

УДК 524.312-735

АНАЛИЗ ВКЛАДА НЕТЕПЛОЙ КОМПОНЕНТЫ В РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБ-ЗВЕЗД

© 2020 Е. Б. Рыспаева¹, А. Ф. Холтыгин^{2*}

¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 198504 Россия

Поступила в редакцию 9 декабря 2019 года; после доработки 24 февраля 2020 года;
принята к публикации 24 февраля 2020 года

В настоящей статье исследуется возможность присутствия в рентгеновских спектрах ОБ-звезд нетепловой компоненты, описываемой степенным спектром. Проанализированы спектры низкого разрешения 101 ОБ-звезды, полученные с использованием камеры EPIC спутника XMM. Сделан вывод о том, что вклад нетепловой компоненты рентгеновского излучения может быть существенным и даже определяющим для звезд-аналогов γ Cas. Включение нетепловой составляющей в модельные рентгеновские спектры приводит к снижению температуры тепловых компонент рентгеновской плазмы таких звезд до типичных для ОБ-звезд значений. Вклад нетепловой компоненты может быть существенным также для двойных звезд со сталкивающимися звездными ветрами и Of?p-звезд.

Ключевые слова: *звезды: рентгеновское излучение*

1. ВВЕДЕНИЕ

Большинство авторов придерживается мнения о том, что рентгеновское излучение ранних звезд может генерироваться в результате нагрева плазмы ударными волнами в звездном ветре (см. Zhekov and Palla (2007) и ссылки в указанной работе), например, в рамках модели ударной волны в звездном ветре, ограниченной магнитным полем (Magnetically confined wind shock model, MCWS (Babel and Monnerle 1997)). В работах Ryspaeva and Kholtygin (2018; 2019a; b) было показано, что модель MCWS применима для описания рентгеновского излучения ОБ-звезд как с сильными, так и со слабыми магнитными полями. При этом был сделан вывод о том, что рентгеновское излучение большинства ОБ-звезд не может быть полностью описано как тепловое излучение горячего газа, и существует дополнительный нетепловой механизм генерации рентгеновских квантов.

О возможности вклада нетепловой компоненты в рентгеновское излучение ОБ-звезд свидетельствует обнаруженное у некоторых из них нетепловое радиоизлучение, которое объясняется как синхротронное излучение релятивистских электронов. В статьях Pollock (1987; 1991) была предложена гипотеза о генерации жесткого рентгеновского излучения в результате обратного комптоновского рассеяния ультрафиолетовых фотонов спектра звезды на электронах высоких энергий. В рамках

этого предположения Chen and White (1991) разработали первую модель, объясняющую генерацию рентгеновского излучения O-сверхгигантов с энергиями более 2 кэВ. Спектр такого излучения является степенным со спектральным индексом, близким к 1.5. В модели Chen and White (1991) предсказывается, что звезды, генерирующие жесткое рентгеновское излучение, имеют поверхностное магнитное поле порядка нескольких Гаусс, переменное рентгеновское излучение на временных масштабах от минут до дней и рентгеновскую светимость в жесткой области спектра около 10^{29} erg s⁻¹.

Другая модель нетеплового рентгеновского излучения разработана Leto et al. (2017) на основе анализа рентгеновских наблюдений B2V-звезды HD 182180 с сильным магнитным полем порядка 11 кГс. В рамках модели Leto et al. (2017) быстро вращающиеся магнитные Ap/Bp-звезды излучают как тепловое рентгеновское излучение, так и *авро-ральное* нетепловое. Внутри магнитосферы звезды рентгеновское излучение тепловое и генерируется согласно модели MCWS, а на расстоянии от звезды, равном альвеновскому радиусу, где магнитное давление не способно ограничивать движение горячей плазмы, происходит перемыкание силовых линий магнитного поля, в результате которого образуются быстрые электроны, которые движутся вдоль альвеновской поверхности к магнитным полюсам.

Потоки быстрых электронов сталкиваются с поверхностью звезды в области полярных шапок.

*E-mail: afkholtygin@gmail.com

Тормозное излучение этих электронов, по мнению авторов, имеет степенной спектр со спектральным индексом порядка 1–2.

Если модель Leto et al. (2017) справедлива, звезды с большими значениями скорости истечения вещества и температуры плазмы должны иметь высокие концентрации нетепловых электронов на альвеновской поверхности и интенсивное нетепловое рентгеновское излучение, которое может быть описано степенным законом с низким показателем степени.

В настоящей статье исследована возможная нетепловая составляющая рентгеновских спектров ОВ-звезд. Протестированы спектры 101 ОВ-звезд на наличие степенной компоненты в рентгеновском спектре для проверки применимости моделей Chen and White (1991) и Leto et al. (2017) при описании рентгеновских спектров различных ОВ-звезд.

Статья организована следующим образом. Сведения о наблюдениях и их первичной обработке, а также о процедуре аппроксимации спектров приведены в разделе 2. Результаты моделирования спектров описаны в разделе 3. Обсуждение результатов и выводы даны в разделе 4.

2. АНАЛИЗ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

2.1. Наблюдения и их первичная обработка

Мы повторно проанализировали архивные данные рентгеновских наблюдений 93 ОВ-звезд, выполненных на орбитальной обсерватории ХММ-Newton и уже рассмотренные нами в работе Ryspaeva and Kholtygin (2019a). Список изучаемых звезд приведен в таблицах 1–2 вышеназванной статьи. Дополнительно проанализированы результаты наблюдений семи звезд-аналогов γ Cas и O5.5V(n)-звезды BD – 14 5040. Список этих объектов дан в таблице 1. Спектральные классы указаны в ней в столбце (2), номер наблюдения, дата и экспозиция в секундах — в трех последних столбцах.

Спектры низкого разрешения были извлечены из изображений с камеры EPIC, установленной на спутнике ХММ. Анализ наблюдений выполнен с помощью программного пакета SAS 17.0 с учетом рекомендаций группы SAS¹. Первичная обработка осуществлялась с использованием команд `emproc` и `epproc` для данных EPIC-MOS1/MOS2 и EPIC-PN соответственно.

Командой `tabgtigen` были выделены и командой `esfilter` удалены временные интервалы наблюдений с повышенным фоновым излучением. Из полученных свободных от вспышек фонового излучения EPIC-изображений были извлечены

спектры звезд из круговых областей радиусом не менее 15', центрированных на координаты изучаемых объектов. Извлечение спектра выполнялось процедурой `evselect`. Аналогично были извлечены спектры фона из круговых областей такого же размера в областях ПЗС-матриц, в которых отсутствуют другие яркие источники. Спектры фона были вычтены из спектров звезд процедурой `specgroup`. Если изучаемые звезды наблюдались несколько раз, то их спектры из разных наблюдений объединялись процедурой `epicspeccombine`.

Полученные EPIC-спектры в диапазоне [0.2; 8] кэВ были аппроксимированы различными моделями с помощью программного пакета XSPEC 12.10.0. Спектры из изображений EPIC-PN, EPIC-MOS1 и EPIC-MOS2 аппроксимировались одновременно. Жесткость спектров оценивалась как отношение интегрального потока в диапазоне энергий [2; 8] кэВ (жесткое излучение) к потоку в диапазоне [0.2; 2] кэВ (мягкое излучение):

$$HR = \frac{H_{[2; 8] \text{ keV}}}{H_{[0.2; 2] \text{ keV}}}. \quad (1)$$

2.2. Моделирование спектров звезд

Звездные спектры аппроксимировались суммами одной–двух моделей излучения горячей плазмы APEC (Astrophysical Plasma Emission Code) (Smith et al. 2001) или MEKAL (Liedahl et al. 1995, Mewe et al. 1985; 1986). Обе модели (далее — тепловые модели) описывают спектр излучения газа, в котором атомы ионизируются электронным ударом, а распределение атомов по уровням определяется радиационными и ударными переходами между уровнями. Модели характеризуются следующими параметрами: kT — температура горячей плазмы в кэВ; $Abundance^2$ — содержание в плазме металлов, нормированное на солнечное (Anders and Grevesse 1989); $norm$ — параметр, зависящий от меры эмиссии плазмы и определяющий долю плазмы с модельной температурой kT .

Описание спектра суммой тепловых моделей позволяет учесть наличие областей разной температуры, излучающих в рентгеновском диапазоне. Средняя температура двухкомпонентной плазмы:

$$\langle kT \rangle = \frac{kT_1 \times norm_1 + kT_2 \times norm_2}{norm_1 + norm_2}. \quad (2)$$

²Обычно (см., например, Naze et al. (2014)) при моделировании спектров ОВ-звезд этот параметр фиксируется и полагается равным 1 (солнечное содержание). Мы этот параметр не фиксировали, так как содержание элементов в излучающей в рентгене плазме может отличаться от солнечного.

¹www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton

Таблица 1. Сведения о наблюдениях дополнительных объектов в нашей выборке звезд

Объект	Спектральный класс	ObsID	Дата	Экспозиция
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
BD – 145040	O5.5V(n)	0742980101	28.03.2015	64000
		0505530101	4.10.2008	53000
HD 45314	O9pe	670080301	14.04.2012	26226
HD 110432	B0.5IVpe	504730101	04.09.2007	80677
HD 119682	B0.5	551000201	06.03.2009	57270
HD 157832	B1.5Ve	551020101	05.09.2008	21920
HD 161103	B0.5 III-Ve	201200101	26.02.2004	17823
		691760101	08.09.2012	22917
HD 212571	BIII-IVe	720390701	17.11.2013	54500
SAO 49725	B0.5 III-Ve	201200201	09.12.2003	11515

Для учета поглощения излучения звезды в межзвездной среде суммы тепловых и степенных моделей умножались на коэффициент поглощения рентгеновского излучения в модели WABS (Morrison and McCammon 1983) (без учета томсоновского рассеяния) или в модели TBABS (Wilms et al. 2000). Обе модели характеризуются лучевой концентрацией водорода в направлении на объект N_H в единицах 10^{22} см^{-2} .

Для оценки локального поглощения излучения в околозвездной среде полученные при моделировании значения N_H сравнивались с данными каталога из работы Gudennavar et al. (2012), в которой определено соотношение между N_H и избытками цвета $E(B - V)$:

$$N_H = E(B - V) \times 6.12 \times 10^{21} \text{ см}^{-2}. \quad (3)$$

Локальные лучевые концентрации водорода определялись как разности значений N_H , рассчитанных при аппроксимации спектров и приведенных в каталоге Gudennavar et al. (2012). Если найденные из аппроксимаций спектра значения N_H оказывались меньше, чем полученные Gudennavar et al. (2012), суммы тепловых моделей умножались на дополнительную модель фотоэлектрического поглощения PHABS (также с параметром N_H), а в моделях межзвездного поглощения значения N_H полагались равными значениям, определенным по данным каталога Gudennavar et al. (2012). В этом случае локальные лучевые концентрации водорода считались равными значению параметра N_H модели PHABS.

У некоторых объектов избыток цвета либо не определен, либо равен нулю, поэтому локальные значения N_H не определялись. Спектры некоторых звезд не удалось аппроксимировать моделями со свободным параметром N_H в моделях

WABS/TBABS. Такие спектры аппроксимировались моделями поглощения с фиксированным параметром N_H , равным приведенному в каталоге Gudennavar et al. (2012). В таблице 2 представлены параметры модельных спектров. Здесь во втором столбце приведены локальные или межзвездные значения N_H ; в следующих столбцах — значения параметров тепловых моделей и спектральный индекс Γ ; в столбце (9) — величина χ^2 , характеризующая точность аппроксимации и число степеней свободы; доля степенного излучения F в % приведена в последнем столбце. Прочерки означают, что для спектров соответствующих звезд долю степенного излучения оценить не удалось. На рис. 1 показаны примеры таких спектров и указаны вклады отдельных компонент.

3. НЕТЕПЛОВОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ОБ-ЗВЕЗД

3.1. Общая статистика

Объектами, в которых вклад нетепловой компоненты рентгеновского излучения, описываемого степенным спектром, может быть существенным, являются несколько групп ОБ-звезд. Прежде всего к ним относятся двойные системы со сталкивающимися звездными ветрами (Particle accelerated collided wind binaries, PACWBs (De Becker and Raucq 2013, De Becker et al. 2017)), поскольку в их звездных ветрах присутствуют релятивистские частицы, ускоренные на фронте ударных волн в сталкивающихся звездных ветрах. Также к таким

Таблица 2. Результаты моделирования спектров звезд

Star	N_H , 10^{22} cm^{-2}	kT_1 , keV	$norm_1$ 10^{-4}	kT_2 , keV	$norm_2$ 10^{-4}	Γ	Abundance	χ^2 (d.o.f.)	F , %	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
О-звезды										
BD – 14 5040 [‡]	$0.93^{+0.10}_{-0.11}$	$0.28^{+0.04}_{-0.05}$					$3.30^{+1.77}_{-1.67}$	≤ 0.35	0.95 (246)	$10.6^{+0.9}_{-0.9}$
CPD – 28 2561 [‡]	$0.49^{+0.06}_{-0.06}$	$0.96^{+0.08}_{-0.09}$	$0.05^{+1.86}_{-0.02}$				$2.69^{+0.20}_{-0.62}$	≤ 0.11	1.13 (330)	$73.0^{+1.1}_{-1.1}$
HD 108	$0.095^{+0.008}_{-0.008}$	$0.61^{+0.02}_{-0.02}$	$0.017^{+4.33}_{-0.009}$				$2.92^{+0.08}_{-0.07}$	≤ 0.85	1.40 (406)	$56.8^{+1.5}_{-1.5}$
HD 15570	$0.19^{+0.06}_{-0.06}$	$0.60^{+0.04}_{-0.04}$	10^{+8}_{-7}				$4.34^{+1.05}_{-0.32}$	$0.15^{+0.55}_{-0.09}$	1.27 (295)	$30.4^{+0.1}_{-0.1}$
HD 15558	$0.30^{+0.04}_{-0.04}$	$0.19^{+0.03}_{-0.02}$	81^{+72}_{-57}	$0.60^{+0.07}_{-0.09}$	10^{+5}_{-6}		$2.70^{+0.55}_{-0.46}$	$0.30^{+3.52}_{-0.12}$	1.12 (401)	$21.0^{+1.7}_{-1.7}$
HD 45314	$0.88^{+0.14}_{-0.14}$	$0.37^{+0.05}_{-0.05}$	$0.95^{+0.47}_{-0.47}$				$1.67^{+0.04}_{-0.04}$	$4.73^{+2.18}_{-2.18}$	1.30 (451)	$83.3^{+1.4}_{-1.4}$
HD 54662	$0.10^{+0.01}_{-0.01}$	$0.24^{+0.01}_{-0.01}$	58^{+31}_{-36}				$3.59^{+0.97}_{-1.53}$	$0.18^{+0.33}_{-0.06}$	1.55 (280)	$4.7^{+0.5}_{-0.5}$
HD 57682	$0.17^{+0.06}_{-0.05}$	$0.81^{+0.04}_{-0.04}$	$0.34^{+3.41}_{-0.06}$				$3.78^{+0.46}_{-0.43}$	≤ 0.36	0.97 (278)	$51.6^{+1.0}_{-1.0}$
HD 93128 [‡]	$0.61^{+0.04}_{-0.04}$	$0.24^{+0.03}_{-0.03}$	93^{+176}_{-74}				$2.97^{+0.26}_{-0.24}$	$0.10^{+0.55}_{-0.05}$	1.00 (260)	39.8
HD 93129	$0.54^{+0.02}_{-0.02}$	$0.143^{+0.007}_{-0.004}$	26^{+140}_{-5}	$0.72^{+0.02}_{-0.02}$	$1.86^{+10.60}_{-0.32}$		$2.96^{+0.04}_{-0.09}$	≤ 0.91	1.80 (465)	$7.3^{+0.5}_{-0.5}$
HD 93205	$0.23^{+0.02}_{-0.02}$	$0.19^{+0.01}_{-0.01}$	83^{+38}_{-26}	$0.51^{+0.04}_{-0.03}$	18^{+4}_{-3}		$1.62^{+0.50}_{-0.50}$	$0.17^{+0.05}_{-0.03}$	1.47 (411)	$4.8^{+0.6}_{-0.6}$
HD 93250	$0.30^{+0.03}_{-0.03}$	$0.27^{+0.03}_{-0.03}$	476^{+22}_{-22}				$2.64^{+0.12}_{-0.12}$	$0.05^{+0.01}_{-0.01}$	1.45 (299)	$45.3^{+0.3}_{-0.3}$
HD 93521	$0.24^{+0.04}_{-0.04}$	$0.23^{+0.03}_{-0.04}$	$0.07^{+2.89}_{-0.02}$				$4.56^{+0.90}_{-0.74}$	≤ 0.11	0.95 (277)	$45.3^{+0.3}_{-0.3}$
HD 148937	$0.06^{+0.05}_{-0.05}$	$0.54^{+0.02}_{-0.02}$	$2.06^{+9.72}_{+0.48}$	$1.27^{+0.07}_{-0.08}$	$1.00^{+3.51}_{-0.56}$		$2.77^{+0.05}_{-0.07}$	≤ 3.00	1.74 (478)	$66.6^{+1.2}_{-1.2}$
HD 152233	$0.16^{+0.01}_{-0.01}$	$0.21^{+0.02}_{-0.02}$	$4.25^{+1.52}_{-1.08}$	$0.56^{+0.01}_{-0.01}$	$2.05^{+0.17}_{-0.21}$		$4.68^{+0.18}_{-0.17}$	1.00 (fr.)	1.87 (353)	$33.1^{+0.4}_{-0.4}$
HD 152248	$0.13^{+0.03}_{-0.03}$	$0.60^{+0.02}_{-0.05}$	19^{+8}_{-17}	$0.20^{+0.02}_{-0.02}$	35^{+27}_{-23}		$2.83^{+1.37}_{-2.75}$	$0.26^{+2.06}_{-0.08}$	1.05 (261)	–
HD 152249	$0.31^{+0.05}_{-0.05}$	$0.12^{+0.05}_{-0.05}$	120^{+118}_{-118}	$0.40^{+0.12}_{-0.12}$	$6.6^{+6.3}_{-6.3}$		$2.26^{+0.19}_{-0.19}$	≤ 0.37	1.03 (338)	–
HD 152408	$0.99^{+0.06}_{-0.06}$	$0.57^{+0.07}_{-0.05}$	$0.54^{+0.95}_{-0.14}$				$2.18^{+0.69}_{-0.01}$	≤ 1.68	1.03 (259)	$16.0^{+0.8}_{-0.8}$
HD 155806	$0.18^{+0.01}_{-0.01}$	$0.230^{+0.006}_{-0.006}$	$2.59^{+15.61}_{-0.33}$				$6.31^{+0.35}_{-0.42}$	≤ 0.68	1.31 (334)	$27^{+0.3}_{-0.3}$
HD 159176	$0.12^{+0.01}_{-0.01}$	$0.24^{+0.02}_{-0.02}$	75^{+16}_{-24}	$0.62^{+0.04}_{-0.03}$	32^{+9}_{-11}		$2.94^{+0.46}_{-0.62}$	$0.20^{+0.11}_{-0.05}$	1.39 (336)	$9.3^{+0.7}_{-0.7}$
HD 164794	$0.127^{+0.008}_{-0.008}$	$0.262^{+0.008}_{-0.008}$	415^{+80}_{-71}				$2.84^{+0.16}_{-0.15}$	$0.08^{+0.01}_{-0.01}$	1.61 (409)	$15.8^{+1.8}_{-1.8}$

Таблица 2. Результаты моделирования спектров звезд. (Продолжение)

Star	N_{H} , 10^{22} cm^{-2}	kT_1 , keV	$norm_1$ 10^{-4}	kT_2 , keV	$norm_2$ 10^{-4}	Γ	Abundance	χ^2 (d.o.f.)	F, %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
HD 167971	$0.35^{+0.02}_{-0.02}$	$0.93^{+0.03}_{-0.03}$	30^{+10}_{-22}	$0.24^{+0.02}_{-0.01}$	262^{+107}_{-209}	$2.46^{+0.92}_{-0.92}$	≤ 0.41	1.33 (409)	$7.3^{+0.5}_{-0.5}$
HD 188001	$0.16^{+0.02}_{-0.02}$	$0.60^{+0.04}_{-0.04}$	$0.17^{+0.62}_{-0.03}$			$5.36^{+0.50}_{-0.46}$	≤ 0.12	1.16 (269)	$45.9^{+1.8}_{-1.8}$
HD 191612	≤ 0.007	$0.53^{+0.10}_{-0.07}$	$0.25^{+0.74}_{-0.04}$	$0.97^{+0.12}_{-0.04}$	$0.29^{+0.76}_{-0.08}$	$2.80^{+0.06}_{-0.07}$	≤ 1.20	1.39 (458)	$56.1^{+1.4}_{-1.4}$
HD 215835	$0.11^{+0.03}_{-0.03}$	$0.71^{+0.02}_{-0.02}$	$0.60^{+5.17}_{-0.08}$			$4.69^{+0.43}_{-0.36}$	≤ 0.48	1.33 (276)	$30.9^{+0.2}_{-0.2}$
Tr 16-22	$0.27^{+0.05}_{-0.05}$	$1.26^{+0.09}_{-0.10}$	$0.23^{+2.41}_{-0.06}$			$2.99^{+0.17}_{-0.32}$	≤ 0.34	0.94 (387)	$66.6^{+0.4}_{-0.4}$
В-звезды									
HD 3360	$0.21^{+0.12}_{-0.12}$	$0.29^{+0.12}_{-0.05}$	$1.78^{+6.03}_{-1.86}$			≤ 4.85	≤ 0.047	0.01 (240)	—
HD 21856	≤ 0.48	$0.20^{+0.02}_{-0.02}$	$0.90^{+0.79}_{-0.79}$			$5.24^{+0.67}_{-0.67}$	$0.65^{+0.54}_{-0.54}$	0.97 (132)	$59.8^{+1.8}_{-1.8}$
HD 24760	$0.16^{+0.04}_{-0.04}$	$0.24^{+0.01}_{-0.01}$	$0.011^{+44.127}_{-0.005}$			$5.69^{+0.51}_{-0.43}$	≤ 0.20	1.6 (204)	$50.8^{+0.7}_{-0.7}$
HD 33328	≤ 0.13	$0.89^{+0.15}_{-0.09}$	$0.019^{+1.770}_{-0.007}$	$0.22^{+0.05}_{-0.04}$	$0.04^{+2.20}_{-0.02}$	$2.49^{+1.10}_{-2.49}$	≤ 0.11	0.91 (202)	$40.6^{+1.9}_{-1.9}$
HD 34816	≤ 0.033	$0.225^{+0.004}_{-0.004}$	14^{+12}_{-11}			$5.75^{+1.56}_{-0.76}$	$0.18^{+0.75}_{-0.09}$	1.35 (241)	$21.3^{+1.1}_{-1.1}$
HD 35468 [‡]	$0.12^{+0.02}_{-0.02}$	$0.056^{+0.006}_{-0.009}$	54^{+573}_{-14}	$0.25^{+0.02}_{-0.01}$	$0.19^{+2.03}_{-0.04}$	$4.04^{+0.77}_{-2.51}$	≤ 0.42	1.4 (274)	$8.4^{+0.7}_{-0.7}$
HD 36959	$0.12^{+0.04}_{-0.04}$	$0.99^{+0.06}_{-0.06}$	$0.046^{+1.041}_{-0.005}$			$3.22^{+0.25}_{-0.22}$	≤ 0.19	1.19 (274)	$76.6^{+0.8}_{-0.8}$
HD 36960	≤ 0.002	$0.23^{+0.01}_{-0.01}$	$2.53^{+2.46}_{-2.17}$	$1.05^{+0.12}_{-0.03}$	$1.69^{+1.49}_{-0.75}$	$2.68^{+0.05}_{-0.07}$	$0.47^{+2.81}_{-0.23}$	1.18 (377)	$51.3^{+0.5}_{-0.5}$
HD 37479	$0.05^{+0.01}_{-0.01}$	$1.25^{+0.04}_{-0.05}$	$0.68^{+4.60}_{-0.46}$	$0.27^{+0.03}_{-0.02}$	$0.45^{+3.07}_{-0.33}$	$2.22^{+0.06}_{-0.18}$	≤ 0.22	1.21 (469)	$75.4^{+0.9}_{-0.9}$
HD 46328	$0.050^{+0.008}_{-0.008}$	$0.75^{+0.01}_{-0.01}$	$1.83^{+1.00}_{-1.12}$	$0.228^{+0.006}_{-0.006}$	$2.63^{+1.50}_{-0.73}$	$4.20^{+0.30}_{-0.20}$	$1.01^{+1.62}_{-0.36}$	1.52 (401)	$21.4^{+1.4}_{-1.4}$
HD 47777 [†]	0.05 (fr.)	$0.98^{+0.10}_{-0.10}$	$0.266^{+0.257}_{-0.257}$			$2.58^{+0.21}_{-0.21}$	≤ 0.07	0.98 (265)	64.5
HD 63922	$0.04^{+0.01}_{-0.01}$	$0.190^{+0.003}_{-0.003}$	$1.45^{+3.90}_{-0.11}$	$0.63^{+0.02}_{-0.02}$	$0.21^{+0.55}_{-0.02}$	$5.16^{+0.50}_{-0.32}$	≤ 1.40	1.25 (328)	$19.5^{+0.9}_{-0.9}$
HD 64760	$0.05^{+0.02}_{-0.02}$	$0.38^{+0.02}_{-0.02}$	19^{+4}_{-3}			$1.13^{+0.56}_{-0.57}$	$0.036^{+0.005}_{-0.005}$	1.66 (359)	$4.1^{+0.7}_{-0.7}$
HD 79351	≤ 0.011	$0.63^{+0.01}_{-0.01}$	$7.41^{+1.11}_{-1.37}$	$1.21^{+0.08}_{-0.09}$	$5.69^{+0.62}_{-1.04}$	$1.73^{+0.64}_{-0.88}$	$0.25^{+0.06}_{-0.03}$	1.21 (447)	$4.8^{+0.3}_{-0.3}$

Таблица 2. Результаты моделирования спектров звезд. (Продолжение)

Star	N_{H} , 10^{22} cm^{-2}	kT_1 , keV	$norm_1$ 10^{-4}	kT_2 , keV	$norm_2$ 10^{-4}	Γ	Abundance	χ^2 (d.o.f.)	F , %
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
HD 105382 [‡]	$0.06^{+0.15}_{-0.06}$	$0.78^{+0.07}_{-0.08}$	$0.04^{+0.96}_{-0.01}$			$3.82^{+1.48}_{-1.46}$	≤ 0.10	0.84 (136)	$44.9^{+2.2}_{-2.2}$
HD 110432	$0.225^{+0.005}_{-0.005}$	$8.24^{+1.06}_{-0.60}$	25^{+4}_{-3}	$0.93^{+0.04}_{-0.04}$	$1.05^{+0.12}_{-0.12}$	$1.42^{+0.02}_{-0.02}$	1.0 (fr.)	1.05 (486)	$57.5^{+0.2}_{-0.2}$
HD 119682 [‡]	$0.33^{+0.09}_{-0.09}$	$0.44^{+0.19}_{-0.15}$	$11.59^{+57.83}_{-8.95}$			$1.60^{+0.10}_{-0.10}$	$0.01^{+0.04}_{-0.01}$	1.15 (464)	$83.7^{+1.5}_{-1.5}$
HD 120324	$0.15^{+0.07}_{-0.07}$	$0.76^{+0.05}_{-0.05}$	$0.10^{+0.04}_{-0.02}$			$4.11^{+0.73}_{-0.53}$	≤ 0.47	1.21 (214)	$60.7^{+1.8}_{-1.8}$
HD 120991 [‡]	$0.15^{+0.10}_{-0.02}$	$0.22^{+0.05}_{-0.04}$	$0.17^{+149.39}_{-0.16}$			$1.89^{+0.06}_{-0.05}$	≤ 0.0017	1.17 (475)	$95.7^{+0.9}_{-0.9}$
HD 136504 [‡]	$0.08^{+0.04}_{-0.04}$	$0.56^{+0.08}_{-0.11}$	14^{+10}_{-7}			$1.71^{+0.42}_{-0.42}$	$0.03^{+0.03}_{-0.01}$	1.03 (246)	$35.8^{+2.7}_{-2.7}$
HD 143275 [‡]	$0.29^{+0.03}_{-0.03}$	$0.233^{+0.006}_{-0.006}$	$3.46^{+9.58}_{-0.66}$			$8.17^{+1.33}_{-1.13}$	≤ 1.31	1.81 (213)	$17.0^{+1.6}_{-1.6}$
HD 147932	$0.23^{+0.02}_{-0.02}$	$1.00^{+0.03}_{-0.02}$	$0.62^{+2.31}_{-0.07}$			$2.83^{+0.06}_{-0.06}$	≤ 2.15	1.23 (458)	$70.6^{+0.8}_{-0.8}$
HD 152234	$0.16^{+0.02}_{-0.02}$	$0.25^{+0.01}_{-0.01}$	$1.20^{+1.14}_{-0.19}$	$0.77^{+0.03}_{-0.02}$	$0.31^{+0.29}_{-0.03}$	$4.19^{+0.17}_{-0.16}$	$1.43^{+1.14}_{-1.14}$	1.61 (384)	$26.0^{+0.8}_{-0.8}$
HD 157246	$0.17^{+0.03}_{-0.03}$	$0.19^{+0.04}_{-0.03}$	$2.43^{+2.09}_{-0.29}$	$0.61^{+0.02}_{-0.02}$	$2.79^{+2.74}_{-2.74}$	$4.07^{+0.28}_{-0.32}$	≤ 0.35	0.89 (306)	$37.8^{+0.2}_{-0.2}$
HD 157832	≤ 0.012	$6.27^{+1.48}_{-1.32}$	$1.90^{+5.43}_{-0.90}$			$1.56^{+0.07}_{-0.18}$	≤ 1.27	0.95 (445)	78.4
HD 158926	$0.006^{+0.007}_{-0.005}$	$0.204^{+0.005}_{-0.004}$	$0.47^{+0.11}_{-0.11}$			$4.53^{+0.34}_{-0.28}$	≤ 0.56	1.17 (219)	$32.9^{+3.2}_{-3.2}$
HD 161103 [‡]	$0.37^{+0.03}_{-0.03}$	$5.46^{+1.09}_{-0.77}$	$5.93^{+2.40}_{-4.38}$	$0.65^{+0.06}_{-0.05}$	$0.41^{+0.27}_{-0.29}$	$1.24^{+0.38}_{-0.90}$	$1.06^{+2.80}_{-0.35}$	0.99 (472)	$76.6^{+2.0}_{-2.0}$
HD 165024	$0.12^{+0.05}_{-0.05}$	$0.19^{+0.02}_{-0.04}$	$0.19^{+2.47}_{-0.06}$	$0.70^{+0.02}_{-0.09}$	$0.14^{+0.63}_{-0.02}$	$4.56^{+1.98}_{-0.63}$	≤ 0.58	0.99 (110)	—
HD 182180 [‡]	$0.62^{+0.30}_{-0.30}$	$0.23^{+0.16}_{-0.09}$	104^{+3303}_{-96}			$1.68^{+0.72}_{-0.59}$	≤ 0.04	0.77 (211)	$35.9^{+3.4}_{-3.4}$
HD 193924	$0.13^{+0.07}_{-0.07}$	$0.46^{+0.03}_{-0.10}$	$0.056^{+0.021}_{-0.008}$			$4.50^{+0.86}_{-0.37}$	≤ 0.71	1.01 (276)	$26.8^{+1.5}_{-1.5}$
HD 212571	$0.09^{+0.01}_{-0.01}$	$6.63^{+0.77}_{-1.52}$	12^{+23}_{-2}			$1.54^{+0.04}_{-0.10}$	$1.37^{+5.73}_{-0.63}$	1.3 (488)	78.8
HD 261938 [‡]	$0.11^{+0.05}_{-0.05}$	$0.90^{+0.07}_{-0.08}$	$0.035^{+0.95}_{-0.01}$			$3.10^{+0.37}_{-0.48}$	≤ 0.13	0.99 (242)	$64.2^{+0.6}_{-0.6}$
CD – 23 12861 [‡]	$0.43^{+0.06}_{-0.06}$	$0.96^{+0.02}_{-0.02}$	$0.57^{+15.29}_{-0.03}$			$3.02^{+0.63}_{-0.64}$	≤ 0.12	1.73 (452)	$66.0^{+0.8}_{-0.8}$
SAO 49725 [‡]	$0.47^{+0.23}_{-0.23}$	$0.70^{+0.14}_{-0.14}$	$1.65^{+1.63}_{-1.65}$			$1.67^{+0.14}_{-0.09}$	$0.29^{+0.19}_{-0.19}$	1.0 (368)	$90.1^{+0.7}_{-0.7}$

[†] — спектры этих звезд не удалось описать моделями со свободным параметром N_{H} , эта величина была фиксирована (см. текст);

[‡] — звезды с нулевым или не определенным избытком цвета, указанные для них значения N_{H} являются межзвездными.

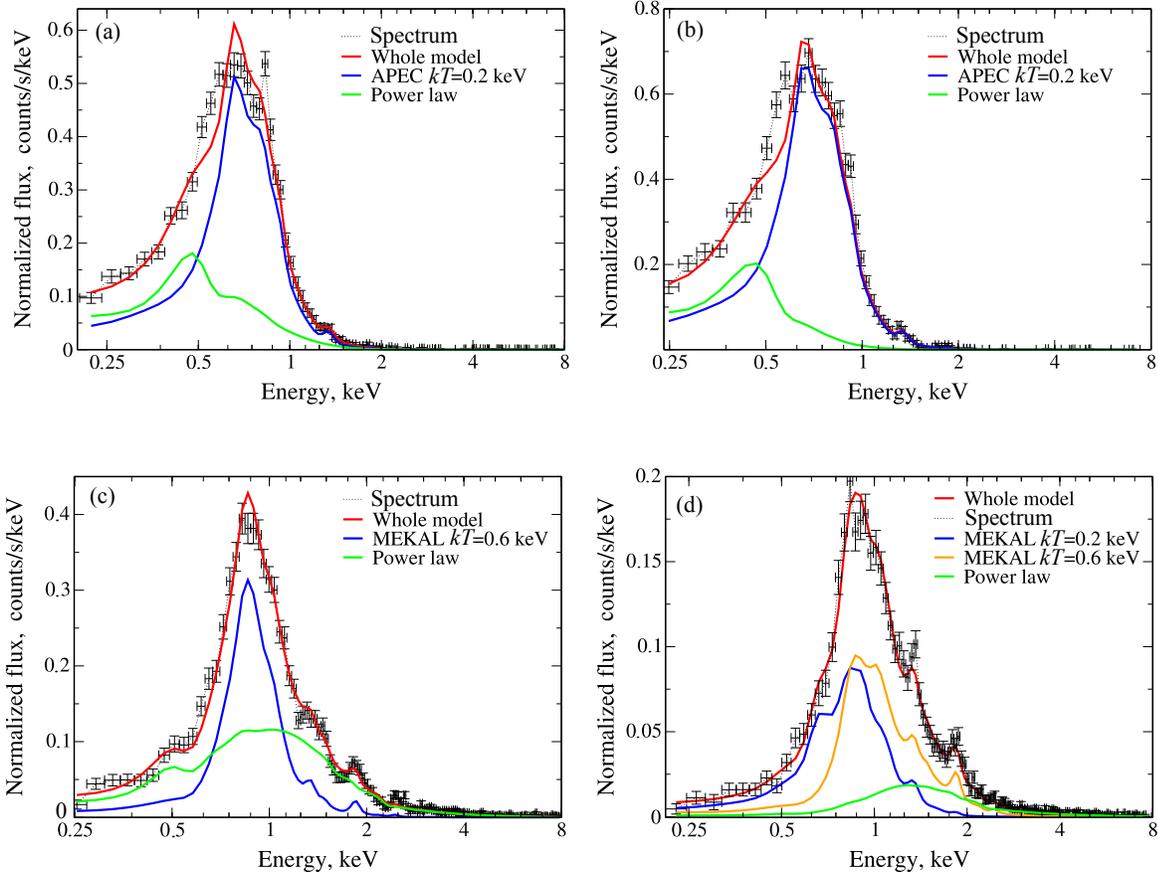


Рис. 1. Аппроксимации (красные линии) спектров типичных ОВ-звезд: (a) — HD 155806 (O7.5Va), (b) — HD 143275 (O3IV), (c) — HD 108 (O4-8?p) и (d) — HD 15558 (O4.5III, PACWBs) тепловыми моделями (синие и оранжевые линии) с добавлением степенной компоненты (зеленые линии) в сравнении с наблюдаемыми спектрами (черные точки с барами ошибок).

объектам могут относиться звезды пекулярного подкласса O?p, имеющие сильное магнитное поле (порядка 1–20 кГс) и звезды-аналоги γ Cas, спектры которых анализируются в разделе 3.3.

Результаты моделирования показали, что из нашей выборки 101 ОВ-звезды у 60 в их рентгеновских спектрах, возможно, присутствует степенная компонента. Из этих 60 ОВ-звезд 26 оказались О-звездами, 13 из которых — магнитные, и 34 В-звезды (11 магнитных). Среди звезд со степенной составляющей рентгеновских спектров присутствуют как PACWBs-системы, так и O?p-звезды. Степенные компоненты O?p-звезд характеризуются спектральными индексами $\Gamma \sim 3$, а PACWBs-систем — индексами $\Gamma \sim 2-3$. У ОВ-звезд с высоким спектральными индексами $\Gamma > 3$ вклад степенной компоненты мал, и, как показано в работе Rysraeva and Kholtygin (2019a), их рентгеновские спектры могут быть описаны только тепловыми моделями.

Для всех изученных ОВ-звезд численным интегрированием была рассчитана доля F вклада сте-

пенной компоненты рентгеновского излучения в их полный рентгеновский поток $H_{[0.2; 8]} \text{ keV}$ в области [0.2; 8] кэВ :

$$F = \frac{H_{[0.2; 8]}^{\text{power}}}{H_{[0.2; 8]} \text{ keV}}, \quad (4)$$

где $H_{[0.2; 8]}^{\text{power}}$ — поток только степенной компоненты излучения в области [0.2; 8] кэВ. Объекты со значениями $F > 50\%$ выделены в таблице 2 курсивом. Оказалось при этом, что малость спектрального индекса, характерная для моделей Chen and White (1991) и Leto et al. (2017), не гарантирует того, что вклад степенной компоненты будет большим. В нашей выборке ОВ-звезд имеется двойная О-звезда HD 93205 и В-звезды HD 64760 и HD 79351, степенные составляющие в спектре которых характеризуются значениями $\Gamma \sim 1.5$. В то же время вклад степенной компоненты в полное рентгеновское излучение этих звезд составляет всего 5%.

Индикатором присутствия в рентгеновском спектре OB-звезд нетепловой компоненты может быть наличие у них синхротронного радиоизлучения, как отмечено Leto et al. (2017), которые анализировали рентгеновские и радионаблюдения B2-звезды HD 182180. В нашей выборке OB-звезд имеются объекты из обзора Benaglia (2010) горячих звезд, излучающих в радиодиапазоне. Это звезды HD 93129 (7%), HD 93250 (45%), HD 37468, HD 47839, HD 15558 (21%), HD 37479 (75%), HD 164794 (16%), HD 167971 (7%). В скобках указаны доли степенной компоненты рентгеновского излучения. По данным обзора Benaglia (2010), перечисленные звезды классифицированы как нетепловые радиоисточники. Следовательно, они могут иметь существенный вклад нетеплового рентгеновского излучения.

Результаты нашего анализа показали, что степенная компонента в спектрах этих звезд характеризуется спектральными индексами, превышающими 2. Названные звезды либо не имеют (HD 47839, HD 37468), либо имеют слишком малый вклад степенной компоненты в рентгеновском излучении (HD 167971), что ставит под сомнение выполнение гипотез Chen and White (1991) и Leto et al. (2017) для перечисленных звезд. Кроме того, мы проанализировали рентгеновские спектры звезд из обзора Benaglia (2010), которые отмечены в нем как тепловые радиоисточники: HD 37128, HD 47129, HD 24912, HD 166734, HD 210839, HD 108, HD 14947, HD 16691, HD 15570 и HD 66811. Из них только в спектрах HD 108 и HD 15570 удалось обнаружить степенные компоненты, составляющие соответственно 57% и 30% от полного рентгеновского потока. Спектральные индексы при этом оказались равными 2.9 и 4.3 соответственно.

Таким образом, можно сделать вывод, что анализ имеющихся в настоящее время данных показал отсутствие взаимосвязи между нетепловым радиоизлучением и степенным рентгеновским излучением OB-звезд, которое может быть нетепловым. Согласно гипотезе Chen and White (1991), такой строгой корреляции и не следует ожидать. Основная причина этого состоит в том, что процессы, приводящие к излучению в этих двух диапазонах спектра, должны протекать в разных областях звездного ветра.

Оптическая толщина звездного ветра для жесткой части рентгеновского излучения мала, поэтому можно предположить, что наблюдаемые рентгеновские фотоны нетепловой части рентгеновского спектра в основном исходят из области вблизи звездной фотосферы, хотя некоторые фотоны могут формироваться и на большем расстоянии.

С другой стороны, поскольку оптическая толщина по тормозному поглощению в ветрах на радиочастотах очень велика, синхротронное излучение в этой части спектра может приходиться только из области за пределами нескольких сотен звездных радиусов (White 1985). То есть наблюдаемое радиоизлучение полностью исходит из внешней области звездного ветра. Отметим, что Robrade (2016) также не обнаружил явной зависимости между радио и рентгеновскими светимостями для Ar/Vp-звезд и показал, что радиоизлучение горячих звезд коррелирует с параметрами звездного ветра.

Напротив, в рамках модели Leto et al. (2017) нетепловые электроны, сталкивающиеся со звездной поверхностью в области магнитных полюсов, формируют также и нетепловое радиоизлучение звезды. Такое излучение было обнаружено у звезд HD 182180 (Leto et al. 2017) и HD 142184 (Leto et al. 2018). Поэтому, исходя из анализа полученных нами результатов, можно утверждать, что степенная компонента рентгеновского излучения OB-звезд, вероятно, имеет нетепловую природу.

3.2. Исследование зависимостей характеристик нетеплового рентгеновского излучения от параметров звезд

У большинства OB-звезд рентгеновское излучение в области энергий больше 2 кэВ, в которой вклад нетепловой компоненты может быть существенным, довольно слабое (см., к примеру, рис. 1). По этой причине его трудно детектировать современными научными приборами. Для того чтобы изучить свойства возможной нетепловой компоненты излучения OB-звезд, мы исследовали зависимости характеристик величины F и Γ от температуры плазмы, жесткости спектра, терминальной скорости ветра, скорости потери массы, напряженности магнитного поля звезды и локальной лучевой концентрации водорода.

Поскольку считается, что у звезд с сильным магнитным полем формирование их рентгеновского излучения происходит главным образом в рамках модели MCWS, можно предположить, что у таких объектов вклад нетеплового излучения незначителен. Напротив, у слабомагнитных звезд, сильно излучающих в рентгене, нетепловое излучение может быть более значимым. Поэтому мы рассмотрели названные выше зависимости как для магнитных, так и слабомагнитных звезд.

Не все из указанных выше зависимостей оказались значимыми. В таблице 3 представлены коэффициенты корреляции и параметры аппроксимации для тех зависимостей, для которых хотя бы в одной из рассматриваемых групп OB-звезд уровни значимости $\alpha \leq 10^{-3}$. В столбце (1) указан тип

аппроксимации, во (2)–(4) столбцах — коэффициенты корреляции R , числа объектов N и уровни значимости α . В столбцах (5)–(6) приведены коэффициенты аппроксимаций. Значения α для найденных зависимостей определены согласно Taylor (1985).

Доля степенной компоненты F линейно возрастает со средней температурой плазмы $\langle kT \rangle$, причем эта зависимость для звезд с температурой плазмы выше 0.3 кэВ и долей степенной компоненты больше 15% характеризуется большим коэффициентом корреляции R . Линейная зависимость F от $\langle kT \rangle$ справедлива для Of?p-звезд, тогда как все из рассмотренных PACWBs-объектов имеют средние температуры плазмы 0.2–0.3 кэВ и не описываются той же линейной зависимостью, как другие OB-звезды, как видно на рис. 2а. При этом зависимости F от $\langle kT \rangle$ не различаются для магнитных и слабомагнитных звезд.

Зависимость спектрального индекса Γ от жесткости HR спектров OB-звезд иллюстрирует рис. 3. Эта зависимость является степенной с высоким коэффициентом корреляции для магнитных OB-звезд и для звезд спектрального класса V.

На рис. 4 сравниваются средние температуры плазмы, полученные при описании рентгеновского излучения только тепловыми моделями (ось абсцисс) с полученными при добавлении степенной компоненты (ось ординат). Видно, что у звезд с температурой плазмы ниже 0.5 кэВ добавление степенной компоненты существенно не меняет температуры тепловых компонент, и вклад степенной компоненты мал. Напротив, у звезд с более горячей плазмой добавление степенной компоненты может уменьшить и иногда увеличить температуру, а вклад возможного нетеплового излучения больше 50%.

Можно сделать вывод, что, если определяемая из анализа рентгеновского спектра звезды средняя температура горячей плазмы, получаемая при использовании только тепловых моделей свечения плазмы, превышает 1.5–2 кэВ, то данная звезда с большой вероятностью является источником нетеплового рентгеновского излучения. Наиболее ярко эффект понижения температуры при добавлении степенной компоненты выражен у звезд-аналогов γ Cas, рассматриваемых в следующем разделе.

3.3. Возможное нетепловое излучение аналогов γ Cas

Для звезд загадочного подкласса — аналогов γ Cas (Smith et al. 2016) — характерны аномально высокие температуры плазмы порядка 10–20 кэВ, если считать, что их рентгеновское излучение является полностью тепловым и переменено на временной шкале от минут до лет. В настоящей работе спектры аналогов γ Cas аппроксимировались

тепловыми моделями с добавлением степенного закона (таблица 2) и чисто тепловыми моделями (таблица 4, где во втором столбце приведены локальные или межзвездные значения N_H , в следующих столбцах — значения модельных параметров, в последнем столбце — величина χ^2 и число степеней свободы).

Примеры аппроксимаций спектров звезд-аналогов γ Cas чисто тепловыми моделями показаны на рис. 5. В этом случае были получены значения температуры плазмы вплоть до 29 кэВ. Если использовать стандартное выражение для температуры плазмы за фронтом ударной волны с высвечиванием (см., например, формулу (10) в статье *ud-Doula et al. (2014)*) и считать, что терминальные скорости звездного ветра у аналогов γ Cas примерно 1000–2500 км с⁻¹, то температура горячей плазмы в таких звездах не должна превышать 7.5 кэВ. Поэтому нельзя утверждать, что рентгеновское излучение звезд-аналогов γ Cas формируется только в горячей плазме, нагретой ударными волнами в звездном ветре (например, в модели MCWS). Более того, у аналогов γ Cas излучение в области спектра $E > 2$ кэВ значительно мощнее, чем у OB-звезд других типов. В то же время при моделировании рентгеновских спектров таких звезд тепловыми моделями с добавлением степенной компоненты температура тепловых компонент плазмы опускается до допустимых величин (см. рис. 4d), а спектральные индексы $\Gamma = 1-2$.

Доля нетепловой компоненты рентгеновского излучения аналогов γ Cas составляет 60–90% общего рентгеновского потока, а их рентгеновские светимости в жесткой части спектра — порядка 10^{32} эрг с⁻¹. Спектры всех аналогов γ Cas (кроме HD 110432) могут быть аппроксимированы только степенным законом, умноженным на модель поглощения излучения межзвездной средой. Результаты моделирования приведены в таблице 5, в которой во втором столбце указаны локальные или межзвездные лучевые концентрации водорода; спектральные индексы и амплитуды моделей даны в столбцах (3)–(4) соответственно. Параметр χ^2 и количество степеней свободы приведены в столбце (5).

Полученные результаты дают основание предположить, что аналоги γ Cas являются источниками мощного нетеплового рентгеновского излучения, формирующегося, вероятно, в результате обратного комптоновского рассеяния фотосферного излучения на электронах высоких энергий в рамках модели Chen and White (1991). Так как ни у одной звезды-аналога γ Cas не измерено магнитное поле и ни одна из рассмотренных звезд-аналогов γ Cas не была обнаружена в радиодиапазоне, то нет оснований считать их нетепловое рентгеновское

Таблица 3. Зависимости доли F степенной компоненты рентгеновского излучения (в %) от средней температуры плазмы $\langle kT \rangle$ и жесткости спектров HR , а также спектрального индекса Γ от HR

Аппроксимация	R	N	α	A	B, β
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Все OB-звезды					
$F = A + B \times \langle kT \rangle$	0.67 ± 0.01	49	5×10^{-4}	12.72 ± 2.51	51.55 ± 70.94
$F^* = A + B \times \langle kT \rangle$	0.83 ± 0.01	28	5×10^{-4}	5.05 ± 4.30	63.75 ± 73.73
$\Gamma = A \times HR^\beta$	-0.49 ± 0.18	54	5×10^{-4}	1.88 ± 0.72	-0.36 ± 0.08
Магнитные OB-звезды					
$\Gamma = A \times HR^\beta$	-0.71 ± 0.06	23	0.001	2.12 ± 0.58	-0.36 ± 0.08
Немагнитные OB-звезды					
$\Gamma = A \times HR^\beta$	-0.49 ± 0.14	31	0.11	1.60 ± 0.93	-0.53 ± 0.23
O-звезды					
$\Gamma = A \times HR^\beta$	-0.17 ± 0.27	25	0.68	0.43 ± 0.06	-0.02 ± 0.21
B-звезды					
$\Gamma = A \times HR^\beta$	-0.60 ± 0.14	29	0.005	1.68 ± 0.79	-0.51 ± 0.17

* — при $F > 15\%$ и $\langle kT \rangle > 0.3$ keV;

** — при $F > 15\%$

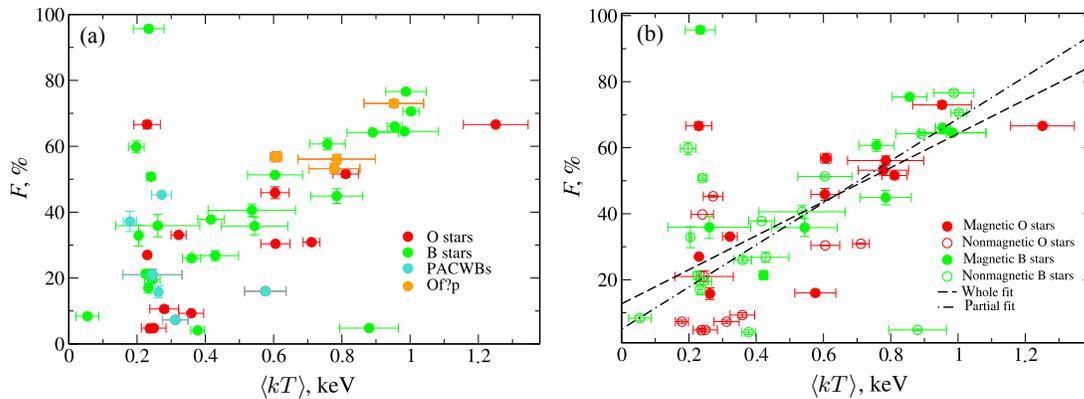


Рис. 2. Зависимость доли степенного излучения в спектрах OB-звезд от средней температуры плазмы для разных подклассов OB-звезд (a) и для магнитных и слабоманитных OB-звезд (b), звезды-аналоги γ Cas не включены из-за их высоких температур. Штриховой линией показана аппроксимация всей зависимости, штрихпунктирной — зависимости для звезд с $F > 15\%$ и $\langle kT \rangle > 0.3$ кэВ (см. таблицу 3).

излучение авроральным в рамках модели Leto et al. (2017).

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование показало, что рентгеновские спектры Of?p-звезд, PACWBs, звезд-аналогов γ Cas и многих типичных OB-звезд могут

быть описаны тепловыми моделями с добавлением степенной компоненты.

Критерием присутствия нетепловой компоненты рентгеновского излучения является значительная доля степенной компоненты в рентгеновском спектре звезды. Как видно на рис. 5, у аналогов γ Cas вклад степенной компоненты рентгеновского спектра практически для всех энергий превышает вклад тепловых компонент, что является дополни-

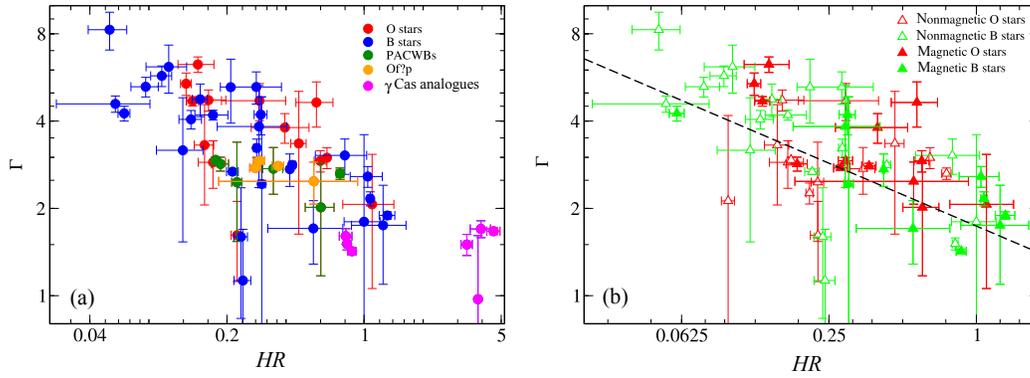


Рис. 3. Зависимость спектрального индекса от жесткости спектров для разных подклассов ОВ-звезд (а) и для магнитных и слабомагнитных ОВ-звезд (б). Аппроксимация зависимости показана штриховой линией.

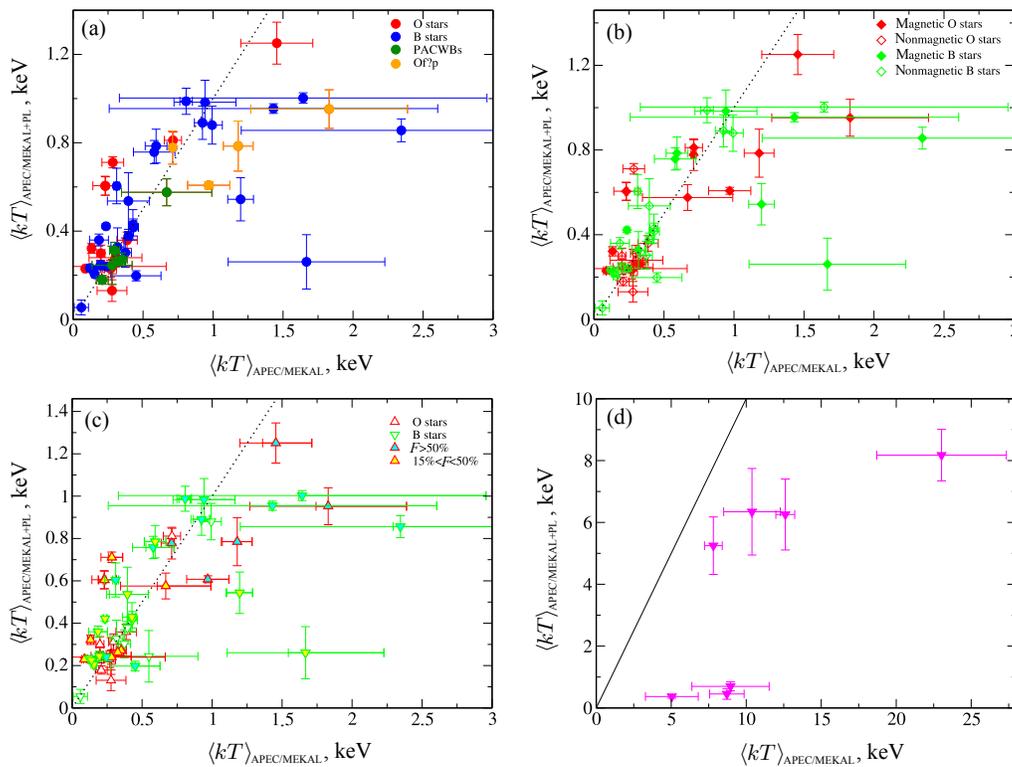


Рис. 4. Сравнение температуры плазмы ОВ-звезд, полученной из моделирования спектров с добавлением степенного закона (APEC/MEKAL+PL) и без него (APEC/MEKAL) для разных подклассов ОВ-звезд (а), для магнитных и слабомагнитных ОВ-звезд (б), для ОВ-звезд с разной долей степенного излучения (с) (отмечены символами разных цветов) и для аналогов γ Cas (д).

тельным свидетельством присутствия нетепловой компоненты в их рентгеновском излучении.

У двойных систем со сталкивающимися звездными ветрами вклад степенной компоненты превышает вклады тепловых компонент в области энергий $E > 2$ кэВ, что также указывает на наличие нетепловой компоненты. У Of?p-звезд вклад степенной компоненты превышает вклады тепловых компонент и в жесткой, и в мягкой (0.2–0.5 кэВ)

частях спектра. У типичных ОВ-звезд вклад степенной компоненты может превышать долю тепловых компонент при малых (менее 2 кэВ) энергиях. Можно предположить, что не только жесткая, но и мягкая части рентгеновского излучения могут иметь нетепловую природу.

Для тестирования данного предположения необходим дополнительный анализ наблюдений ОВ-звезд в жестком рентгеновском, оптическом и ультрафиолетовом диапазонах и расширение

Таблица 4. Результаты аппроксимации спектров звезд-аналогов γ Cas тепловыми моделями

Star	N_{H} , 10^{22} cm^{-2}	kT_1 , keV	$norm_1$, 10^{-4}	kT_2 , keV	$norm_2$, 10^{-4}	kT_3 , keV	$norm_3$, 10^{-4}	Abundance, solar un.	χ^2 (d.o.f.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
HD 45314	≤ 0.69	$9.83^{+1.23}_{-2.29}$	$7.53^{+0.42}_{-0.22}$	$0.48^{+0.06}_{-0.06}$	$5.78^{+3.16}_{-3.16}$			$0.37^{+0.14}_{-0.14}$	1.21 (451)
HD 110432 [†]	$0.214^{+0.004}_{-0.004}$	$0.81^{+0.03}_{-0.03}$	$1.16^{+0.16}_{-0.14}$	29^{+4}_{-4}	$54.7^{+2.3}_{-2.4}$	$4.70^{+0.47}_{-0.51}$	17^{+3}_{-3}	$0.84^{+0.08}_{-0.08}$	1.45 (485)
HD 119832 [†]	$0.17^{+0.01}_{-0.01}$	$0.97^{+0.21}_{-0.28}$	$0.21^{+0.13}_{-0.96}$	$8.79^{+1.30}_{-0.94}$	$6.59^{+0.27}_{-0.26}$			$0.52^{+0.17}_{-0.15}$	1.11 (464)
HD 157832	≤ 0.004	$1.07^{+0.23}_{-0.12}$	$0.44^{+0.39}_{-0.16}$	$10.13^{+2.47}_{-1.29}$	$15.03^{+0.75}_{-0.75}$			$0.94^{+0.29}_{-0.27}$	0.93 (445)
HD 161103 [†]	$0.35^{+0.02}_{-0.02}$	$0.91^{+0.08}_{-0.12}$	$0.33^{+0.11}_{-0.87}$	$8.07^{+0.59}_{-0.57}$	$8.50^{+0.29}_{-0.29}$			$0.91^{+0.14}_{-0.14}$	1.01 (474)
HD 212571	$0.065^{+0.004}_{-0.004}$	$1.31^{+0.07}_{-0.08}$	$2.35^{+0.52}_{-0.51}$	$12.99^{+0.64}_{-0.61}$	65^{+1}_{-1}			$0.46^{+0.05}_{-0.05}$	1.17 (488)
SAO 49725 [†]	$0.38^{+0.09}_{-0.06}$	$8.97^{+3.13}_{-1.97}$	$4.92^{+0.46}_{-0.43}$	$0.99^{+0.51}_{-0.23}$	$0.28^{+0.36}_{-0.17}$			$0.78^{+0.42}_{-0.35}$	0.97 (370)

[†] — спектры этих звезд не удалось описать моделями со свободным параметром N_{H} , эта величина была фиксирована;

[‡] — звезды с нулевым или не определенным избытком цвета, указанные для них значения N_{H} являются межзвездными.

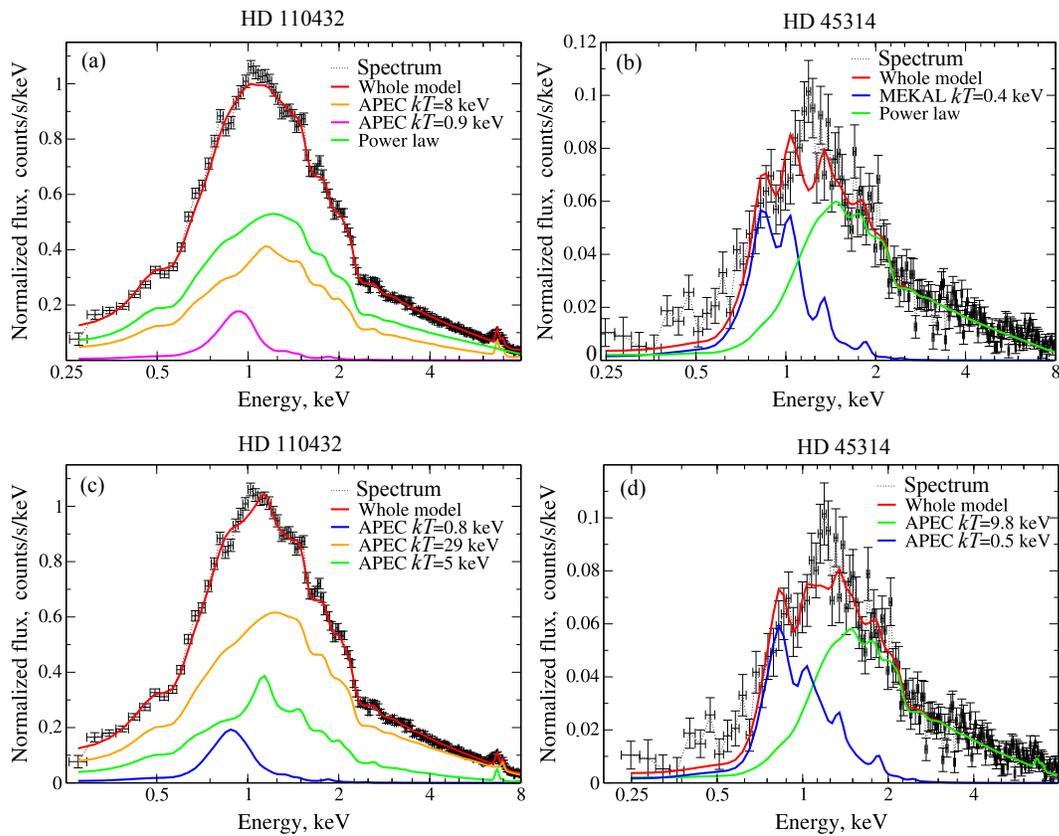


Рис. 5. (a), (b): аппроксимации (красные линии) спектров звезд-аналогов γ Cas тепловыми моделями с добавлением степенной компоненты (зеленые линии) в сравнении с наблюдаемыми спектрами (черные точки с барями ошибок). (c), (d): то же, что на рисунках (a) и (b), но с аппроксимацией только тепловыми моделями.

Таблица 5. Результаты аппроксимации спектров звезд-аналогов γ Cas одним степенным законом

Star	N_H , 10^{22} cm^{-2}	Γ	$norm$ 10^{-4}	χ^2 (d.o.f.)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
HD 45314	$0.092^{+0.029}_{-0.027}$	$1.50^{+0.06}_{-0.06}$	$1.71^{+0.13}_{-0.12}$	1.14 (454)
HD 119682 [‡]	$0.227^{+0.016}_{-0.015}$	$1.72^{+0.05}_{-0.05}$	$2.12^{+0.11}_{-0.10}$	1.27 (469)
HD 157832	$0.014^{+0.02}_{-0.02}$	$1.61^{+0.06}_{-0.05}$	$4.69^{+0.28}_{-0.27}$	1.04 (448)
HD 161103 [‡]	$0.356^{+0.016}_{-0.015}$	$1.70^{+0.04}_{-0.04}$	$2.83^{+0.13}_{-0.12}$	1.49 (480)
HD 212571	$0.101^{+0.005}_{-0.005}$	$1.57^{+0.01}_{-0.01}$	$17.89^{+0.24}_{-0.24}$	1.74 (491)
SAO 49725 [‡]	$0.367^{+0.05}_{-0.05}$	$1.67^{+0.11}_{-0.11}$	$1.57^{+0.21}_{-0.18}$	1.02 (373)

[‡] — звезды, у которых показатель цвета $E(B - V) = 0$ или не определен; для них указаны межзвездные значения N_H .

объема выборки анализируемых звезд. Как важный этап решения этой задачи запланированы оптические наблюдения звезд типа γ Cas HD 45314 и SAO 49725 в первом полугодии 2020 г. на БТА.

Исходя из выполненного нами анализа рентгеновских спектров ОБ-звезд можно сделать следующие выводы:

У всех ОБ-звезд (кроме PACWBs) с высокой средней температурой плазмы $\langle kT \rangle$ вклад возможного нетеплового излучения существенен и возрастает линейно с увеличением температуры. Особенно сильно эта зависимость выражена для звезд с $\langle kT \rangle > 0.3$ кэВ и долей вклада степенной компоненты рентгеновского излучения больше 15%.

С увеличением жесткости HR рентгеновских спектров спектральный индекс Γ возможного нетеплового излучения уменьшается по степенному закону. Эта зависимость лучше всего выражена у магнитных ОБ-звезд. При этом спектральный индекс и жесткость не коррелируют с долей нетеплового излучения F . Поэтому спектральный индекс определяется, по-видимому, только механизмом генерации нетеплового излучения.

Анализ имеющихся данных не показал зависимости между скоростью истечения вещества ОБ-звезд, напряженностью их магнитных полей и характеристиками возможного нетеплового рентгеновского излучения. Возможно, что модель аврорального нетеплового излучения Leto et al. (2017) справедлива только для звезд с сильными магнитными полями порядка 10 кГс, а модель Chen and White (1991) описывает нетепловое излучение звезд-аналогов γ Cas и слабомагнитных ОБ-звезд.

Жесткая часть рентгеновского спектра звезд-аналогов γ Cas и даже весь спектр в области энергий больше 2 кэВ могут быть описаны степенным законом со спектральным индексом 1.5–2.

В рентгеновском излучении ряда систем PACWBs существенен вклад степенной компоненты с $\Gamma \sim 1-3$. Его доля в полном рентгеновском излучении звезд достигает 45%. Максимальные температуры горячей плазмы при добавлении к рентгеновскому спектру степенной компоненты уменьшаются примерно с 2 кэВ до менее чем 1 кэВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность рецензенту за замечания, способствующие улучшению текста статьи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Настоящее исследование выполнено с поддержкой грантом РФФИ № 19-02-00311 А.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. E. Anders, N. Grevesse, Geochim. Cosmochim. Acta **53**, 197 (1989).
2. J. Babel, T. Montmerle, Astron. and Astrophys. **323**, 121 (1997).

3. P. Benaglia, ASP Conf. Ser. **422**, 111 (2010).
4. W. Chen, R. White, *Astrophys. J.* **366**, 512 (1991).
5. M. De Becker, F. Raucq, *Astron. and Astrophys.* **558**, id. A28 (2013).
6. M. De Becker, M. V. del Valle, G. E. Romero, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471**, 4452 (2017).
7. S. B. Gudennavar, S. G. Bubbly, K. Preethi, and J. Murthy, *Astrophys. J. Suppl.* **199**, 8 (2012).
8. P. Leto, C. Trigilio, L. Oskinova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **467**, 2820 (2017).
9. P. Leto, C. Trigilio, L. M. Oskinova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476**, 562 (2018).
10. D. A. Liedahl, A. L. Osterheld, and W. H. Goldstein, *Astrophys. J.* **438**, L115 (1995).
11. K. Mewe, E. H. B. M. Gronenschild, and G. H. J. van der Oord, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **62**, 197 (1985).
12. K. Mewe, J. R. Lemen, and G. H. J. van der Oord, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **65**, 511 (1986).
13. R. Morrison, D. McCammon, *Astrophys. J.* **270**, 119 (1983).
14. Y. Naze, V. Petit, M. Rinbran, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **215**, 10 (2014).
15. A. M. T. Pollock, *Astron. and Astrophys.* **171**, 135 (1987).
16. A. M. T. Pollock, *Proc. IAU Symp. No. 143*, 102 (1991).
17. J. Robrade, arXiv:1601.04959v1 (2016).
18. E. Ryspaeva, A. Kholtygin, *Research Astron. Astrophys.* **18**, 104 (2018).
19. E. Ryspaeva, A. Kholtygin, *Research Astron. Astrophys.* **19**, 120 (2019).
20. E. Ryspaeva, A. Kholtygin, *Research Astron. Astrophys.* **19**, 2019 (in press).
21. R. K. Smith, N. S. Brickhouse, D. A. Liedahl, and J. C. Raymond, *Astrophys. J.* **556**, L91 (2001).
22. M. A. Smith, R. Lopes de Oliveira, and C. Motch, *Advanced Space Research*, **58**, 782 (2016).
23. J. R. Taylor, *An Introduction to Error Analysis* (Univ. Sci. Books, Mill Valley, 1982).
24. A. ud-Doula, S. Owocky, R. Townsend, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **441**, 3600 (2014).
25. R. L. White, *Astrophys. J.* **289**, 698 (1985).
26. J. Wilms, A. Allen, and R. McCray, *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
27. S. Zhekov, F. Palla, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **382**, 1124 (2007).

Contribution of a Non-Thermal Component to the X-Ray Emission of OB Stars

E. B. Ryspaeva and A. F. Kholtygin

In the paper the possibility of the presence of a non-thermal component described by a power-law spectrum in the X-ray spectra of OB stars is investigated. The low-resolution spectra of 101 OB stars obtained using the EPIC camera on the XMM satellite are analyzed. It is concluded that the contribution of the non-thermal component of X-ray emission can be significant and even determining for the stars similar to γ Cas. The inclusion of the nonthermal component in the model X-ray spectra reduces the temperature of the thermal components of the X-ray plasma of such stars down to typical for OB stars values. The contribution of the nonthermal component can also be significant for binary stars with colliding stellar winds and for Of?p stars.

Keywords: *stars: X-ray*