

Моделирование вспышек в вязком аккреционном диске вокруг нейтронной звезды

Вспышка Aql X-1 2013 г.

Г. Липунова, К. Маланчев, С. Цыганков,
Н. Шакура, А. Тавлеев, Д. Колесников

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра 2021 (HEA-2021)

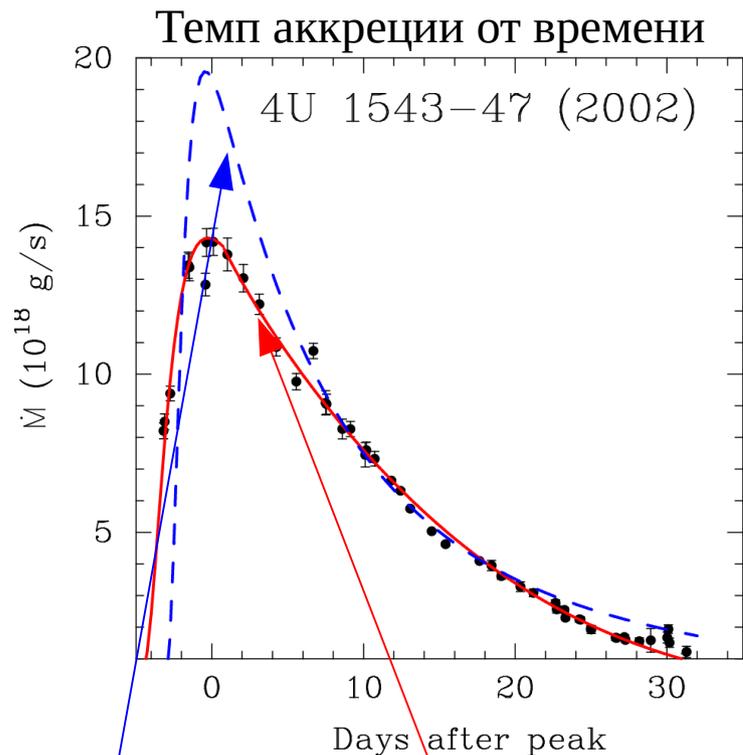


План

- Эволюция вязких дисков во время вспышек LMXB. Эволюция FREDDI с 2017 (ЧД) до 2021 (НЗ)
- Модель облученного вязкого диска вокруг замагниченной нейтронной звезды
- Вспышка AQL X-1 в 2013
- Результаты

Эволюция вязкого диска

Код **FREDDI** для численного расчета эволюции диска вокруг ЧД (Липунова и Маланчев 2017)



диск
постоянного
радиуса

диск
уменьшающегося
радиуса

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} \frac{(GM_{\star})^2}{h^3} \frac{\partial^2 F}{\partial h^2}$$

Уравнение вязкой диффузии

$$F = 2\pi W_r \varphi r^2 \quad \text{момент вязких сил}$$

$$h \equiv \sqrt{GM_{\star} r} \quad \text{удельный момент импульса}$$

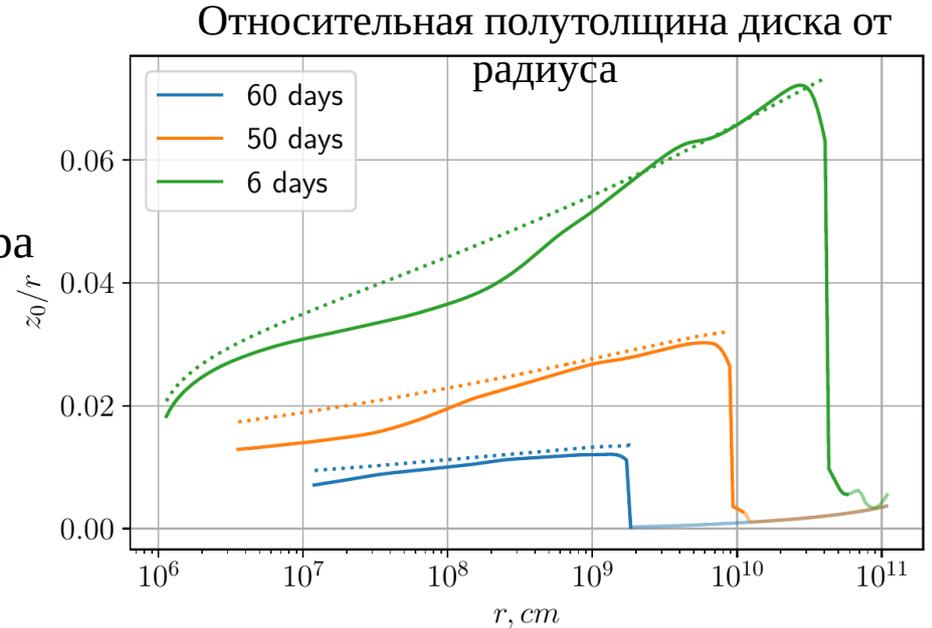
Эволюция вязкого диска

Поверхностная плотность Σ связывается с вязким моментом F через уравнения вертикальной структуры. Численное решение этих уравнений позволяет нам найти поправочные коэффициенты к степенным распределениям параметров в диске

$$W_{r\varphi} = \int_{-z_0}^{+z_0} \alpha P dz$$

Проинтегрированная по высоте компонента тензора вязких напряжений

$$F = 2\pi W_{r\varphi} r^2 \quad \text{момент вязких сил}$$



см. постер А. Тавлеева и др. "Моделирование вертикальной структуры аккреционных дисков вокруг нейтронных звезд и чёрных дыр" и [код для расчета вертикальной структуры](#)

Модель облученного вязкого диска вокруг замагниченной нейтронной звезды

- Взаимодействие диска с магнитосферой
- Облучение и внешний радиус диска
- Наблюдаемый поток от НЗ, диска и звезды-компаньона

Внутренний радиус диска

$$R_{\text{in}} = \xi_{\text{mag}} R_{\text{mag}} \quad R_{\text{mag}} \equiv \left(\frac{\mu^2}{\dot{M}_{\text{out}} \sqrt{G M_{\star}}} \right)^{2/7}$$

Оценки на ξ_{mag} в 1D моделях: 

0.5 (Ghosh & Lamb 1979),

0.3 – 1 (Chashkina et al. 2017),

< 1.5 и $\xi_{\text{mag}} = \xi_{\text{mag}}(\omega_s)$ (Kluźniak & Rappaport 2007). $\omega_s \equiv \omega_{\star}/\omega(R_{\text{in}})$

3D МГД расчеты 

$\xi_{\text{mag}} = 0.5$

$\xi_{\text{mag}} \sim \mathbf{0.4 - 0.5}$ (Long et al. 2005; Bessolaz et al. 2008)

Но другие степени, отличные от определения Альфвеновского радиуса, получаются у Kulkarni & Romanova (2013).

Момент сил на внутреннем крае диска

$$F_{\text{in}} = \kappa_{\text{td}} \frac{\mu^2}{R_{\text{in}}^3} \text{ for } R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$$

Снаружи от R_{cor} к диску приложен ускоряющий момент сил.

Внутри радиуса коротации диск тормозится

$$F_{\text{in}} = \kappa_{\text{t}} \frac{\mu^2}{R_{\text{cor}}^3} \text{ for } R_{\text{in}} < R_{\text{cor}}$$

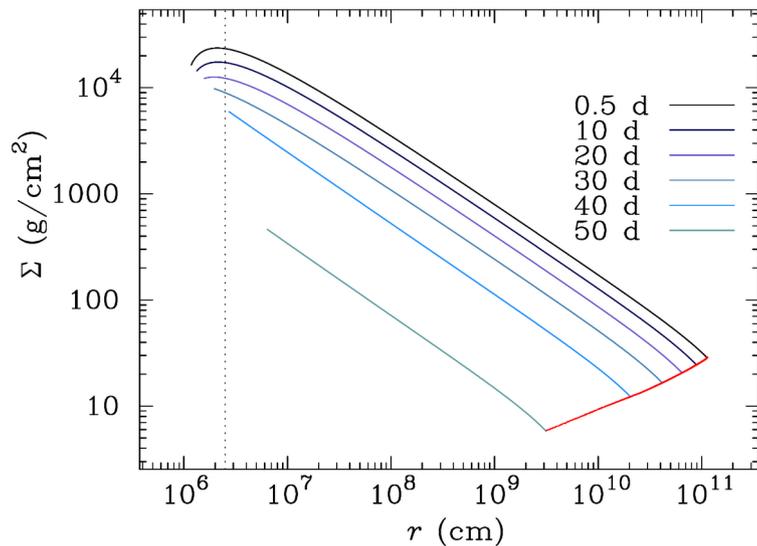
Davidson & Ostriker 1973; Lynden-Bell & Pringle 1974; Syunyaev & Shakura 1977; Lipunov 1992; Spruit & Taam 1993; Wang 1987, 1995; Armitage & Clarke 1996; Lai 1999; Matt & Pudritz 2005; Kluźniak & Rappaport 2007; and others...

Решение вязкого уравнения диффузии с учетом магнитных сил — постер А. Кузина и др.
"Эволюция аккреционного диска вокруг нейтронной звезды с наклоненной магнитной осью".

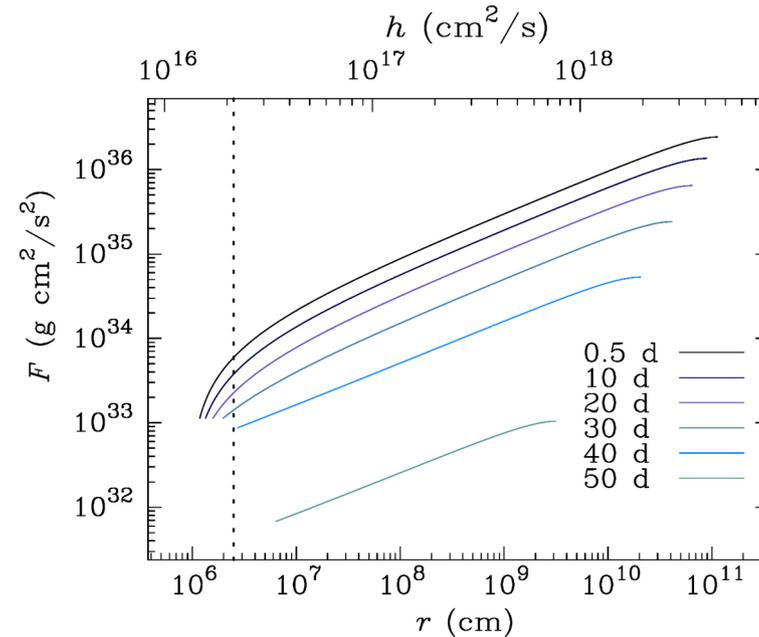
Эволюция диска вокруг нейтронной звезды

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{1}{4\pi} \frac{(GM_\star)^2}{h^3} \frac{\partial^2 F}{\partial h^2} \quad \longrightarrow$$

поверхностная плотность Σ



МОМЕНТ вязких сил $F = 2\pi W_r \varphi r^2$



Внешняя граница горячей зоны диска

$$Q_{\text{irr}} > Q_{\text{vis}}$$

горячая зона диска контролируется
облучением $\rightarrow T_{\text{irr}} = 10^4 \text{ K}$
Tuchman et al. 1990; King & Riter 1998;
Dubus et al. 1999

$$Q_{\text{vis}} > Q_{\text{irr}}$$

движение "холодного фронта"
Ludwig et al. 1994; Menou et al. 1999;
Dubus et al. 2001; Lasota 2001; Hameury
2020

$$\sigma T_{\text{vis}}^4 = \frac{3 (G M_{\star})^4 F}{8 \pi h^7}$$

собственный поток тепла диска

$$\sigma T_{\text{irr}}^4 = C_{\text{irr}} \frac{L_x}{4 \pi r^2}$$

термализованный рентгеновский поток

Облучение диска

Параметризация облучающего потока

$$Q_{\text{irr}} = C_{\text{irr}} \frac{L_x}{4 \pi r^2}$$

$$C_{\text{irr}} = (1 - A) \underbrace{\Psi(\theta)}_{\text{Альbedo}} \underbrace{\frac{z_0}{R} \left(\frac{d \ln z_0}{d \ln r} - 1 \right)}_{\text{косинус угла луча к нормали освещаемой им площадки}}$$

Диаграмма направленности центрального облучения (усредненная по времени)

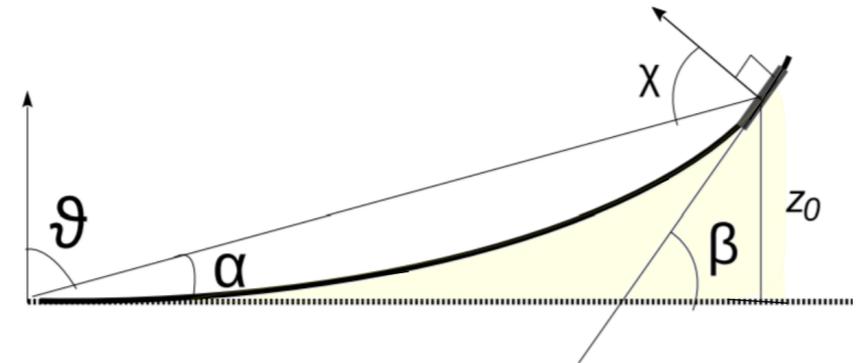
косинус угла луча к нормали освещаемой им площадки

$$C_{\text{irr}} = \tilde{C}_{\text{irr}} \left(\frac{z_0/r}{0.05} \right)^k \Psi(\theta),$$

Рентген от центральной звезды

$$\Psi(\theta) = 1$$

Обычно облучение звездой больше



$$k = 1;$$

Рентген от центра диска

$$\Psi(\theta) = 2 \cos(\theta) \approx 2 z_0/r$$

Наблюдаемый поток

Рентген

Диск, интенсивность

$$I_\nu = B_\nu(f_{\text{col}} T_{\text{eff}}) / f_{\text{col}}^4$$

учет электронного рассеяния в атмосфере диска

Сюняев и Шакура 1973, Taam & Meszaros 1987; Shimura & Takahara 1995; Davis et al. 2005

Нейтронная звезда, наблюдаемый поток

$$\mathcal{F}_{\nu, \star} = \frac{S_X}{4\pi d^2} \pi B_\nu(T_\star)$$

$$T_\star = [L_\star / (\sigma_{\text{SB}} S_X)]^{1/4}$$

Оптические диапазоны

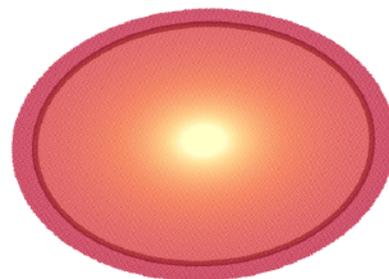
Van Paradijs, J. & McClintock, J. E. (1994)

Сулейманов, Липунова, Шакура (2008)

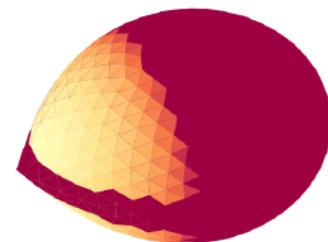
Ревнивцев, Золотухин, Мещеряков (2012)

термализованный рентгеновский поток

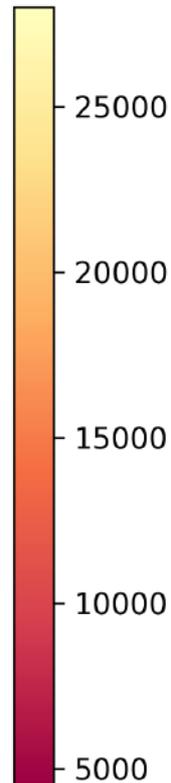
$$\sigma T_{\text{irr}}^4 = \frac{(1 - a_{\text{opt}})(L_{\text{disc}} \Psi(\theta) + L_\star)}{4\pi r^2} \cos \xi$$



$$T_{\text{eff}}^4 = T_{\text{irr}}^4 + T_{\text{vis}}^4$$



$$T_{\text{eff}}^4 = T_{\text{irr}}^4 + T_{\text{opt}}^4$$



Болометрическая светимость

Диск

$$L_{\text{disc}} = \left(F_{\text{in}} + \frac{\dot{M}_{\text{in}} h_{\text{in}}}{2} \right) \times \omega_{\text{in}}$$

Нейтронная звезда

$$L_{\star} = \frac{\dot{M}_{\star} G M_{\star}}{R_{\star}} \left(1 - \frac{R_{\star}}{R_{\text{in}}} \right) + \frac{\dot{M}_{\star} \omega_{\star}^2}{2} (R_{\star}^2 - R_{\text{in}}^2) + \frac{\dot{M}_{\star} G M_{\star}}{2 R_{\text{in}}} \left(1 - \frac{\omega_{\star}}{\omega_K(R_{\text{in}})} \right)^2$$

Темп аккреции на НЗ

Переход на режим "пропеллера" (Илларионов и Суняев 1975):

ц.б. барьер

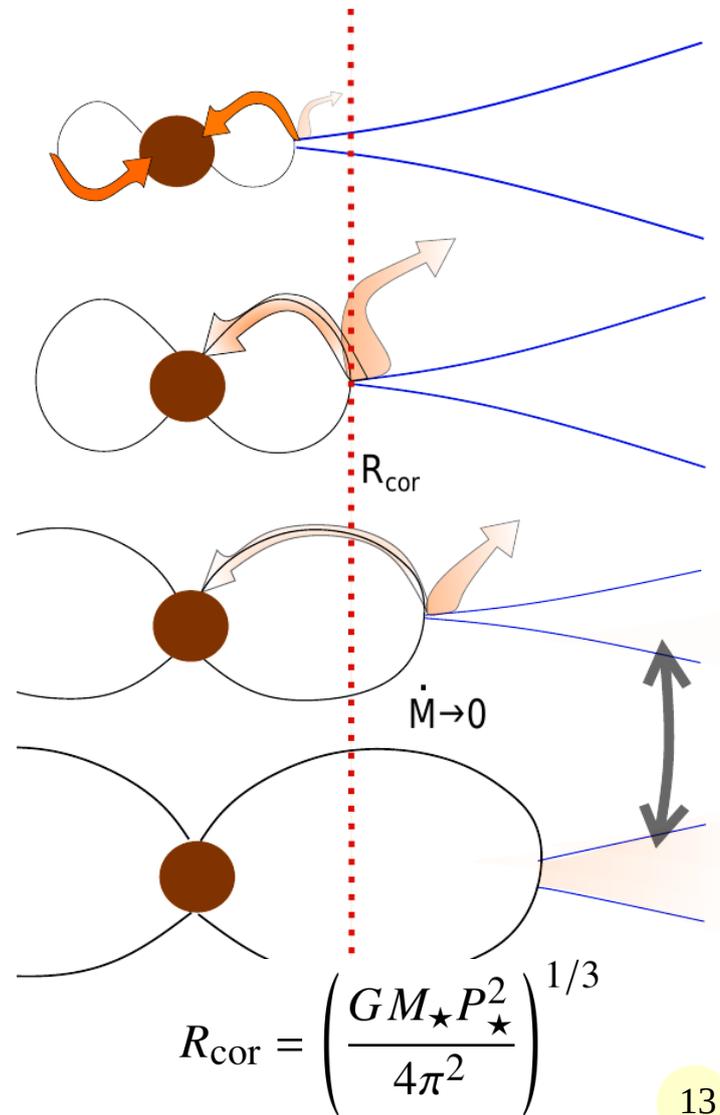
отток

аккумуляция вещества в диске

Когда $R_{in} = \xi_{mag} R_{mag}$ больше R_{cor} , часть вещества продолжает аккрецировать на НЗ (Romanova 2018, Zanni & Ferreira 2013)

Вводим параметр $f_{\star} = \dot{M}_{\star} / \dot{M}_{in}$

- доля вещества, упавшая на НЗ



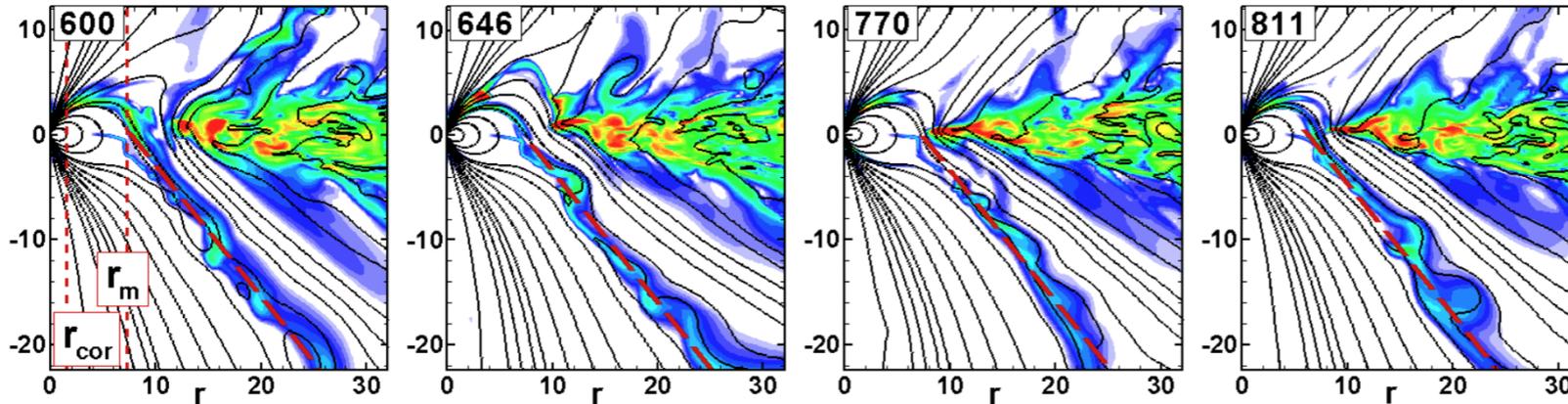
Сценарии

Scenario	Concept	Accreted part $f_{\star} = \dot{M}_{\star} / \dot{M}_{\text{in}}$	Torque coefficient	
			for $R_{\text{in}} < R_{\text{cor}}$	for $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$
SA	no-outflow, everything falls onto NS	1	$\kappa_t = \xi_{\text{mag}}^{7/2}$	$\kappa_{\text{td}} = \kappa_t$
PO	propeller outflow; nothing falls onto NS if $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$	$H(R_{\text{cor}} - R_{\text{in}})$	$\kappa_t = \xi_{\text{mag}}^{7/2}$	$\kappa_{\text{td}} = 0$
POSA	gradual blocking, matter partly outflows	$f_{\star}(\omega_s)$	$\kappa_t = \xi_{\text{mag}}^{7/2}$	$\kappa_{\text{td}} = \kappa_t$

POSA

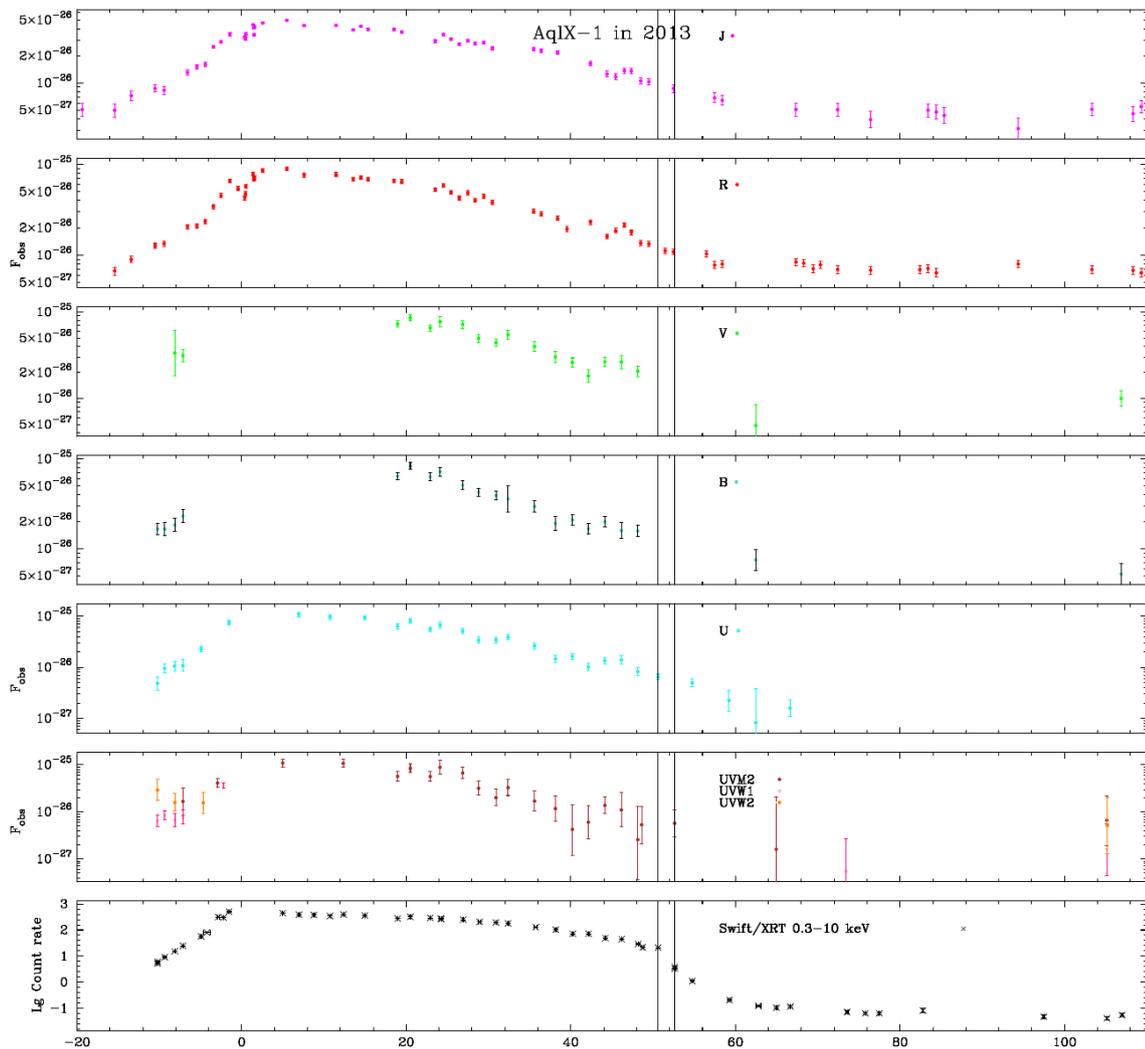
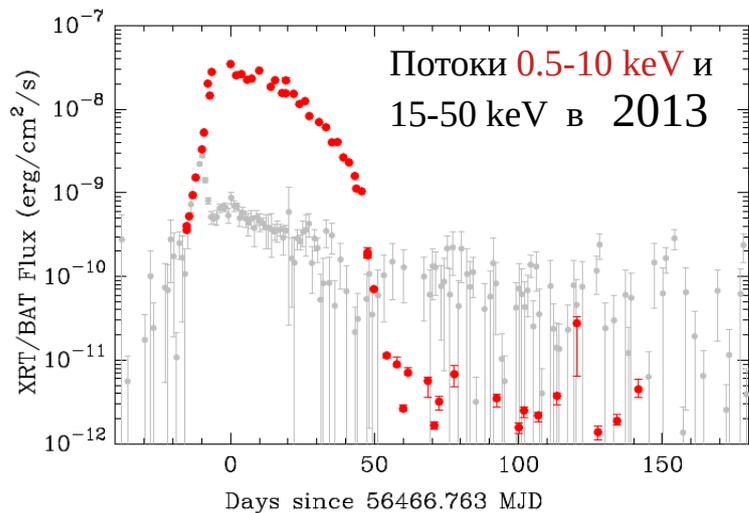
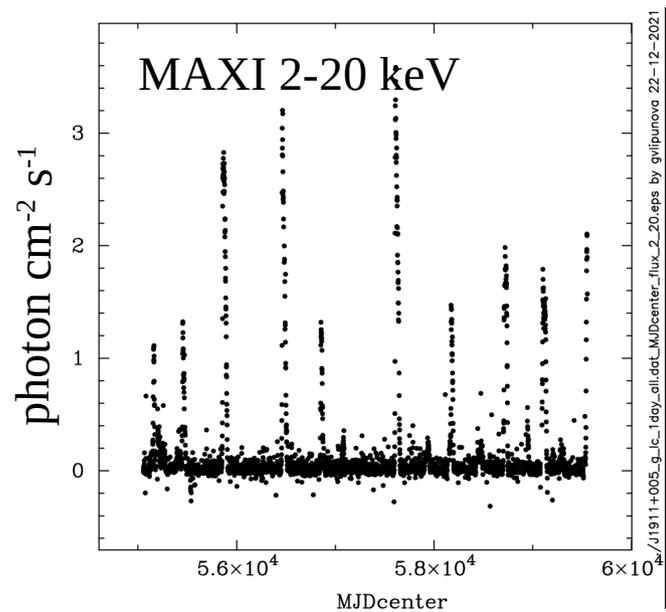
$$f_{\star} = 1 - 0.0006 \omega_s^{4.01}$$

(Romanova+2018)



"Properties of Strong and Weak Propellers from MHD Simulations". Рис. 6. Цветом показан поток вещества $\rho|v_p|$,

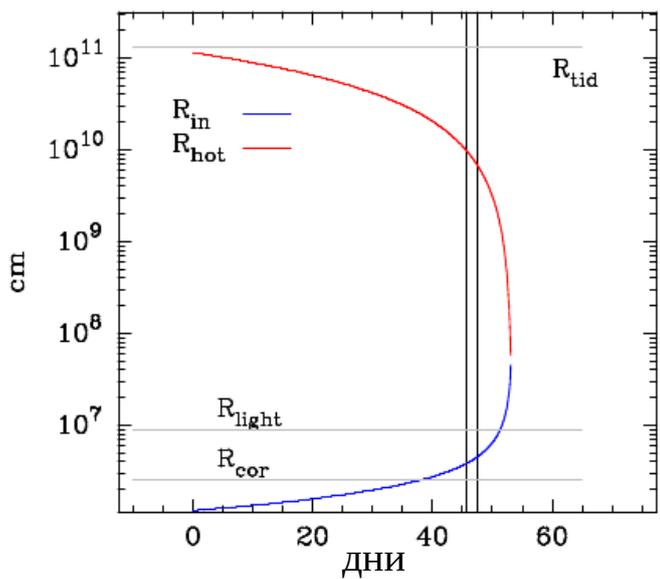
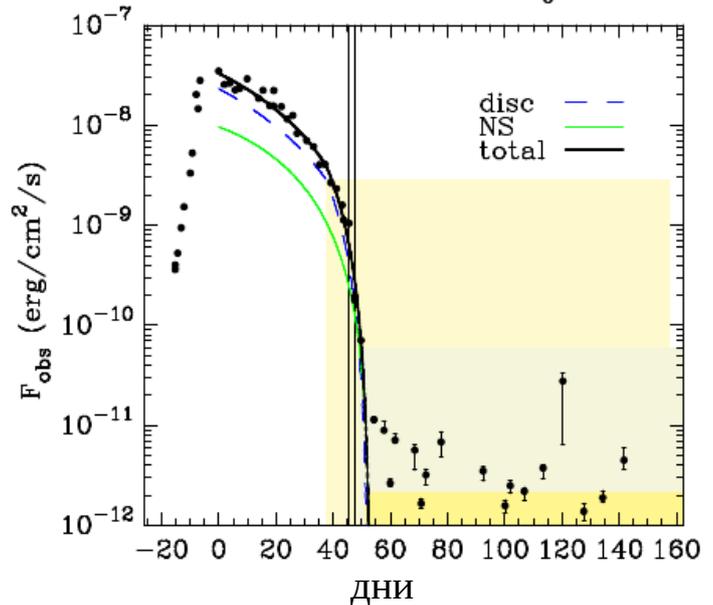
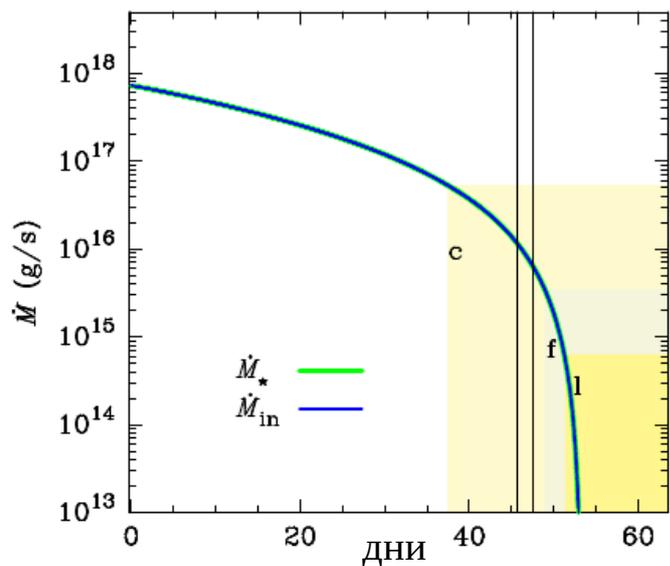
Aql X-1



$$R_{\text{cor}} \approx 25 \text{ km}$$

Результаты моделирования (Липунова и др. 2021, [MNRAS accepted](#))

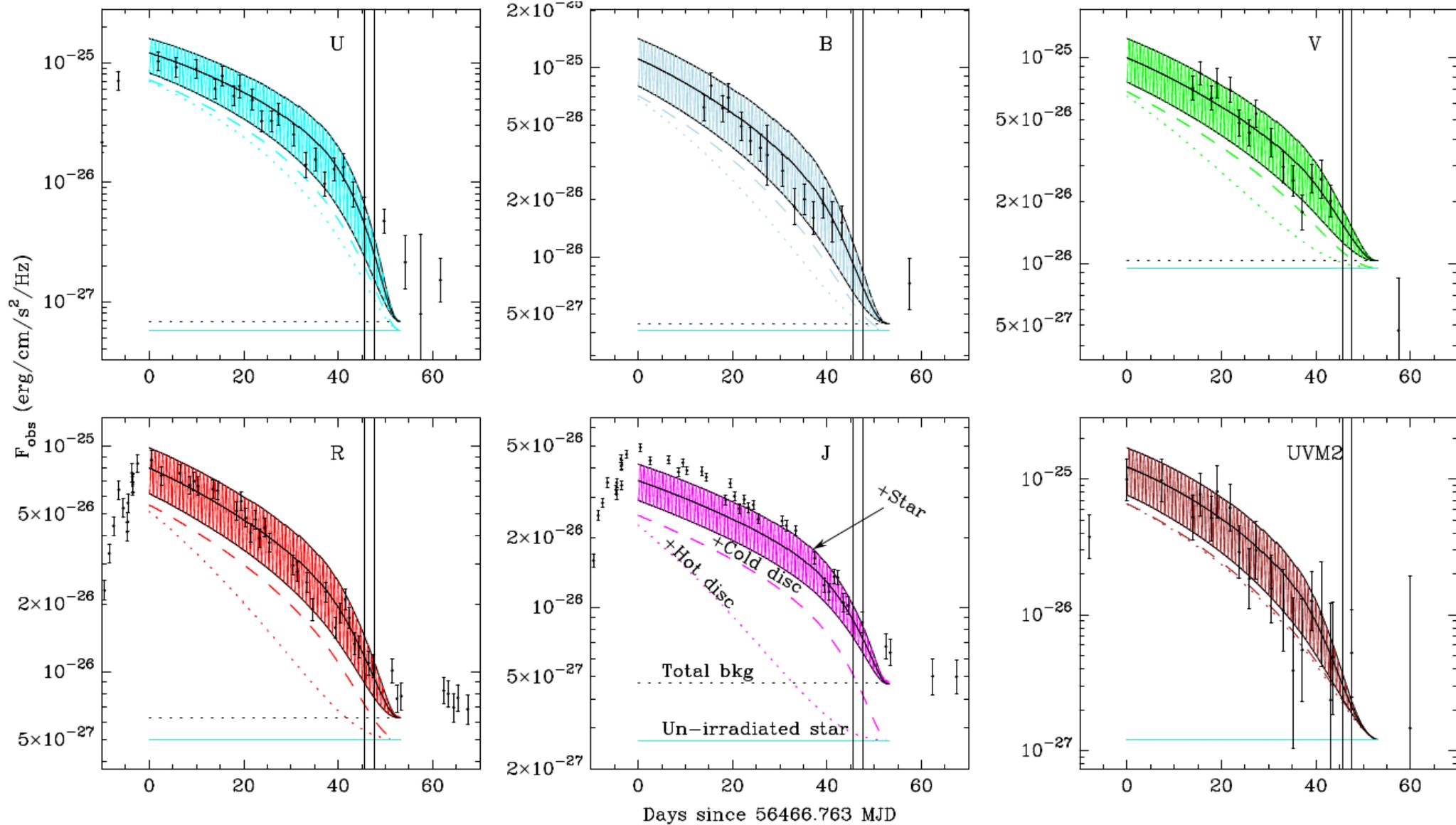
$\tilde{C}_{\text{irr}}=1.5\text{e-}03$ $\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}=1.2\text{e-}03$ $k=1$ $\alpha=0.74$ $B_x=6.3\text{e+}08$ $\dot{M}_0=7.3\text{e+}17$ $R_{\text{dead}}=160.2$ $\xi_{\text{mag}}=0.50$ $\text{HSA}=0.40$ $i=40$ $a_s=0.50$ $M_{\text{opt}}=0.55$ $T_{\text{opt}}=4500$ SA



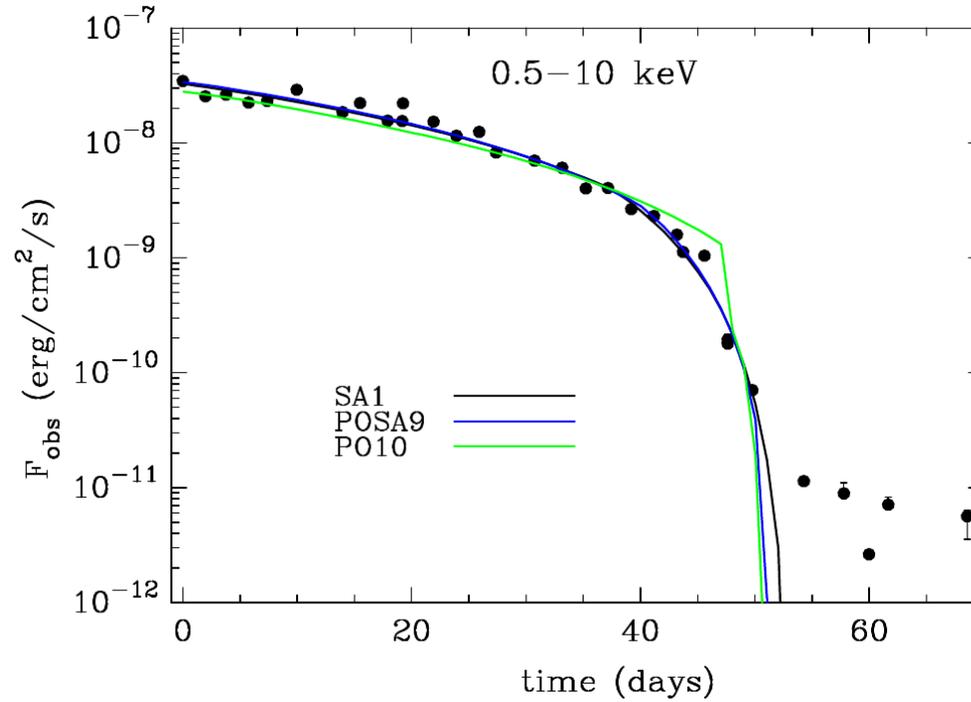
B_x (Gs)	\dot{M}_0 (g/s)	α	\tilde{C}_{irr}	$\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$	Comment	χ^2 (X)	\mathcal{R}^2 (X)	χ^2 (opt)
------------	-------------------	----------	--------------------------	--	---------	--------------	---------------------	----------------

SA No outflows

6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$\alpha \geq 0.5$	21348	0.986	155
5.2e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	1.6e-03	$\alpha \leq 0.5$	21395	0.988	186
5.3e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	3.8e-03	$a_{\text{opt}} = 1$	21406	0.988	193
1.0e+02	1.1e+18	0.68	1.3e-03	5.5e-04	fixed B_x , $\alpha \geq 0.5$	34573	0.979	162
1.0e+02	9.8e+17	0.13	1.6e-04	1.2e-03	fixed B_x , $\alpha \leq 0.5$	32725	0.981	177



Сравнение сценариев



B_x (Gs)	\dot{M}_0 (g/s)	α	\tilde{C}_{irr}	$\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$	Comment	χ^2 (X)	\mathcal{R}^2 (X)	χ^2 (opt)	Model ID
No outflows									
6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$\alpha \geq 0.5$	21348	0.986	155	SA1
Partial outflow if $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$									
5.5e+08	8.1e+17	0.56	9.7e-04	1.4e-03		20469	0.986	175	POSA9
Complete outflow if $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$									
3.6e+08	7.1e+17	0.53	1.2e-03	1.0e-03		49943	0.967	249	PO10

Вырождение параметров α и C_{irr}

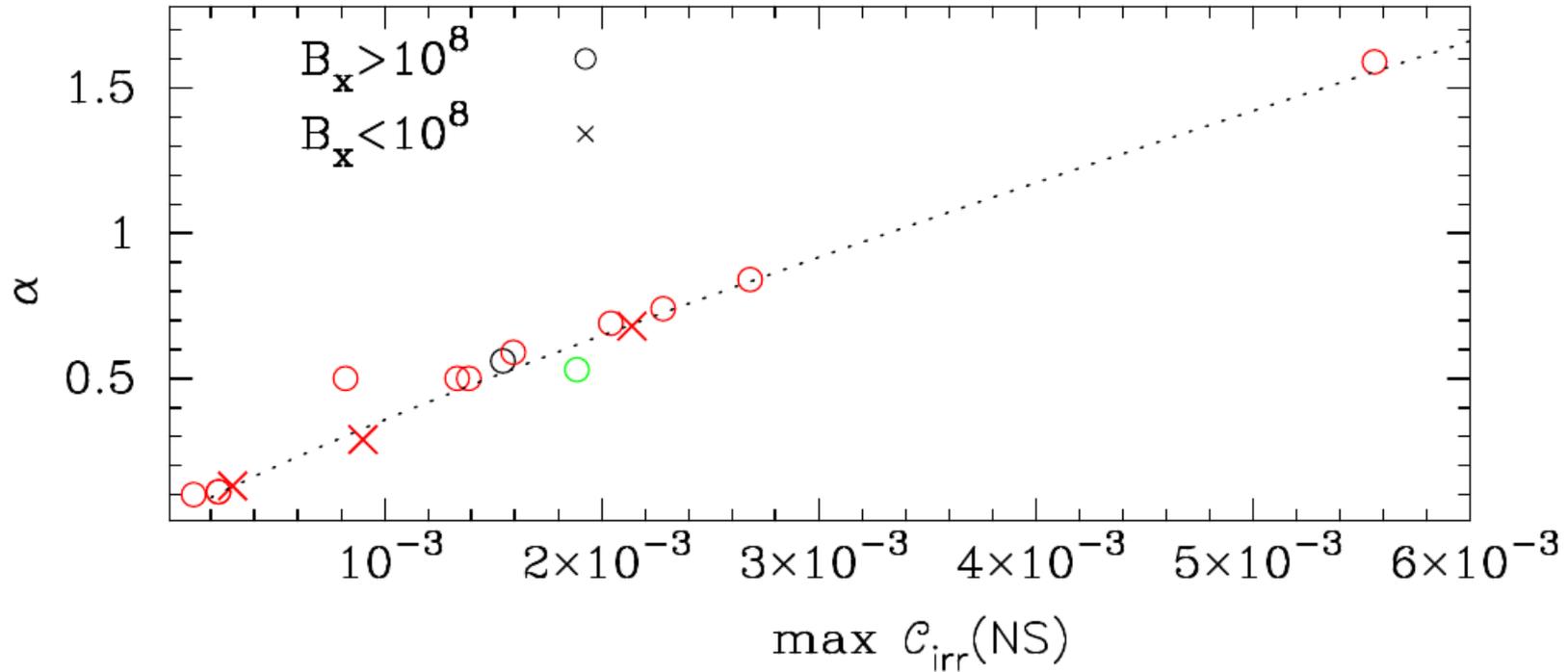


Figure 9. Relation between α and maximum irradiation factor that parametrizes the reprocessed X-ray flux emitted by the neutron star for the models listed in Table 3. Red color marks the SA scenario, black POSA, and green PO.

Отвергнутые модели

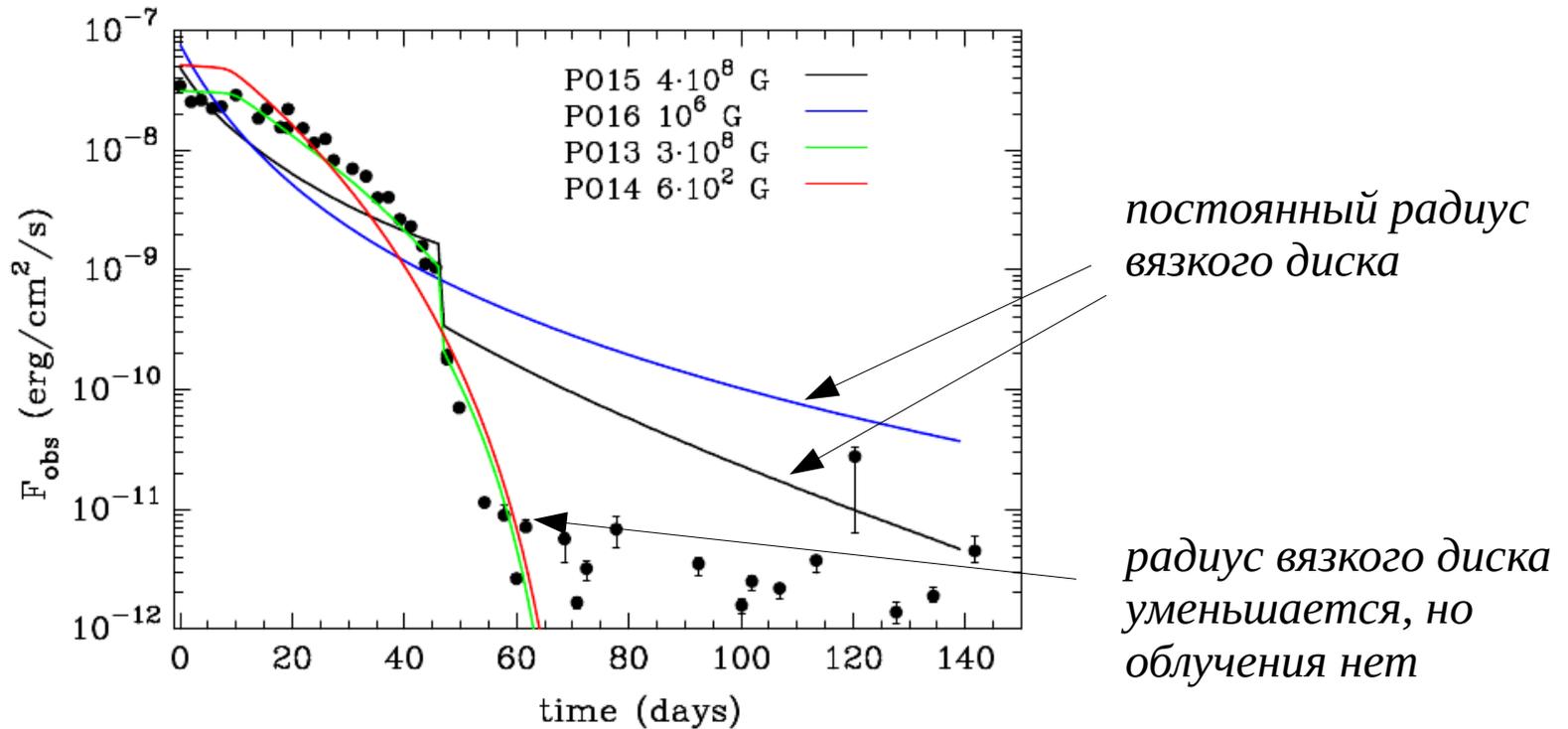


Figure 12. X-ray light curves resulted in the models without irradiation of the disc (rejected models).

Отвергаются модели: диск без облучения (для контроля размера горячей зоны и по оптике), диск постоянного радиуса любого радиуса,

Заключение

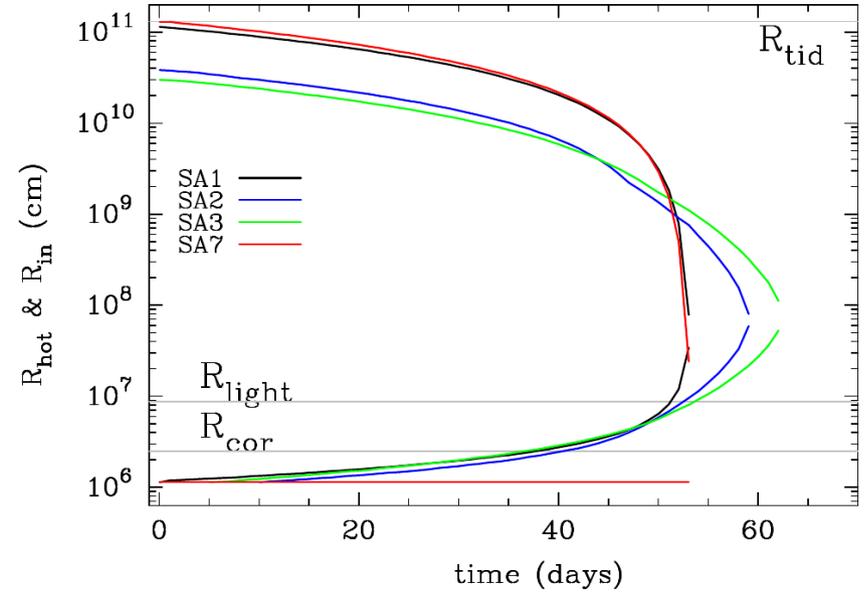
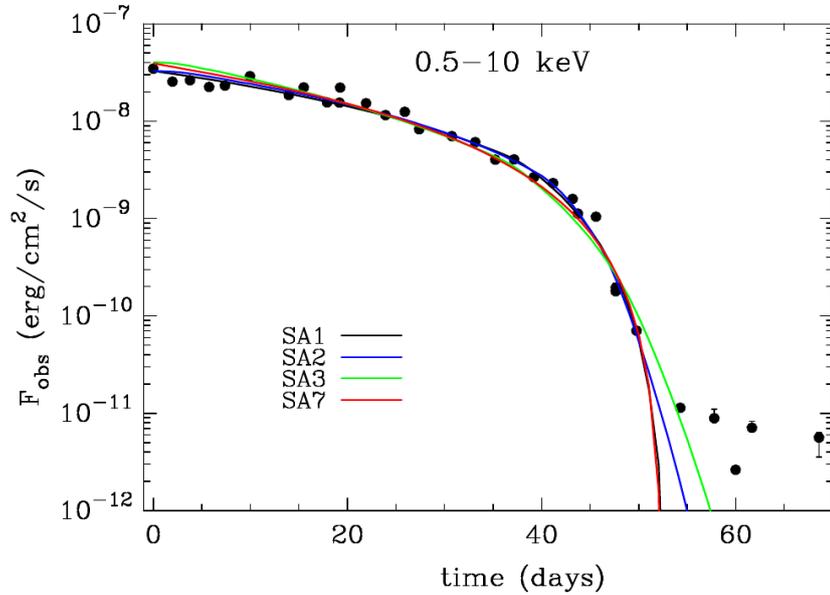
- Можем моделировать вспышки рентгеновских новых с НЗ. Планируем учитывать более сложные модели излучения НЗ для моделирования вспышек рентгеновских пульсаров.

Вспышка Aql X-1 (2013)

- Эффект пропеллера не так очевиден, надо проверить другие вспышки.
- Зона аккреционного диска, в которой идет быстрая вязкая эволюция, уменьшается в размере.
- Облучение необходимо для объяснения и хода рентгеновской кривой и уровня оптического потока.
- Параметр α опять ~ 1 .

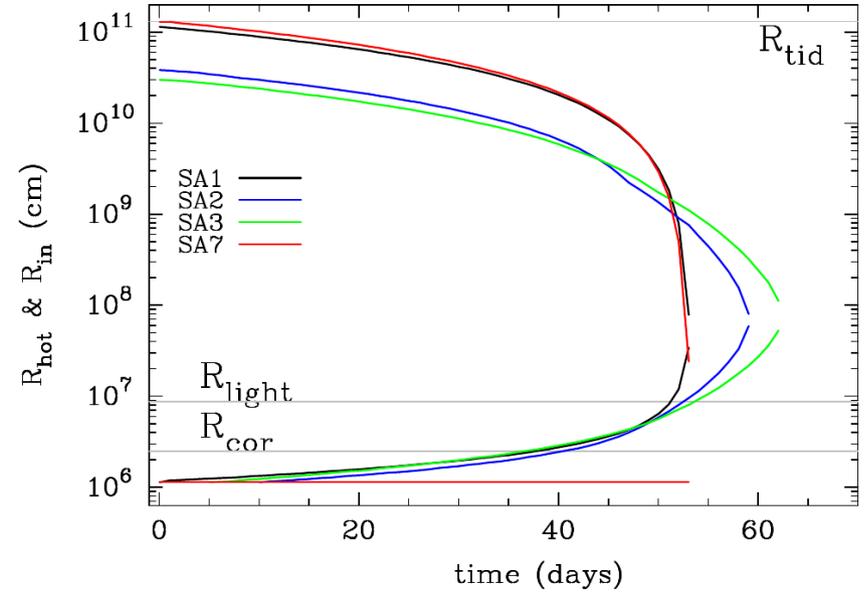
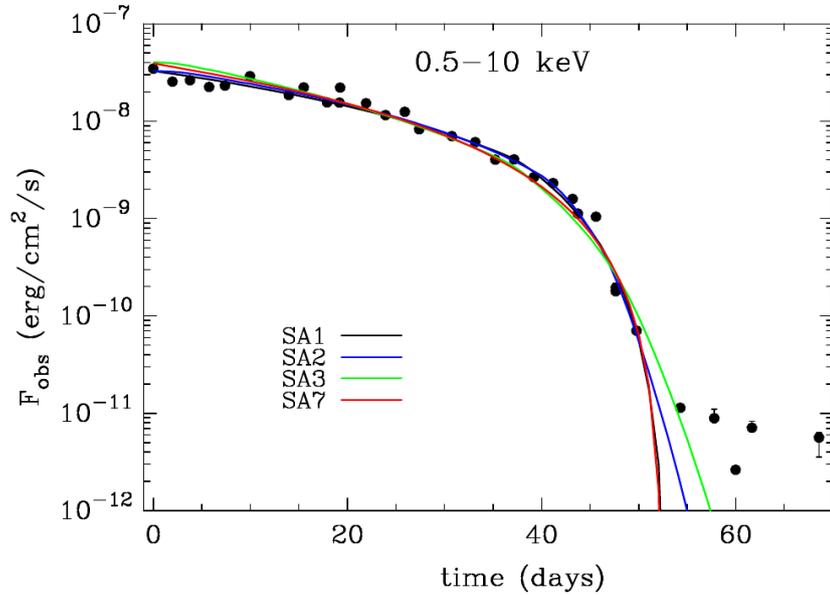
СПАСИБО

Вырождение параметров α и C_{irr}



B_x (Gs)	\dot{M}_0 (g/s)	α	\bar{C}_{irr}	$\bar{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$	Comment	χ^2 (X)	\mathcal{R}^2 (X)	χ^2 (opt)	Model ID
No outflows									
6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$\alpha \geq 0.5$	21348	0.986	155	SA1
5.2e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	1.6e-03	$\alpha \leq 0.5$	21395	0.988	186	SA2
6.2e+08	9.6e+17	0.10	1.2e-04	1.7e-03	$k = 0$	52435	0.971	127	SA3
5.3e+08	8.4e+17	0.69	1.3e-03	0.0e+00	fixed $\bar{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0$	20805	0.986	306	SA4
7.0e+08	9.6e+17	1.59	3.8e-03	0.0e+00	fixed $\bar{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0, a_{\text{opt}} = 1$	35387	0.982	571	SA5
5.3e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	3.8e-03	$a_{\text{opt}} = 1$	21406	0.988	193	SA6
1.0e+02	1.1e+18	0.68	1.3e-03	5.5e-04	fixed $B_x, \alpha > 0.5$	34573	0.979	162	SA7

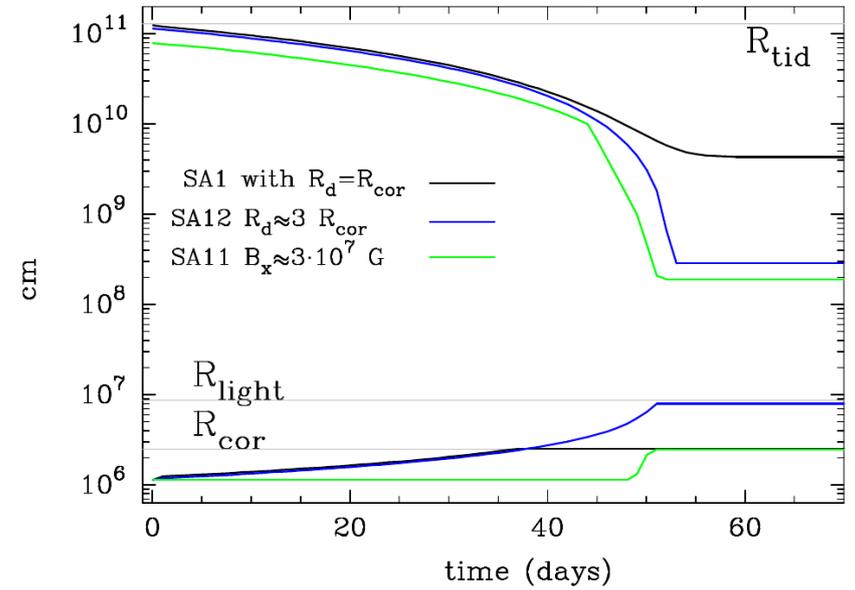
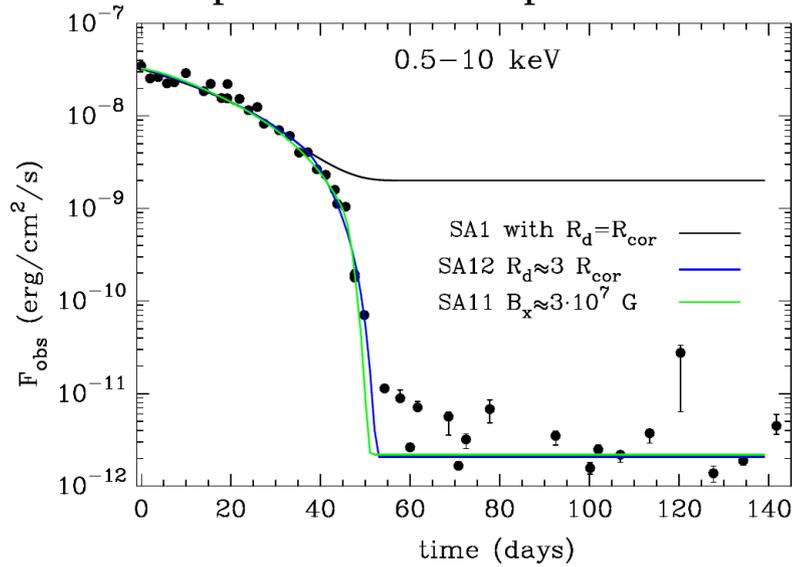
Вырождение параметров α и C_{irr}



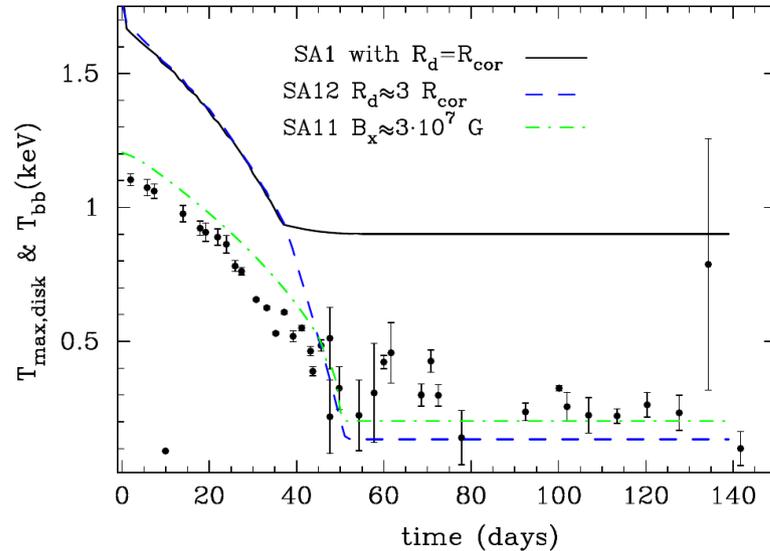
B_x (Gs)	\dot{M}_0 (g/s)	α	\tilde{C}_{irr}	$\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$	Comment	χ^2 (X)	\mathcal{R}^2 (X)	χ^2 (opt)	Model ID
No outflows									
6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$\alpha \geq 0.5$	21348	0.986	155	SA1
5.2e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	1.6e-03	$\alpha \leq 0.5$	21395	0.988	186	SA2
6.2e+08	9.6e+17	0.10	1.2e-04	1.7e-03	$k = 0$	52435	0.971	127	SA3
5.3e+08	8.4e+17	0.69	1.3e-03	0.0e+00			0.986	306	SA4
7.0e+08	9.6e+17	1.59	3.8e-03	0.0e+00			0.982	571	SA5
5.3e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	3.8e-03			0.988	193	SA6
1.0e+02	1.1e+18	0.68	1.3e-03	5.5e-04			0.979	162	SA7

$$C_{\text{irr}} = \tilde{C}_{\text{irr}} \left(\frac{z_0/r}{0.05} \right)^k \Psi(\theta)$$

Кривая блеска в рентгене



Температура



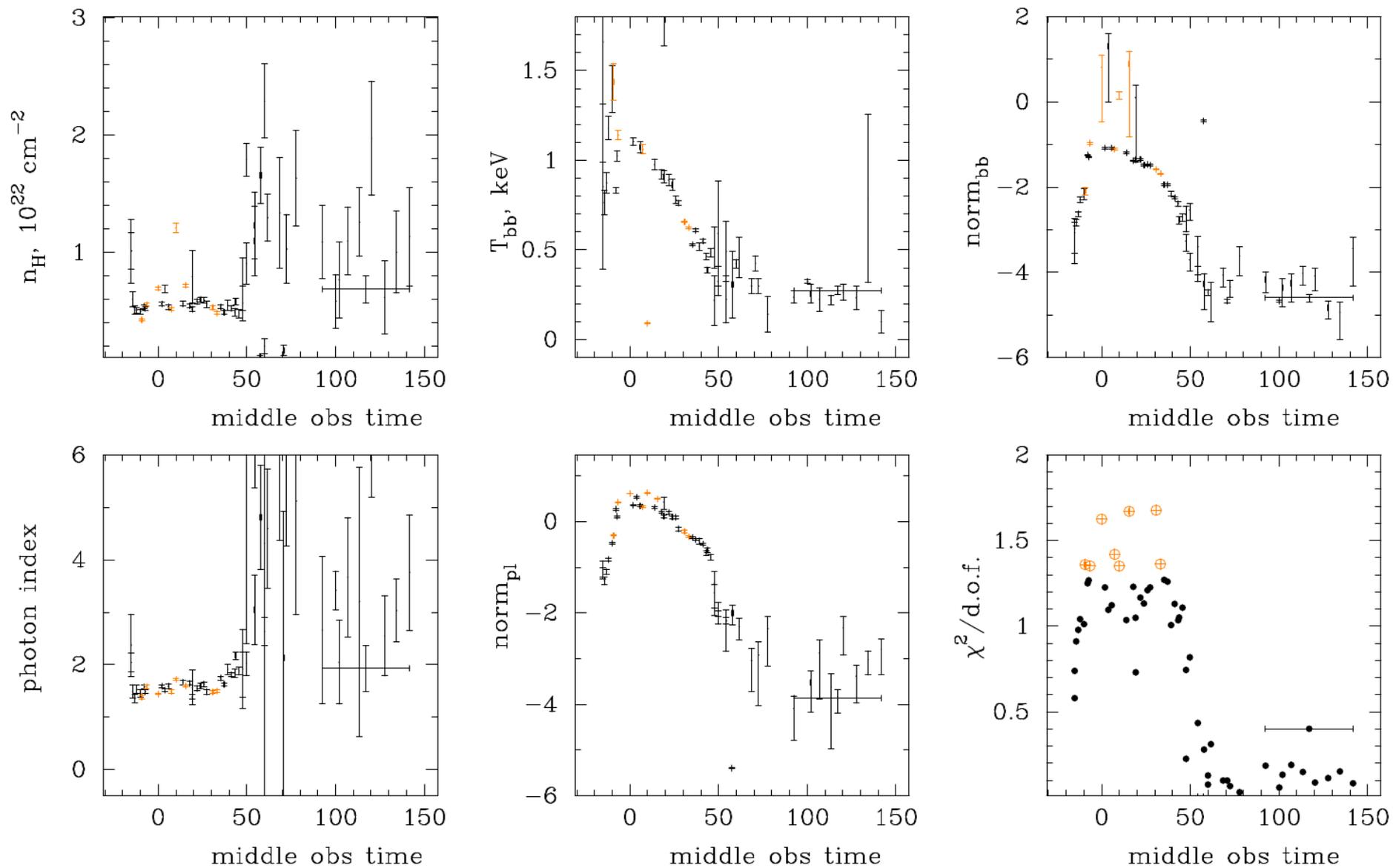


Figure A2. Evolution of the spectral parameters for model $\text{tbabs}^*(\text{bbody}+\text{powerlaw})$. Orange color indicate fits with reduced $\chi^2 > 1.3$. Zero time is MJD 56466.763. The point with the long horizontal bar is derived from the spectrum integrated over MJD 56550-56650 and used for fits SA11 and SA12.

Table 2. Fixed parameters of the model of Aql X-1.

Variable	Parameter	Value	Ref.
M_{\star}	NS mass	$1.4 M_{\odot}$	
R_{\star}	NS radius	1.12×10^6 cm	
ν_{\star}	NS spin frequency	550 Hz	(1)
R_{cor}	Corotation radius	2.5×10^6 cm	Eq. (6)
R_{light}	Light cylinder radius	8.7×10^6 cm	Eq. (5)
R_{tid}	Tidal radius of the disc	$0.9R_{L1} = 1.87R_{\odot}$	(2)
P_{orb}	Orbital period	0.7895126	(1)
$T0$	Ephemeris	2455810.387 d	(3)
q	Mass ratio	0.39	(3,4)
a	Semi-axis	$4.5 R_{\odot}$	
M_{opt}	Optical star mass	$0.55 M_{\odot}$	
T_{opt}	Optical star temperature	4500 K	(3)
a_{opt}	Optical star albedo	0.5	(5)
$R_{\text{pol}}/R_{\text{pol}}^{\text{Roche}}$	Roche lobe filling	1	
d	Distance to the source	5 kpc	(3,4,6)
i	Inclination of the orbit	40°	(3)
$E(B - V)$	Color excess	0.64 ± 0.04	App. C
ξ_{mag}	$R_{\text{in}}/R_{\text{mag}}$	0.5	Eq. (4)
κ_{t}	Magnetic torque coef.	$\xi_{\text{mag}}^{7/2} \approx 0.088$	§2.3
f_{col}	Inner disc color correction	1.7	§2.5
$S_{\text{X}}/(4\pi R_{\star}^2)$	Hot spot fraction	0.4	§2.5
$(z/r)_{\text{cold}}$	Outer disc relative semithickness	0.05	

- (1) [White & Zhang \(1997\)](#); [Zhang et al. \(1998b\)](#); [Casella et al. \(2008\)](#);
(2) [Papaloizou & Pringle \(1977\)](#); (3) [Mata Sánchez et al. \(2017\)](#); (4)
[Meshcheryakov et al. \(2018\)](#); (5) [Basko et al. \(1974\)](#); (6) [Galloway et al. \(2008\)](#)

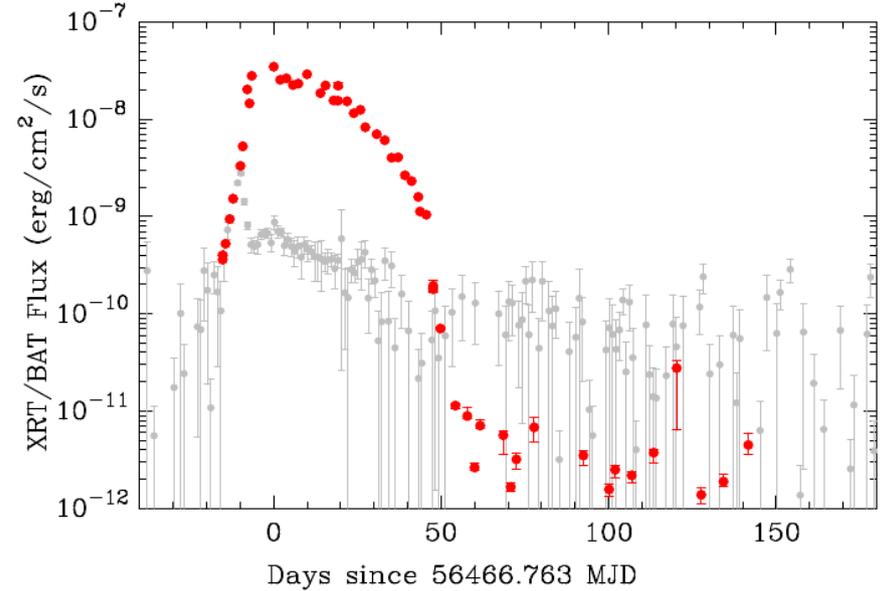


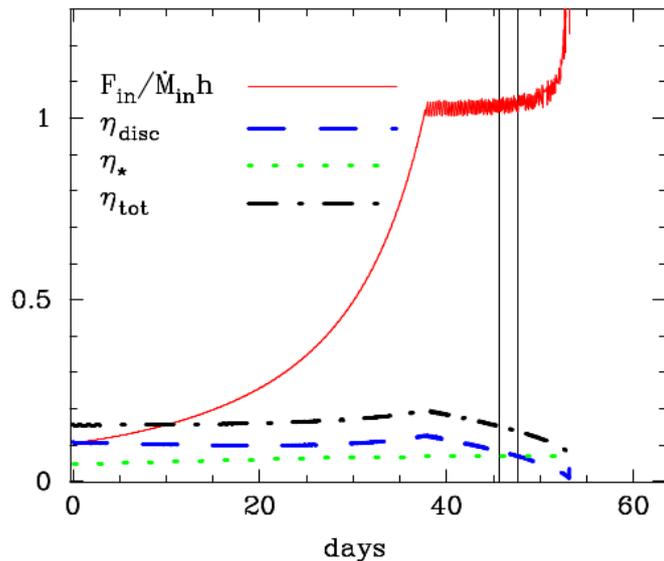
Figure 5. Red circles show unabsorbed total flux in 0.5 – 10 keV, observed by Swift/XRT in ‘wt’ and ‘pc’ mode. The flux is calculated using spectral fitting by model `tbabs*(bbody+powerlaw)` in XSPEC12.10.0c (see §3.1). Grey data points show absorbed 15-50 keV Swift/BAT counts converted to absolute units using Crab (see §3.1).

Table 3. Parameters of resulting models. Columns are: (1) Figure number; (2-6) Resulting parameters; (7) Parameter restrictions or changes to values given in Table 2; (8-10) Resulting χ^2 and \mathcal{R}^2 for X-ray and optical data; (11) Model ID. For the ‘POSA’ scenario, the material with $v < v_{\text{esc}}$ falls onto NS and there is no outflow when the disc reaches the star surface.

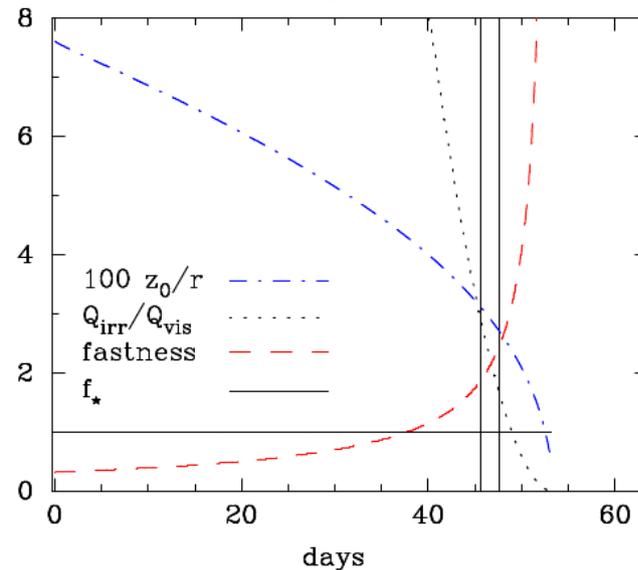
Fig	B_x (Gs)	\dot{M}_0 (g/s)	α	\tilde{C}_{irr}	$\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$	Comment	χ^2 (X)	\mathcal{R}^2 (X)	χ^2 (opt)	Model ID
No outflows										
7	6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$\alpha \geq 0.5$	21348	0.986	155	SA1
SF2	5.2e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	1.6e-03	$\alpha \leq 0.5$	21395	0.988	186	SA2
SF3	6.2e+08	9.6e+17	0.10	1.2e-04	1.7e-03	$k = 0$	52435	0.971	127	SA3
SF4	5.3e+08	8.4e+17	0.69	1.3e-03	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0$	20805	0.986	306	SA4
SF5	7.0e+08	9.6e+17	1.59	3.8e-03	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0, a_{\text{opt}} = 1$	35387	0.982	571	SA5
SF6	5.3e+08	7.9e+17	0.11	1.3e-04	3.8e-03	$a_{\text{opt}} = 1$	21406	0.988	193	SA6
SF7	1.0e+02	1.1e+18	0.68	1.3e-03	5.5e-04	fixed $B_x, \alpha \geq 0.5$	34573	0.979	162	SA7
SF8	1.0e+02	9.8e+17	0.13	1.6e-04	1.2e-03	fixed $B_x, \alpha \leq 0.5$	32725	0.981	177	SA8
Partial outflow if $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$										
SF9	5.5e+08	8.1e+17	0.56	9.7e-04	1.4e-03		20469	0.986	175	POSA9
Complete outflow if $R_{\text{in}} > R_{\text{cor}}$										
10	3.6e+08	7.1e+17	0.53	1.2e-03	1.0e-03		49943	0.967	249	PO10
Dead disc for a plato, which is one point in X:										
11	3.3e+07	9.0e+17	0.29	5.2e-04	1.1e-03	B_x explains plato, $R_{\text{dead}} = R_{\text{cor}}$	21647	0.948	163	SA11
11	6.3e+08	7.3e+17	0.74	1.5e-03	1.2e-03	$R_{\text{dead}} \approx 3.3R_{\text{cor}}$ explains plato in SA1	21348	0.986	155	SA12
No disc irradiation:										
12	3.3e+08	8.2e+17	0.06	1.0e-10	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}} = \tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0$ and B_x ;	55158	0.981	1574	PO13
12	6.0e+02	1.5e+18	0.06	1.0e-10	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}} = \tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}} = 0$;	334770	0.874	1250	PO14
No irradiation and constant outer radius $R_{\text{hot}} = R_{\text{tid}}$										
12	4.2e+08	1.3e+18	4.00	1.0e-10	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}}, \tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}$ & R_{hot}	423694	0.830	2137	PO15
12	1.0e+06	2.2e+18	4.00	1.0e-10	0.0e+00	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}}, \tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}, B_x$ & R_{hot}	907624	0.622	1990	PO16
Irradiation of hot disc with constant outer radius $R_{\text{hot}} = 10^{10}$ cm, no cold disc										
SF17	3.3e+08	3.6e+18	0.07	1.0e-10	2.4e-03	fixed $\tilde{C}_{\text{irr}}^{\text{cold}}=0$ and B_x	969733	0.717	3212	PO17
Irradiation of whole disc; hot part has constant outer radius										
SF18	3.3e+08	3.4e+18	0.07	5.0e-02	1.3e-05	fixed $B_x, R_{\text{hot}} = 10^{10}$ cm	966438	0.717	2121	PO18
SF19	3.3e+08	3.3e+17	4.00	1.7e-03	1.2e-05	fixed $B_x, R_{\text{hot}} = R_{\text{tid}}$	1528271	0.512	1823	PO19

Эволюция ключевых безразмерных параметров диска:

КПД аккреции



Относительная полутолщина,
облучение



Параметр облучения

