

Определение α в аккреционных
дисках: эффекты самооблучения
в 4U 1543–47
во время вспышки 2002 г.

Галина Липунова, Константин Маланчев

Введение

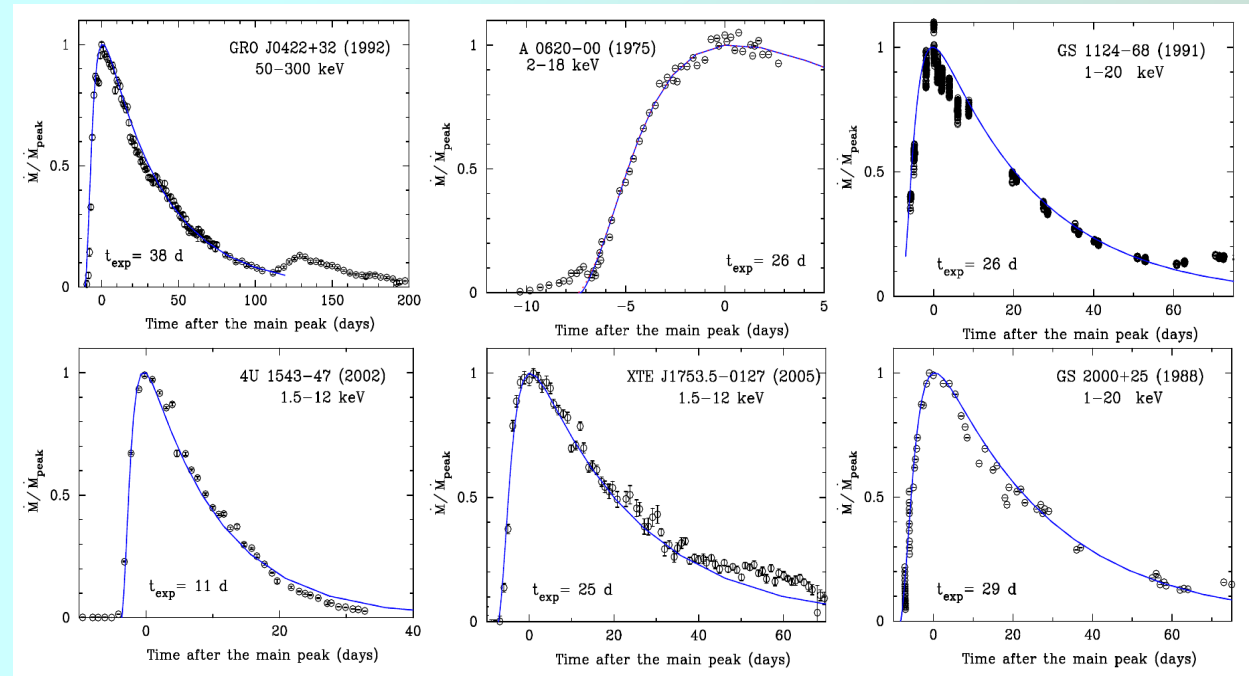
Величина α напрямую связана со скоростью протекания вязкой эволюции в диске.

Астрофизические диски, в которых именно вязкие процессы определяют наблюдаемую эволюцию — это диски в рентгеновских новых во время вспышек.

Время экспоненциального спада в диске с постоянным внешним радиусом

$$t_{\text{exp}} \approx 0.45 R_{\text{out}}^2 / \nu_t(R_{\text{out}})$$

(Липунова 2015)



Связь с параметром турбулентности

$$\alpha \approx 0.15 \left(\frac{R_{\text{out}}}{2 R_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{z_0/R_{\text{out}}}{0.05} \right)^{-2} \left(\frac{M_x}{10 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{t_{\text{exp}}}{30^{\text{d}}} \right)^{-1} \times \Pi_1$$

(Липунова-Маланчев, направлено в MNRAS)

На значение α влияет (а) тип вертикальной структуры и (б) уточненный вид **не- \exp (!)** кривой в рентгеновской новой ($\sim 20\%$)

ПЛАН

1. получение зависимости темпа аккреции от времени из наблюдений 4U 1543-47 во вспышке 2002 г.
2. сравнение с результатами модели
3. оценки параметра турбулентности
4. оценка степени облучения в 4U 1543-47 во вспышке 2002 г.

4U 1543-47

Porb=1.116 day

Mopt ~ 2.5 Msun

D ~ 9 kpc

BH: $M_x = 8.4 - 10.4 M_{\text{sun}}$
(Orosz 1998)

$R_{\text{tid}} \sim 0.88 R_{\text{RL}} \sim 3.8 R_{\text{sun}}$

Вспышка 2002 г

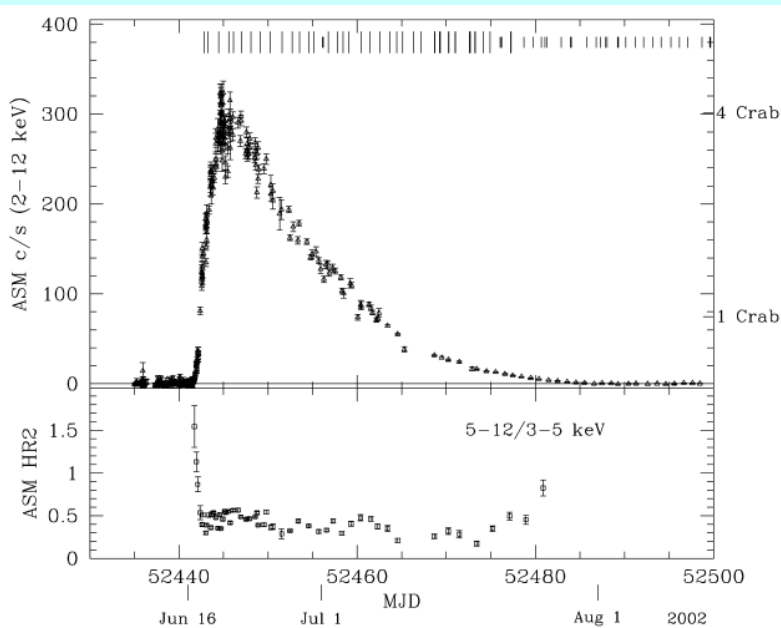


FIG. 1.—Plot of 2–12 keV ASM light curve (*top panel*) and hardness ratio (5–12 keV)/(3–5 keV) (*bottom panel*) for 4U 1543–47. The vertical lines at the top indicate the times of pointed *RXTE* observations; the larger tick marks indicate observations analyzed in this paper.

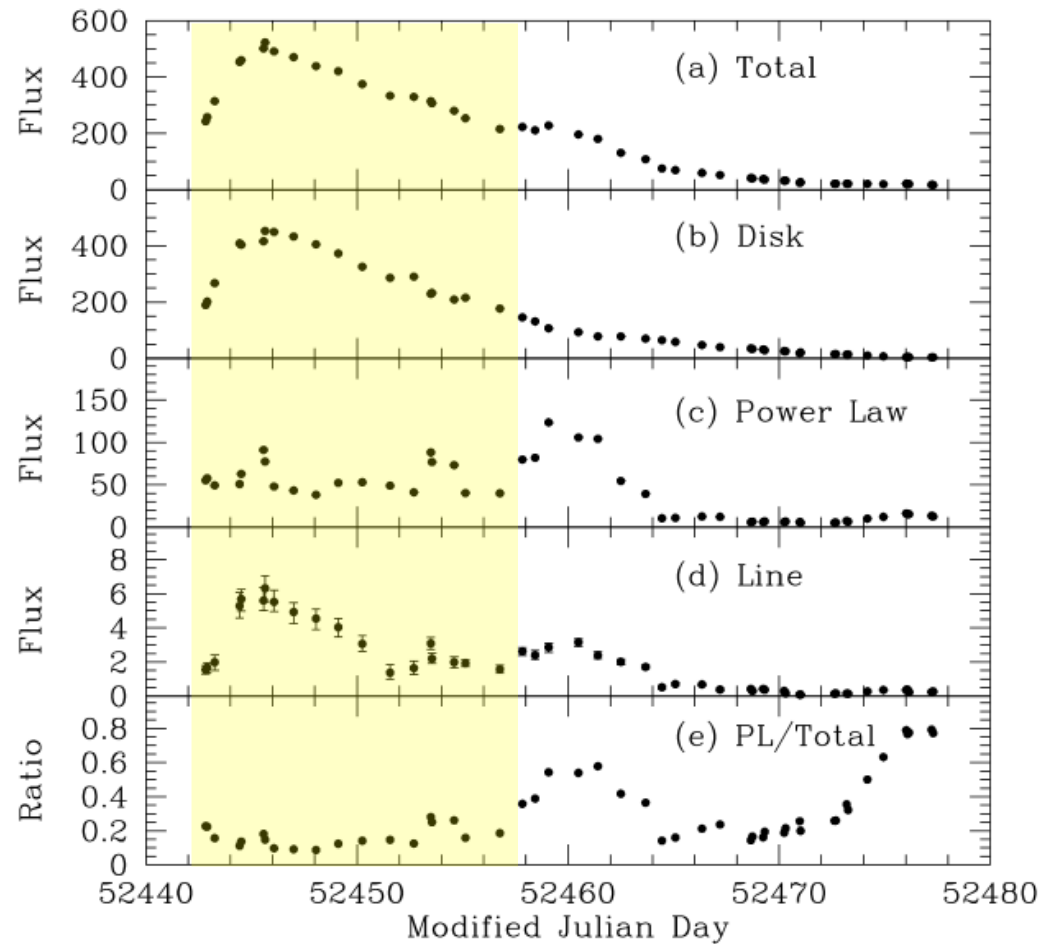
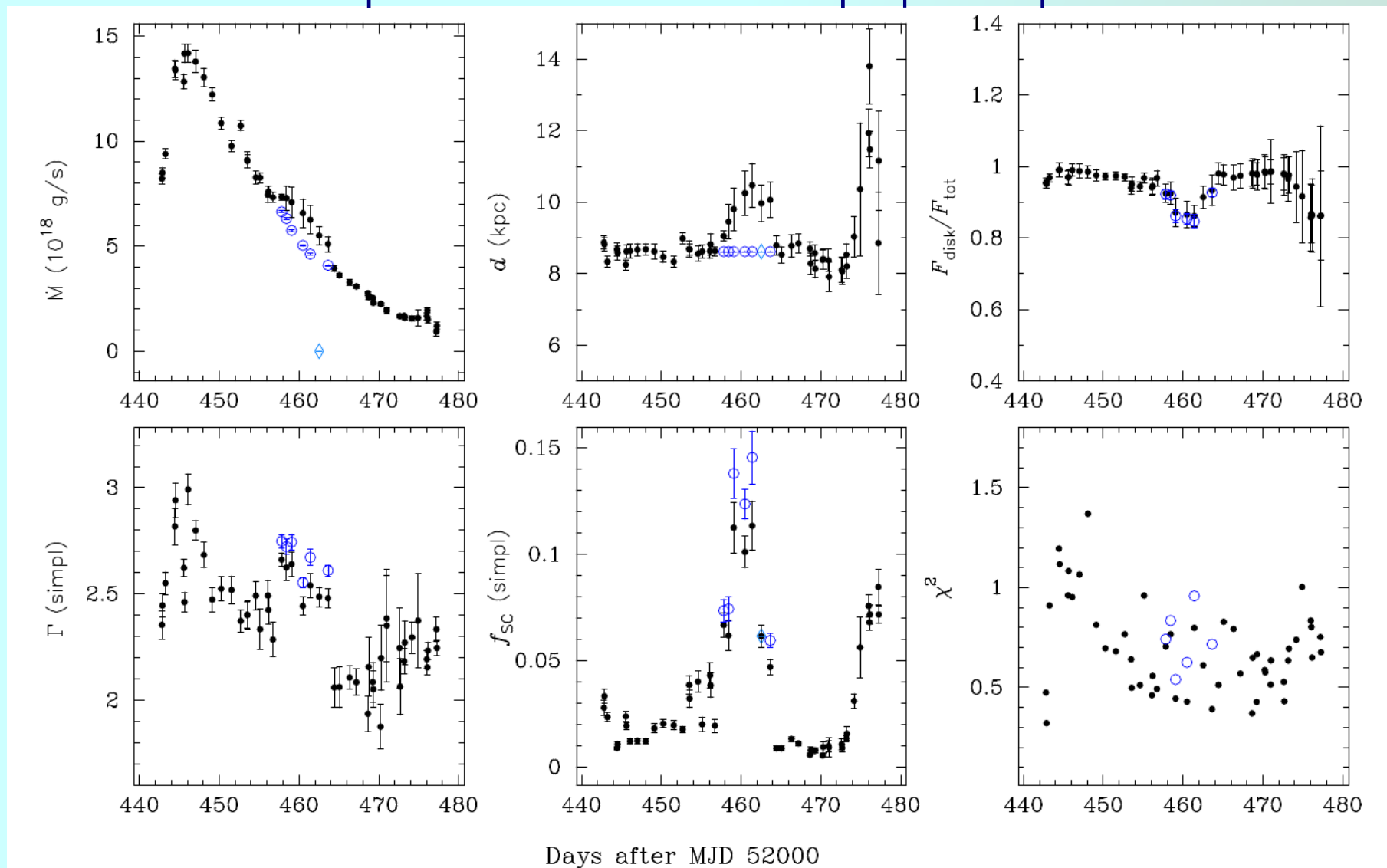


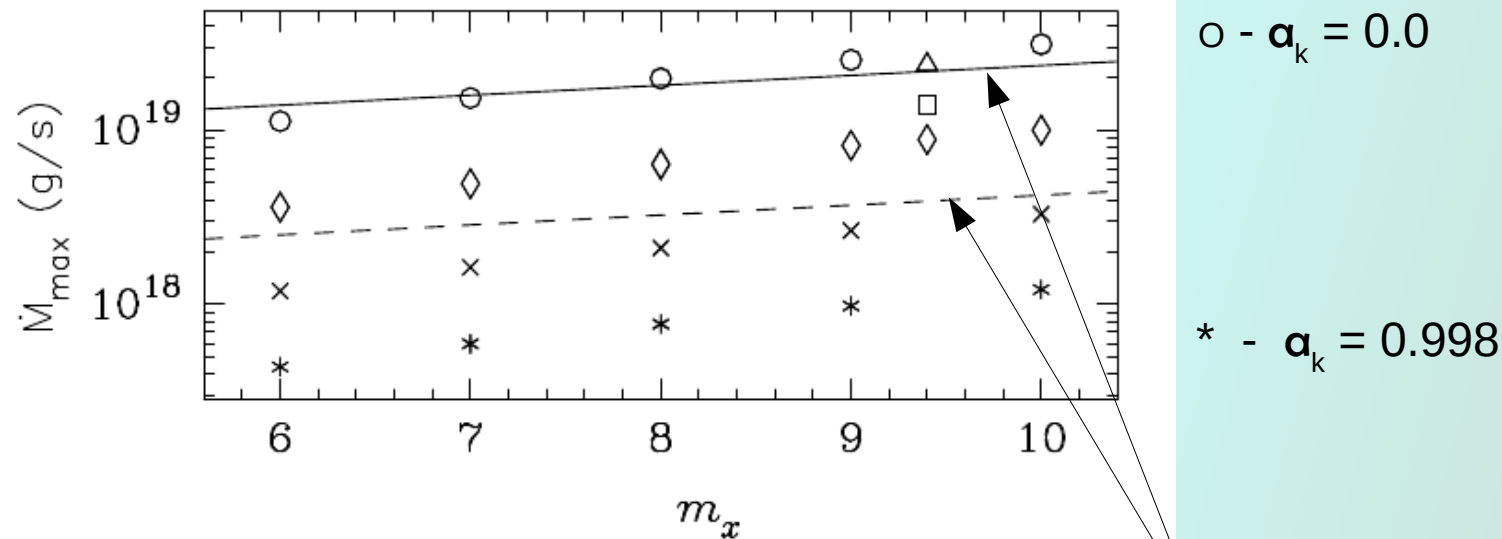
FIG. 2.—(a) Total flux, (b) disk flux, (c) power-law flux, (d) line flux, and (e) ratio of the power-law flux to the total flux for PCA observations of 4U 1543–47 in the 3–25 keV band. All fluxes are given in units of 10^{-10} ergs cm^{-2} s^{-1} . When error bars are not visible, it is because they are smaller than the plotting symbol.

СПЕКТРАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ спектра 3-25 keV, чтобы правильно найти темп аккреции от времени



Эволюция спектральных параметров, полученная в XSPEC в модели $tbabs * (simpl * kerrbb + laor) * smedge$ для наблюдений RXTE/PCA в 2002. ЧД: $m_{\text{ch}} = 9.4$ and $a_{\text{Kerr}} = 0.4$, наклонение $i = 20.^\circ 7$.

Моделированный пиковый темп аккреции в зависимости от параметров ЧД.



Эддингтоновский предел (зависит от КПД аккреции и от α_k)

Чтобы найти α , численно моделируем вспышку в источнике - зависимость темпа аккреции от времени - для разных значений массы и параметра Керры ЧД

Уравнение эволюции вязкого диска

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

Поверхностная плотность

$$\Sigma_o(t, r) = 2 \int_0^{z_0} \rho(t, r, z) dz,$$

Момент вязких сил

$$F = 2\pi W_{r\varphi} r^2$$

Удельный момент импульса

$$h(r) = v_\varphi(r) r = \omega r^2.$$

Касательная компонента
тензора вязких напряжений

$$W_{r\varphi}(r, t) = \frac{3}{2} \omega_K \nu_t \Sigma_o.$$

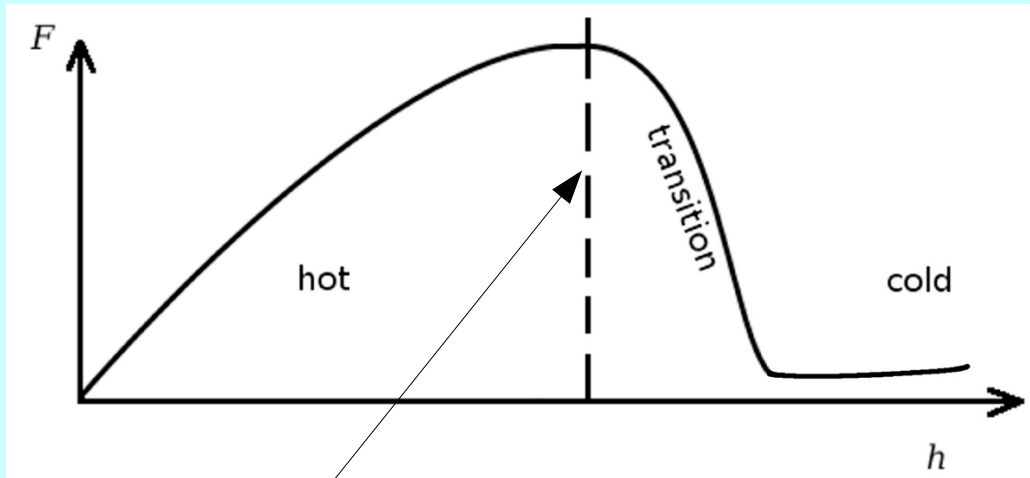
ν_t - кнематический коэффициент турбулентной вязкости

$$\nu_t = \frac{2}{3} \alpha \frac{v_{\text{sound}}^2}{\omega_K}$$

$$\Sigma = \frac{(GM_x)^2 F^{1-m}}{4\pi(1-m)D h^{3-n}}$$

Для степенной непрозрачности, D - константа

Распределение момента вязких в сил в диске



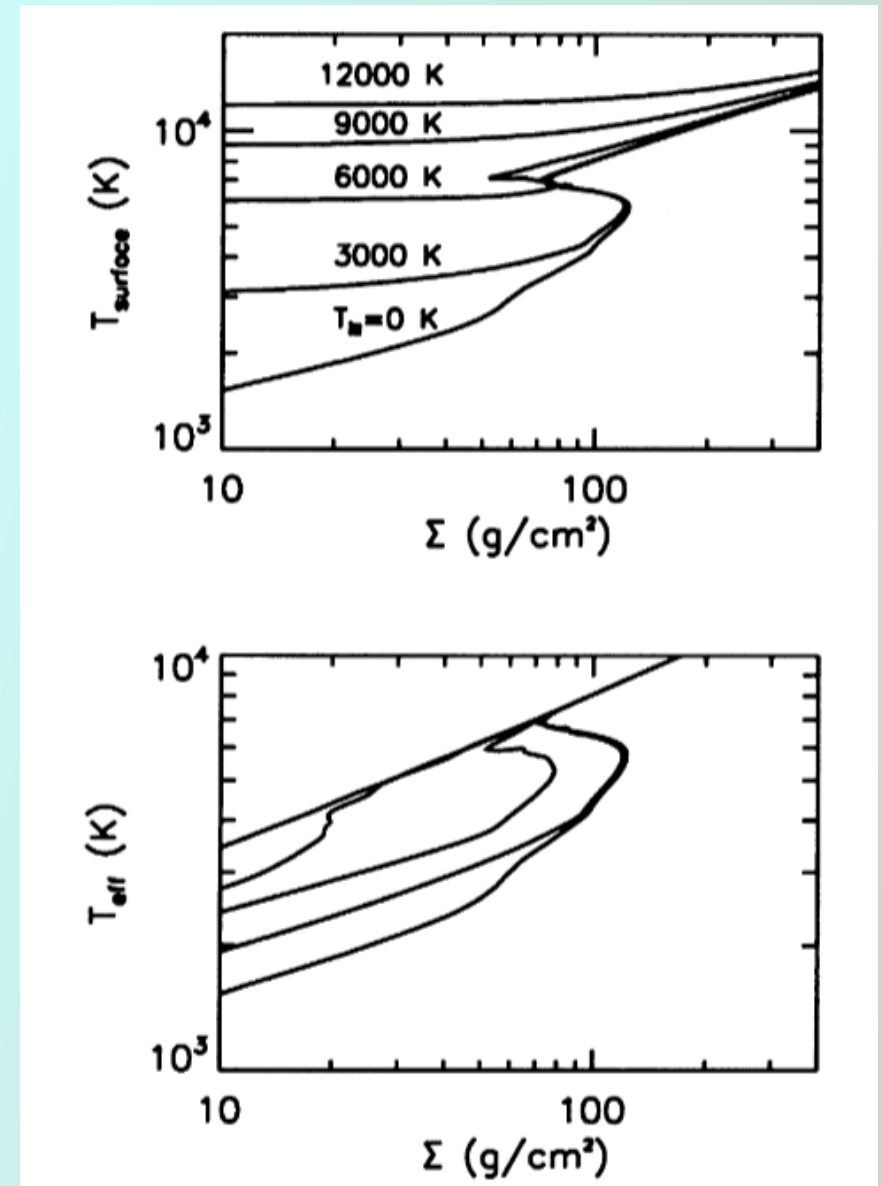
$$T_{\text{irr}} = 10^4 \text{ K}$$

Meyer & Meyer-Hofmeister 1984;
Tuchman et al 1990; Dubus et al 2001

- Внутренняя граница:
нет вязких напряжений
- Внешняя граница:
в двойных системах

$$\dot{M} = \frac{\partial F}{\partial h} = 0$$

«S-кривая» — множество решений вертикальной структуры на данном радиусе



Облучение в рентгеновских новых

$$Q_{\text{irr}} \equiv \sigma_{\text{SB}} T_{\text{irr}}^4 = C_{\text{irr}} \frac{L_{\text{bol}}}{4 \pi r^2}$$

(Lyutyi & Sunyaev 1976; Cunningham 1976)

Наблюдательные и теоретические указания: $C_{\text{irr}} \sim 5 \times 10^{-3}$

Параметр облучения

$$C_{\text{irr}} = \eta_{\text{th}} \Psi(\theta) \left(\frac{dz}{dr} - \frac{z}{r} \right)$$

$\Psi(\theta)$

Угловое распределение центрального потока

z

Высота перехвата облучения над плоскостью симметрии

η_{th}

Доля перехватываемого потока, которая перерабатывается в тепловое излучение

Облучение в рентгеновских новых

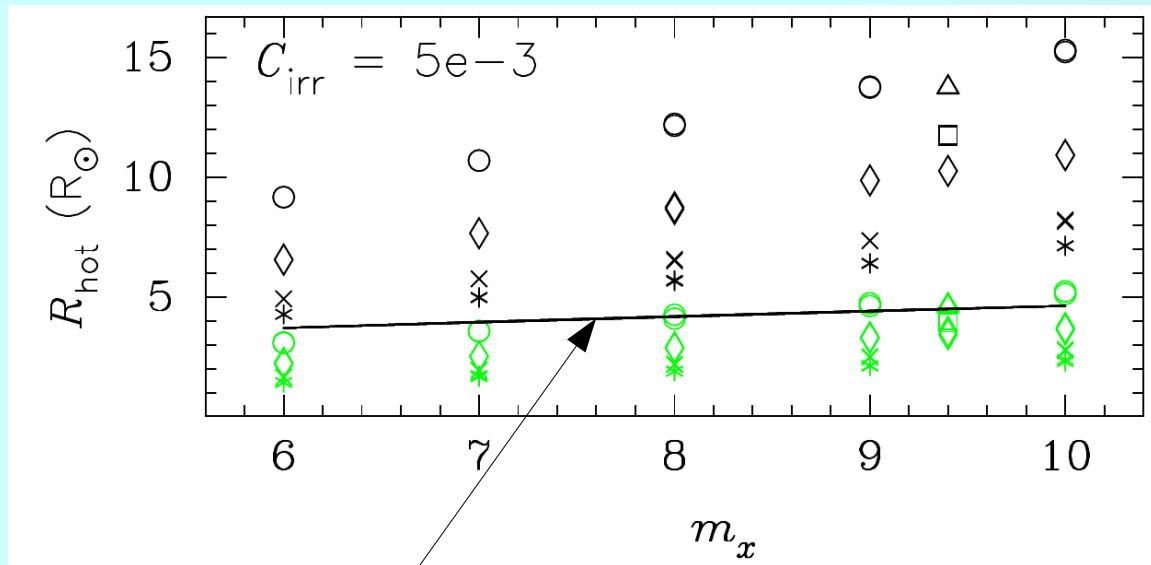
$$Q_{\text{irr}} \equiv \sigma_{\text{SB}} T_{\text{irr}}^4 = C_{\text{irr}} \frac{L_{\text{bol}}}{4 \pi r^2} \quad (\text{Lyutyi \& Sunyaev 1976; Cunningham 1976})$$

Облучение в 4U 1543-47 (2002)

$$\sigma T_{\text{hot}}^4 = C_{\text{irr}} \frac{\eta(a_{\text{Kerr}}) \dot{M}_{\text{in}}(t) c^2}{4 \pi R_{\text{hot}}(t)^2}$$

$$T_{\text{hot}} = 10^4 \text{ K}$$

Радиус горячего диска



Максимум

t = 28 дней

Радиус приливного обрезания

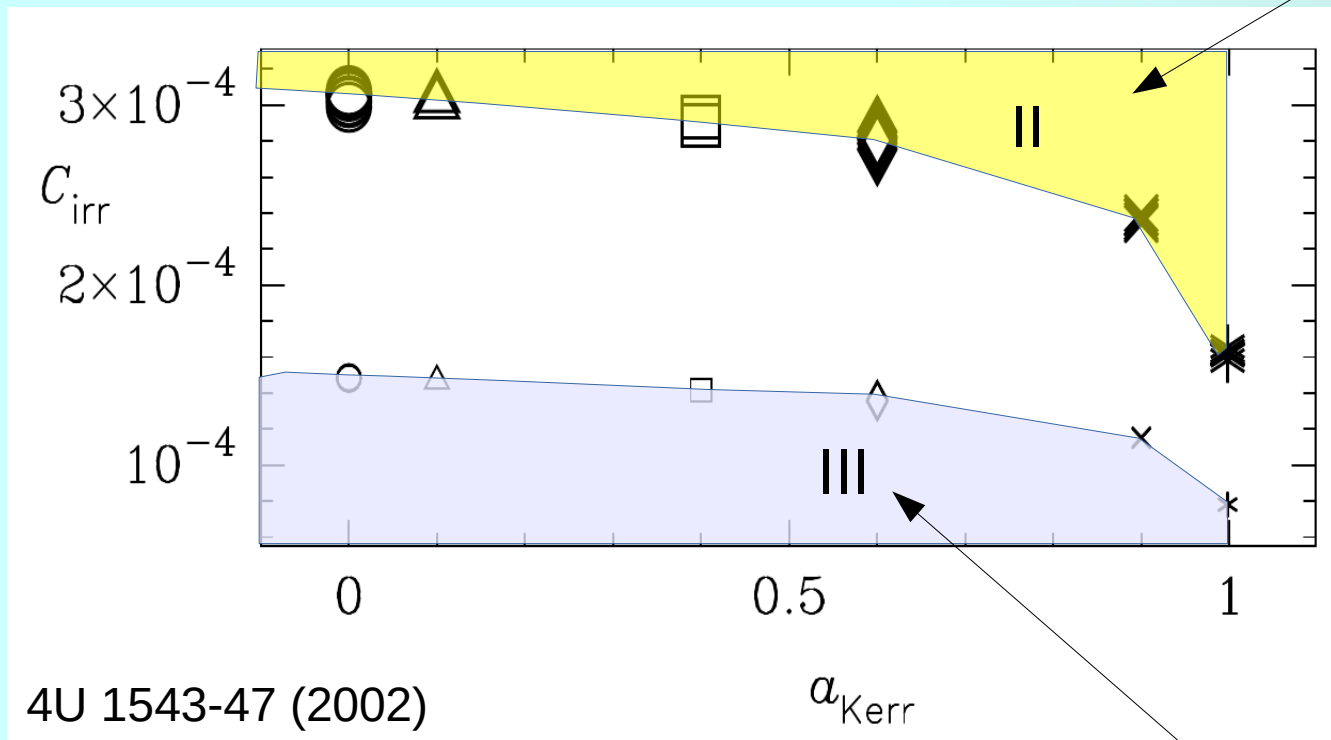
1. $\alpha \sim 3-5$

$$\alpha \approx 0.15 \left(\frac{R_{\text{out}}}{2 R_{\odot}} \right)^{3/2} \left(\frac{z_0/R_{\text{out}}}{0.05} \right)^{-2} \left(\frac{M_x}{10 M_{\odot}} \right)^{-1/2} \left(\frac{t_{\text{exp}}}{30^{\text{d}}} \right)^{-1} \times \Pi_1$$

Роль облучения падает с уменьшением расстояния до центра

$$\frac{Q_{\text{irr}}}{Q_{\text{vis}}} = \frac{4}{3} \eta(a_{\text{Kerr}}) C_{\text{irr}} \frac{r}{R_{\text{grav}}}$$

⇨ падает со временем @ R_{hot}



Облучение доминирует в течение 28 дней после пика

Условие

$$Q_{\text{irr}} / Q_{\text{vis}} = 1$$

на R_{hot} позволяет найти

C_{irr}

Облучение не может доминировать уже в пике



This repository Search

Pull requests Issues Gist



hombit / **freddi**

Unwatch 1 Star 0 Fork 1

Code Issues 4 Pull requests 0 Projects 0 Wiki Pulse Graphs Settings

Branch: master **freddi / Readme.md**

Find file Copy path

gvlipunova Update Readme.md 66148c6 5 hours ago

2 contributors

313 lines (258 sloc) | 17.2 KB

Raw Blame History

Freddi — compute FRED-like light curves of LMXB

Overview

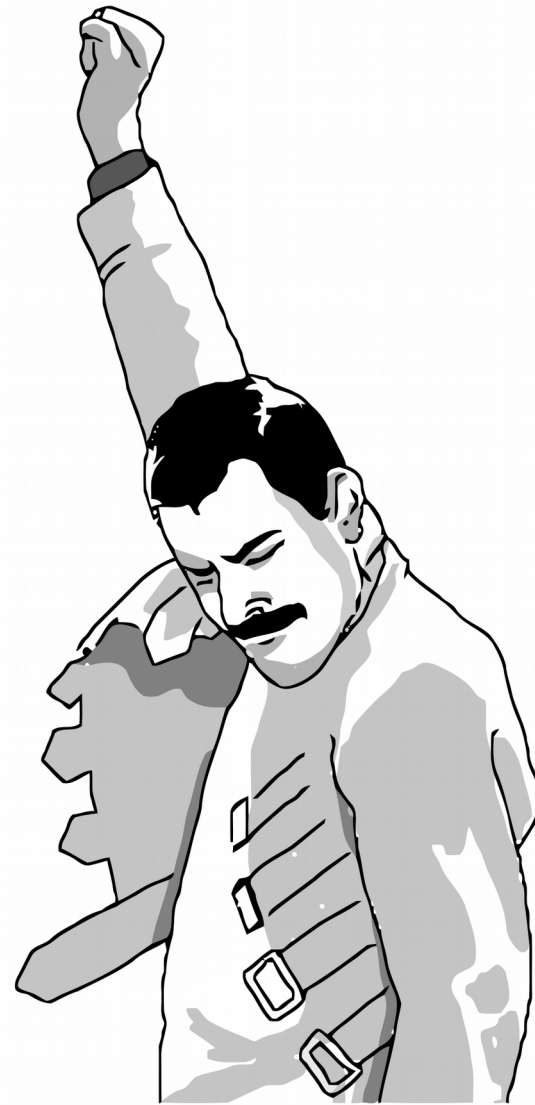
The code solves 1-D evolution equation of Shakura-Sunyaev accretion disk. The code is developed to simulate fast rise exponential decay (FRED) light curves of low mass X-ray binaries (LMXBs) for the paper "Determination of the turbulent parameter in the accretion disks: effects of self-irradiation in 4U 1543-47 during the 2002 outburst" by Lipunova & Malanchev (2016) [arXiv:1610.01399](https://arxiv.org/abs/1610.01399).

Installation

Docker

If you are familiar with [Docker](#) then you can skip all further installation instructions and go straight to the Usage section, using following string instead of `./freddi`.

F ast
R ise
E xponential
D e cay accretion
D isk
I mplementation

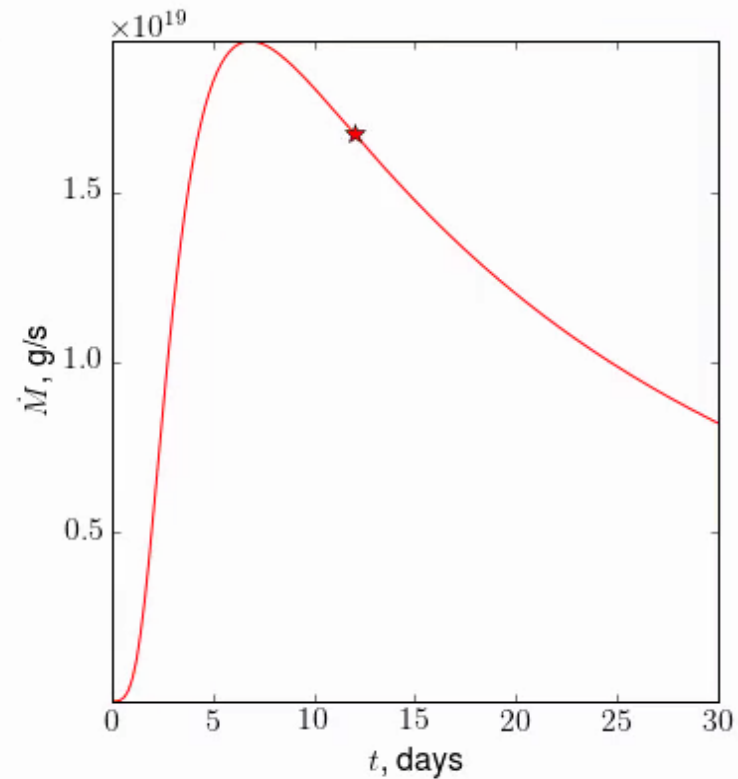
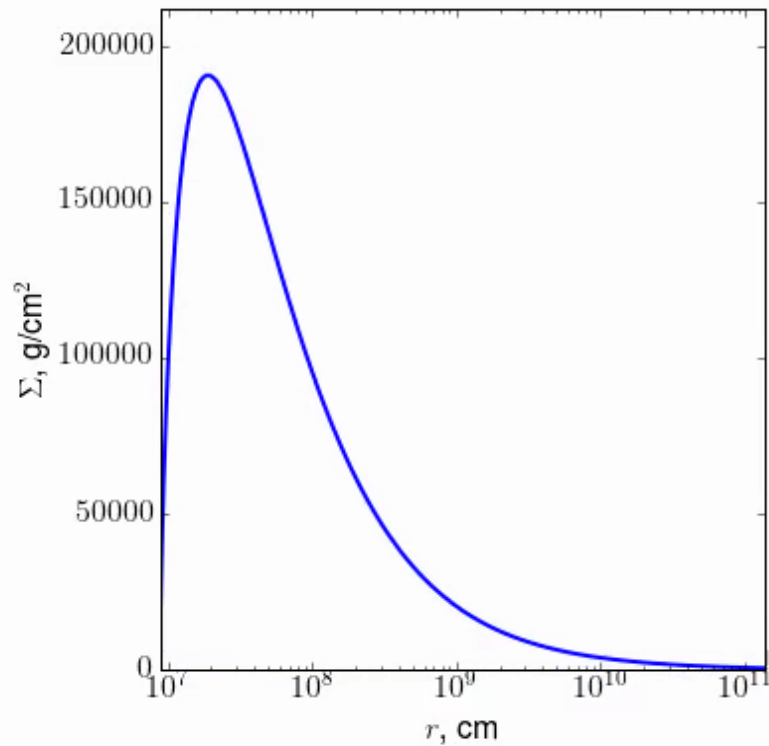


FREDDI

Расчет кривой блеска с начала вспышки диск с $R_{\text{hot}} = \text{const}$ (I)

Поверхностная плотность
от радиуса

Темп аккреции на центр
от времени

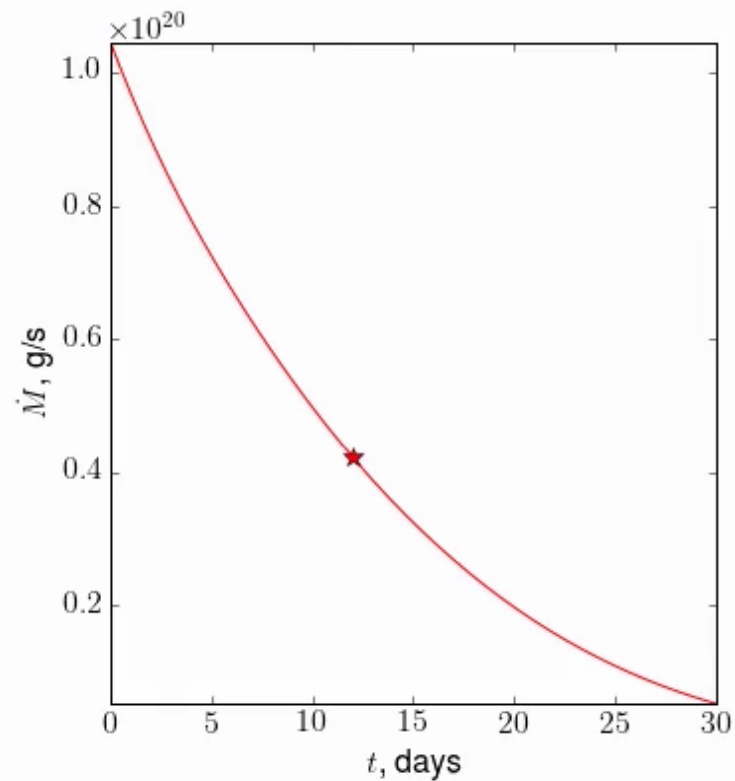
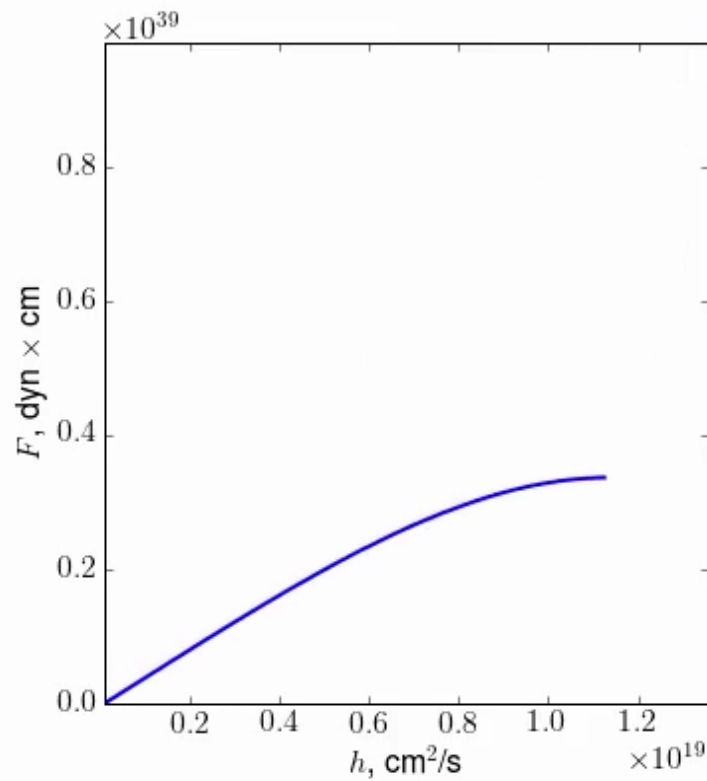


FREDDI

Расчет кривой блеска после пика вспышки Rhot уменьшается (II)

Момент вязких сил от
удельного момента импульса

Темп аккреции на центр
от времени



FREDDI

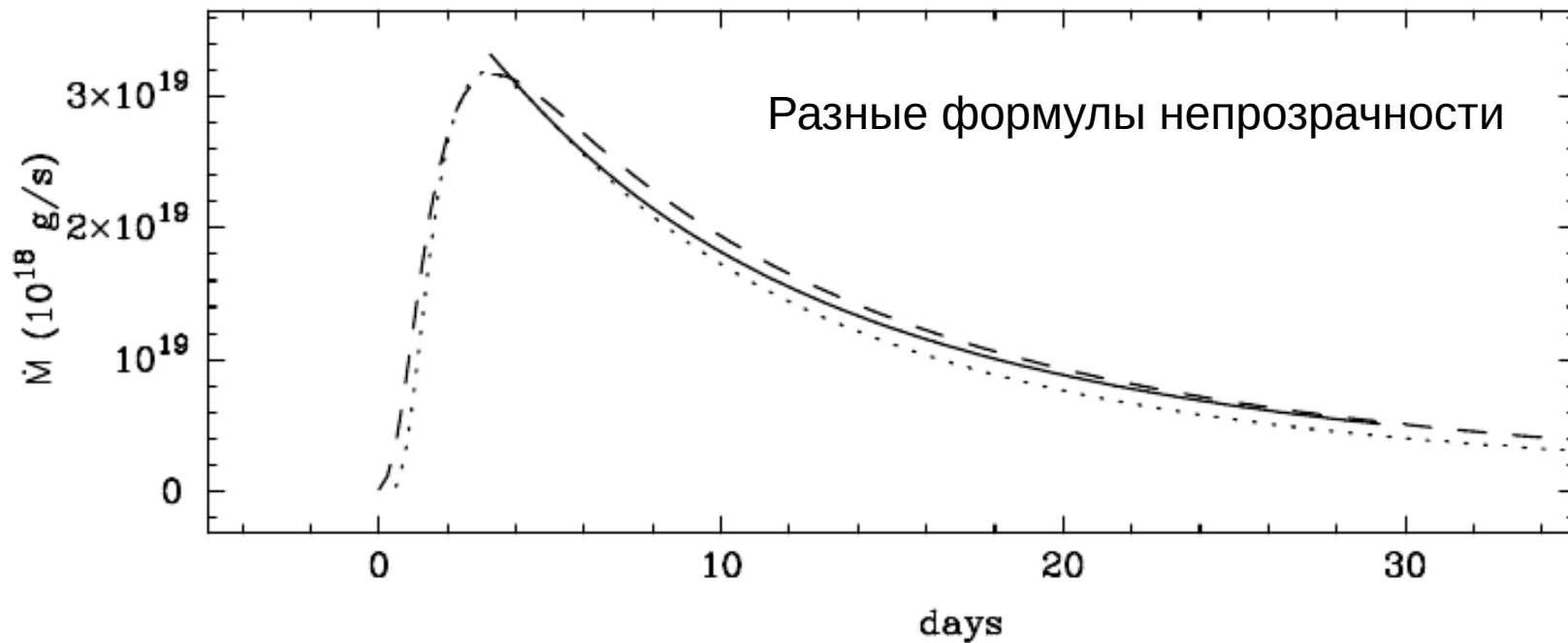


Figure 19. Modelled evolution $\dot{M}(t)$ for different opacity implementations for the solar abundancies: the dashed line is for Kramers' law $\kappa = 5 \times 10^{24} \rho / T^{7/2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$; the dotted line is for the analytic approximation to OPAL tables $\kappa = 1.5 \times 10^{20} \rho / T^{5/2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (Bell & Lin 1994); the solid line is for OPAL tables (Iglesias & Rogers 1996) calculated by other code (Malanchev & Shakura 2015). Disk radius is constant, $C_{\text{irr}} = 0$.

Фитирование при постоянном радиусе горячего диска

I

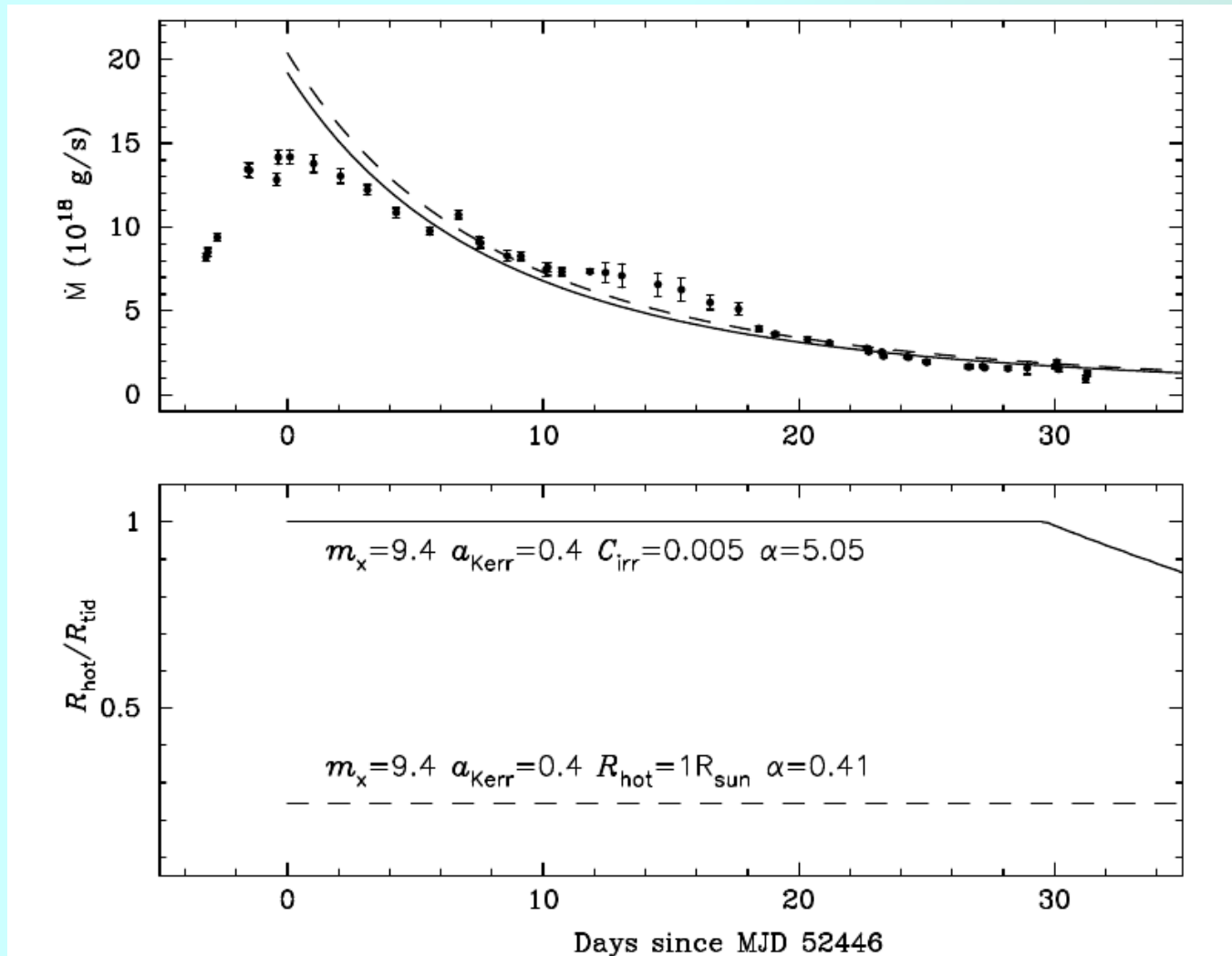


Figure 12. Same as Fig. 8, but C_{irr} and α are different; The hot evolving disk has a constant size before day 30 because the self-irradiation is very strong (solid line). The dashed line shows the best-fit result for the disk with less but constant radius.

Модель с переменным радиусом, Rhot @ Tirr=1e4 K

II

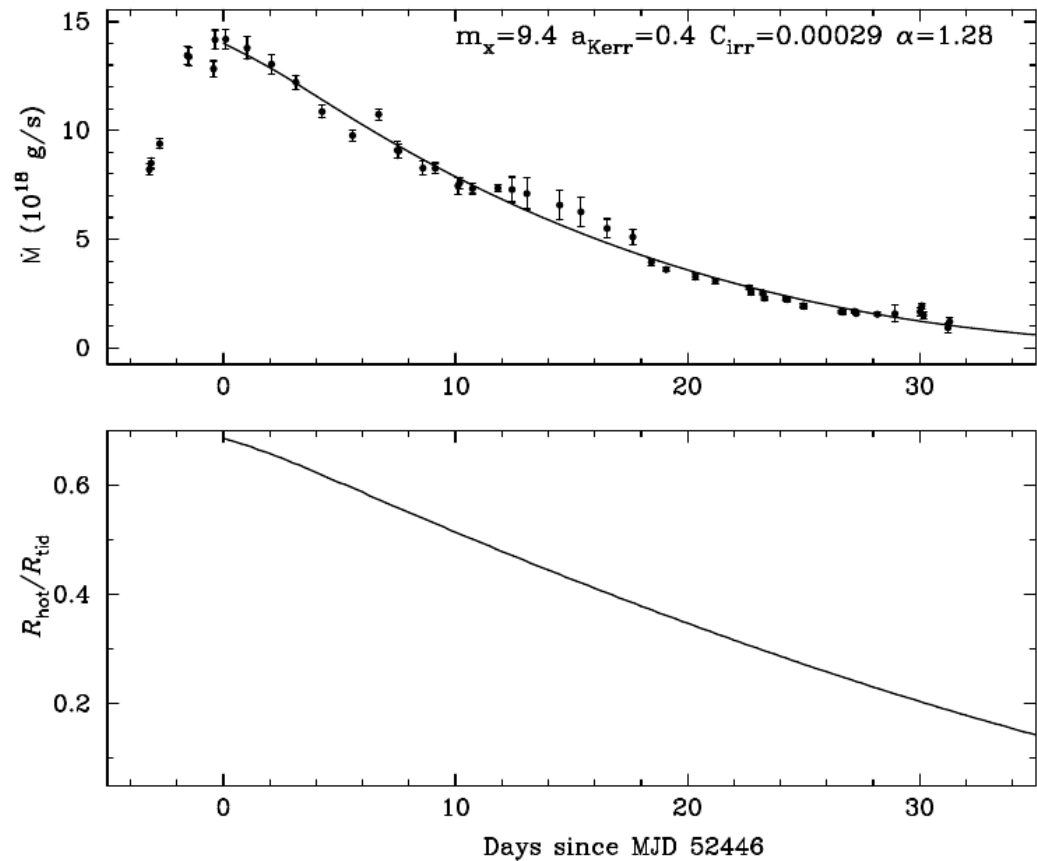


Figure 8. Top panel: modelled and observed $\dot{M}(t)$ of 4U 1543–47 (2002). Lower panel: evolution of the radius of the hot zone R_{hot} . Disk parameters and resulted α are indicated in the top panel. Distance obtained from spectral fitting is 8.62 kpc.

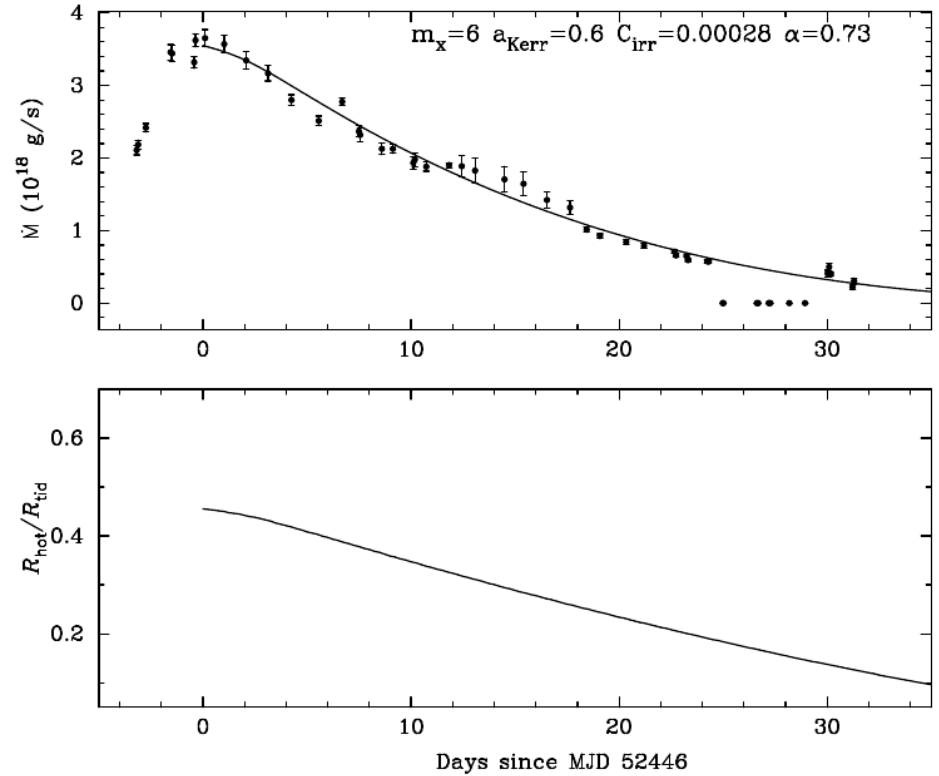
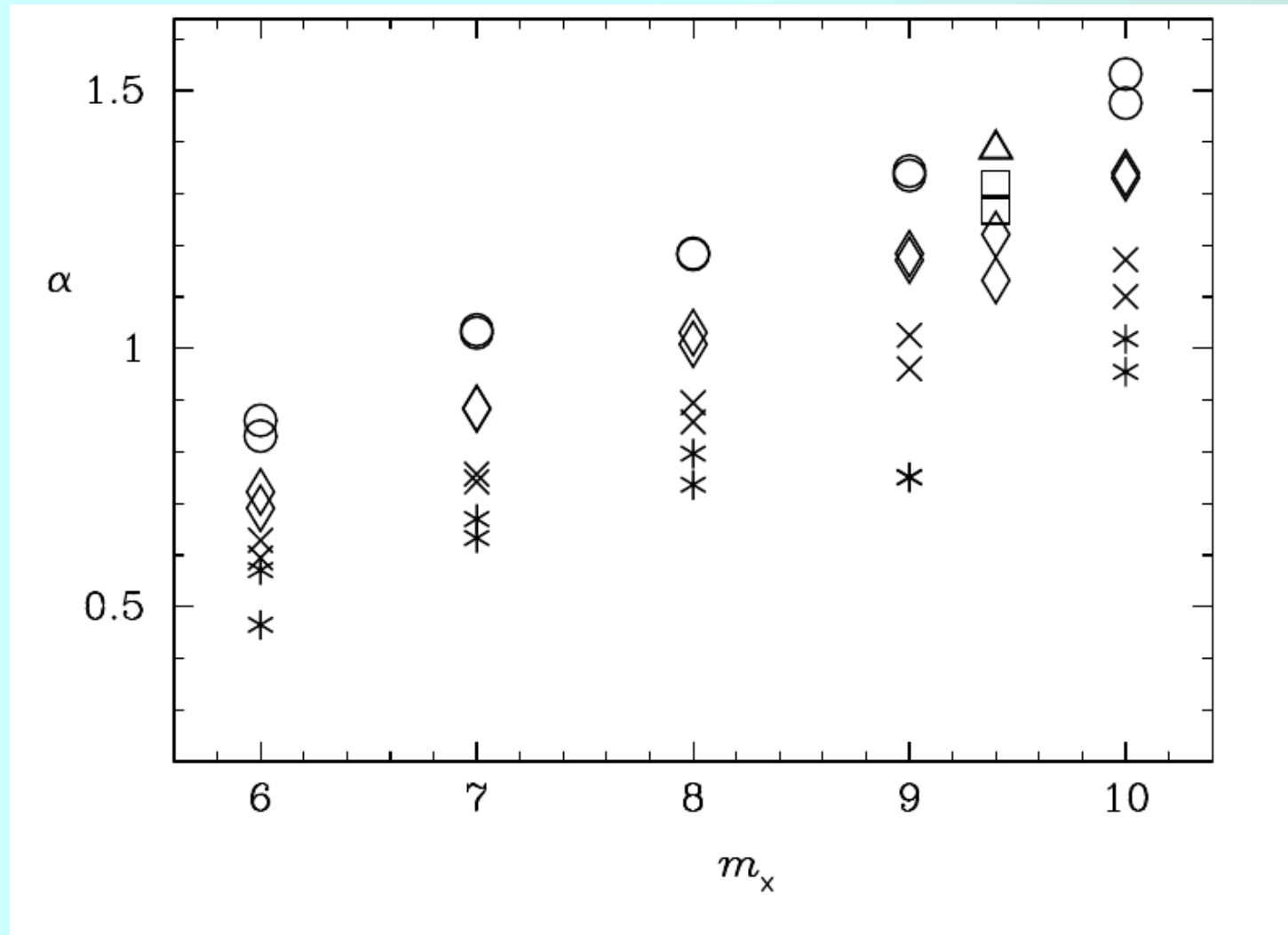


Figure 9. Same as in Fig. 8 but the BH parameters are different. Distance obtained from the spectral fitting is 4.7 kpc.

$$C_{\text{irr}} \sim 3 \times 10^{-4}$$

Поиск α в модели с переменным радиусом

II



II — не исключено, что необходим учет влияния холодной зоны на движение границы

FREDDI: Уточнение формулы

для зависимости α от параметров вспышки

$$\alpha \approx 0.2 f(R_{\text{hot}}, t_{\text{exp}}, \dot{M}_{\text{max}}, m_x)$$

Непрозрачность Крамерса

$$f = \left(\frac{R_{\text{hot}}}{R_{\odot}} \right)^{25/16} \left(\frac{t_{\text{exp}}}{30^{\text{d}}} \right)^{-5/4} \left(\frac{\dot{M}_{\text{max}}}{10^{18} \text{ g s}^{-1}} \right)^{-3/8} m_x^{5/16}$$

Аппроксимация таблиц OPAL

$$f = \left(\frac{R_{\text{hot}}}{R_{\odot}} \right)^{12/7} \left(\frac{t_{\text{exp}}}{30^{\text{d}}} \right)^{-9/7} \left(\frac{\dot{M}_{\text{max}}}{10^{18} \text{ g s}^{-1}} \right)^{-3/7} m_x^{2/7}$$

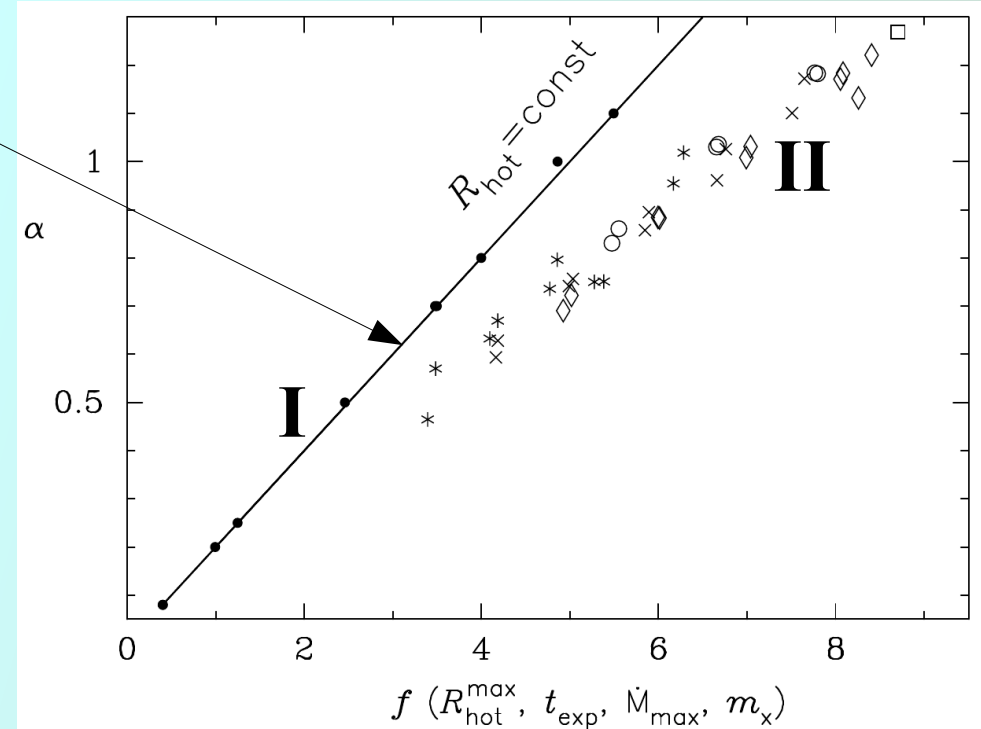


Figure 13. Dependence of α on burst/disk parameters. The line is the approximation for the FREDDI results (dots) with the constant radius R_{hot} and Kramer's opacity, see Eq. (13). The power law is explained in the text before Eq. (4). Symbols below are the results obtained for the disk with the variable radius of the hot zone R_{hot} set at $T_{\text{irr}} = 10^4 \text{ K}$ (same as in Fig. 7). Functions f for two opacity laws are given by Eqs. (14) and (15).

Модель с охлаждающим фронтом III

- аппроксимация результатов численных моделирований других авторов

Kotko & Lasota (2012)

Оценка турбулентного параметра для нормальных вспышек в карликовых новых

$$\alpha_{\text{hot}} \sim 0.1 - 0.2$$

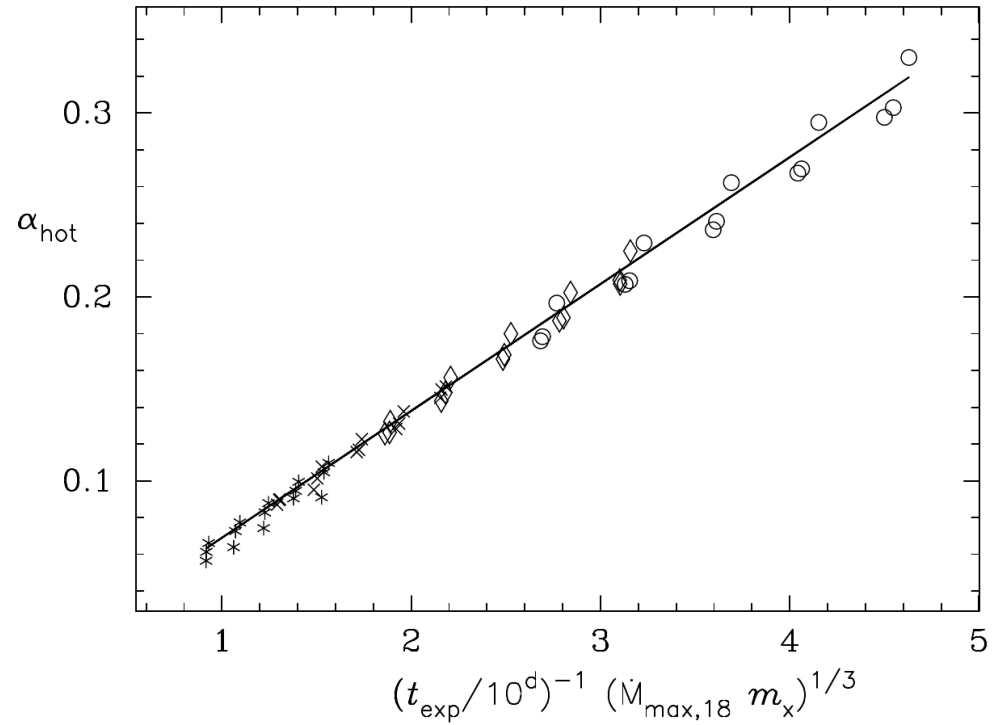
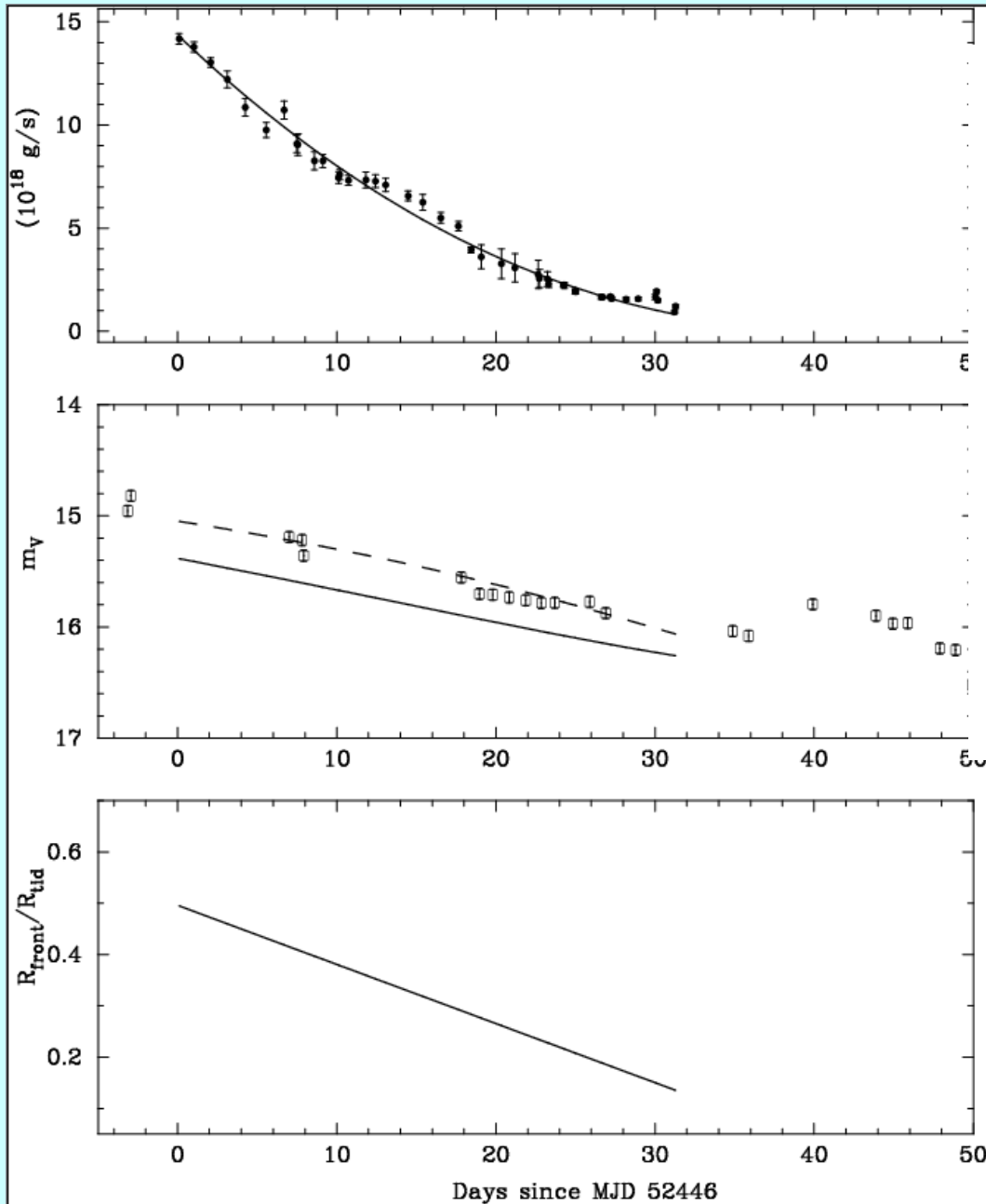
Menou et al. (1999)

$$\dot{M}(t) = \dot{M}_{\text{peak}} (R_{\text{front}}(t)/R_{\text{hot,peak}})^{2.2}$$

$$R_{\text{front}}(t) = R_{\text{hot,peak}} - u_{\text{front}} t$$

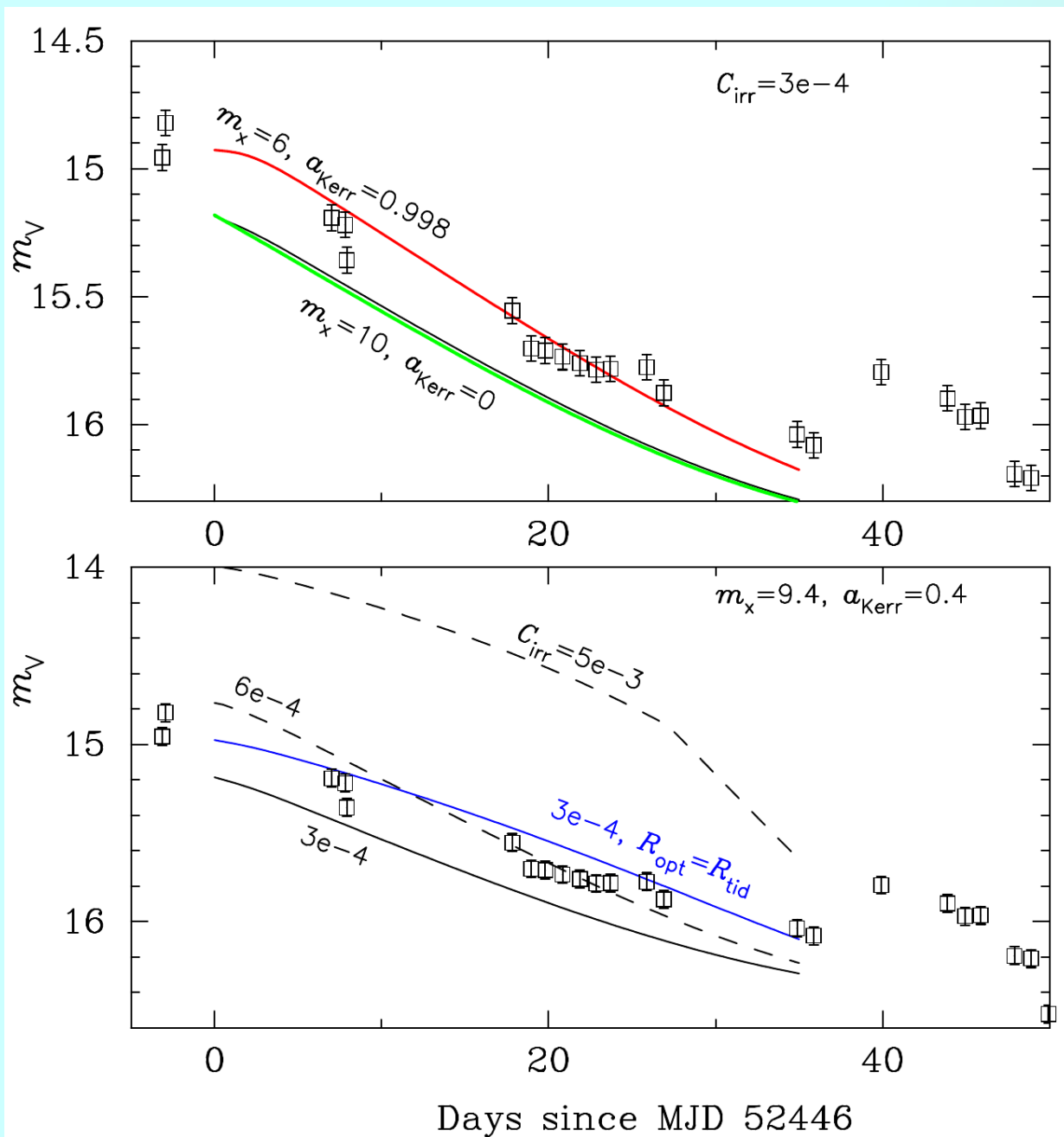
$$u_{\text{front}} = k \alpha u_{\text{sound}}, \quad u_{\text{sound}} = \sqrt{\mathcal{R} T_{\text{crit}}/\mu}, \quad k \approx 1/14.$$
$$T_{\text{crit}} = 4.7 \times 10^4 \text{ K}$$

Поиск α в модели с охлаждающим фронтом (как в карликовой новой)



$$C_{\text{irr}} < 1.5 \times 10^{-4}$$

Сравнение потока в оптической полосе V



Параметр облучения

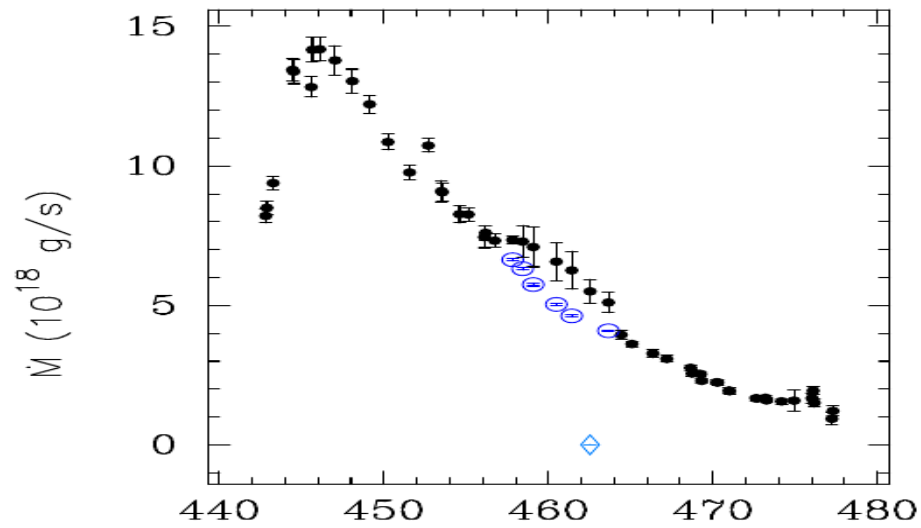
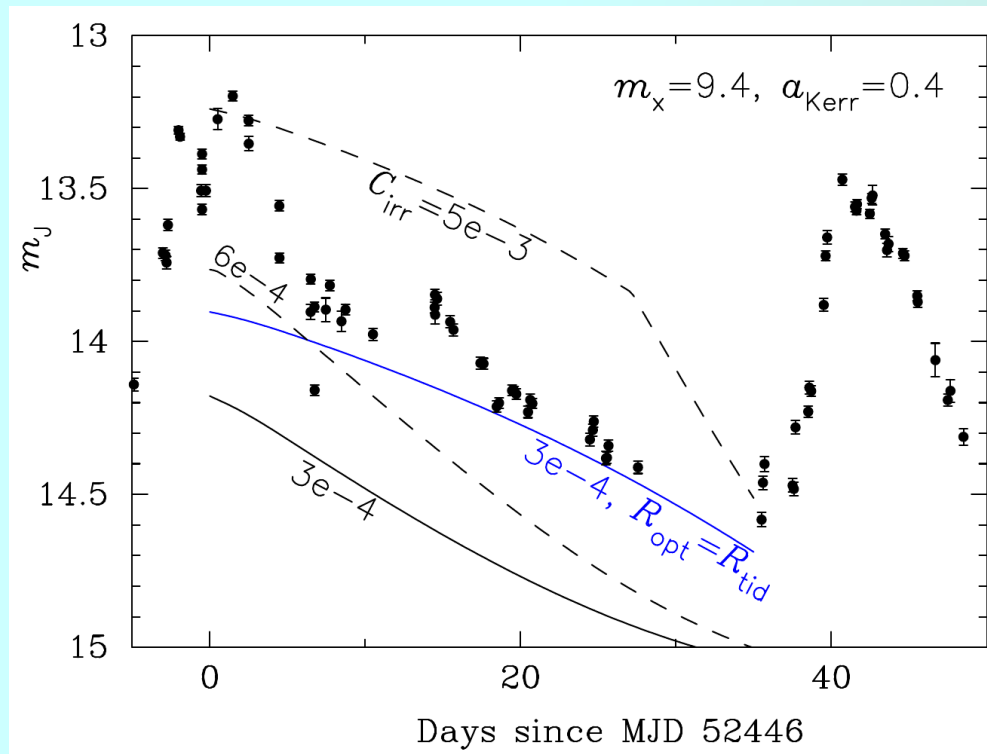
$$C_{irr} \sim 5 \times 10^{-3}$$

исключается

$$C_{irr} \sim (3-6) \times 10^{-4} \text{ или}$$

еще меньше

Сравнение потока в оптической полосе J



Determination of the turbulent parameter in the accretion disks: effects of self-irradiation in 4U 1543–47 during the 2002 outburst

G. V. Lipunova^{*}, K. L. Malanchev

Lomonosov Moscow State University, Sternberg Astronomical Inst., Universitetski pr. 13, Moscow 119991, Russia

6 October 2016

arXiv:1610.01399v1 [astro-ph.HE] 5 Oct 2016

ABSTRACT

The accretion disk around black hole in 4U 1543–47, a binary system with the orbital period of 1.116 day, can have the size of about $4R_{\odot}$. An outburst of 4U 1543–47 in 2002 has a characteristic exponential decay time of about 15 days. Such fast decay cannot be explained by the viscous evolution in the whole disk, and the evolution of the inner hot disk with changing size should be considered. Accretion rate evolution of this burst is obtained from spectral modelling of the archival RXTE/PCA data. Estimates on α are derived by fitting observed $\dot{M}(t)$ to the numerical results of the code FREDDI for a range of black hole masses and Kerr parameters. If the self-irradiation of the disk by the emission from its center, which is parametrized by factor C_{irr} , was as high as suggested for other X-ray transients then the disk was completely ionized and the short time of the decay required huge α . Different scenarios are possible depending on the degree of irradiation. If irradiation factor C_{irr} was about 5×10^{-4} , a decade lower than suggested for X-ray transients, the disk could be viscously evolving with the hot zone size controlled by irradiation. For even weaker irradiation, the burst decline proceeded as in normal outbursts of dwarf novae and $\alpha_{\text{hot}} \sim 0.1 - 0.3$. The analytic approximations are derived to estimate α in X-ray novae using $\dot{M}(t)$. Resulting α can vary remarkably depending on the unknown black hole Kerr parameter and the self-irradiation degree.

Key words: accretion – accretion disks – binaries: general – methods: numerical – X-rays: individual: 4U 1543–47

1 INTRODUCTION

X-ray transient 4U 1543–47 (V* IL Lup) is a low mass X-ray binary system (LMXB) that shows outbursts in X-rays about every ten years. The compact accreting object is a reliable black hole candidate. The binary has the orbital period $P_{\text{orb}} \approx 1.116$ day (Orosz 2003), which is longer than those of most LMXBs with known orbital periods. For example, the X-ray novae with black hole candidates A 0620–00, GS 1124–68, GS 2000+25, GRO 0422+32 have orbital periods less than 10 hours. The optical companion in

timescale. As the model predicts, this happens first at some radius. An ‘avalanche’ proceeds to other disk rings outwards and inwards, converting the disk to the hot state. An outburst in an X-rays occurs after a transition of a substantial mass in the disk to the hot state and after the redistribution of the torque led to the increased accretion rate in the centre. To reproduce outburst cycles of dwarf and X-ray novae it is necessary that α -parameter is higher in the hot state than in the cold state (see, e.g., Lasota 2001).

Viscous evolution of the disk redistributes mass and viscous

ВЫВОДЫ

- Определение α в больших дисках требует аккуратного рассмотрения эффектов облучения, которое влияет на размер горячего диска
- В 4U 1543-47 (2002) форма зависимости темпа аккреции от времени говорит о том, что радиус горячего диска не мог быть постоянным
- Об этом же говорят требуемые величины α — слишком большие. Такой диск был бы, если параметр облучения — типичный для рентгеновских новых ($5e-3$, Dubus et al 2001)
- Следовательно, параметр облучения меньше, примерно на порядок.
- Такое же значение подкрепляется величиной потока в полосе V и J
- Возможно, вспышка в 4U 1543-47 (2002) развивалась по сценарию вспышки в карликовой новой.

- Создан публично доступный код по расчету кривых блеска рентгеновских новых Freddi
- Получена с помощью Freddi аппроксимационная формула для оценки параметра турбулентности в коротко-периодических рентгеновских новых в зависимости от пика и e^{hr} времени темпа аккреции, массы ЧД и размера диска.

СПАСИБО!