

Всероссийская конференция с международным участием

Физика звёзд: теория и наблюдения

26-30 июня 2023 года

МГУ, ГАИШ

А.Ф. Холтыгин¹, Е.Б. Рыспаева^{1,2}, И.А. Якунин³, О.А Циопа⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет

²Крымская Астрофизическая обсерватория

³Специальная астрофизическая обсерватория

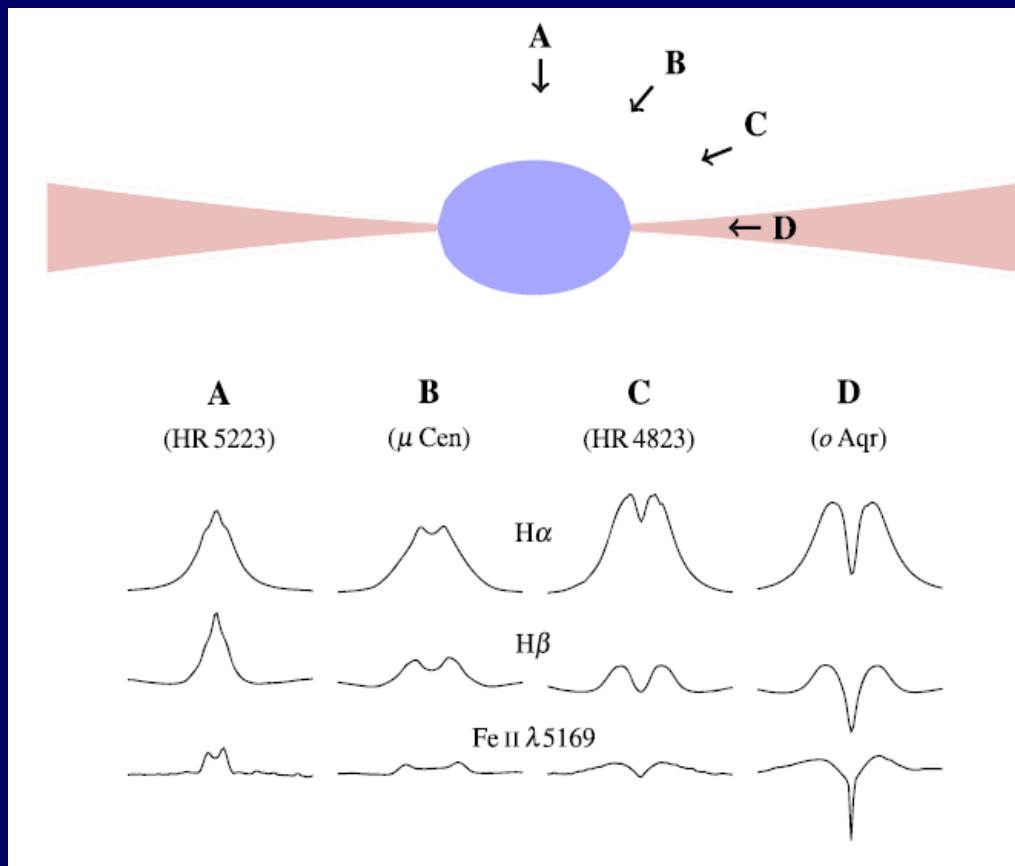
⁴Главная (Пулковская) обсерватория

Переменность оптических и рентгеновских спектров звезд типа γ Cassiopeia

Звезды типа γ Cas

Звезды типа γ Cas – подкласс (1%) Be звезд

Be звезды делятся на 2 группы: **классические Be звезды** и **Be звезды Хербига** (звезды на стадии эволюции до главной последовательности)



Профили линий в спектрах Be звезд (Rivinius et al. 2013, A&AR, 21, id 69)

Механизм формирования декреционных дисков не до конца известен. Многие модели их образования требуют наличия магнитного поля. В то же время ни у одной **Be звезды** магнитное поле не обнаружено

Магнитное поле с $B \geq 10$ Гс разрушает декреционный диск (ud-Doula et al. 2018)

γ Cassiopeia type stars (γ Cas analogs)

Оптические спектры звезд типа **gamma Cas** не отличаются от спектров других **Be звезд**. Звезды этого типа выделяются по их аномальному рентгеновскому спектру.

Характеристики звезд типа γ Cas (γ Cas analogs):

- 1) Звезды типа γ Cas — подкласс Be/Oe звезд;
- 2) Рентгеновская светимость L_x - 10^{31} - 10^{33} эрг/с;
- 3) Температура плазмы звезд типа γ Cas type достигает 10-20 кэВ или более, предполагая, что рентгеновское излучение полностью тепловое;
- 4) Жесткость рентгеновского спектра звезд типа γ Cas (отношение потоков в жесткой и мягкой части рентгеновского спектра) превышает 50%.;
- 5) Рентгеновское излучение переменное на шкалах времени вплоть до минут.

К настоящему времени известно 25 звезд типа **γ Cas** и 2 кандидата. **16** звезд этого типа **могут** наблюдаться в России ($\delta > -10^\circ$)

Spectra of γ Cas type stars obtained during the Large Programs for Looking for superfast Variability of OBA Stars: 9 stars/6350 spectra

Star	Sp.Type	V	N _{sp}	Exp (s)	Telescope	Spectrograph	Dates	Total # of spectra
γ Cas	B0.5IVpe	2.39	150	60	6-m BTA	MSS	04.11.2020	4324
			138	60	6-m BTA	MSS	1-2.2.2021	
			1576	2	1.25-m ZTE	A-sp	13-14.9.2020	
			2460	1.5	1.25-m ZTE	A-sp	7-8. 9.2021	
HD 45314	O9:npe	6.64	20	600	6-m BTA	MSS	5-8.1.2020	20
SAO 49725	B0.5III/IVe	9.27	432	5	6-m BTA	SCORPIO	17-18.08.2021	432
ζ Tau	B1IVe	3.03	51	120	6-m BTA	MSS	12.01.2023	51
π Aqr	B1III-IVe	4.64	1250	5	1.25-m ZTE	A-sp	10.10.2021	1250
V ²¹⁵⁶ Cyg	B1.5Ve	8.91	7	20	6-m BTA	SCORPIO	18.08.2021	7
HD 45995	B1.5Vne	6.14	208	30	1.25-m ZTE	A-sp	10.10.2021	225
			17	300	1.25-m ZTE	MSS	12.01.2023	
V810 Cas	B2 D	8.59	12	600	6-m BTA	MSS	12.01.2023	12
V558 Lyr	B3Ve	6.34	29	180/300	6-m BTA	MSS	12.01.2023	29

An analysis of X-ray spectra of γ Cas type stars

The X-ray spectra in the range 0.2-8keV were extracted from the frames obtained by EPIC-camera of the XMM-Newton X-ray observatory. Next models are used for the X-ray spectra approximations:

APEC (Astrophysical Plasma Emission Code, Smith et al, 2001) and **MEKAL**(Mewe, Kaastra, Liedahl,1995) describe the stationary thermal radiation of a plasma in which atoms are ionized by electron impact.

PSHOCK (Borkowski et al, 2001) – Model of a shock wave in the plasma describing the non-stationary thermal X-ray radiation/ This model has an additional parameter, the ionization time.

PL(Power law) – the power component which is used to describe the possible non-thermal radiation

Parameters of the X-ray Spectra:

$$HR = \frac{H(2-8 \text{ keV})}{H(0.2-2 \text{ keV})}$$

A hardness of the X-ray spectra

$$F_{HR} = \frac{H(2-8 \text{ keV})}{H(0.2-8 \text{ keV})}$$

A fraction of the hard X-rays

$$F_{PL} = \frac{H_{PL}(0.2-8\text{keV})}{H(0.2-8\text{keV})}$$

A fraction of the PL component in the total model X-ray spectra

ДВОЙСТВЕННОСТЬ

γ Cas

$M_1=13-15 M_{\odot}$, $R_1=10 R_{\odot}$ $i=45^{\circ}$
 $M_2=0.98 M_{\odot}$ (F-G star)
 $d=188$ pc, $P_{orb}=203.1-203.7$ d

π Aqr

$M_1=11 \pm 1.5 M_{\odot}$, $R_1=6.1 \pm 2.5 R_{\odot}$ $i=70^{\circ}$
 $M_2=1.8 \pm 0.2 M_{\odot}$ (A-F star)
 $d=239$ pc, $P_{orb}=84.1$ d

**BZ Cru, $d=438$
pc, Be + WD?**

**HD 161103 $d=1270$ пк
A,B,C компоненты
 $1-5 M_{\odot}$, $R \sim 550-1550$ a.u**

Keck/NIRC2 vor-
tex coronagraph

Star	P, d	M (Be) (M_{\odot})	M_{comp} (M_{\odot})	i ($^{\circ}$)
V 782 Cas	122	9	0.6-07	60-90
HD 45995	103.1	10	1.0 ± 1	47
V 558 Lyr	83.3	8	0.7-0.8	60-90
SAO 49725	26.1	13	0.2-0.5	30-90
	137		0.4-0.7	30-90
V2156 Cyg	126.6	11	0.7-0.8	60-90
V810 Cas	75.8	12.5	0.7-0.8	60-90

**10 двойных
(кратных)
звезд/25 звезд
типа γ Cas**

Naze et al. MNRAS, 510, 2286 (2022)

09/21/22

Анализ спектральной переменности

$$F_i(\lambda) = F(\lambda, t = t_i)$$

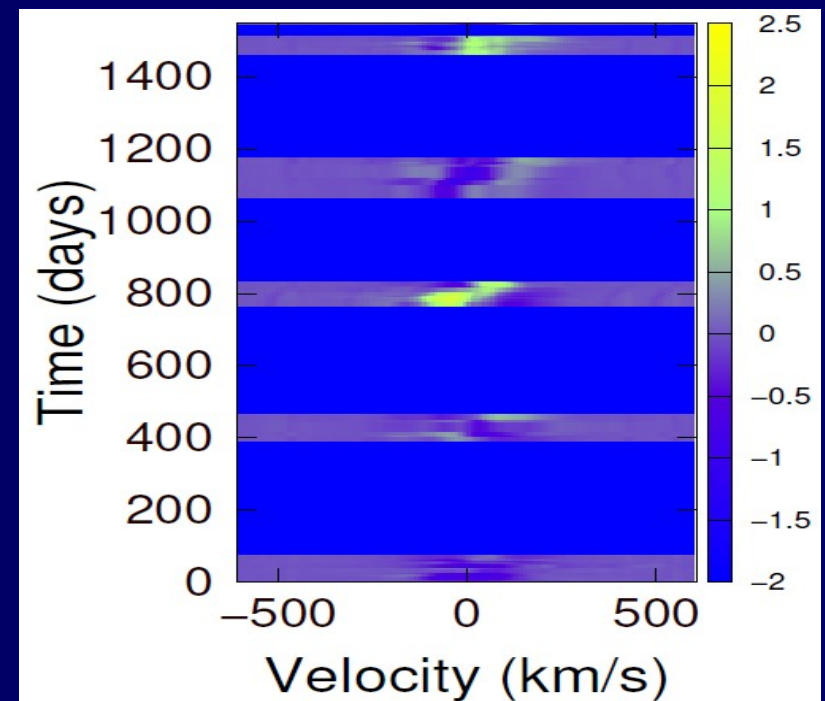
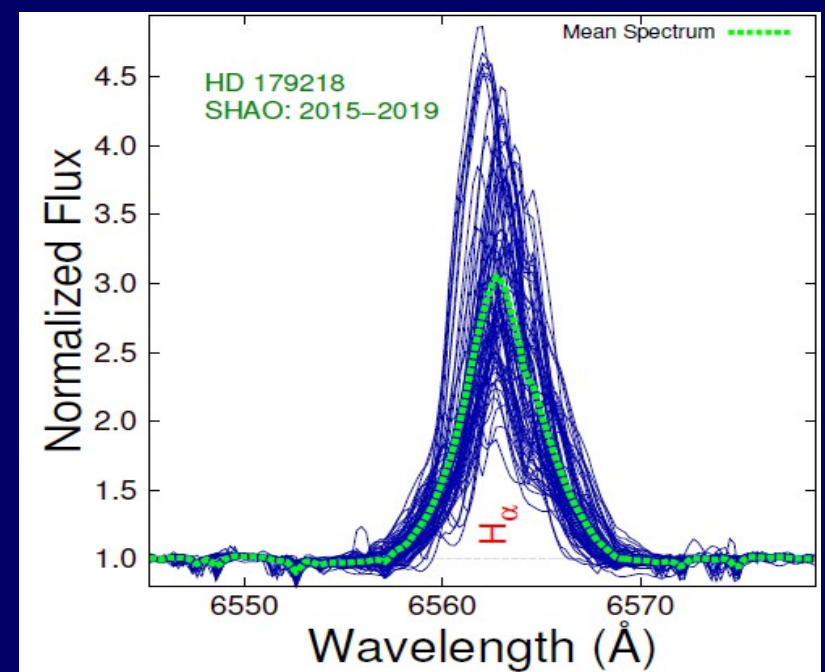
Нормированные профили, полученные в момент времени $t=t_i$

$$\overline{F(\lambda)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i(\lambda)$$

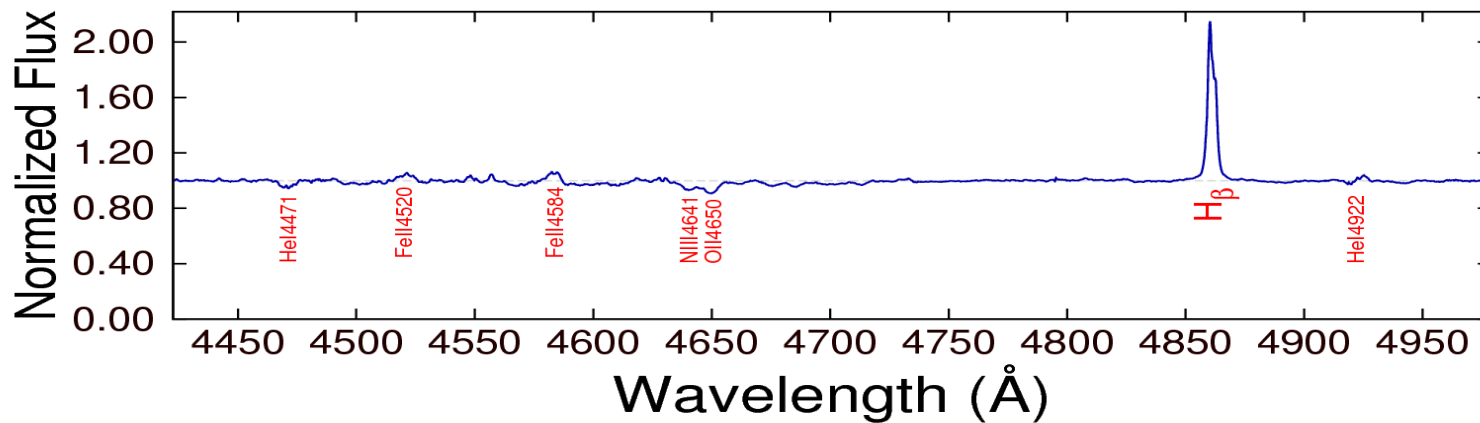
Средний профиль линии

$$d_i(\lambda) = d(\lambda, t_i) = F(\lambda, t_i) - \overline{F(\lambda)}$$

Разностный профиль $d_i(\lambda, t)$

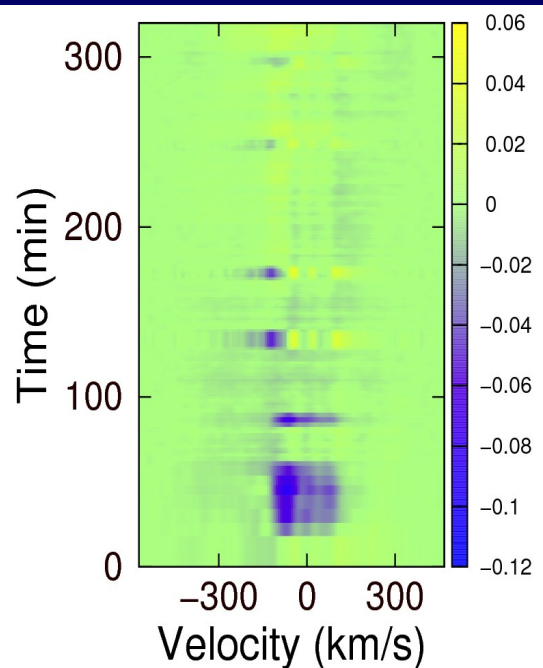
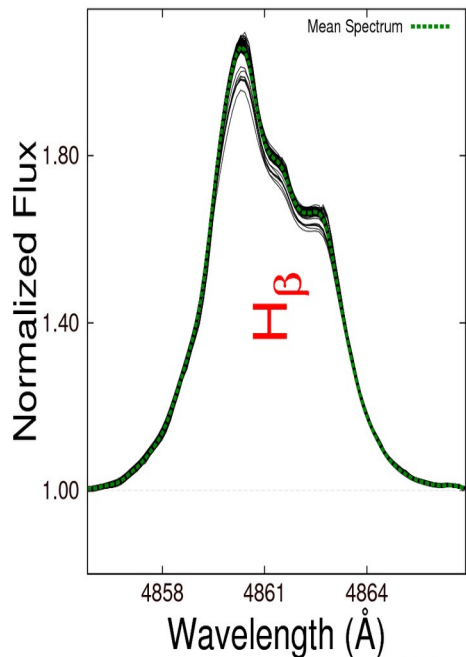


γ Cas – спектральная переменность



**BTA, Scorpio,
04.11.2020**

$P_{\text{rot}} = 1.215811 \pm$
0.000030 days



Clean Spectrum (H_{β}):

$P = 45.1 \pm 6.4$ min

$P = 59.3 \pm 11.0$ min

$P = 145.5 \pm 66.2$ min

$P = 188.3 \pm 110.8$ min

$P = 266.8 \pm 222.4$ min

$P = 291.1 \pm 264.8$ min

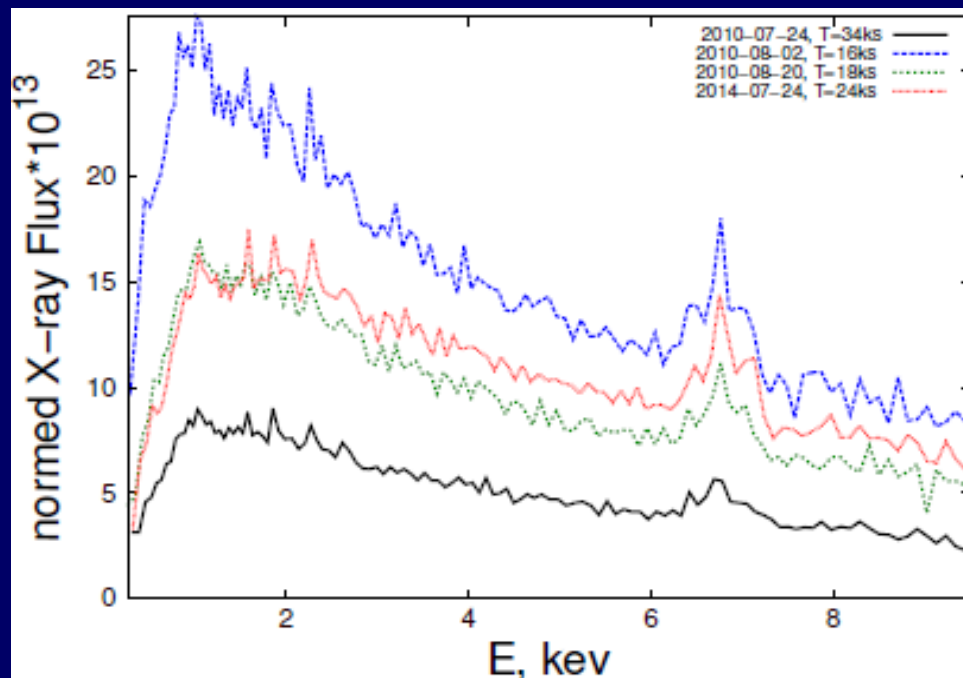
$T = 320.0403$ min
time resolution
 $\Delta T = 2-3$ min

09/21/22

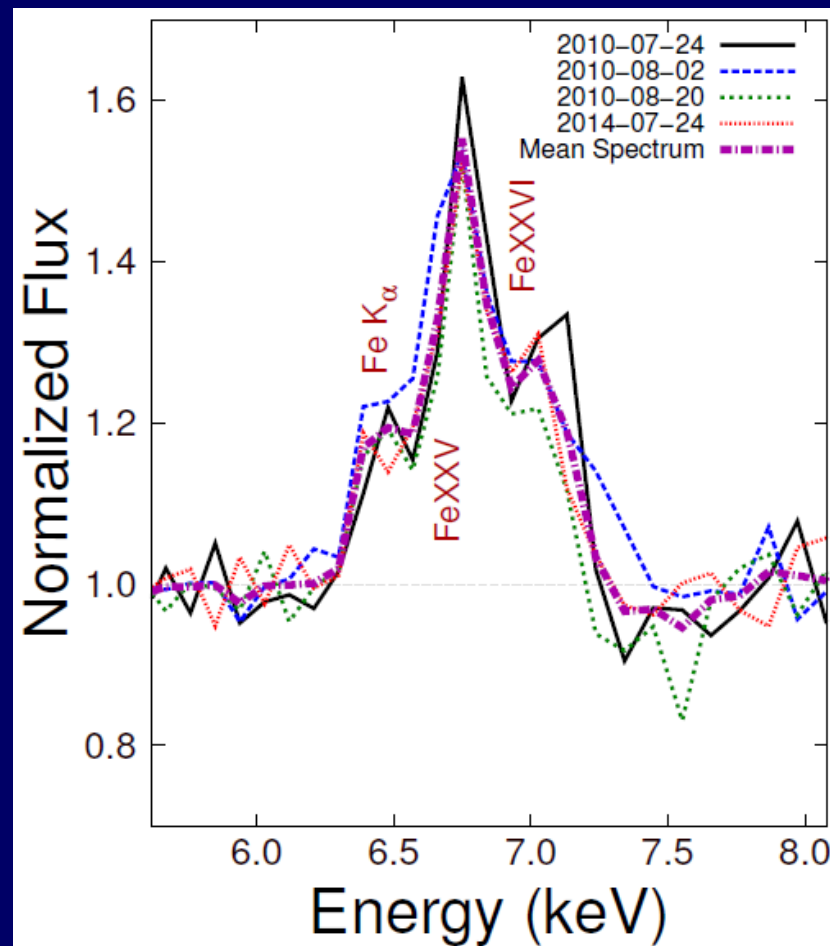
$P = 188.3 \pm 118$ min **$P(\text{TESS}) = 190$ min**

$P = 291.1 \pm 282$ min **$P(\text{TESS}) = 285$ min**

Переменность рентгеновских спектров звезд типа γ Cas



Рентгеновские спектры γ Cas в 2010 и 2014 гг.

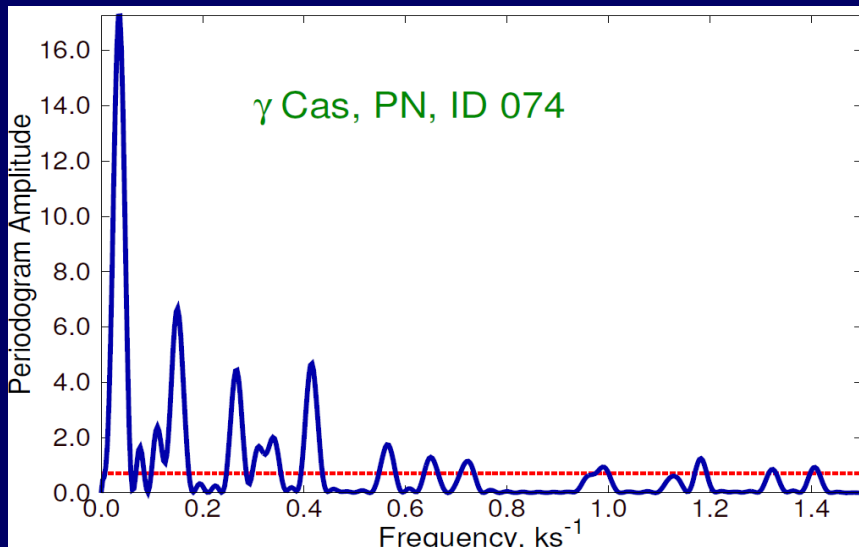
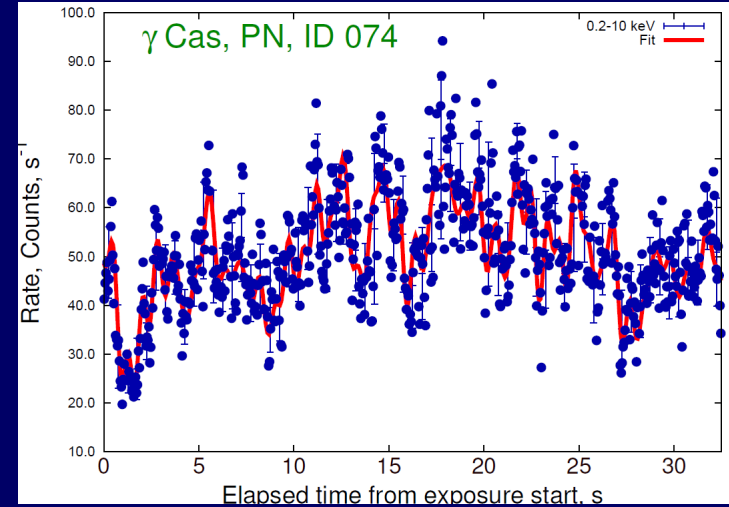
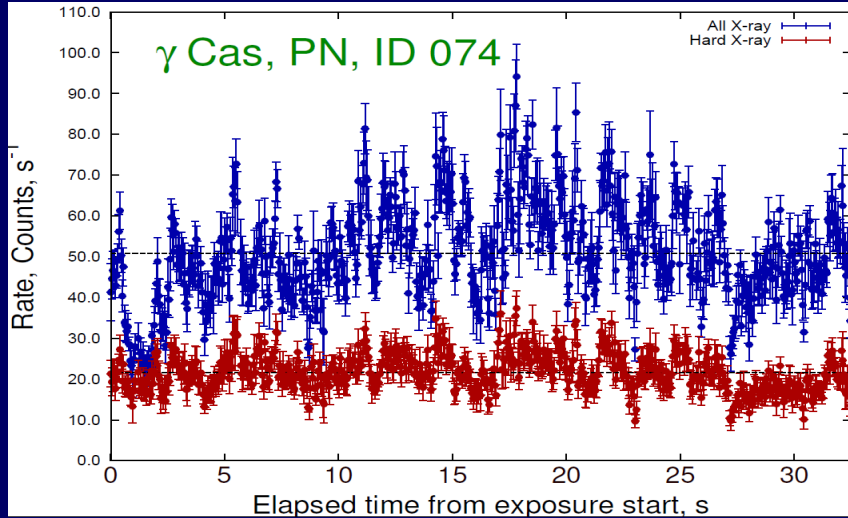


Переменность профиля рентгеновской детали на **6.7 кэВ**

$$E(\text{кэВ}) = \frac{12.39851}{\lambda(\text{А})}$$

γ Cas – переменность рентгеновского излучения (0.2-10 кэВ)

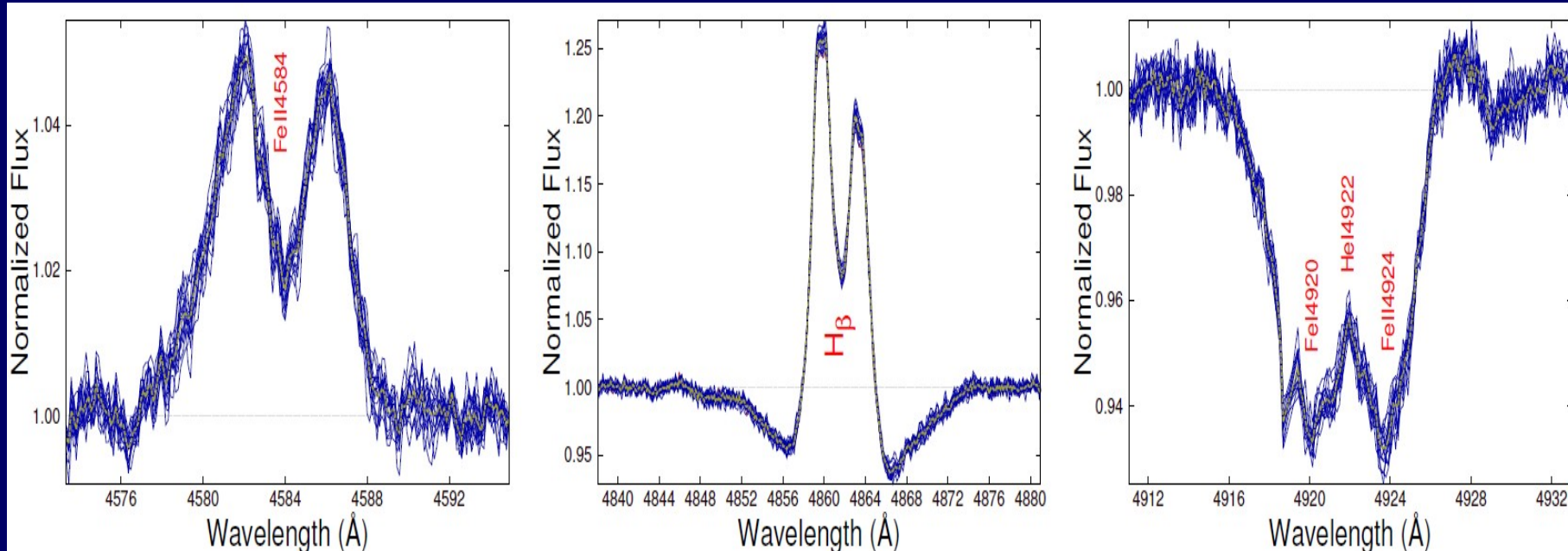
Observations: XMM: 24.07.2010, 2.08.2010, 20.08., **24.07.2010**



Periods, minutes $\alpha=10^{-3}$

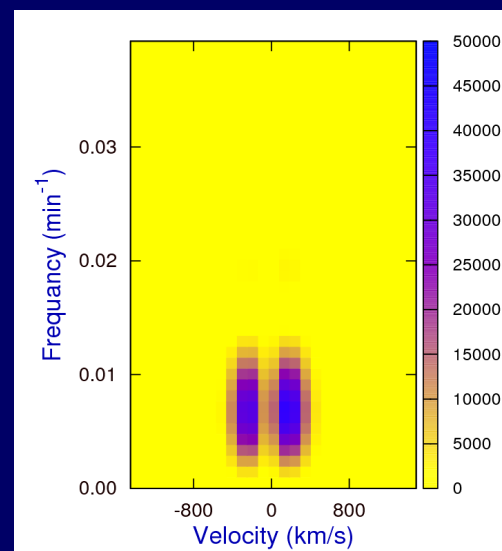
Opt	X-ray
183 ± 111	200 ± 74
59 ± 11	63 ± 7
45 ± 6	48 ± 4
19 ± 1	17 ± 1
10.7 ± 0.4	11.8 ± 0.3

The correspondence of the optical and x-ray periods



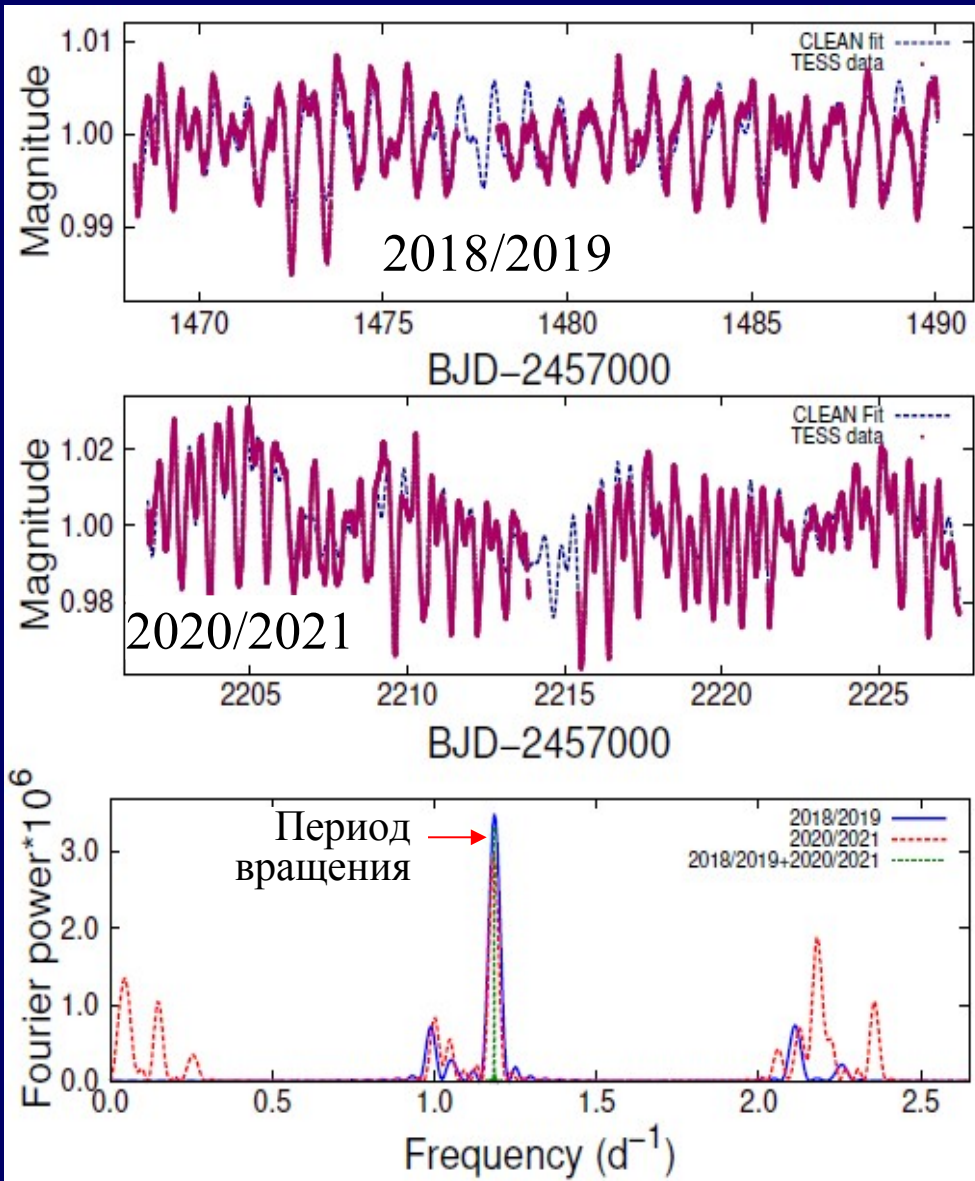
No. comp	P, min	α
1	37.3 ± 13.3	10^{-5}
2	87.5 ± 72.5	10^{-5}

Fourier spectra of LPVs in spectra of HD 45995



TESS фото- метрия

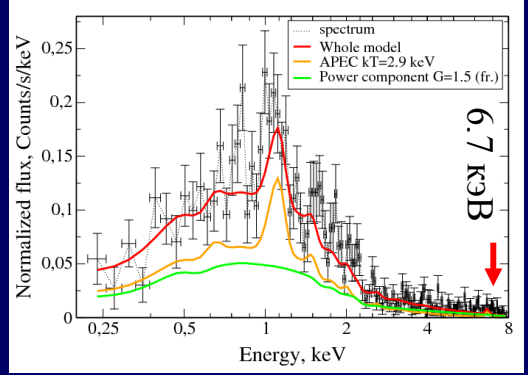
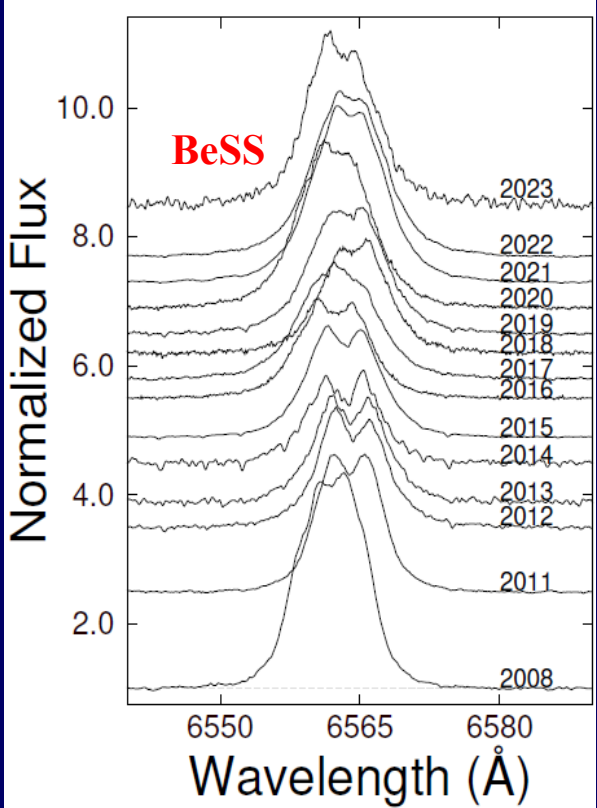
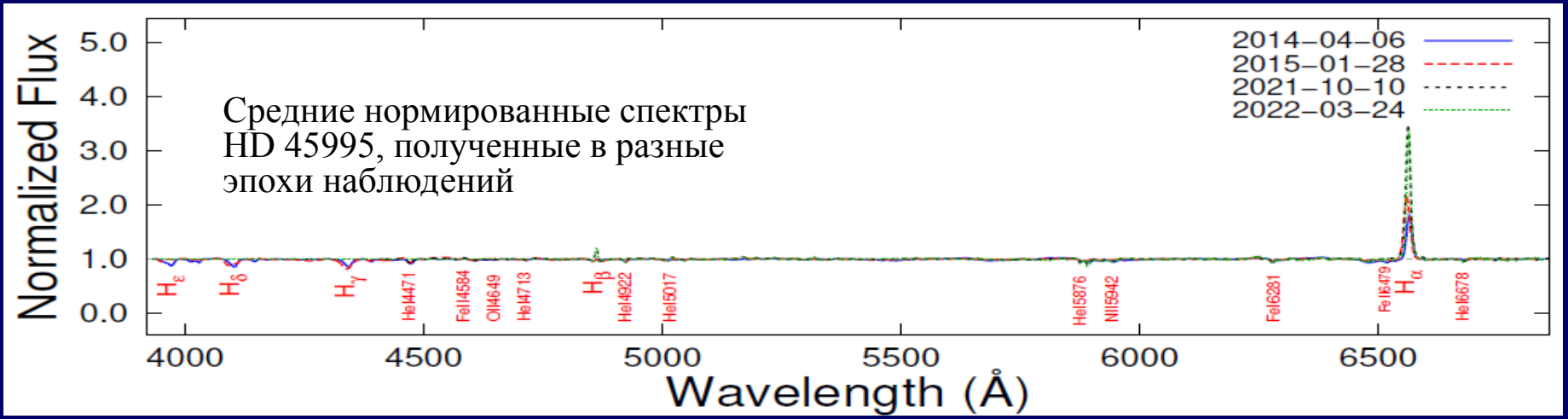
HD 45995



No	ν, d^{-1}	P, days
1	0.070	14.35±8.72
2	0.151	6.63±1.86
3	0.255	3.91±0.65
4	1.049	0.95±0.04
5	1.184	0.8443±0.0009
6	2.067	0.95±0.01
7	2.129	0.47±0.01
8	2.179	0.46±0.01
9	2.255	0.44±0.04

Периоды вариаций блеска по наблюдениям TESS различаются в разные эпохи (2018/2019 и 2020/2021)

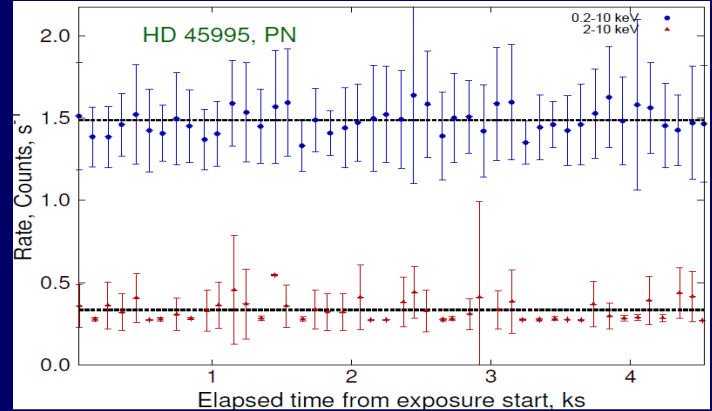
Кривые блеска TESS и Фурье-спектры вариаций блеска



Model	kT_1	kT_2	HR	F_{HR}
2*APEC	1.98	13.1	1.78	0.64
APEC + PL	2.94	G=1.5	$F_{PL}=0.45$	

Рентгеновский спектр HD 45995: модель APEC + PL компонент

Рентгеновская кривая блеска

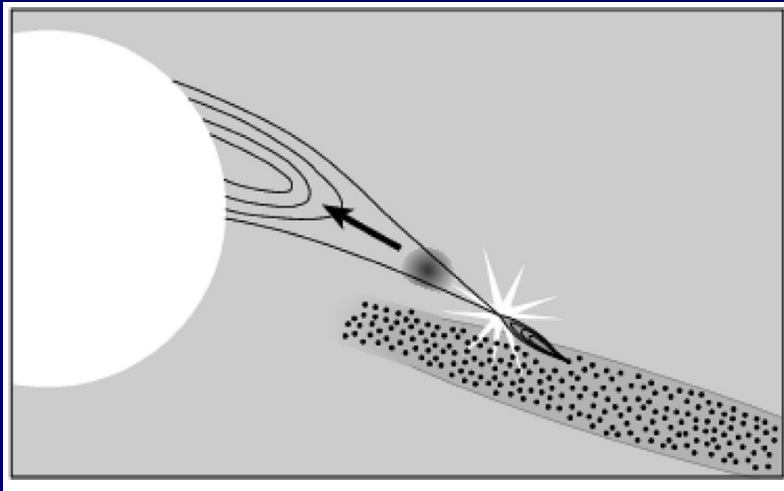


$P=48.5 \pm 0.5$ секунд

Генерация рентгеновского излучения звезд типа γ Cas

Механизмы:

- 1) Компактный компонент a) NS (Postnov et al., 2017) b) WD (Vieira et al. 2017)
- 2) Взаимодействие декреционного диска с локальными магнитными полями звезды (Smith et al. 2016)
- 3) Нетепловое излучение в результате обратного комптоновского рассеяния UV фотонов на релятивистских электронах: Chen & White (1991) model
- 4) Аналоги солнечных вспышек
- 5) Что-то еще неизвестное



Взаимодействие между системами магнитных петель звезды типа γ Cas и декреционного диска в экваториальной плоскости. Показаны потоки заряженных частиц, ускоренных в области перезамыкания магнитных силовых линий

Smith et al., AdvSpRes, 58 (2016)

09/21/22

Выводы

1. У всех звезд типа γ Cas обнаружена регулярная переменность профилей линий в оптической области спектра с периодами от минут до часов;
1. Обнаружена переменность рентгеновского блеска звезд типа γ Cas на шкалах времени вплоть до минут;
1. Периоды вариаций профилей линий оптического спектра звезд типа γ Cas соответствуют периодам изменений их рентгеновского блеска;
1. Большой вклад жесткого рентгеновского излучения звезд типа γ Cas в области энергий **2-8 keV** может быть объяснен вкладом и теплового и нетеплового излучения (**40-90%**) в полный рентгеновский поток;
1. В фотометрических **TESS** кривых блеска обнаружены вариации с периодами от часов до дней, причем амплитуда и частота таких вариаций меняются в разные эпохи наблюдений

Спасибо за внимание

