

Детальный анализ остатка вспышки
сверхновой RX J1713.7–3946 в
рентгеновских лучах по данным
обсерватории *INTEGRAL*, *XMM-Newton* и
SRG/ART-XC.

Кузнецова Е. А., Кривонос Р. А., Чуразов Е. М.,
Лыскова Н. С., Лутовинов А. А., Павлинский М. Н.

HEA-2019

ИКИ РАН

Обнаружение SNR RX J1713.7–3946

Впервые RX J1713 был обнаружен в обзоре *ROSAT* в мягких рентгеновских лучах 0.5–2.4 кэВ в созвездии Скорпиона.

- Находится на расстоянии 1 кпк.
- Совпадает с исторической вспышкой сверхновой SN 393.
- Возраст — 1600 лет.
- Угловой размер $\sim 1^\circ$.

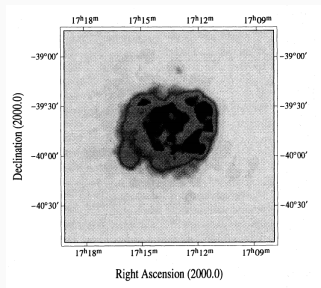


Рис. 1: Изображение RX J1713 по данным *ROSAT* (Pfeffermann&Aschenbach, 1996).

Спектр:

- нетепловой синхротронной природы
- тепловой с линиями излучения Ne Ly α и Mg He α на энергиях ~ 1 кэВ и 1.35 кэВ (центральная область, Katsuda+2015)

Мягкий рентеновский диапазон до ~ 10 кэВ: степенной закон ($\Gamma \sim 2$) с поглощением ($N_{\text{H}} \sim 0.8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$) по данным *XMM-Newton* (Acero+2010) и *Suzaku/XIS* (Tanaka+2008, Takahashi+2008).

Спектральные параметры изменяются в зависимости от области извлечения спектра (*Chandra*, Okuno+2018).

На более жестких энергиях 12–40 кэВ: $\Gamma \sim 3$ (*Suzaku/HXD*, Tanaka+2008).

CANGAROO — первое наблюдение SNR на ТэВ-ных энергиях в 1998 г (Muraishi+2000). Спектр в диапазоне 0.2–30 ТэВ по данным *H.E.S.S.* характеризуется степенным законом ($\Gamma \sim 2$) с экспоненциальным завалом (Aharonian+2004,2006,2007).

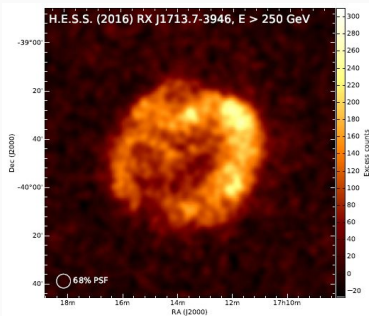


Рис. 2: Изображение RX J1713 в гамма-лучах по данным *H.E.S.S.*

Работа основана на данных обзора области Галактического Центра в жестком рентгеновском диапазоне с помощью телескопа с кодирующей апертурой *IBIS*, установленного на космической обсерватории *INTEGRAL* (Krivonos et al., 2017).

Декабрь 2002 — март 2017 г.
Рабочий диапазон — 17–60 кэВ.

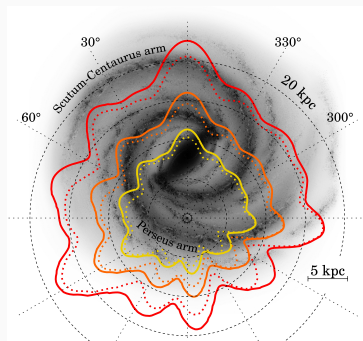


Рис. 3: Галактика с контурами расстояний, на которых могут быть зарегистрированы источники разной светимости в диапазоне 17–60 кэВ ($L_{\text{HX}} = 2 \cdot 10^{35}, 1 \cdot 10^{35}, 5 \cdot 10^{34}$ эрг с^{-1}).

Изображения *INTEGRAL*

В области SNR RX J1713 было обнаружено два ярких источника жесткого рентгеновского излучения (А и В) с угловым размером ($\sigma_A = 6'.3_{-1'.1}^{+1'.3}$ и $\sigma_B = 7'.2_{-1'.2}^{+1'.5}$), превышающим ФРТИ телескопа ($\sigma_{IBIS} = 5'$).

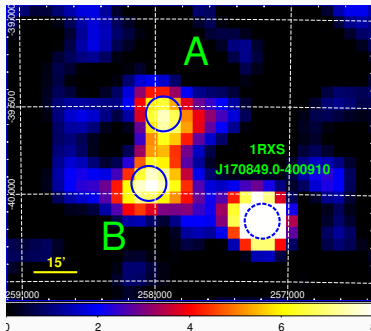
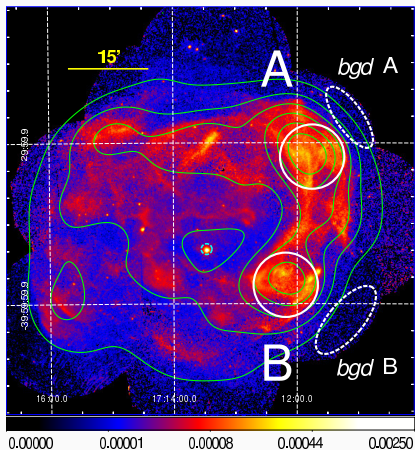


Рис. 4: 17–60 кэВ изображение RX J1713 в единицах значимости.

Изображение *XMM-Newton* 2001–2017 г.



Изображение RX J1713 в единицах скорости счета (отсч. $\text{с}^{-1}\text{см}^{-2}$ на угловую минуту) по данным *XMM-Newton* в диапазоне 1–10 кэВ, с вычтенным инструментальным фоном, скорректированное на экспозицию. Пунктирные эллиптические области использовались для извлечения спектров фона.

Изображение *INTEGRAL*

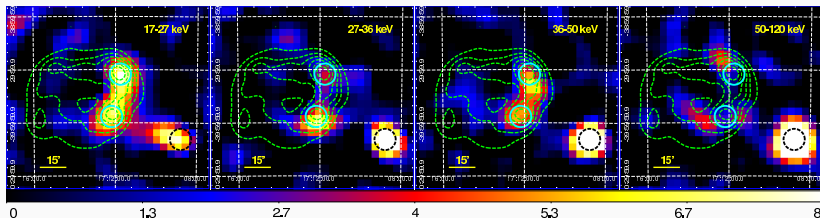


Рис. 5: Изображения RX J1713 в единицах значимости в разных энергетических диапазонах по данным *IBIS*, свернутые с его ФРТИ ($FWHM = 12'$). Зеленые контуры соответствуют контурам изображения *XMM-Newton*, свернутого с ФРТИ *INTEGRAL*.

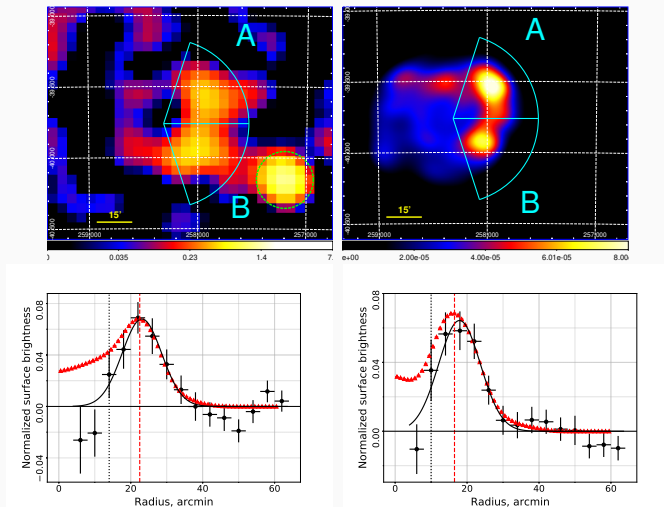


Рис. 6: Радиальные профили секторов A и B по данным *INTEGRAL* ($\sigma_A = 5'.5 \pm 1'.0$ и $\sigma_B = 5'.8 \pm 0'.9$) и *XMM-Newton* обозначены черными и красными точками.

Спектр *INTEGRAL*

Спектр источников А и В по данным *IBIS* в энергетическом диапазоне 17–60 кэВ: степенной закон с $\Gamma = 3.13^{+0.36}_{-0.33}$ и $F_{17-120} = 12.0 \pm 1.4 \cdot 10^{-12}$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$ ($\chi^2/d.o.f. = 1.49/6$). Спектр 1RXS J170849.0–400910 описывается степенным законом с $\Gamma = 1.13 \pm 0.1$.

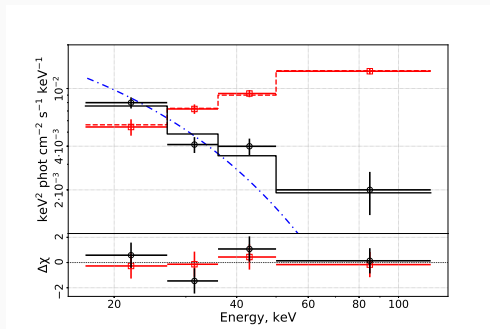
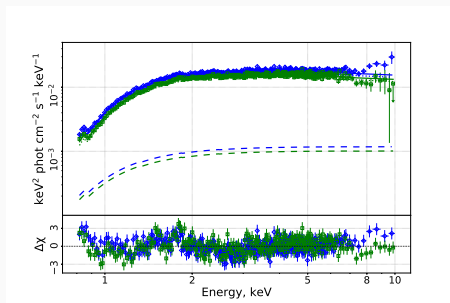
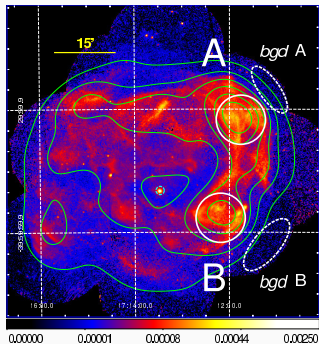


Рис. 7: Суммарный спектр источников А и В (черный) и спектр точечного источника 1RXS J170849.0–400910 (красный).

Спектр XMM-Newton



Модель: степенной закон с поглощением ($TBabs * pow$)
 $N_{\text{H}} = 1.10 \pm 0.01 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$
 $\Gamma = 2.23 \pm 0.01$
 $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.09/1141$

Рис. 8: Спектры источников А (зеленый) и В (синий) в диапазоне 0.8–10 кэВ. Пунктир — спектр фона.

Широкополосный спектр

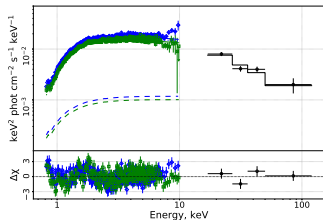


Рис. 9: Совместный спектр *XMM-Newton* и *INTEGRAL*, полученный в диапазонах 0.8–10 кэВ и 17–60 кэВ.

Таблица 1: Модель: *TBabs* * *bknpow*.

Параметр	Broken pow	cutoffpl
$N_{\text{H}}, 10^{22} \text{ см}^2$	1.10 ± 0.01	1.04 ± 0.01
Γ_1	2.23 ± 0.01	2.04 ± 0.01
$E_{\text{bkn}}/E_{\text{cut}}$	17 кэВ	17 кэВ
Γ_2	$3.13^{+0.36}_{-0.33}$	—
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	1.09/1144	1.19/1145

Аналитическая модель

Модель Zirakashvili&Aharonian (2007) — аналитическая модель синхротронного спектра электронов, ускоренных на нерелятивистской ударной волне в молодом остатке вспышки сверхновой:

$k = B1/B2 = 1$ — магнитное поле перпендикулярно ударной волне

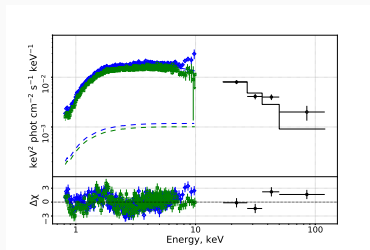
$$\frac{dN}{d\epsilon} \sim \epsilon^{-2} \left[1 + 0.46 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{0.6} \right]^{11/4.8} e^{-\sqrt{\epsilon/\epsilon_0}}, \quad (1)$$

$k = \sqrt{1/11}$ — изотропное магнитное поле

$$\frac{dN}{d\epsilon} \sim \epsilon^{-2} \left[1 + 0.38 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^{0.5} \right]^{11/4} e^{-\sqrt{\epsilon/\epsilon_0}}, \quad (2)$$

Аналитическая модель ZA07

$k = 1$



$k = \sqrt{1/11}$

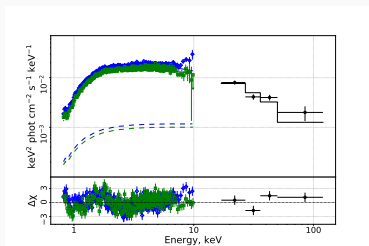


Таблица 2: Модель: $TBabs * ZA07$.

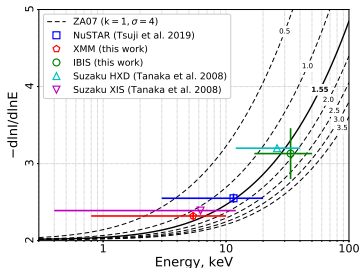
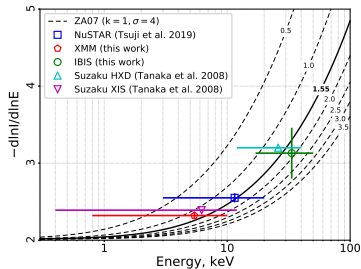
Параметр	$k = B1/B2 = 1$	$k = \sqrt{1/11}$
ϵ_0 , keV	1.13 ± 0.06	1.73 ± 0.11
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	1.19/1145	1.17/1145

Диаграмма $d\ln I/d\ln \epsilon$

Диаграмма $\Gamma(\epsilon) = -\frac{d\ln I}{d\ln \epsilon}$ позволяет освободиться от неопределенностей в нормировках разных экспериментов.

$$k = 1$$

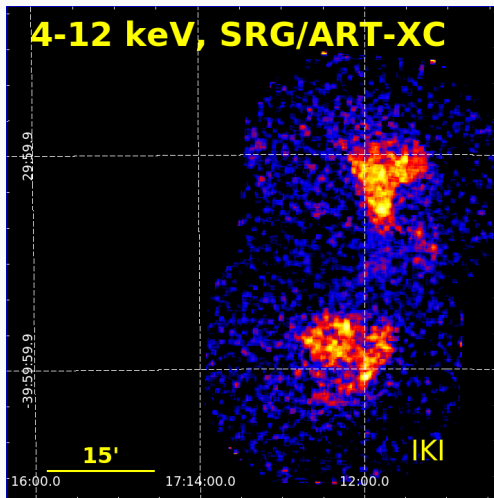
$$k = \sqrt{1/11}$$



$\epsilon_0 = 1.55$ кэВ соответствует режиму диффузии Бома со скоростью ударной волны $u = 3900$ км/с (Tsuji+2019).

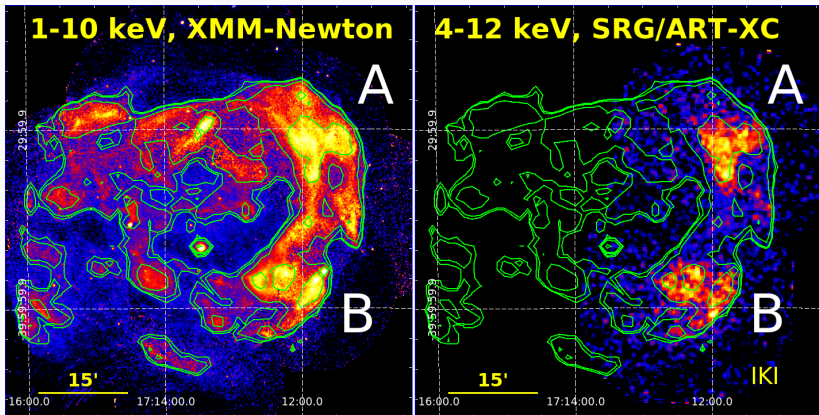
Предварительное изображение RX J1713 по данным *SRG/ART-XC*.

Два наблюдения со средним временем экспозиции ~ 6 ч.



Предварительное изображение RX J1713 по данным XMM-Newton и SRG/ART-XC.

В изображении SRG/ART-XC хорошо детектируется протяженная структура RX J1713.



Результаты *XMM-Newton*, *SRG/ART-XC* и *INTEGRAL*.

- В данной работе мы впервые провели детальный анализ SNR RX J1713 в жестком рентгеновском диапазоне 17–60 кэВ, в результате которого было выявлено два ярких источника протяженного излучения.
- Хорошее согласование изображений RX J1713 по данным *INTEGRAL* (17–60 кэВ), *XMM-Newton* (1–10 кэВ) и *SRG/ART-XC* (4–12 кэВ) указывает на единый механизм генерации излучения в мягком и жестком рентгеновских диапазонах.
- Различие в значениях фотонных индексов для спектров, извлеченных из данных *XMM-Newton* ($\Gamma \sim 2.23$) и *IBIS* ($\Gamma \sim 3.13$), указывает на смену наклона степенного спектра при переходе от мягкого к жесткому диапазонам.
- Широкополосный спектр RX J1713 в энергетических диапазонах 0.8–10 и 17–60 кэВ лучше поддерживает модель степенного закона с изломом, чем с экспоненциальным завалом.
- Модель ZA07 дает хорошее согласие с данными при энергиях $\epsilon_0 \sim 1 - 2 \text{ keV}$, что ожидается от режима диффузии Бома.

Спасибо за внимание!