^{-2}$	36	0.97



Параметры спектральной модели излучения остатка G18.1-0.1. Модель T τ_{abs} *арес с солнечным и варьируемым (а) обилием Si (2.0 +1.5-0.7). Ошибки приведены на уровне значимости 90%.

Впервые в спектре остатка G18.1-0.1 обнаружено значимое превышение обилия Si над солнечным.

Рис. 6. Спектр остатка вместе со спектральной моделью T τ_{abs} *арес.

Публикации

[1] Bykov A.M., Uvarov Y.A., Churazov E.M., et al., "Spatially resolved X-ray spectra of the galactic SNR G18.95-1.1: SRG/eROSITA view", A&A, 2021, DOI: 10.1051/0004-6361/202141024, arXiv: http://arxiv.org/abs/2110.02051

Благодарности

Работа основана на наблюдениях телескопа eROSITA, расположенного на борту обсерватории СРГ. Обсерватория СРГ была построена Роскосмосом в интересах Российской академии наук в лице Института космических исследований (ИКИ) в рамках Российской Федеральной космической программы при участии Немецкого центра космических исследований (DLR). Рентгеновский телескоп СРГ/eROSITA был построен консорциумом немецких институтов во главе с МПЕ при поддержке DLR. Космический аппарат СРГ был спроектирован, построен, запущен и эксплуатируется ассоциацией Лавочкина и ее субподрядчиками. Научные данные получены антеннами в Медвежьих озерах, Уссурийске и Байконуре, финансируемые Роскосмосом. Данные eROSITA, использованные в данной работе, были обработаны с использованием программного комплекса eSASS, разработанного немецким консорциумом eROSITA, и собственного программного обеспечения для анализа данных, разработанного российским консорциумом eROSITA. В докладе используются данные обзора галактического диска в молекулярных линиях Бостонского университета - FCRAO Galactic Ring Survey (GRS). А.М. Быков и Ю.А. Уваров были поддержаны грантом РНФ 21-72-20020. Часть расчетов была выполнена на компьютерах МЦП РАН.