

Массы белых карликов в промежуточных полярах и другие их характеристики в эпоху Gaia

Валерий Сулейманов

Universität Tübingen, Germany

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет,
Институт Космических Исследований

Виктор Дорошенко, Klaus Werner

Universität Tübingen, Germany

+ A. W. Shaw, C. O. Heinke, K. Mukai, J. A. Tomsick, D. J. K. Buisson, P. Gandhi, B. W. Grefenstette, J. Hare, J. Jiang, R. M. Ludlam, V. R., G.R.Sivakoff

Семинар отдела релятивистской астрофизики
ГАИШ МГУ

20 апреля 2021, Москва

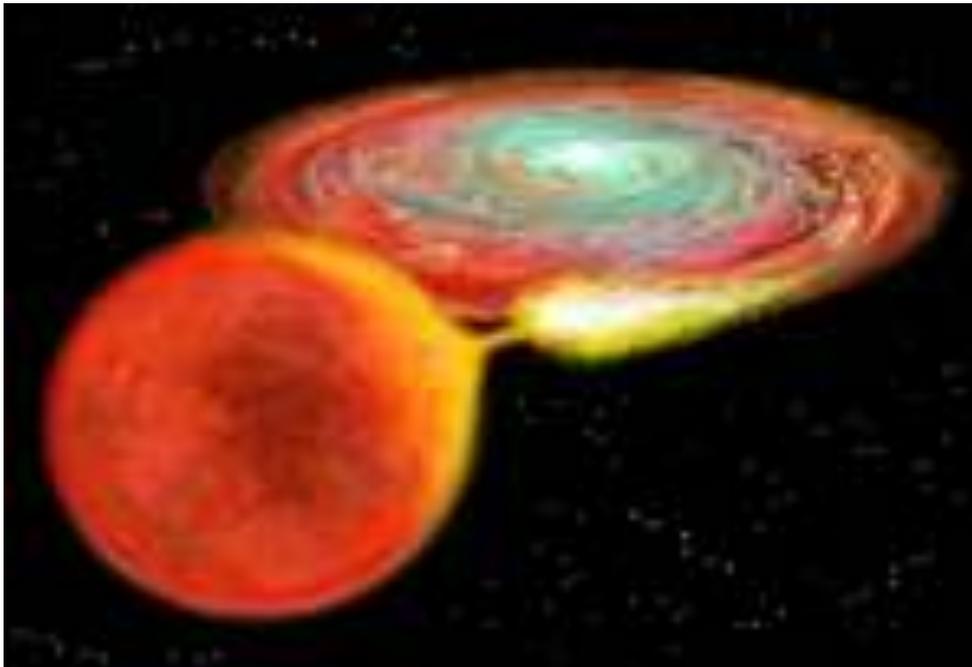
План:

- 1) Введение. Катаклизмические переменные и промежуточные поляры как их подкласс.
- 2) Основная проблема: белые карлики (БК) в катаклизмических переменных в среднем тяжелее, чем одиночные БК.
- 3) Модель аккреционной колонки и ее жесткое рентгеновское излучение как основа для определения масс БК в промежуточных полярах.
Сделанные предположения и что еще надо бы учесть.
- 4) Метод определения масс БК и других параметров промежуточных поляров.
- 5) Полученные результаты

Катаклизмические переменные звезды

С аккреционным диском

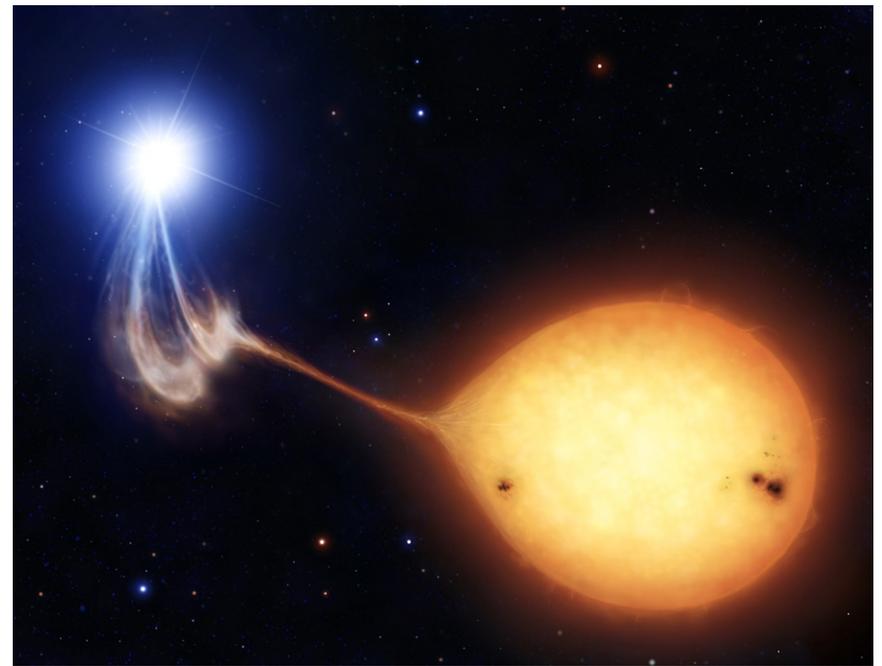
Магнитное поле БК слабое ($< 10^4$ G)



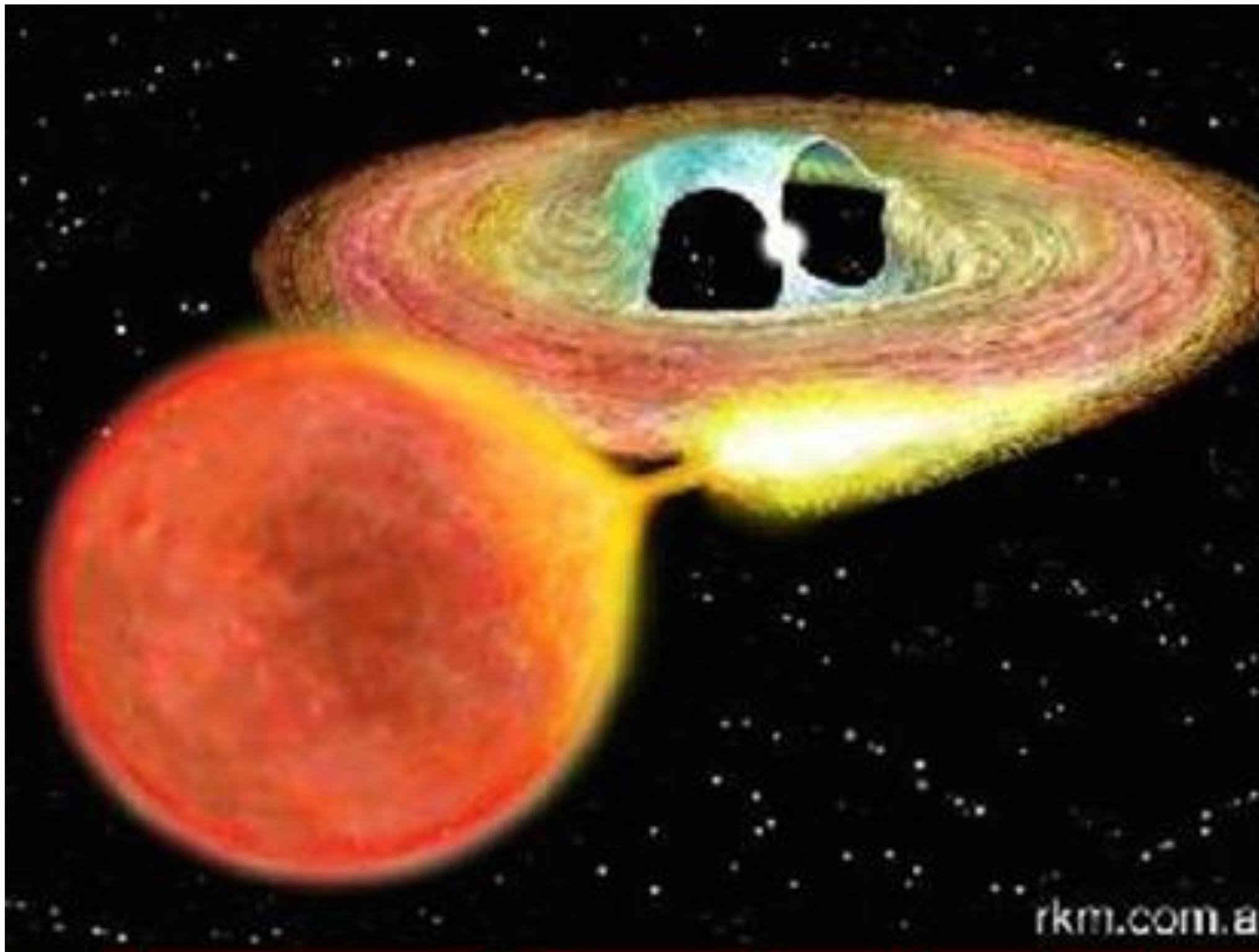
Карликовые Новые,
Новоподобные,

Без аккреционного диска

Магнитное поле БК сильное



Поляры



Промежуточные поляры (IPs)

Подкласс катаклизмических переменных звезд (CVs).

Аккреция на намагниченный белый карлик (БК), $B \leq 10$ MG.

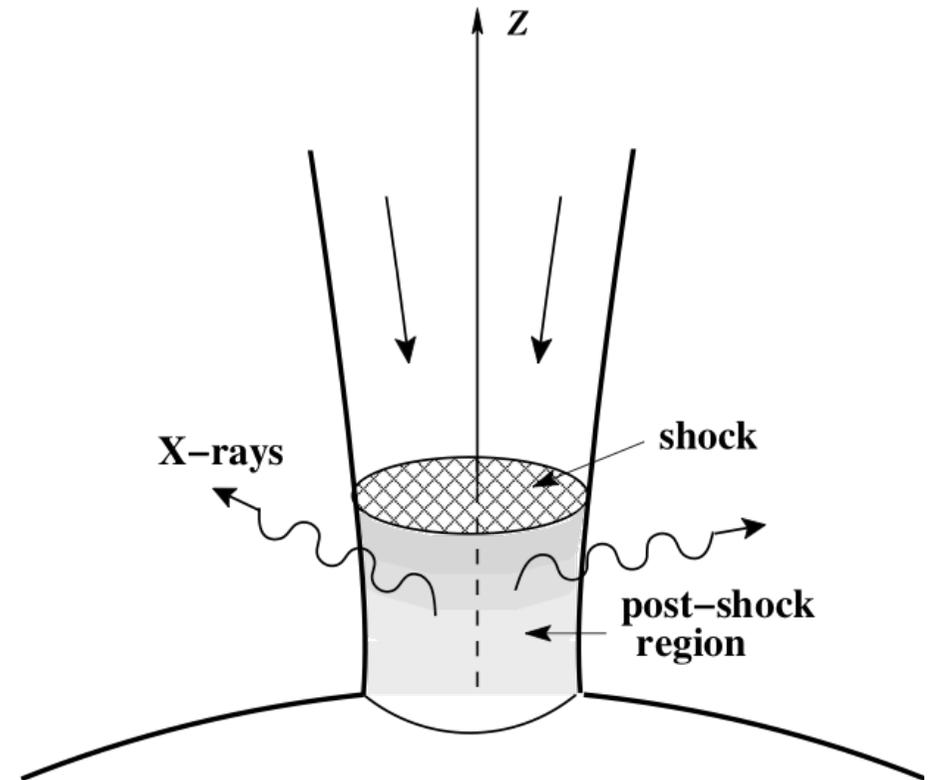
Источники рентгеновского излучения $kT_{br} \sim 10 - 30$ keV

Сильная ударная волна

$$V = 0.25V_{ff}, \quad \rho = 4\rho(V_{ff})$$

$$kT_{sh} \approx \frac{2}{3}\mu m_H \left(\frac{3}{4}V_{ff}\right)^2 \propto \frac{M}{R(M)}$$

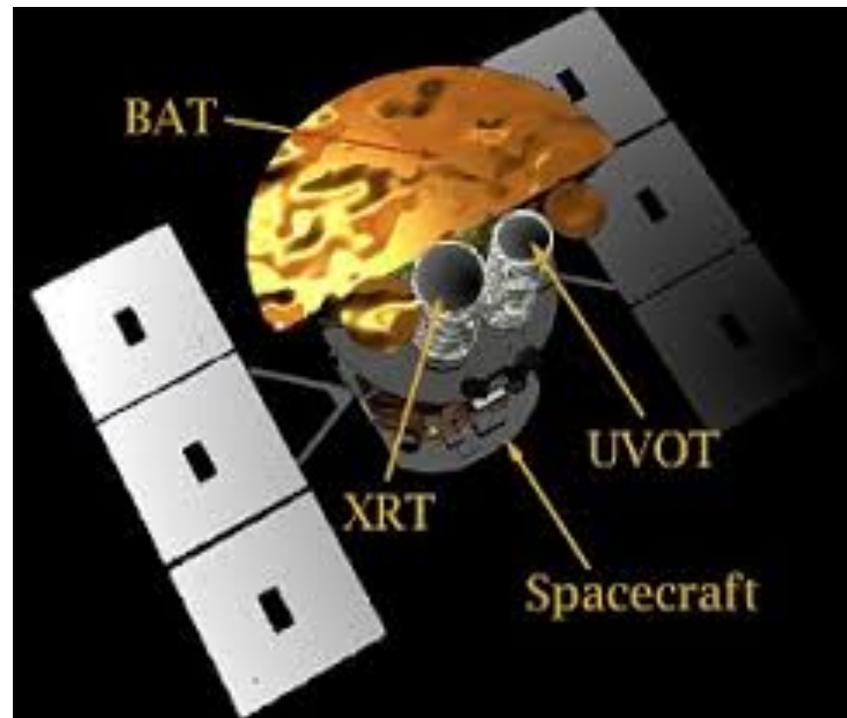
По форме рентгеновского спектра можно найти массу белого карлика!



Рентгеновские обсерватории

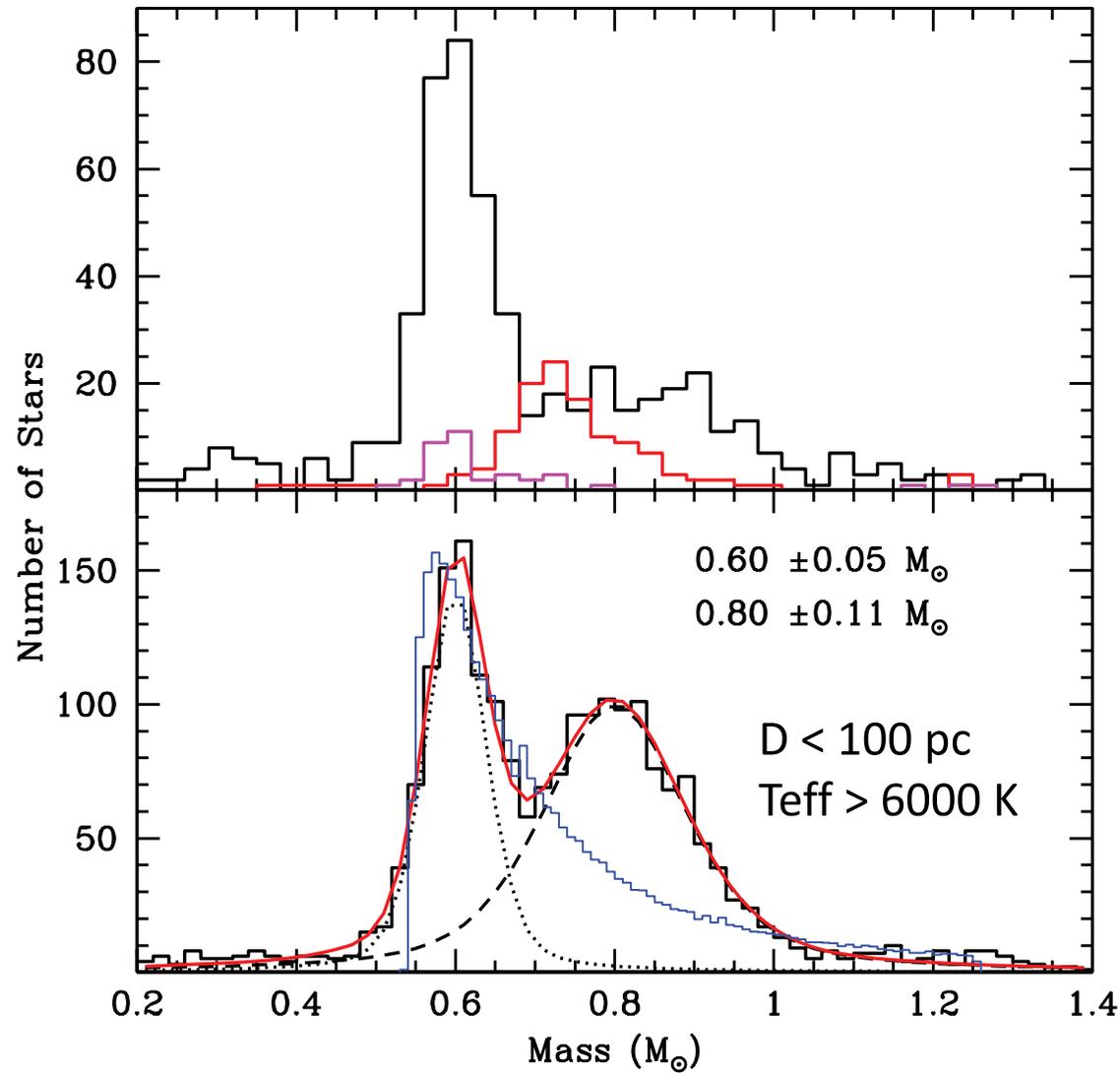


NuSTAR (3 -79 keV)
строит изображения

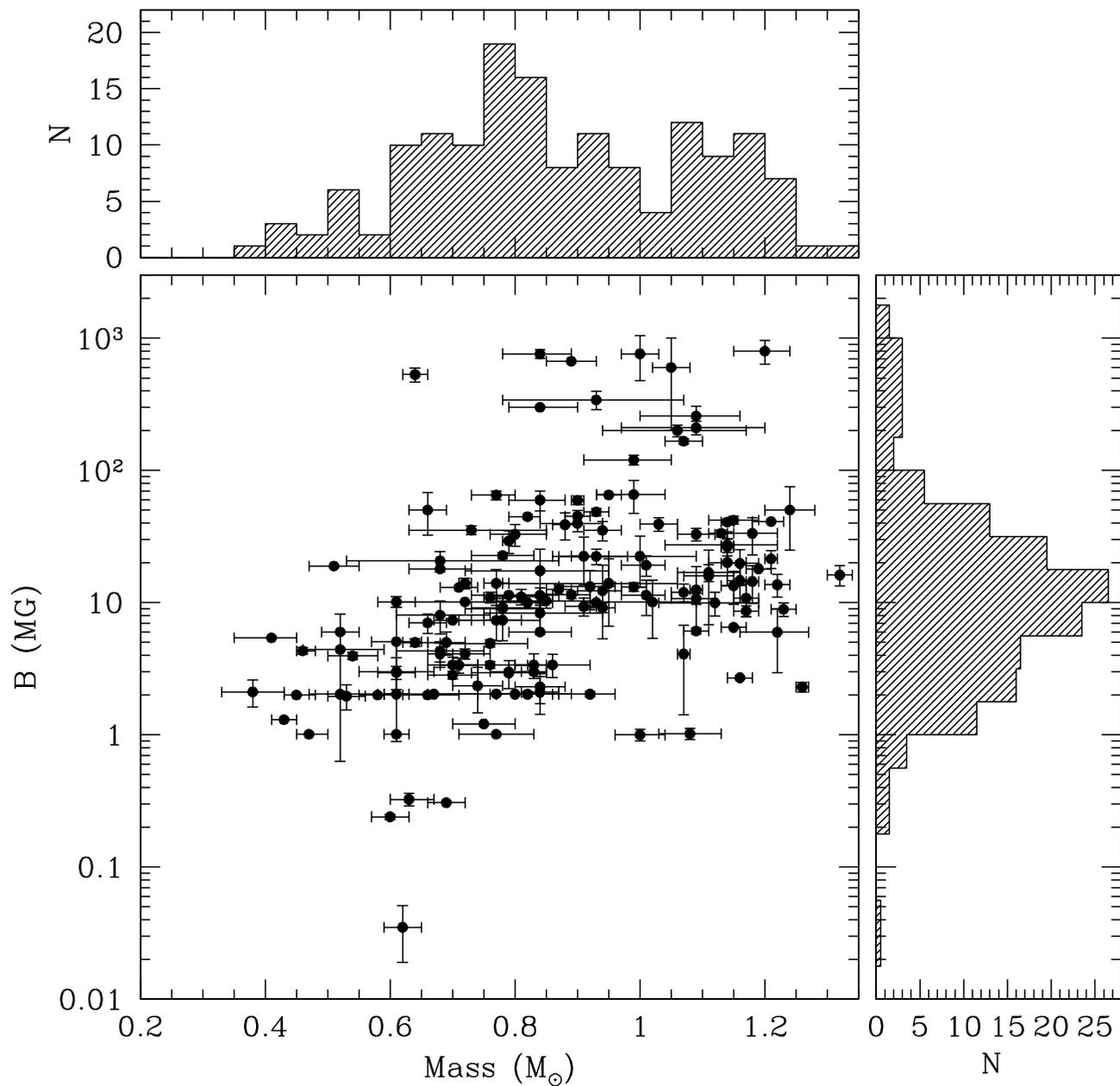


Swift/BAT (15 -200 keV)
кодированная маска

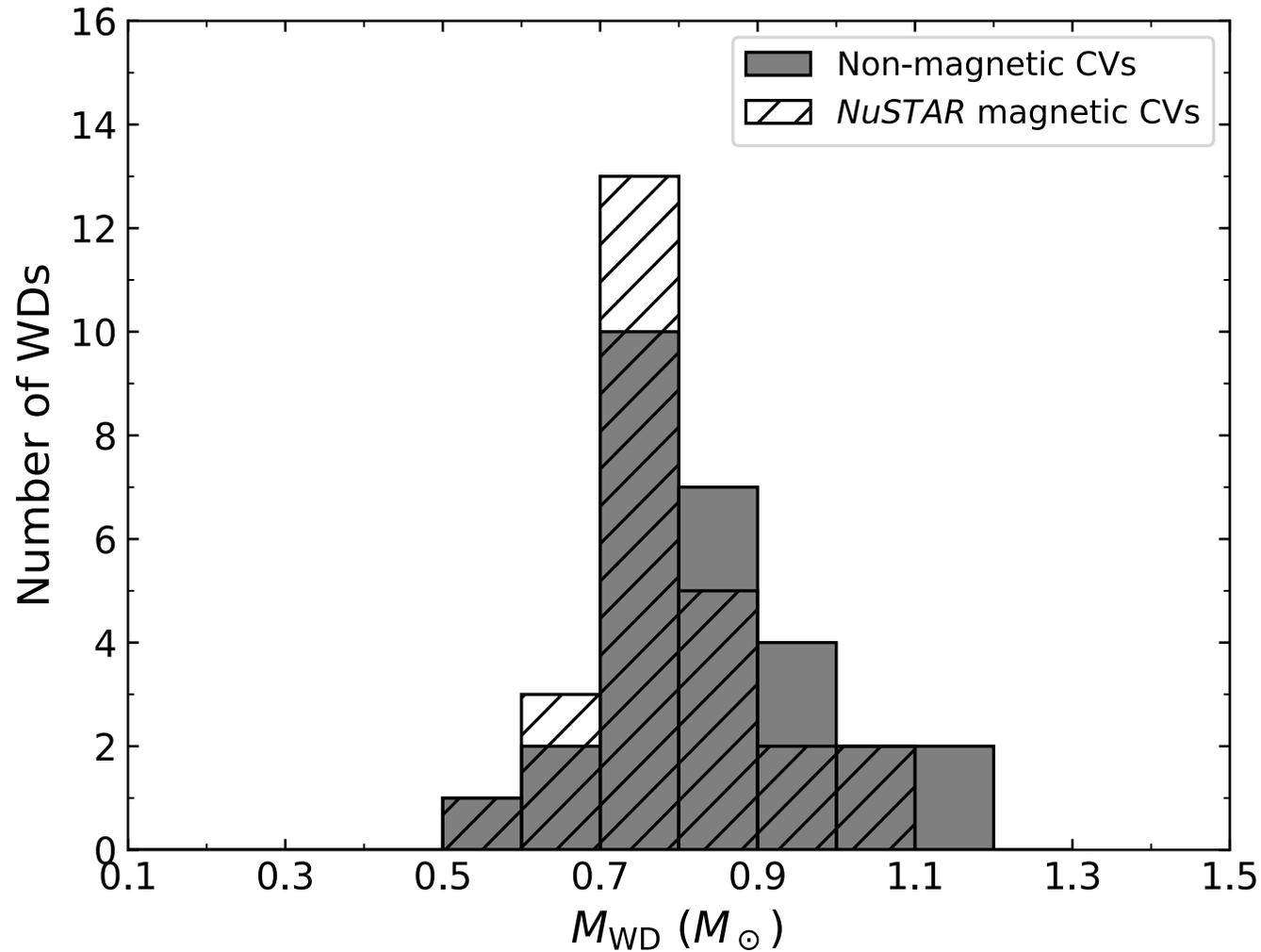
Распределение одиночных БК по массам (Kilic+ 2018)
Второй пик (0.8 M_{sun}) связывают со слияниями двойных БК



Распределение одиночных магнитных БК по массам и напряженности поля (Кавка 2020)

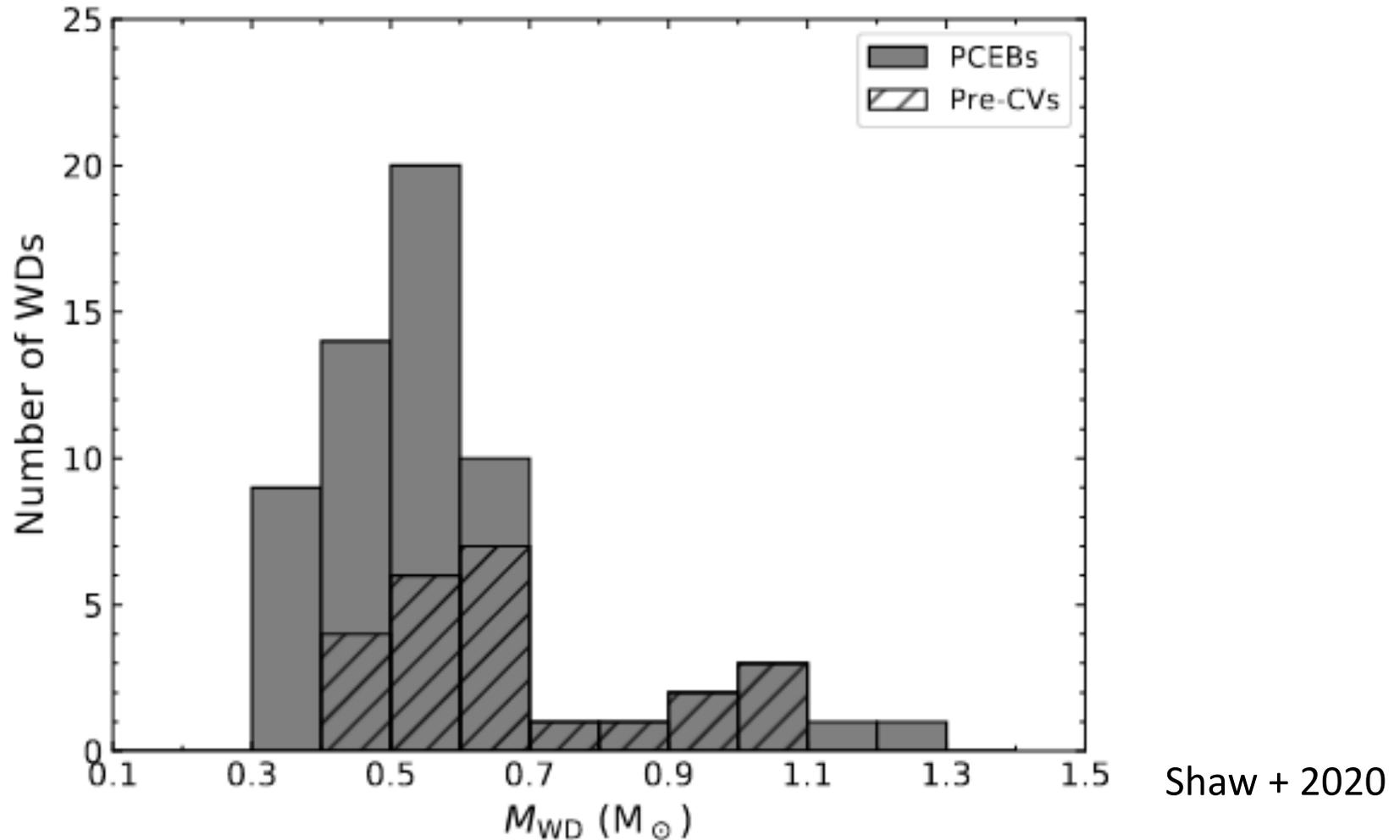


Распределение БК по массам в немагнитных CVs (Zorotovic+ 2011)
Распределение БК по массам в промежуточных полях
такое же (Shaw + 2020)



Shaw + 2020

Распределение БК по массам в двойных после стадии общей Оболочки (серые колонки) и в пред-катаклизмических переменных (штрихованные колонки) (Zorotovic+ 2011)

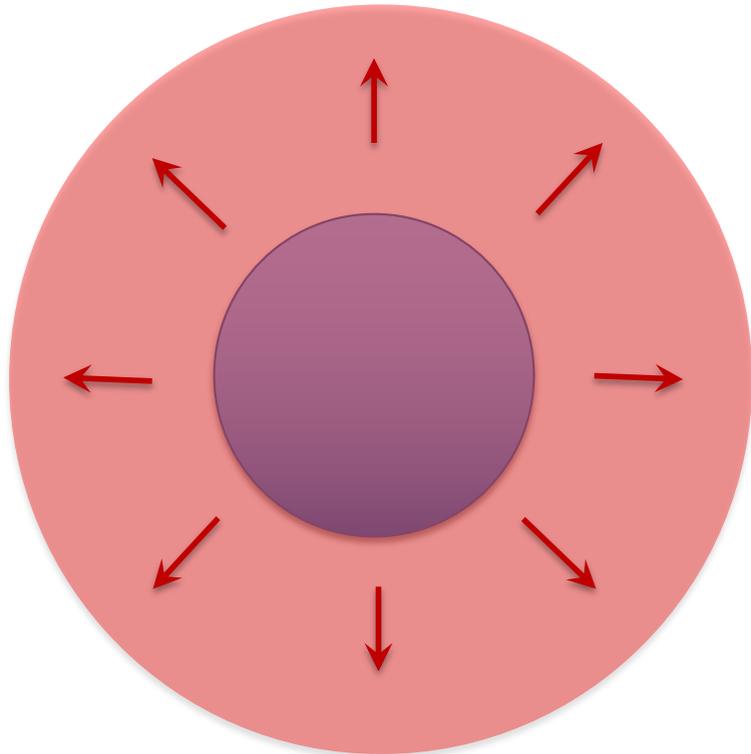


Эмпирически подобранная зависимость скорости потери углового орбитального момента от массы БК во время вспышек Новых может помочь (Schreiber + 2016)

Влияние вспышек Новых

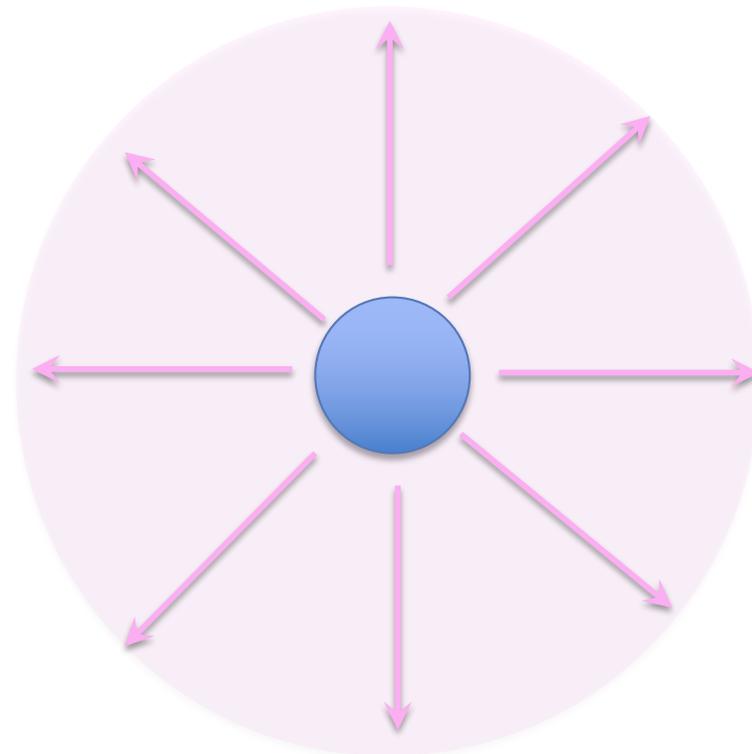
Легкий БК

Массивная, плотная,
медленно расширяющаяся оболочка



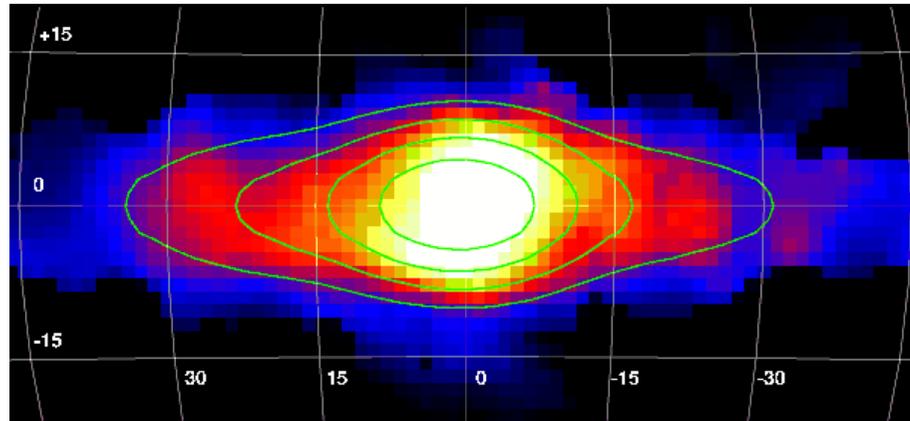
Массивный БК

Легкая, разреженная,
быстро расширяющаяся оболочка



ПОЭТОМУ - эмпирически подобранная зависимость скорости потери углового орбитального момента от массы БК во время вспышек Новых может помочь
(Schreiber + 2016)

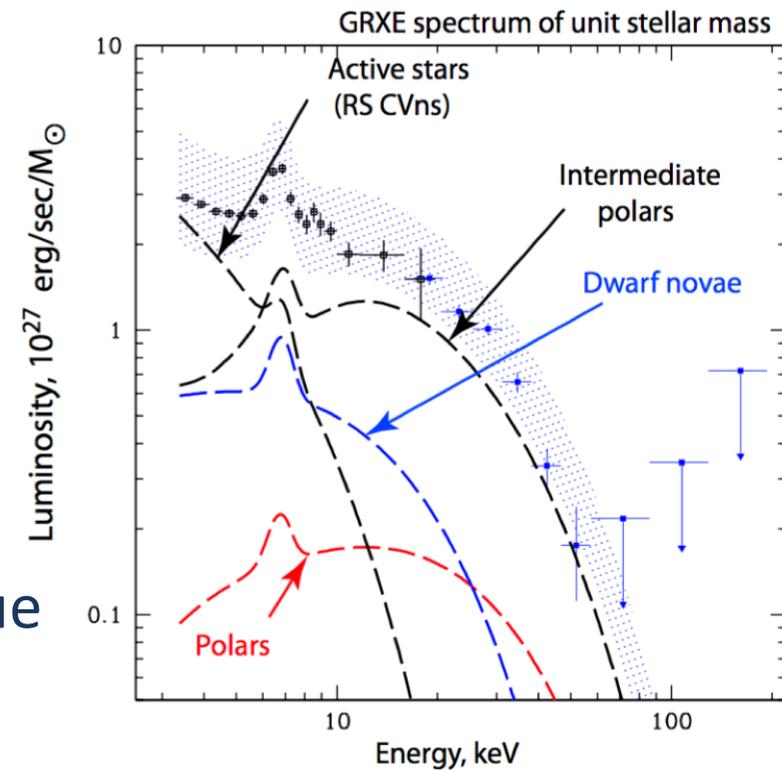
Рентгеновский спектр хребта Галактики



Krivonos + 2007

Диффузное рентгеновское излучение центра Галактики (NuSTAR)

$\langle M \rangle \approx 0.9 M_{\text{sun}}$, Hailey + 2016



$\langle M \rangle \approx 0.5 M_{\text{sun}}$, Krivonos + 2007

$\langle M \rangle \approx 0.5 - 0.7 M_{\text{sun}}$, Yuasa + 2012

Исторический экскурс

- **First works**

Rotschild et al (1981) – идея и применение к AM Her

Ishida (1991) – GINGA / LAC observations, isothermal post-shock region (PSR, or accretion column)

- **Detail model of PSR (non-isothermal)**

Aizu (1973), Wu et al (1994), Woelk & Beuermann (1996), Cropper et al (1999), dipole geometry - Canalle et al (2005), two-temperature plasma Saxton et al (2007)

- **WD mass determinations using non-isothermal models of PSR**

Cropper et al (1999) – GINGA / LAC (2-20 keV)

Ramsay (2000) – RXTE / PCA (3-20 keV)

Suleimanov et al (2005) – RXTE / PCA + HEXTE

Brunschweiler et al (2009) - Swift / BAT

Yuasa et al (2010) - Suzaku

De Martino's group, Bernardini + (2012-2019) - INTEGRAL

Новые сетки теоретических спектров

Квази-дипольная геометрия

предложена Hayashi & Ishida 2014 (corrected)

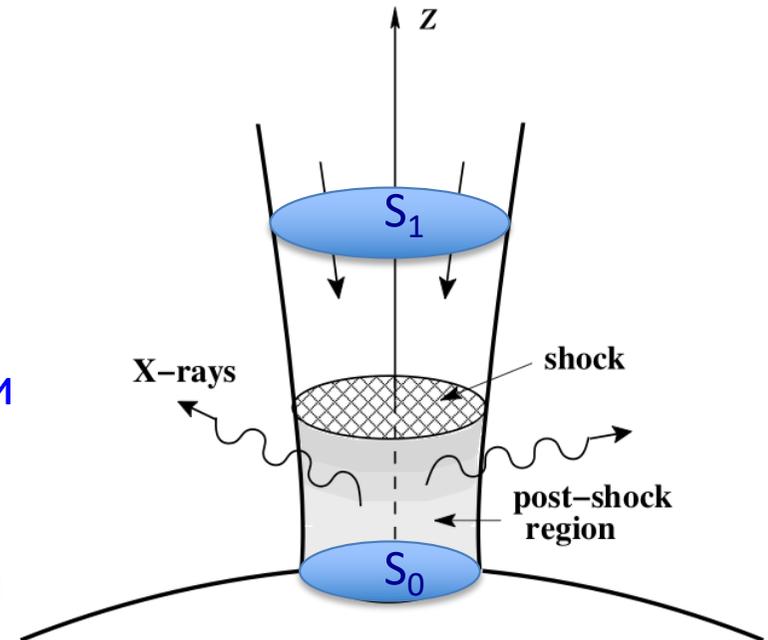
Полная система самосогласованных гидродинамических уравнений, описывающих аккреционную колонку

$$\frac{1}{S} \frac{d(S\rho v)}{dz} = 0, \quad \text{Уравнение неразрывности}$$

$$\rho v \frac{dv}{dz} = -\frac{dP}{dz} - g(z)\rho, \quad \text{Уравнение Эйлера}$$

and Закон сохранения энергии

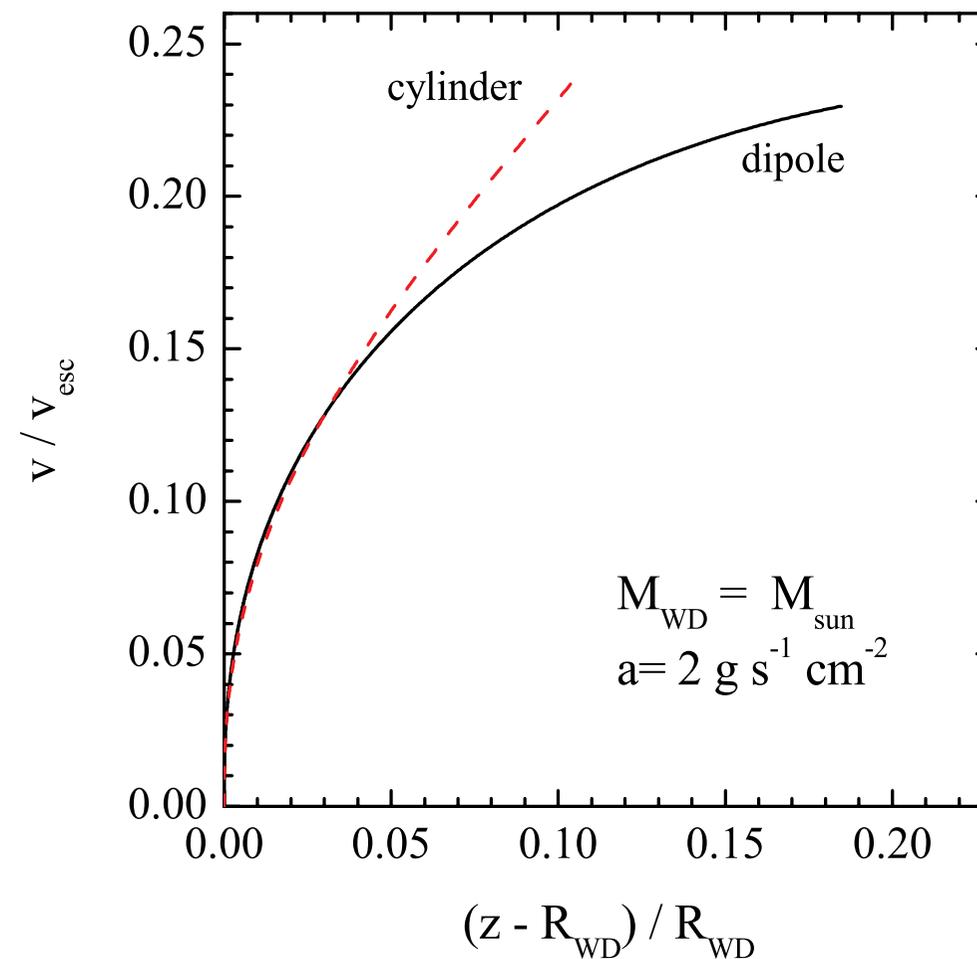
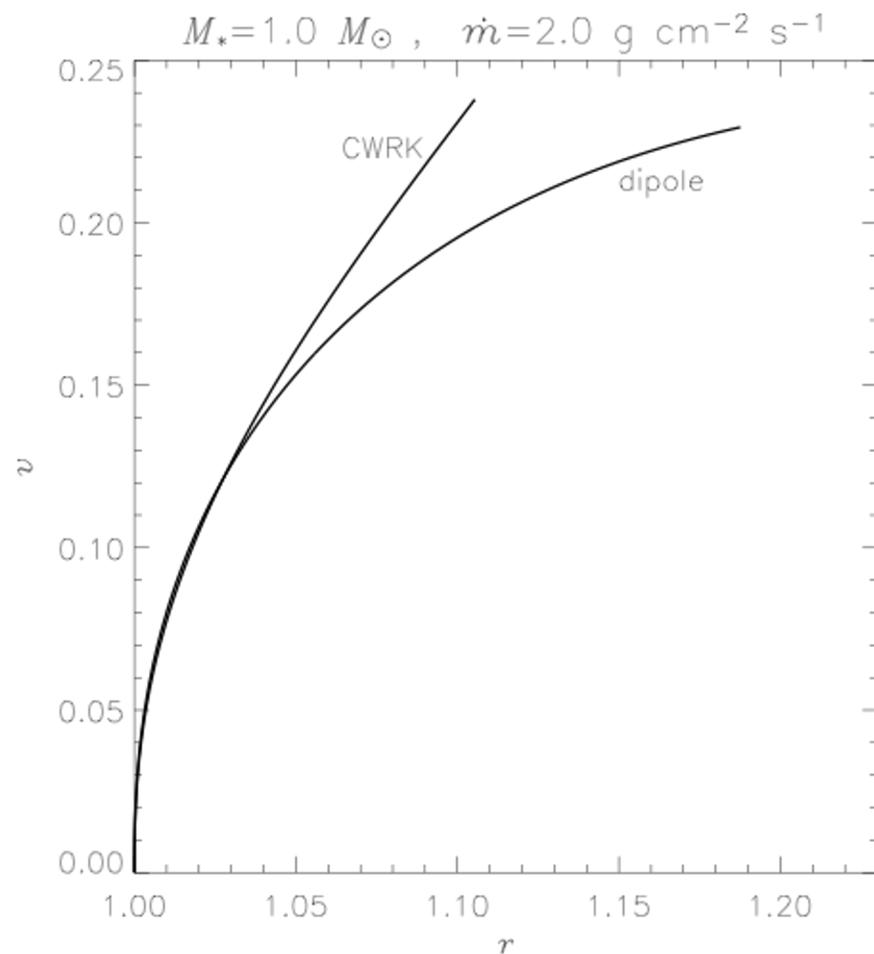
$$\frac{1}{S} \frac{d}{dz} \left[S v \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \varepsilon + P \right) \right] = -g(z)\rho v - \Lambda(\rho, T). \quad S = (1+z/R)^3$$



APES Использована эта функция охлаждения $\Lambda(\rho, T)$
(огромная благодарность Gerardo Luna !)

Свойства моделей в новых сетках

Сравнение с результатами других авторов

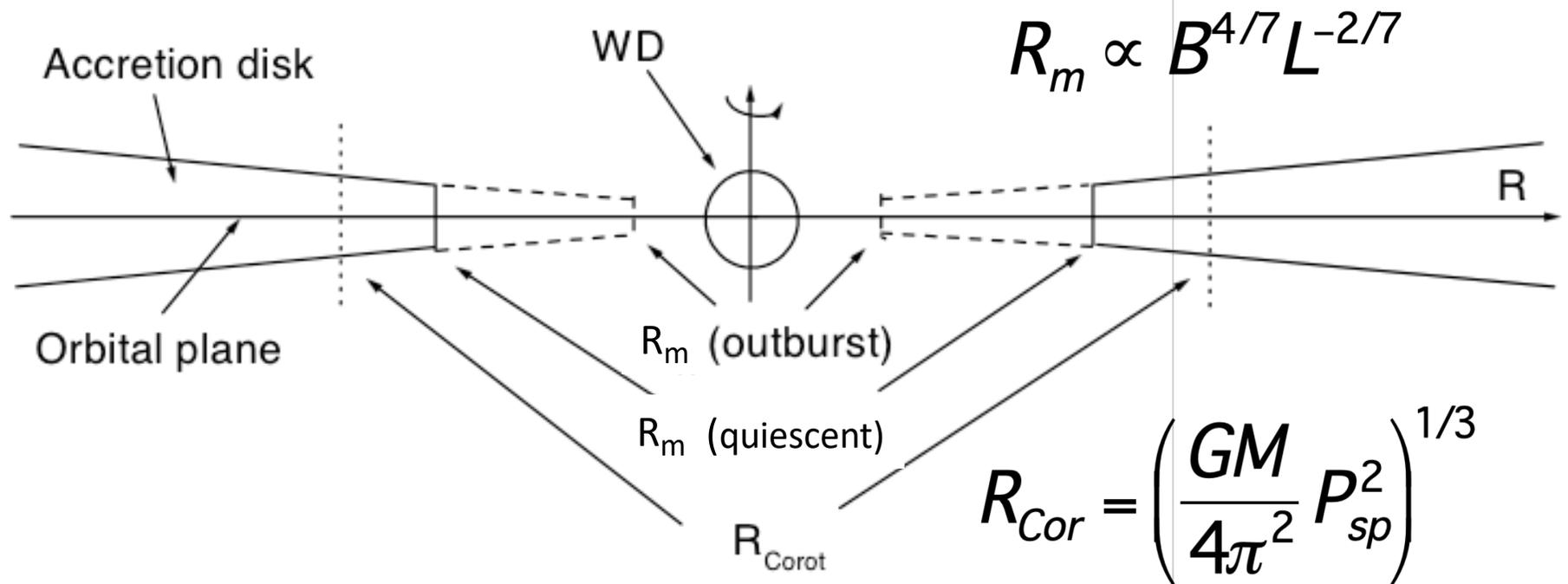


Canalle et al. 2005

Форма спектра зависит и от радиуса магнитосферы R_m

Из-за конечной высоты свободного падения
(актуально для маленьких радиусов магнитосферы R_m)

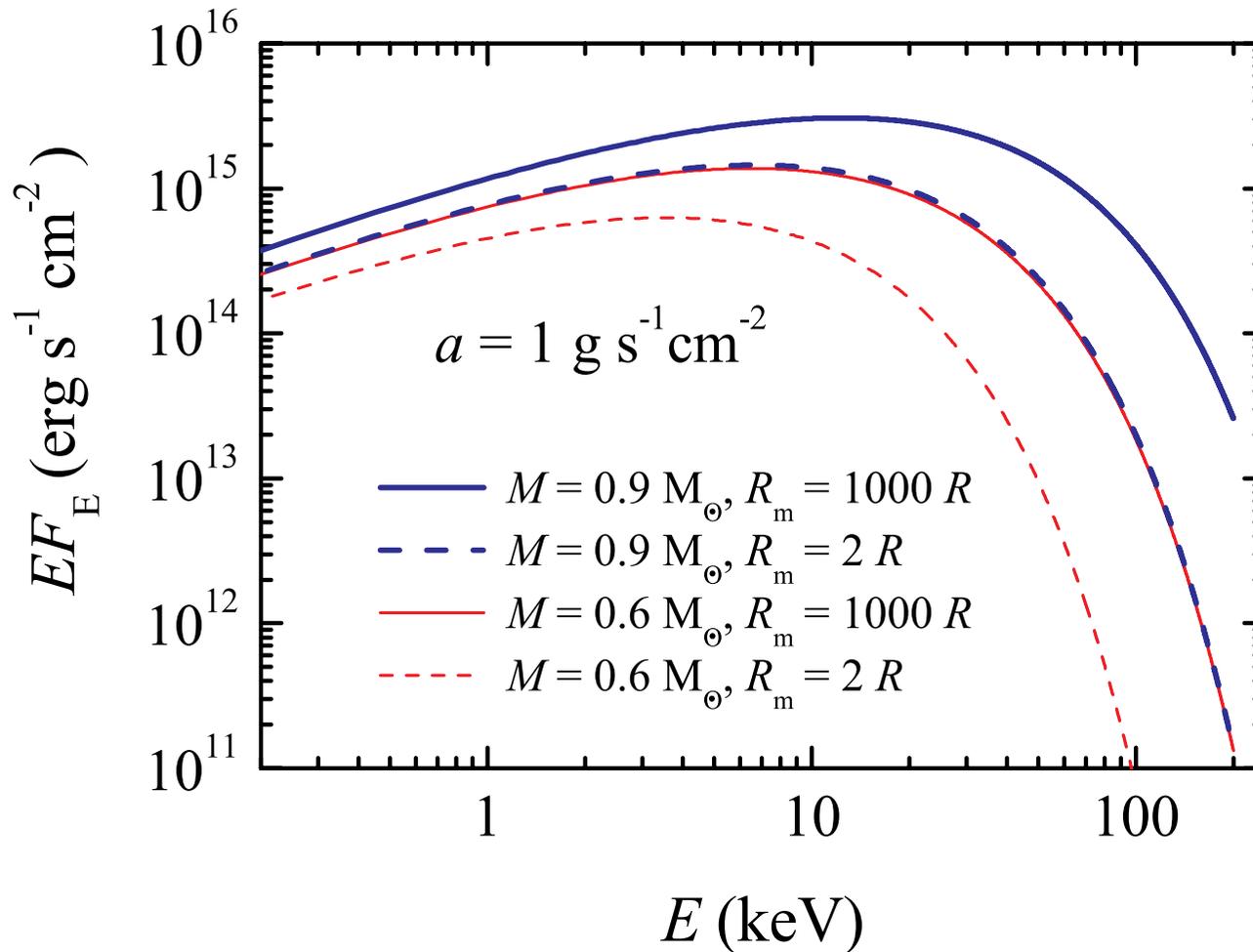
$$v_{ff}^2 = 2GM (1 / R - 1 / R_m)$$



Вывод: нам нужна (как минимум) двух-параметрическая сетка
теоретических спектров (M и R_m / R)

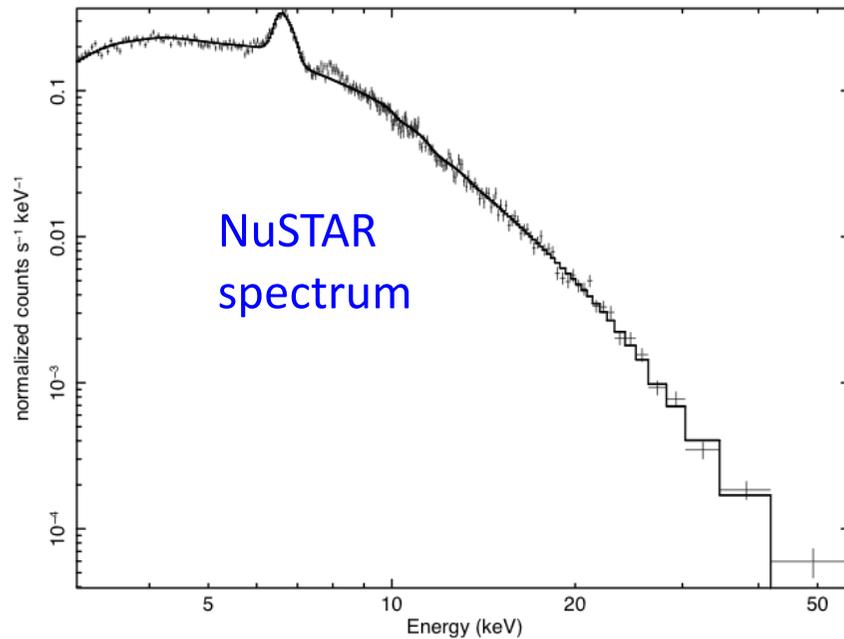
Свойства моделей в новых сетках

Влияние конечного радиуса магнитосферы

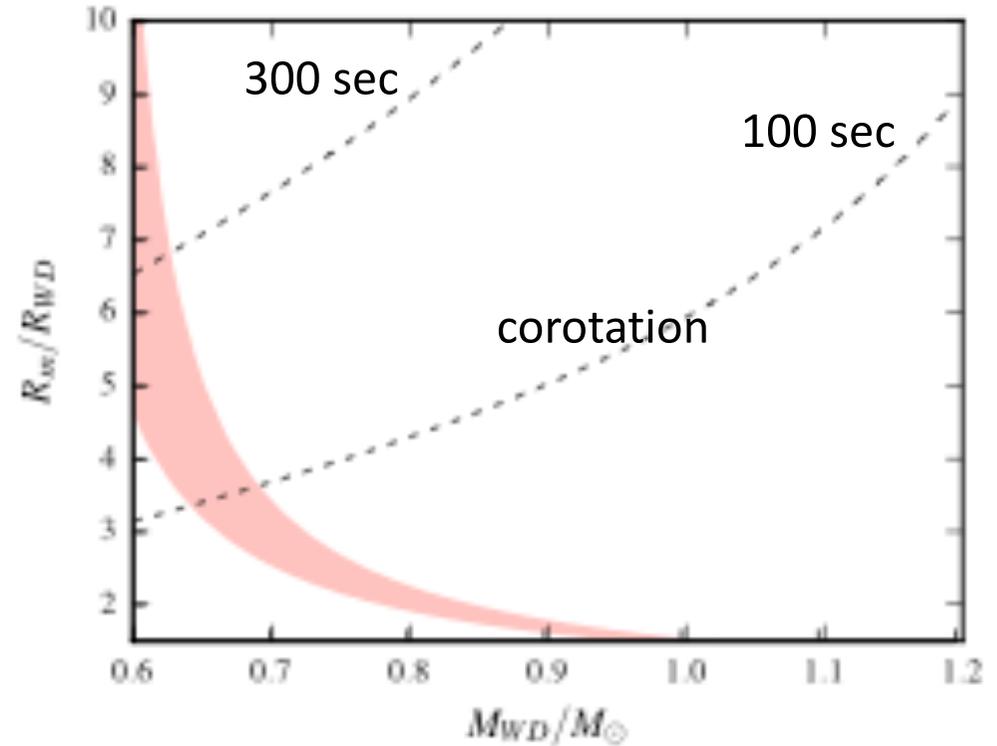


Модель для БК с $M=0.9 M_{\text{sun}}$ и $R_m=2R$ дает такой же спектр, как и модель для БК с $M=0.6 M_{\text{sun}}$ и $R_m=1000 R$

Неопределенность: Аппроксимация спектра дает полосу на плоскости $M - R_m / R$



Photon energy, keV



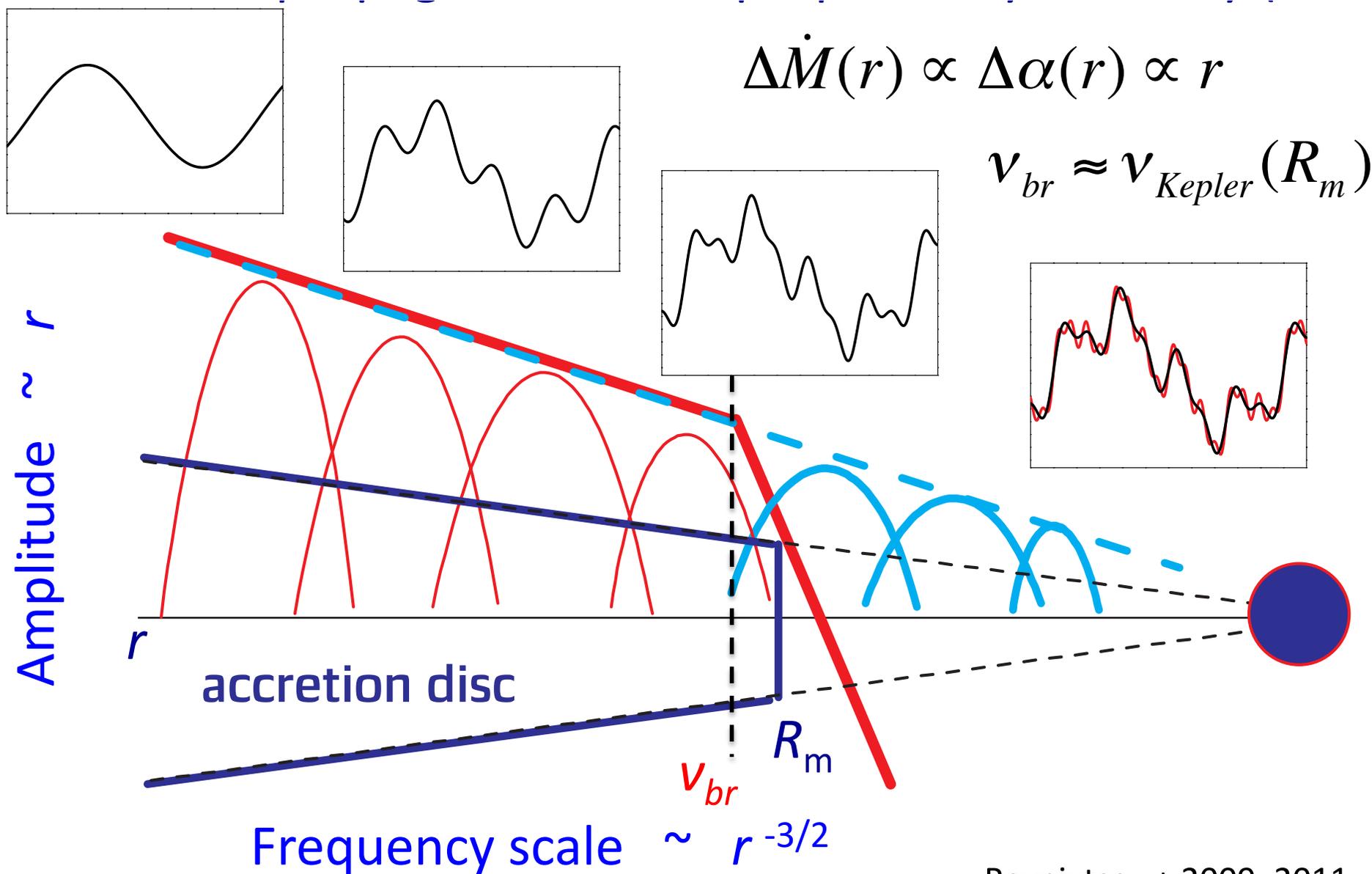
Использовать радиус коротации?

Считается, что должно быть $R_m < R_{Corot}$

$$R_{Cor} = \left(\frac{GM}{4\pi^2} P_{sp}^2 \right)^{1/3}$$

Другая возможность: Спектр мощности

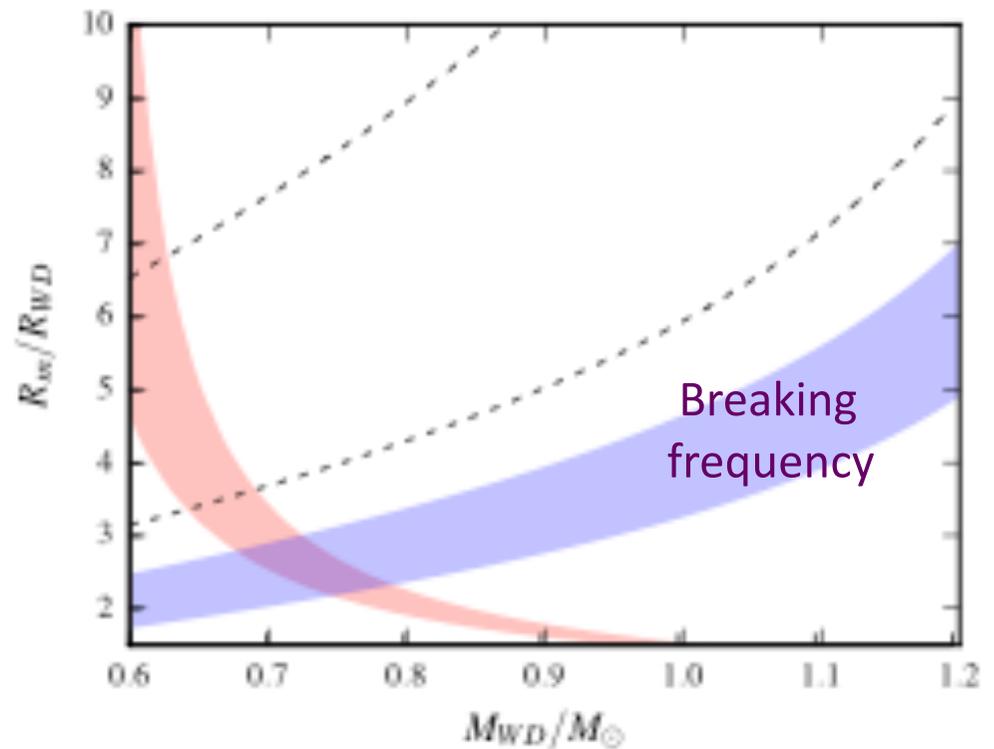
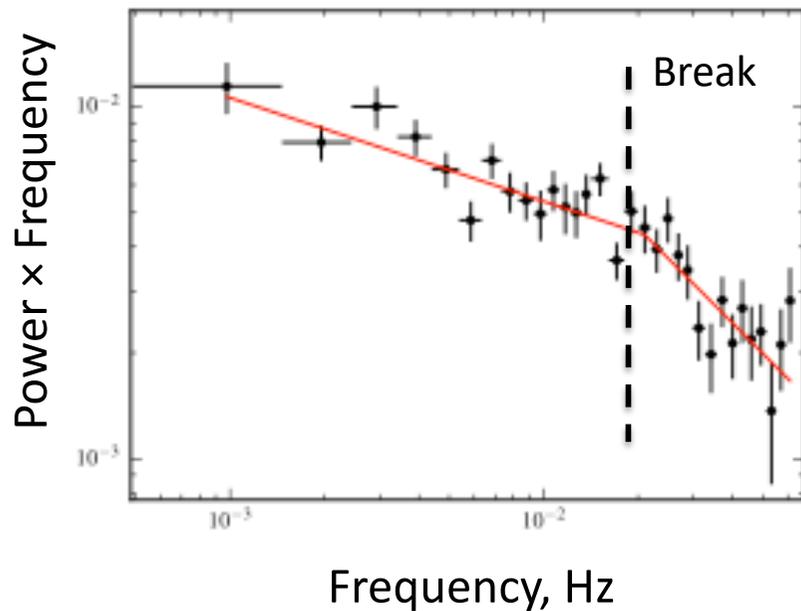
Модель распространения флуктуаций Lubarsky (1997)



Частота слома в спектре мощности:
еще одна полоса на плоскости $M - R_m/R$

$$\nu_{br}^2 = GM \left(4\pi^2 R_m^3 \right)^{-1}$$

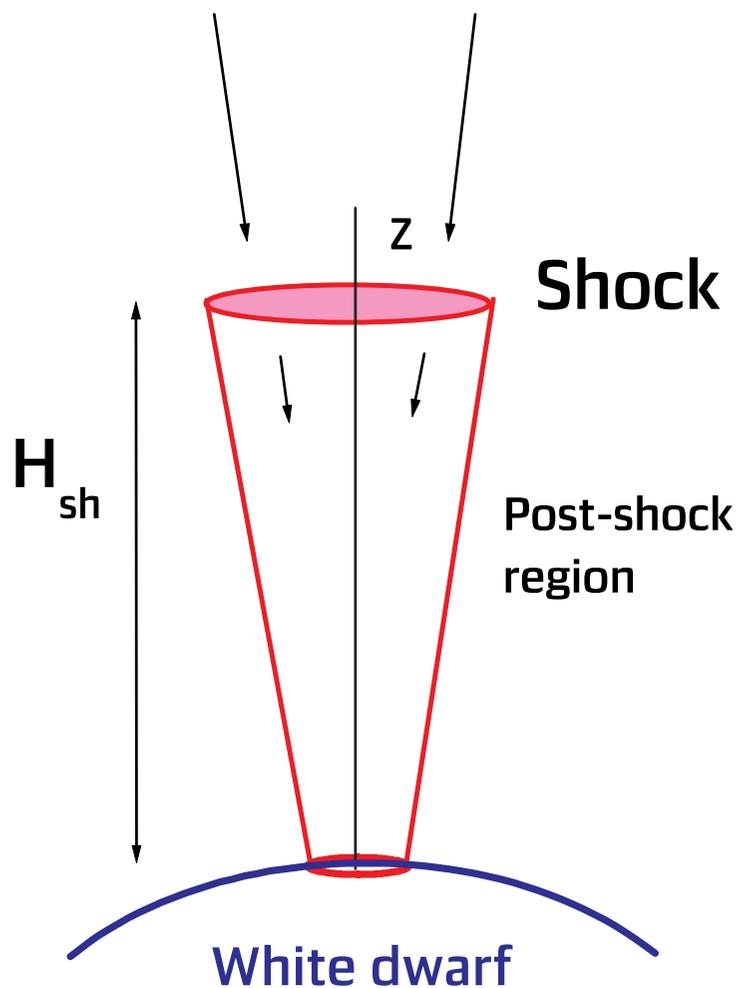
Спектр мощности



Область пересечения дает одновременно M и R_m

Высота фронта ударной волны также важна!

Высокая аккреционная колонка у EX Hya (Luna + 2018)



$$kT_{sh} \sim v_{ff}^2 = 2GM / (R + H_{sh})$$

$$H_{sh} \sim a^{-1} \quad [a] = g \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

(в цилиндрической геометрии)

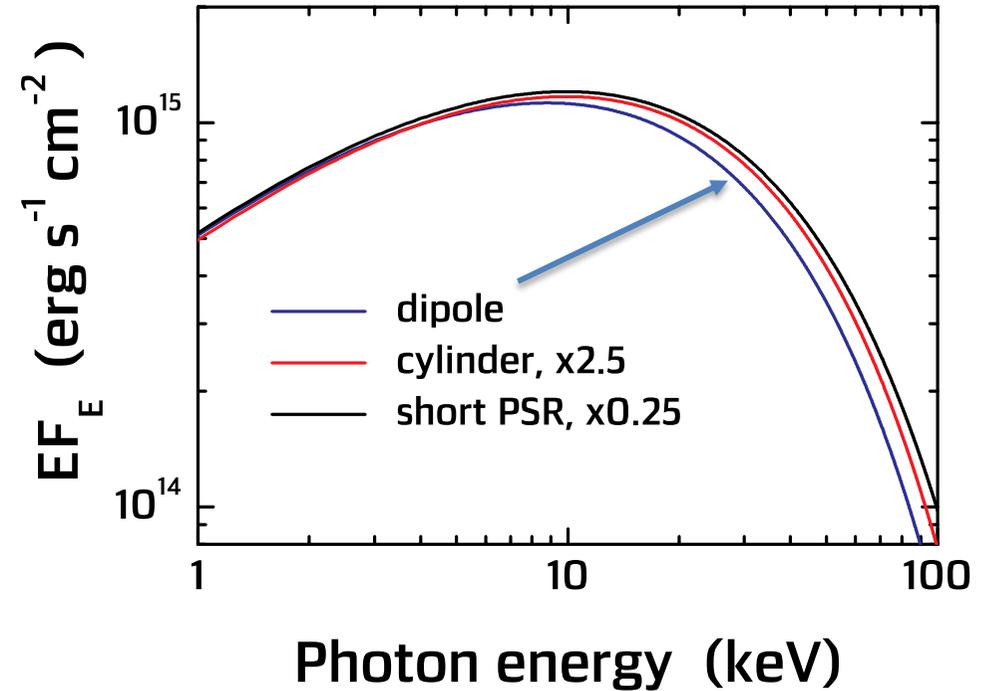
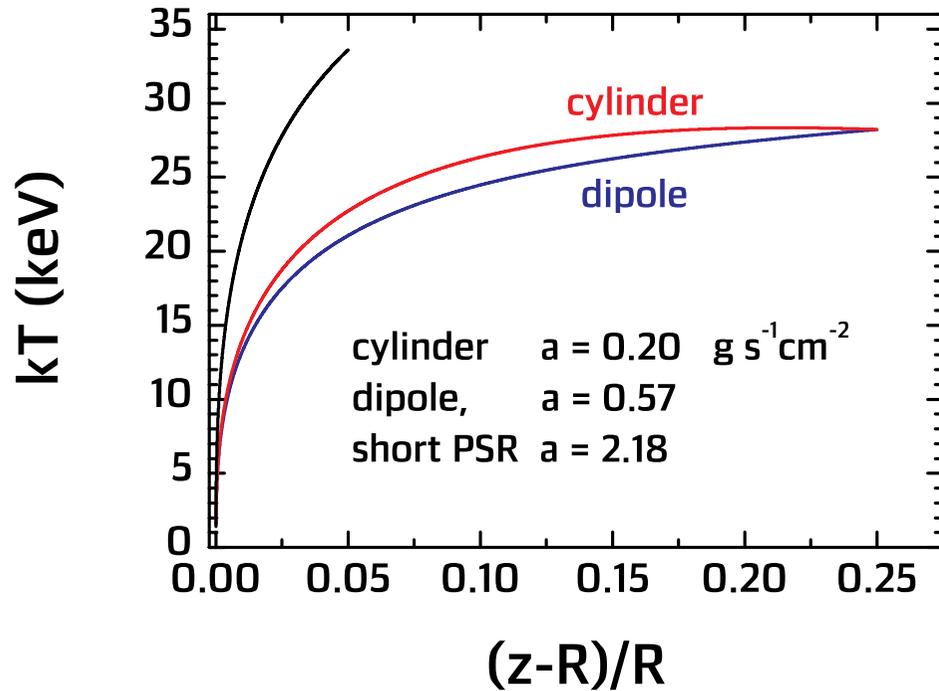
Аккреционные колонки высокие
при низких
локальных темпах аккреции

$$a < 1 \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

и дают более мягкие спектры
(см. далее)

Свойства моделей в новых сетках

Влияние высоты фронта ударной волны



Модели для БК с $M=0.79 M_{\text{sun}}$ и $R_m=1000 R$.
Модель рассчитанная в дипольной геометрии,
дает более мягкий спектр, чем модель, посчитанная
в цилиндрической геометрии.

Новые сетки теоретических спектров

- 1) Фиксированный темп аккреции и занимаемая часть поверхности БК

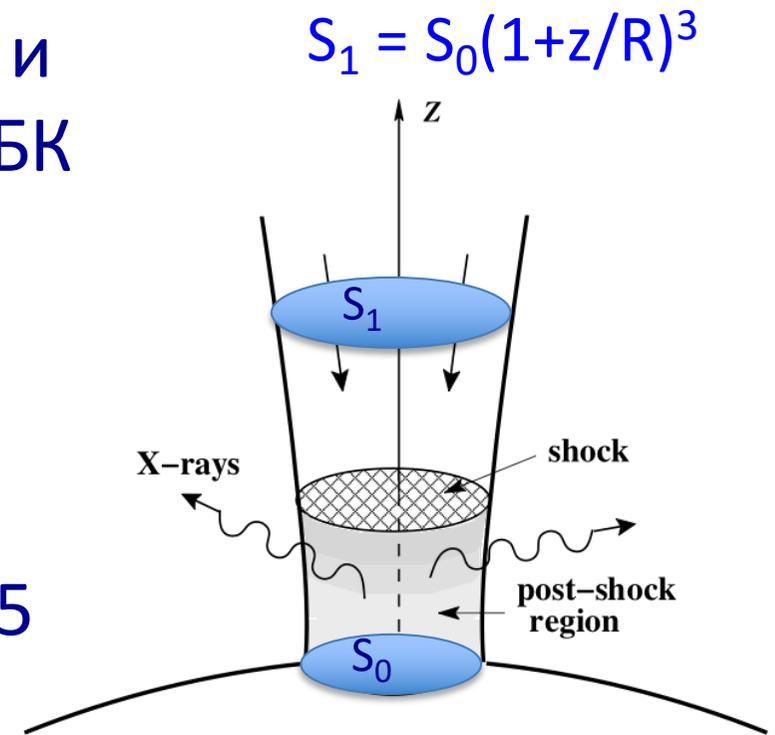
$$\dot{M} = 10^{16} \text{ g s}^{-1}, f = 5 \times 10^{-4}$$

- 2) Фиксированная относительная высота колонки $H_{\text{sh}}/R = 0.25$

Тормозное излучение голых ядер 15 элементов для расчета спектров:
спектры правильные только при $E > 3-10 \text{ keV}$

Однородные по массам БК,
от 0.3 до 1.4 (1.2) M_{sun} , (шаг 0.02)

Однородные по функции $(1 - R/R_m)$,
от 1.5 до 60 для R_m/R



Что проигнорировано

Неполная ионизация – дополнительные источники непрозрачности:
фотоионизация, линии

Учитываются в функции охлаждения, но не при расчете спектров.

Моделировать спектры на энергиях выше 3-10 кэВ.

Циклотронное охлаждение

Важно при низких локальных спектрах аккреции. Спектр зависит от геометрии колонки. Брать источники высокой светимости.

Неустойчивость колонки, охлаждаемой только тормозным излучением

Предсказываемая переменность около 1 Гц достоверно не обнаружена.

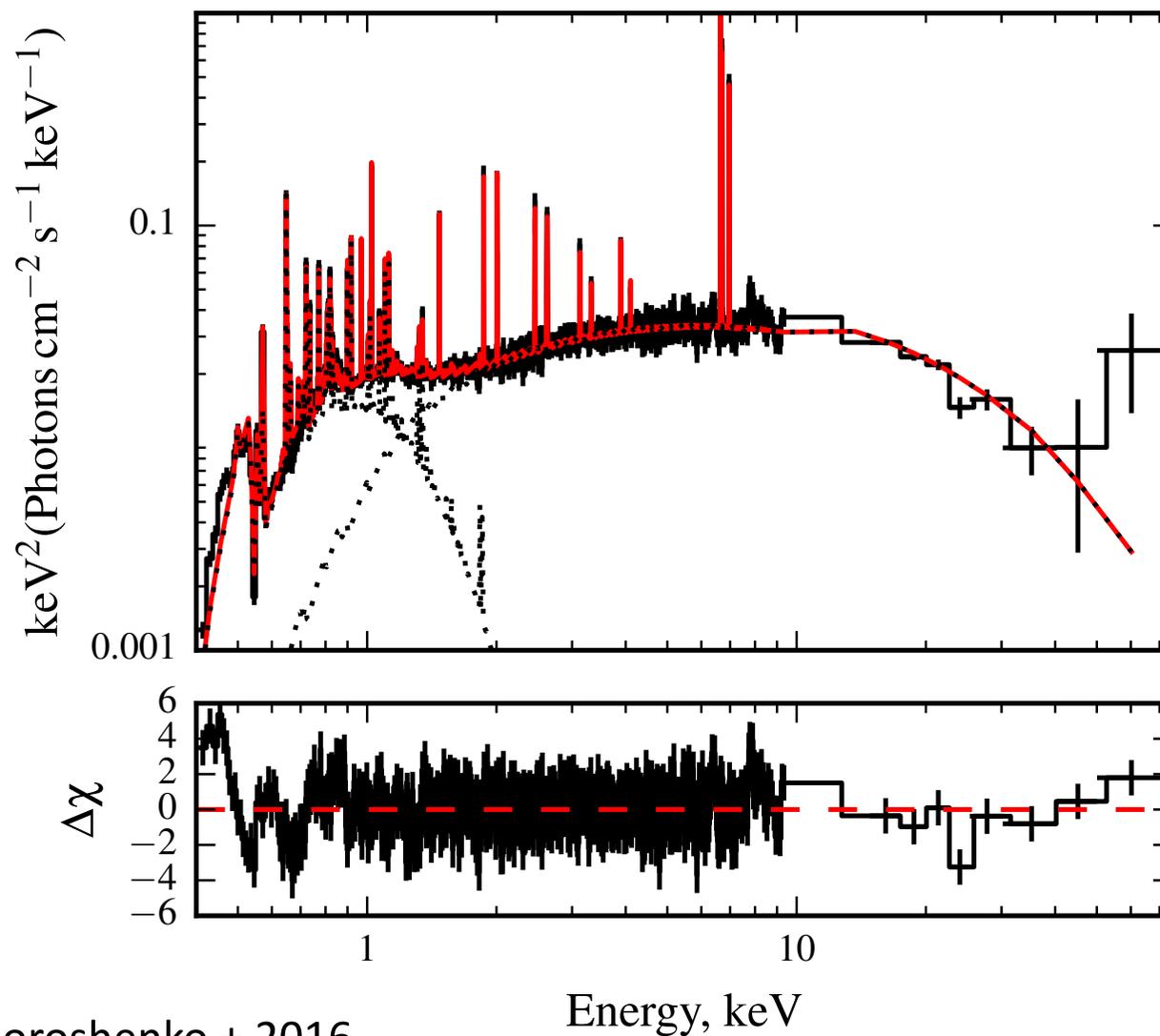
Циклотронное охлаждение стабилизирует неустойчивость. Усредненный спектр близок к спектру стационарной модели.

Взаимодействие с поверхностью БК и аккреционным потоком

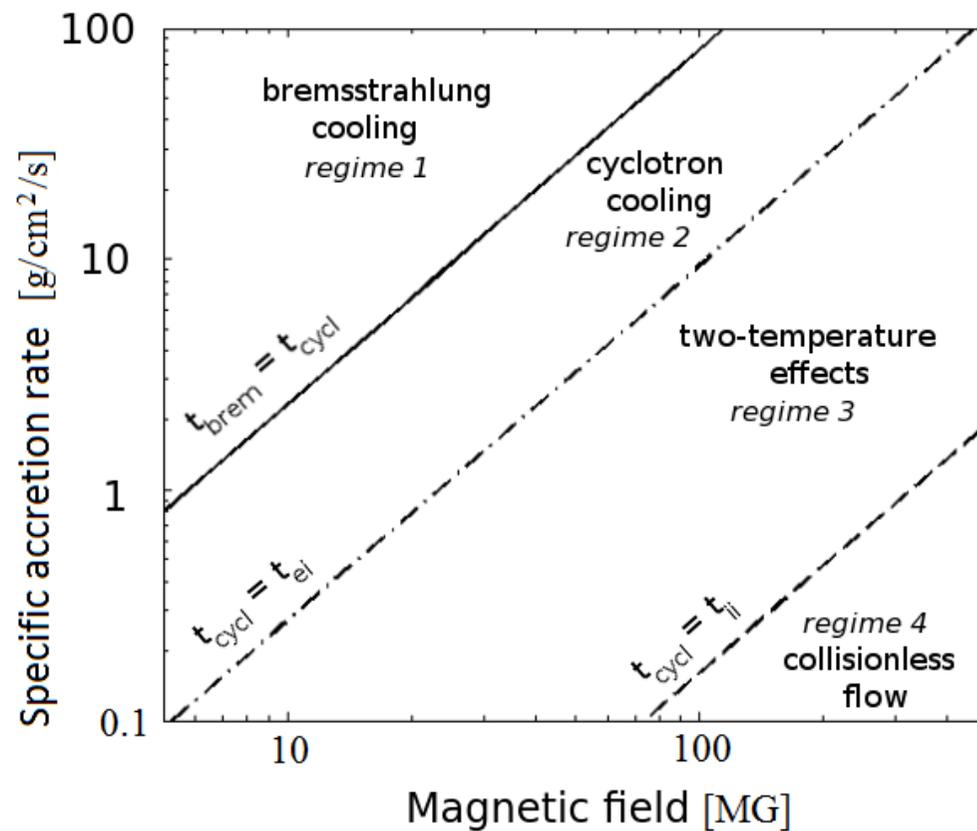
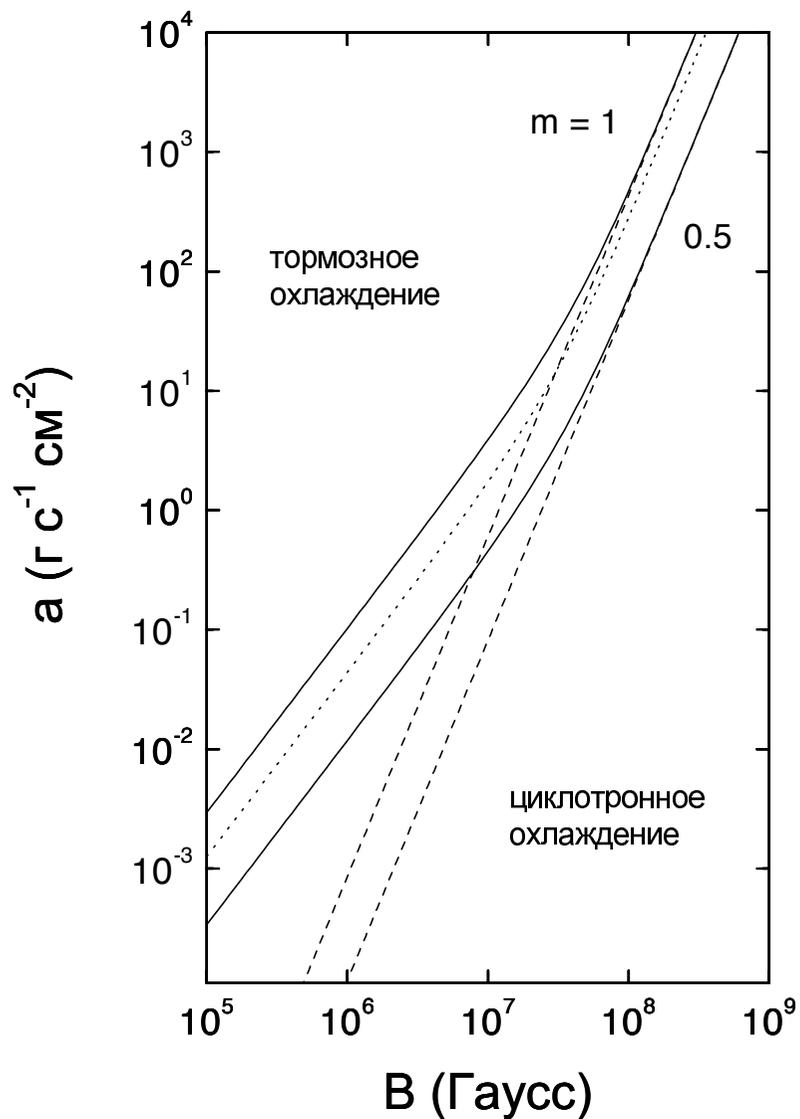
Появляется отраженный компонент, и некоторая доля мягкой части спектра подвержена сильному дополнительному поглощению.

Моделировать спектры на энергиях выше 20 кэВ.

Сложный фит рентгеновского спектра EX Hya Suzaku XIS + HXD

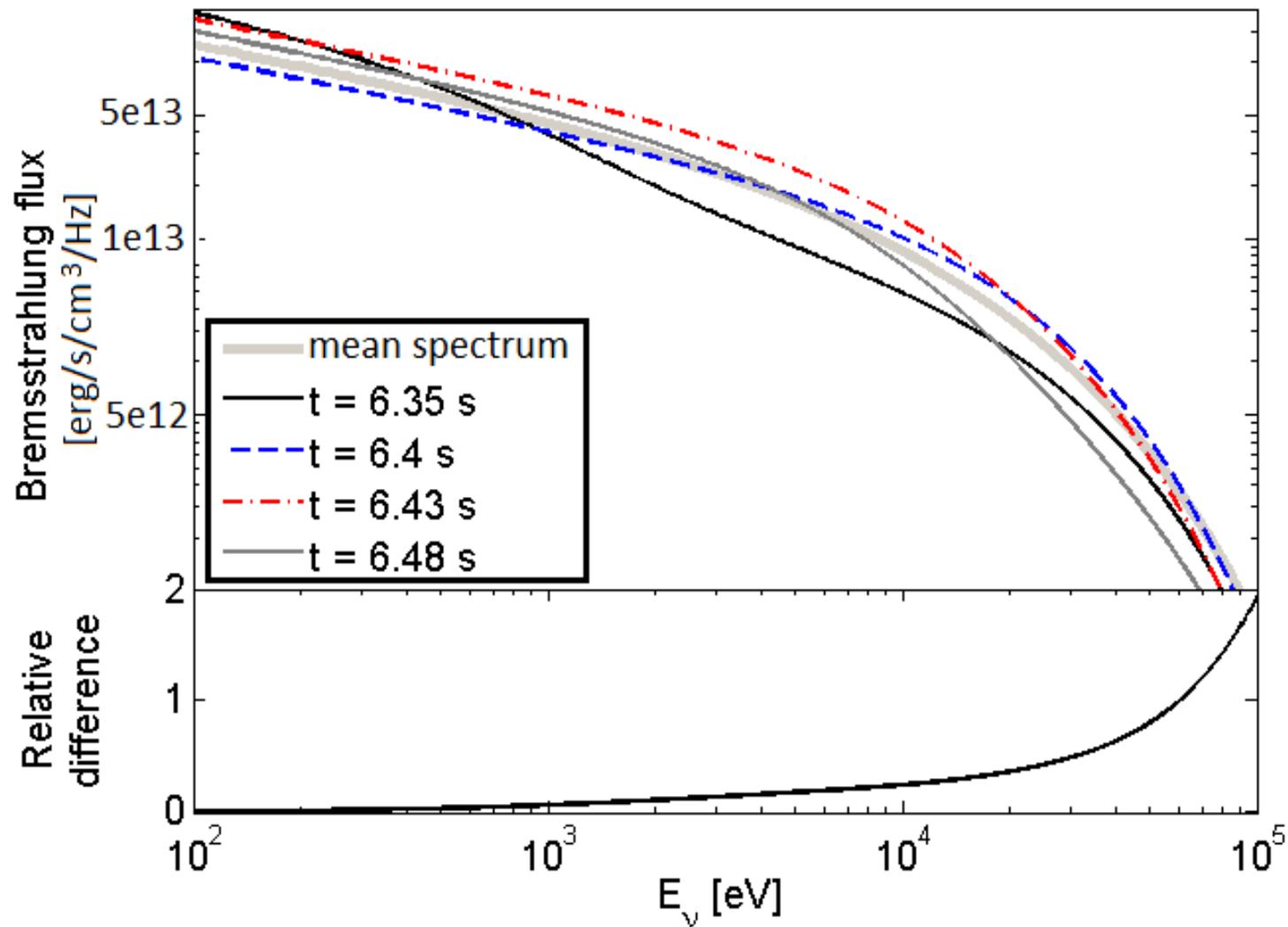


Важность циклотронного охлаждения



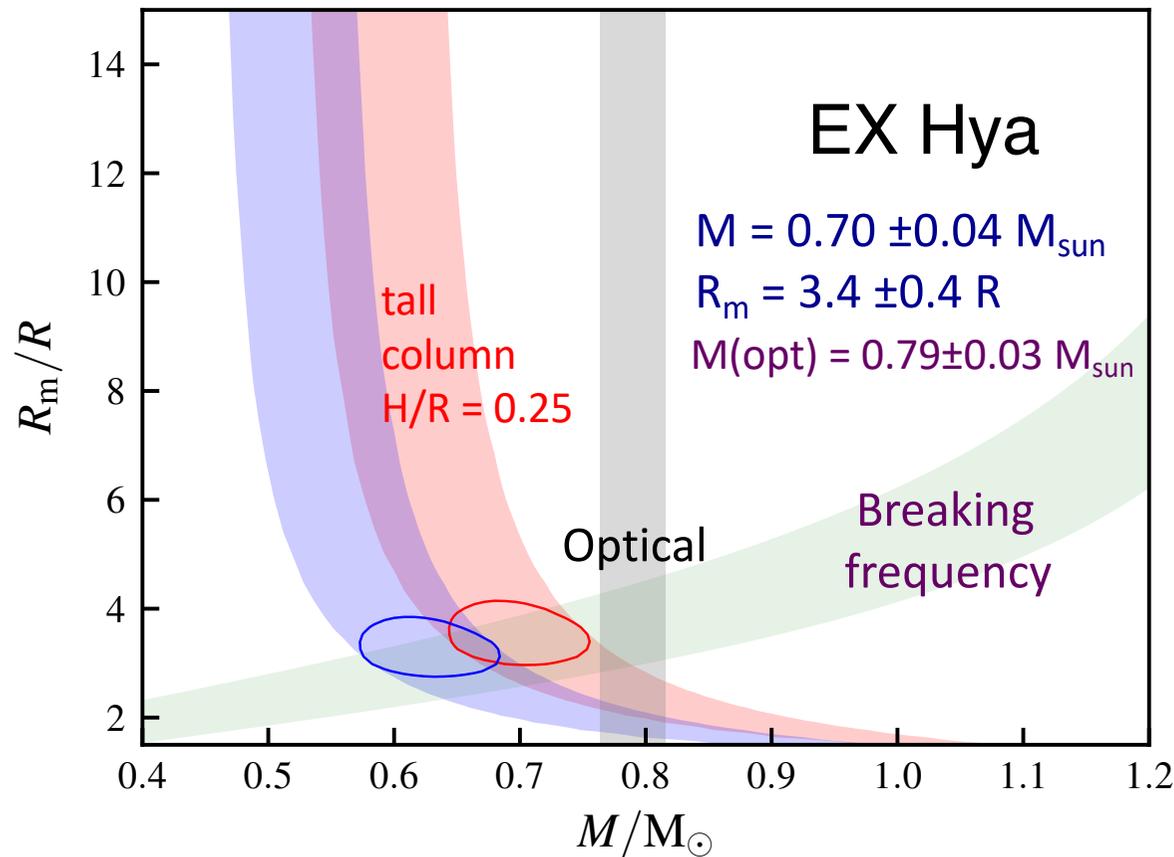
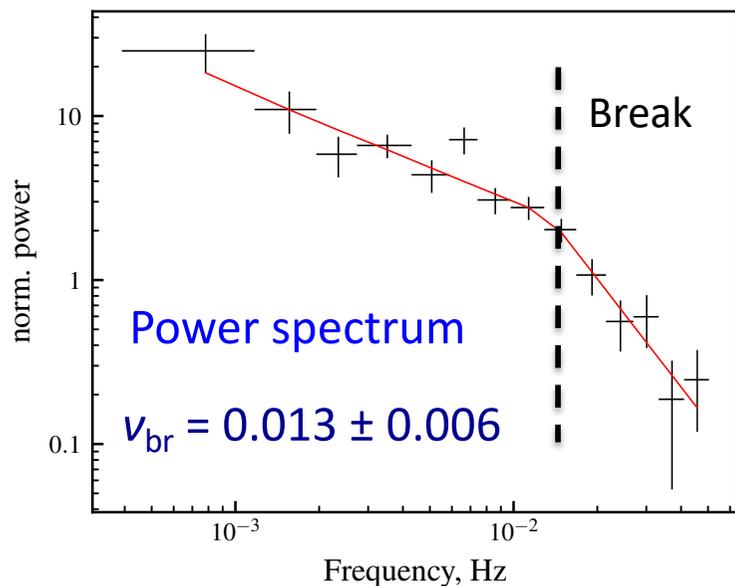
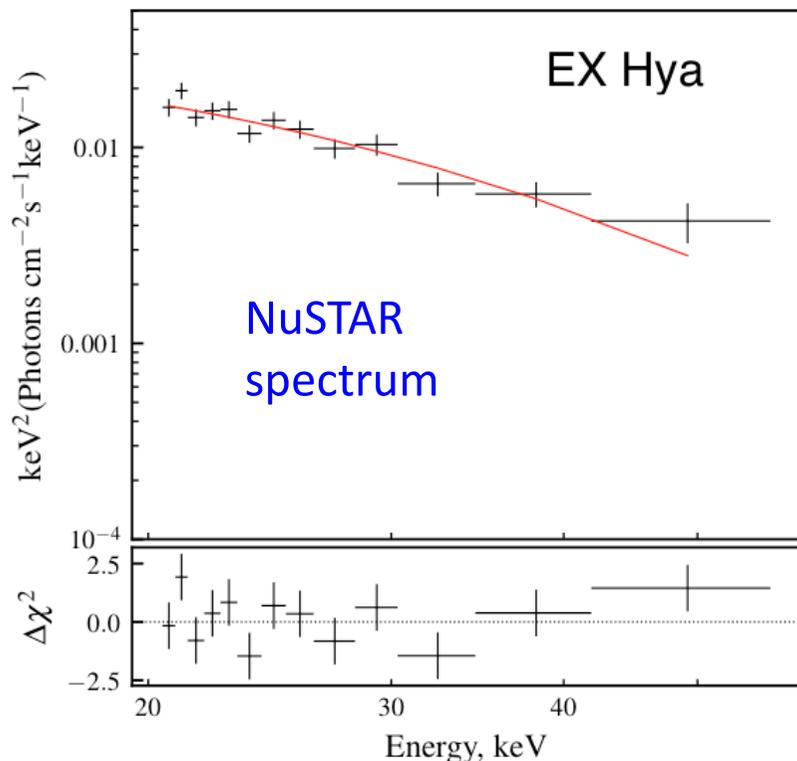
Busschaert + 2015

Спектры осциллирующей колонки



Контрольный источник: EX Hya

Фитирование спектров: две полосы
(короткая и длинная колонки) на $M - R_m$



Частота излома в спектре мощности
дает еще одну полосу на $M - R_m$

$$\nu_{br}^2 = GM(4\pi^2 R_m^3)^{-1}$$

Revnivtsev + 2009, 2011

Контрольный источник: EX Нуа

Определение фундаментальных параметров

Используемые соотношения

$$C \times F_{0.1-100} = \frac{GM\dot{M}}{4\pi D^2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_m} \right) \quad \text{Темп аккреции}$$

$\dot{C} \approx 1.25 - 1.4$ - учитывает, что в рассчитанных спектрах не включены линии и фоторекомбинационные континуумы

$$R = 7.8 \times 10^8 \left[\left(\frac{1.44}{m} \right)^{2/3} - \left(\frac{m}{1.44} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \text{ см.} \quad \text{Масса – радиус}$$

$m = M/M_{\text{sun}}$ Nauenberg, 1972

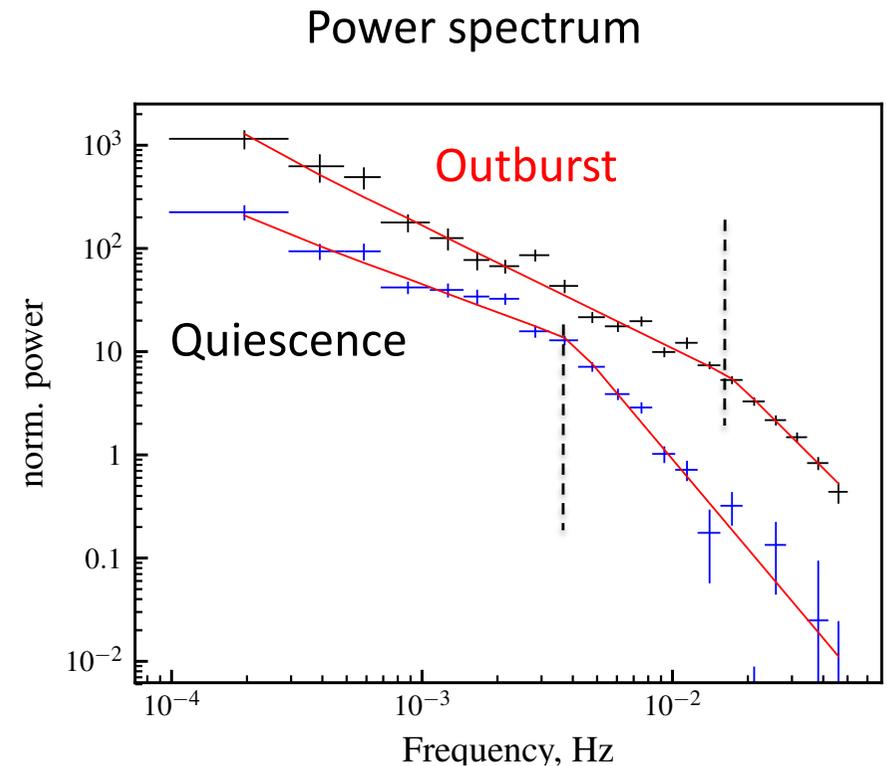
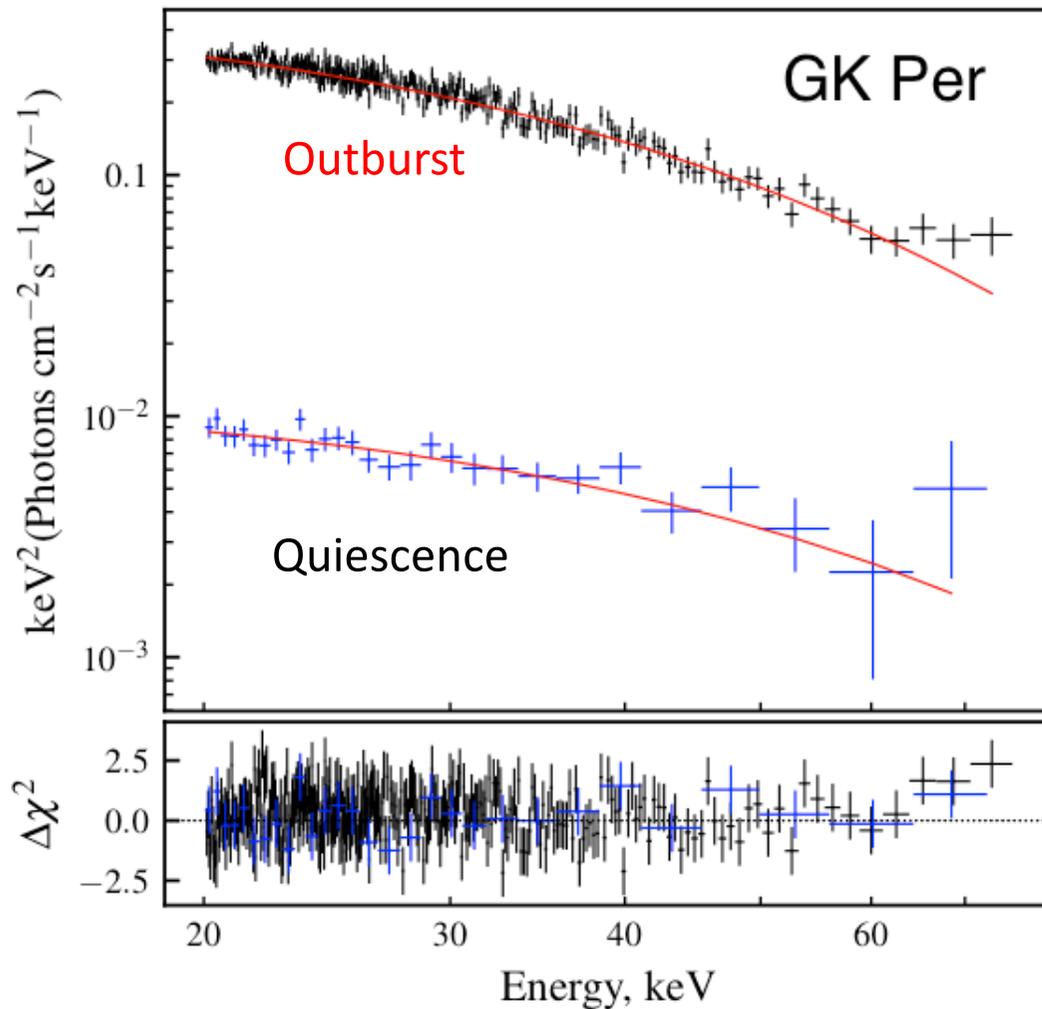
$$r_m = \frac{R_m}{R} = \Lambda \left(\frac{B^4 R^5}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7}, \quad \text{Относительный радиус магнитосферы}$$

$$R_m = \Lambda R_A, \quad \Lambda \approx 0.5$$

$$B = (2GM)^{1/4} \dot{M}^{1/2} R^{-5/4} \left(\frac{r_m}{\Lambda} \right)^{7/4}. \quad \text{Напряженность магнитного поля}$$

Карликовая Новая GK Per

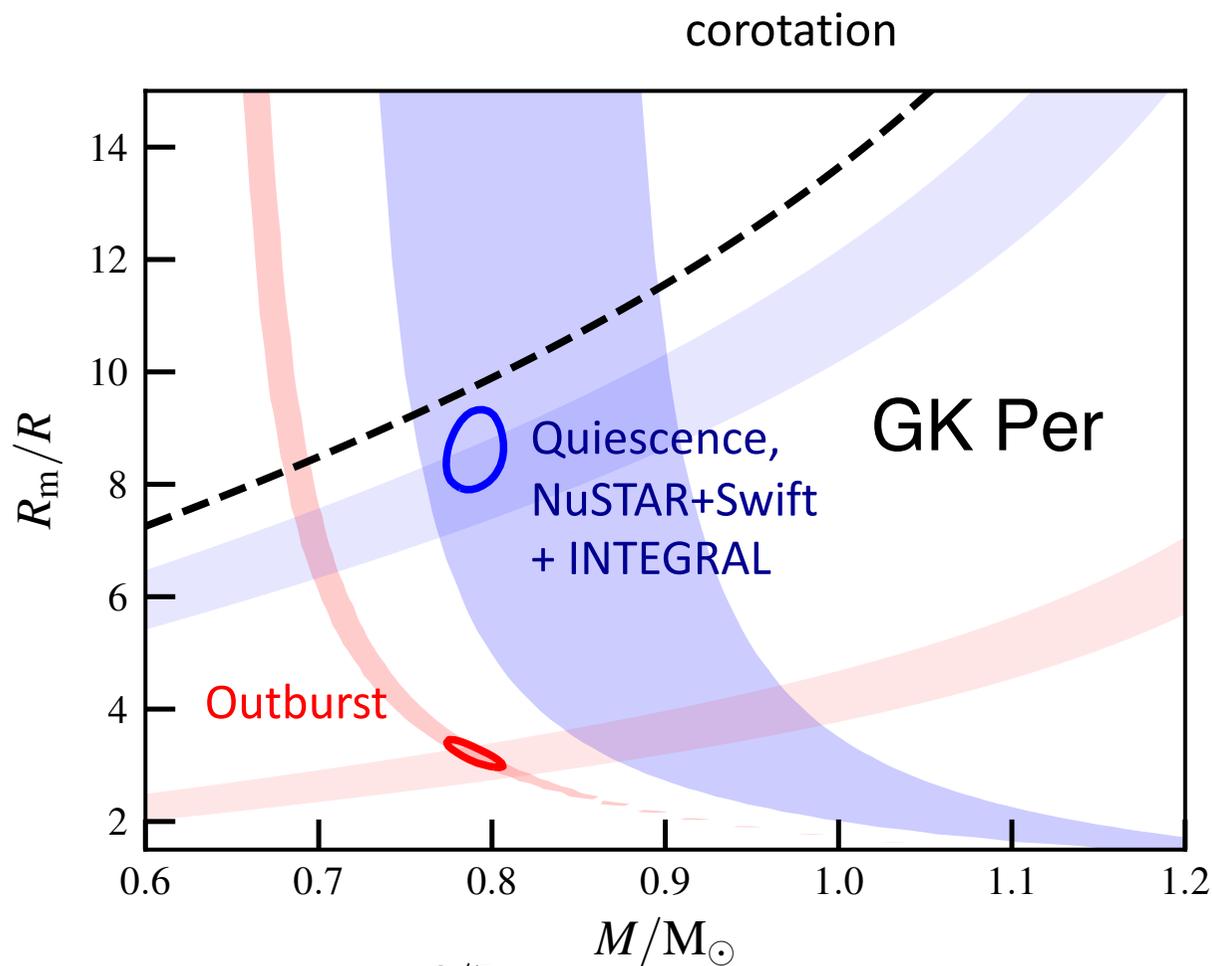
Наблюдалась обсерваторией NuSTAR во время вспышки (42 ks, PI М. Orio) и в после нее (72 ks, PI Т. Yuasa).



$$\nu_{br} (\text{outburst}) \approx 0.017$$

$$\nu_{br} (\text{quiescence}) \approx 0.004$$

Карликовая Новая GK Per



$$\frac{R_m^q}{R_m^o} \sim \left(\frac{\dot{M}^q}{\dot{M}^o} \right)^{-2/7} \approx 3.15 \pm 0.05$$

$$R_m(q)/R_m(out) \approx 2.7 \pm 0.21$$

Wada + 2018 : $M=0.87 \pm 0.07 M_{\text{sun}}$, $R_m(q)/R_m(out) \approx 3.9 \pm 0.5$

Результаты

$$M = 0.79 \pm 0.01 M_{\text{sun}}$$

$$R_m/R = 3.18 \pm 0.17$$

$$8.5^{+0.5}_{-0.4}$$

$$D = 442 \pm 8.5 \text{ пк}$$

$$\dot{M} \approx 7.9 \times 10^{17} \text{ г/с}$$

$$1.4 \times 10^{16} \text{ г/с}$$

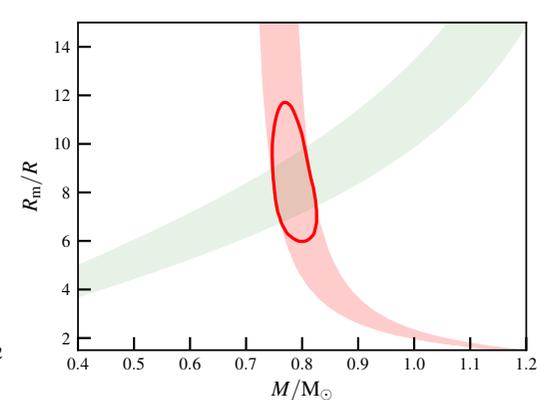
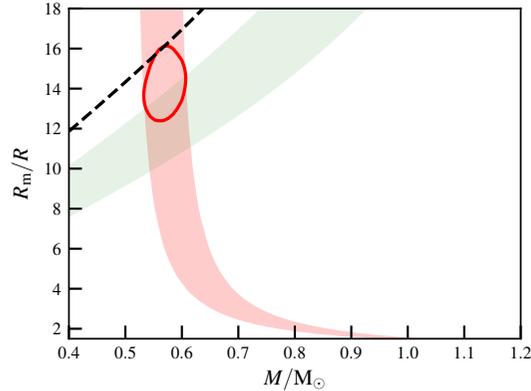
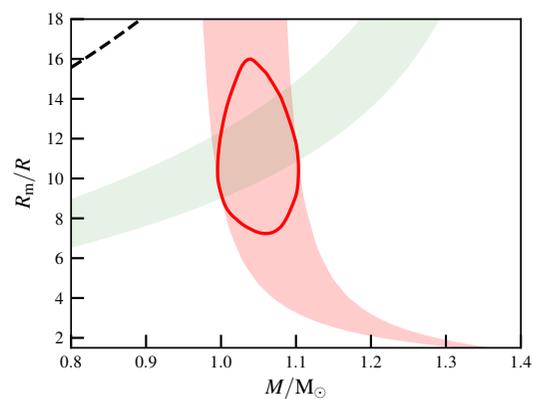
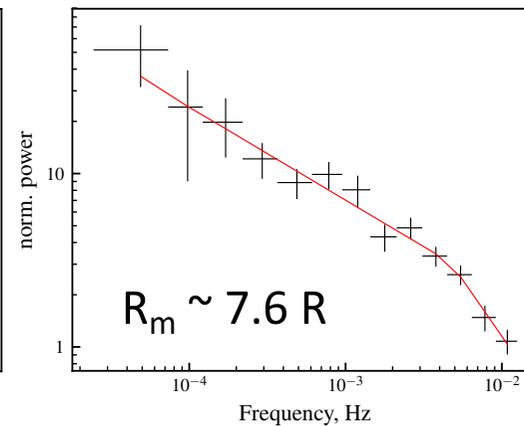
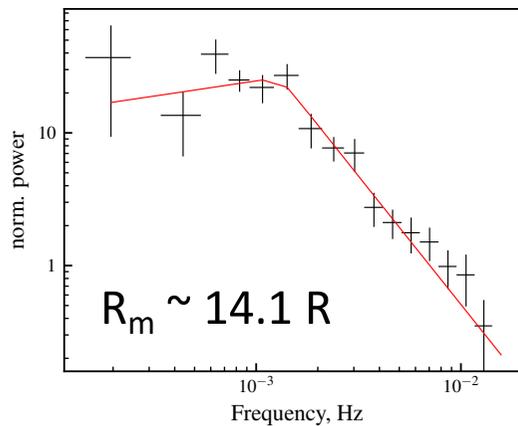
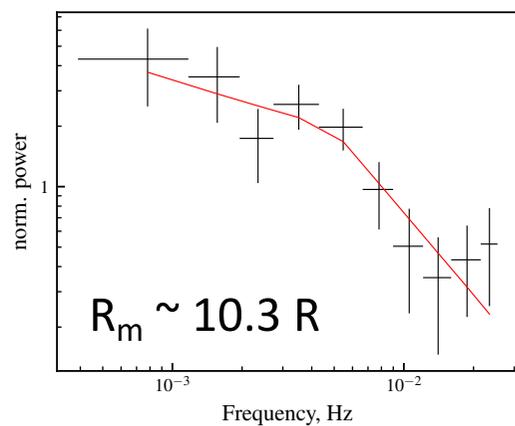
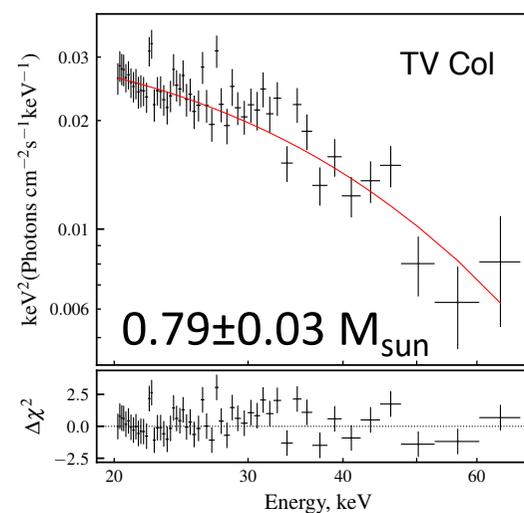
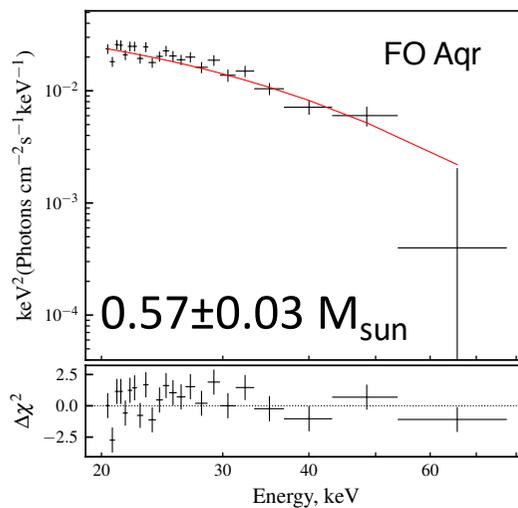
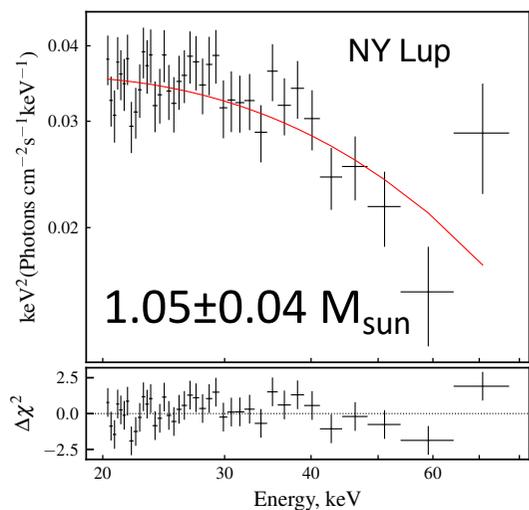
$$L \approx 5.8 \times 10^{34} \text{ эрг/с}$$

$$1.4 \times 10^{33} \text{ эрг/с}$$

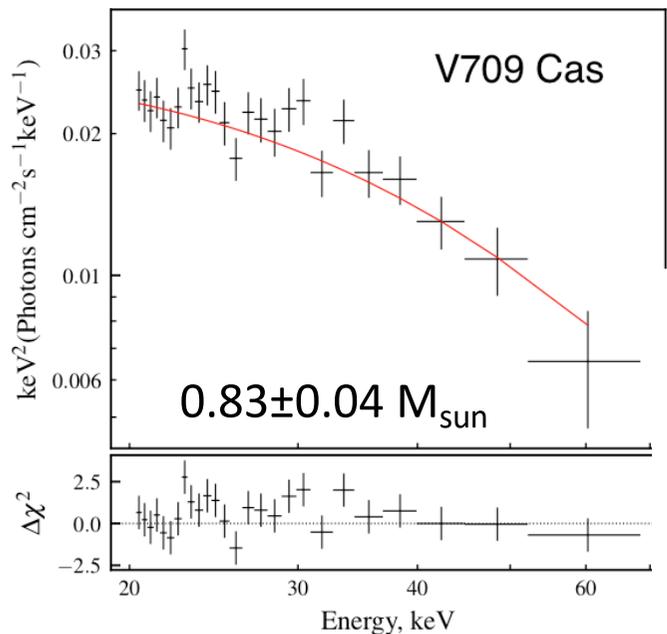
$$B \approx 7.5 \times 10^5 (0.5/\Lambda)^{7/4} \text{ Гс}$$

$$5.6 \times 10^5 (0.5/\Lambda)^{7/4} \text{ Гс}$$

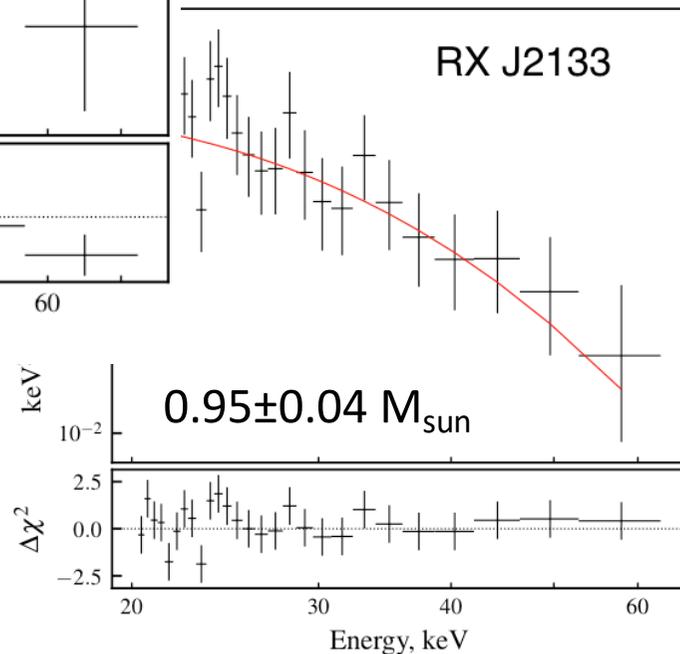
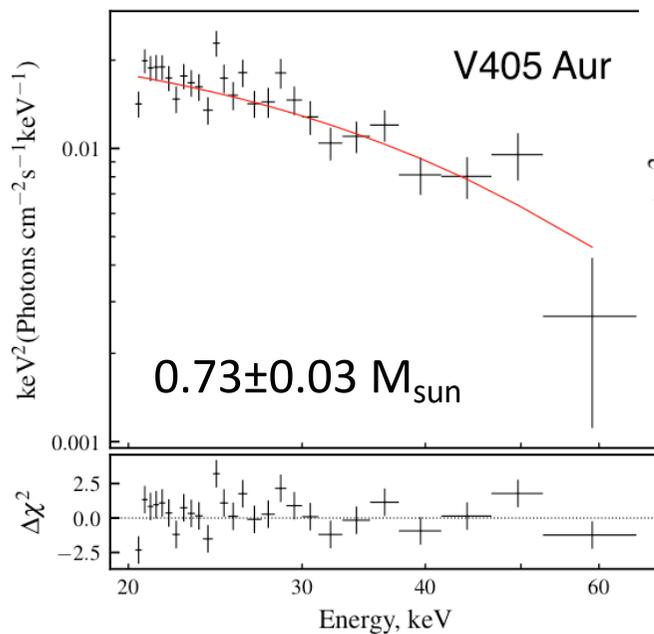
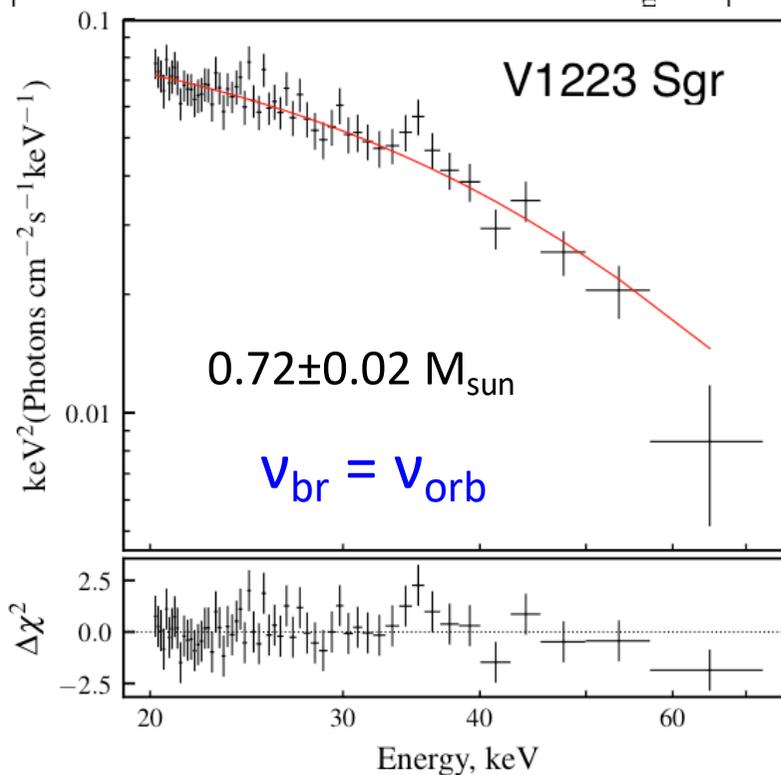
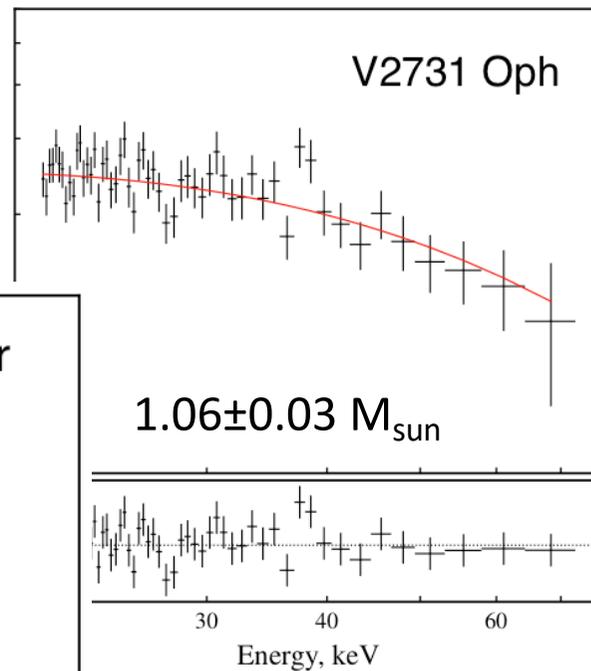
Другие IPs , наблюдавшиеся NuSTAR



Другие IPs , наблюдавшиеся NuSTAR



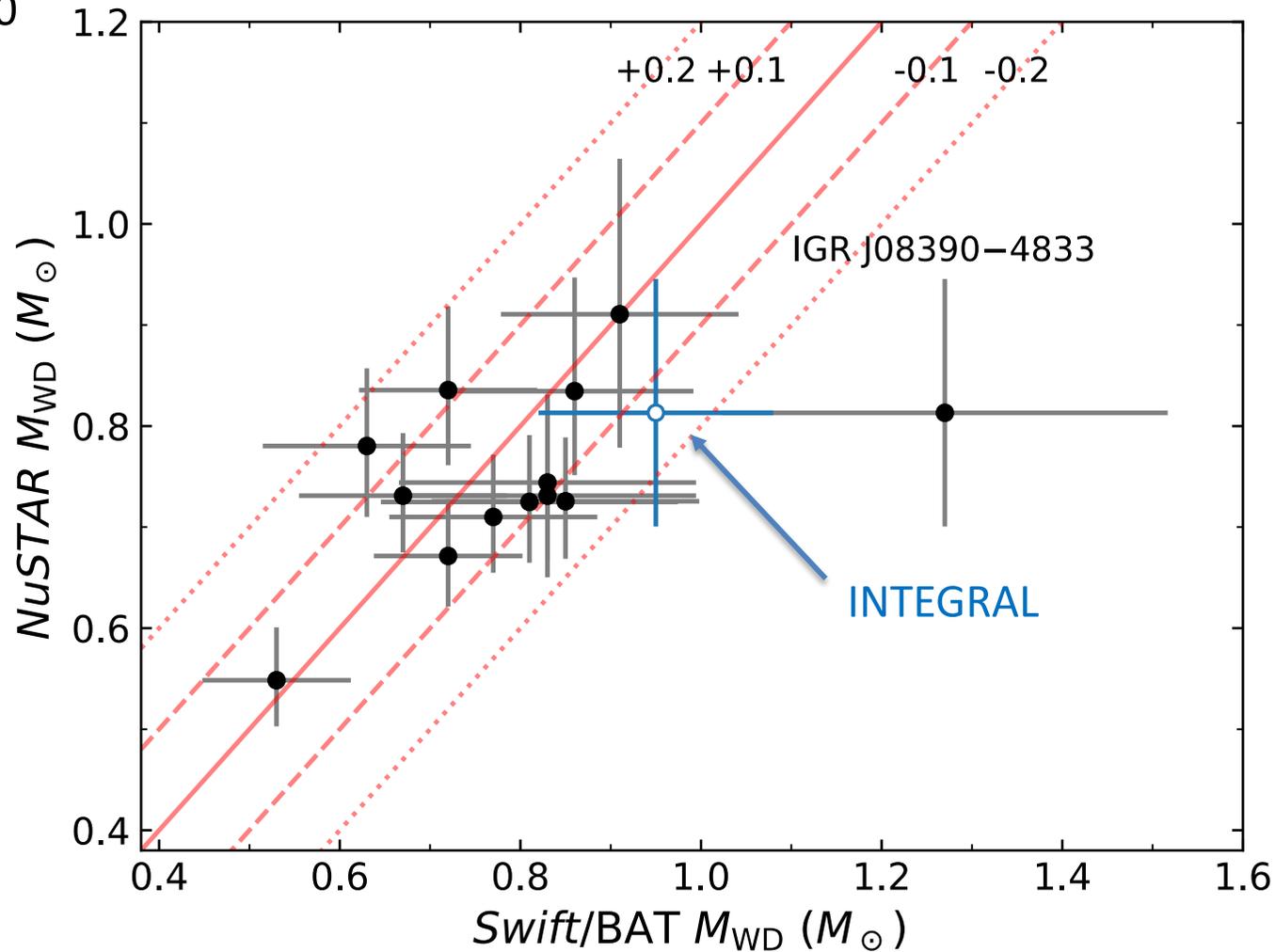
$$R_m = R_{\text{cor}}$$



IPs из архива Swift/BAT (35 источников)

Сравнение с результатами NuSTAR

Shaw + 2020



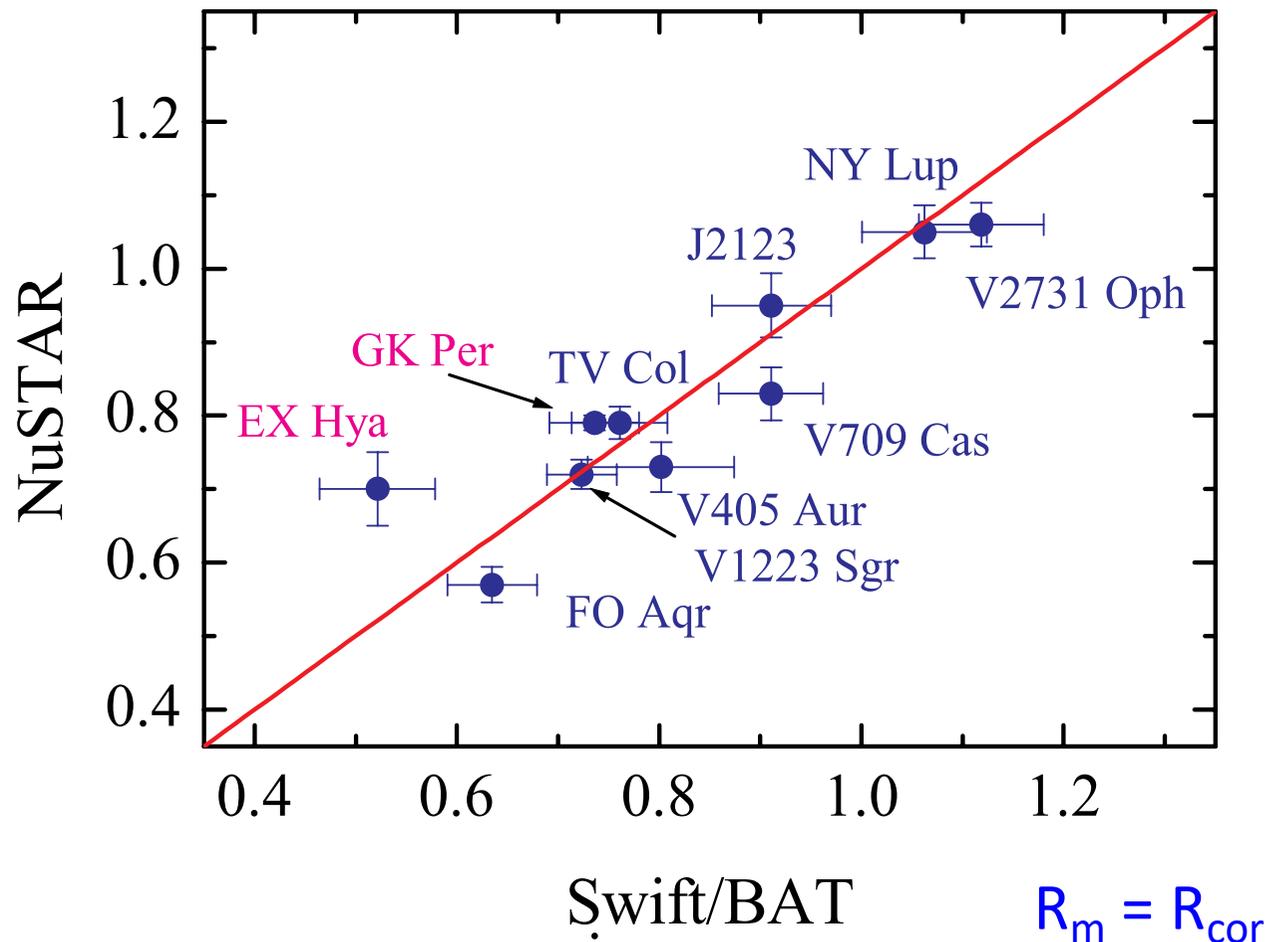
Suleimanov + 2019

$$R_m = R_{cor}$$

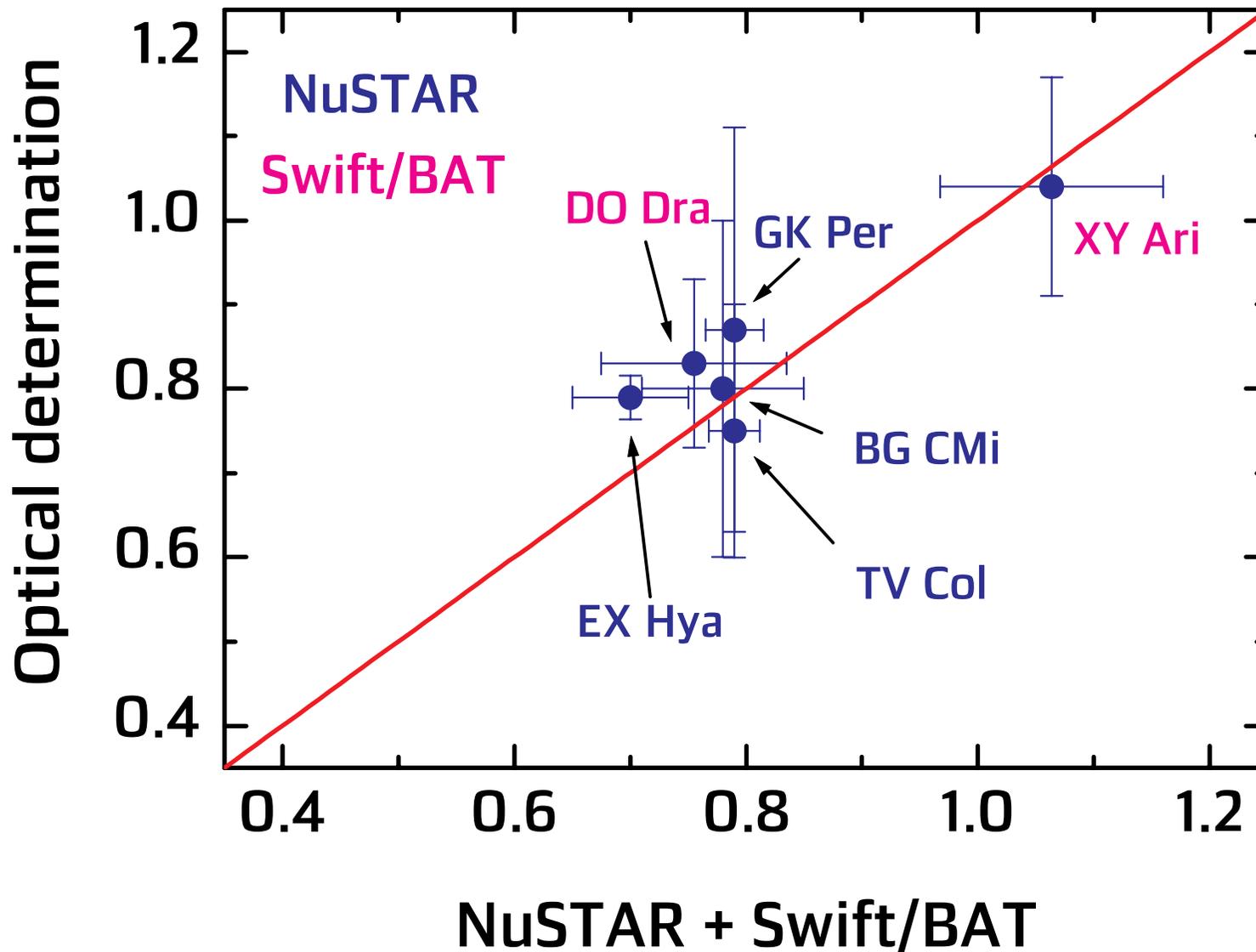
IPs из архива Swift/ВАТ (35 источников)

Включая наблюдавшиеся обсерваторией NuSTAR

EX Hya TV Col DO Dra V405 Aur MU Cam V667 Pup V2400 Oph BG CMi
 V709 Cas V2731 Oph PQ Gem V1223 Sgr AO Psc V1025 Cen V1062 Tau XY Ari
 FO Aqr TX Col GK Per V2306 Cyg NY Lup V1033 Cas J2133+5107 V418 Gem
 V515 And V647 Aur EI UMa V2069 Cyg J17195-4100 J04571+4527 J18173-2509
 J08390-4833 J15094-6649 J16500-3307 J16547-1916

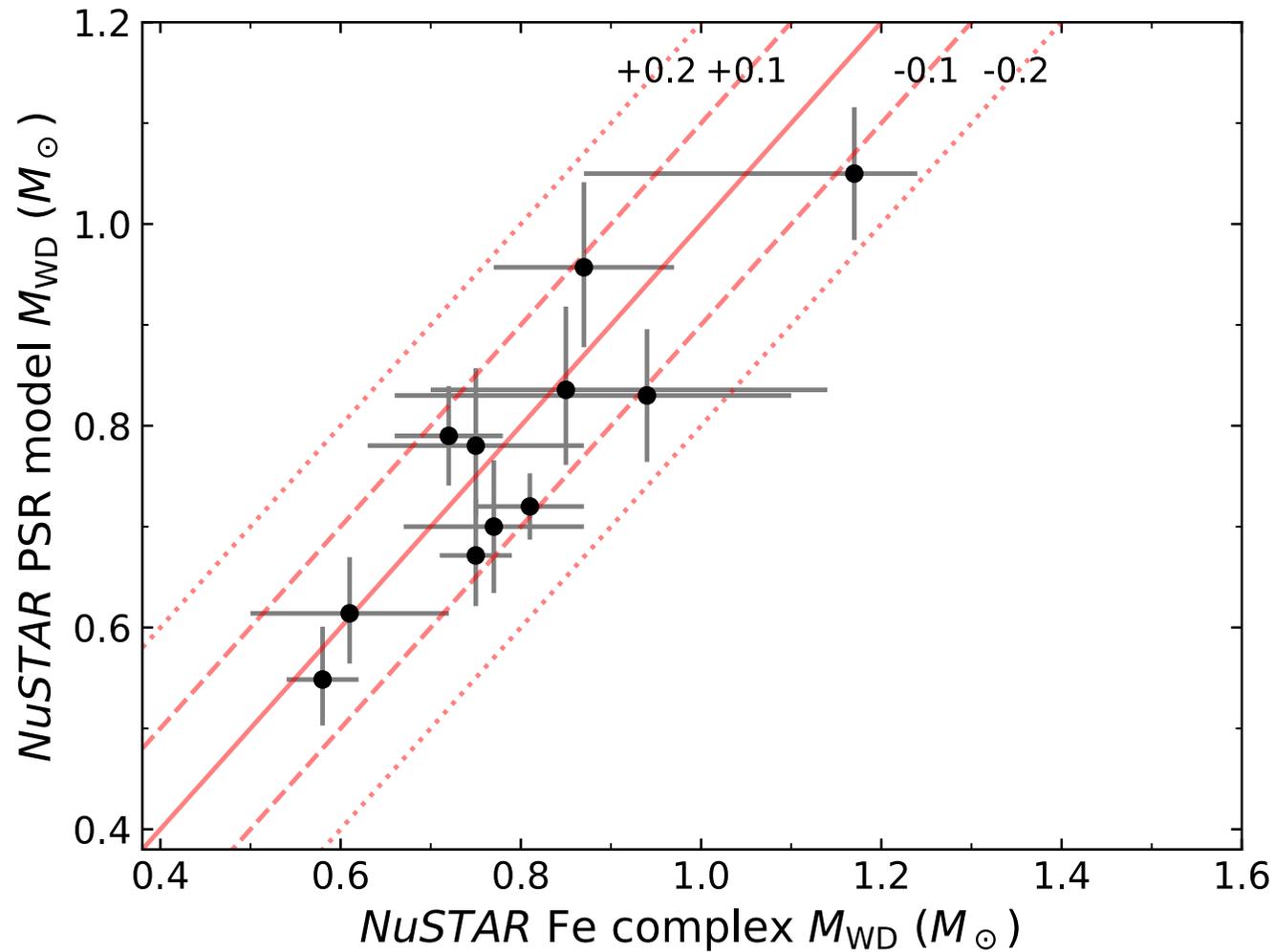


Сравнение с другими методами (в основном, оптическими)



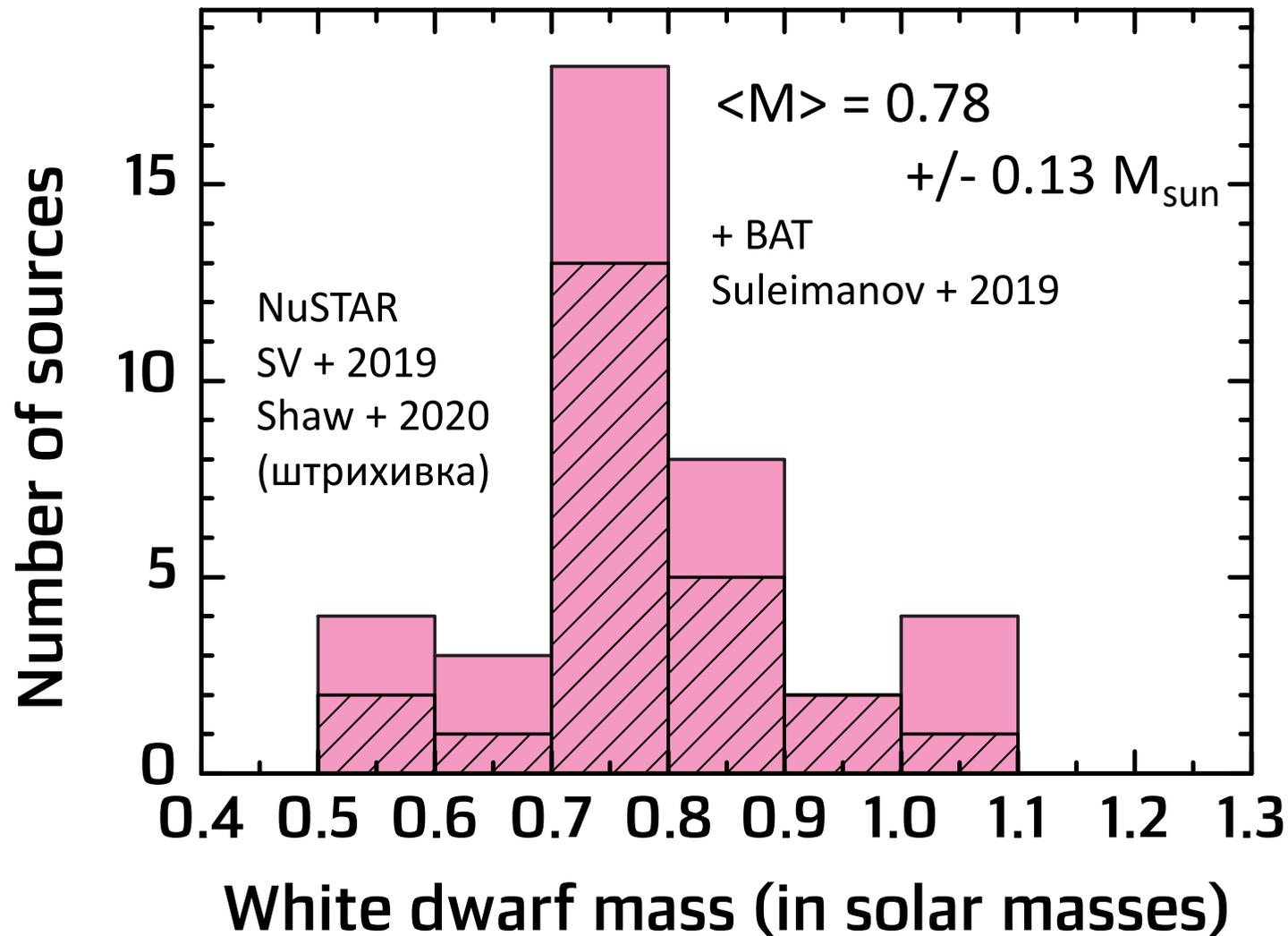
Сравнение с другими методами (по отношению $EW_{\text{FeXXVI}}/EW_{\text{FeXXV}}$)

Shaw + 2020



Хи + 2019, см. также Luna... SV 2015

Распределение по массам БК



$0.83 \pm 0.24 M_{\text{sun}}$ - Zorotovic + 2011 (по всем CVs)

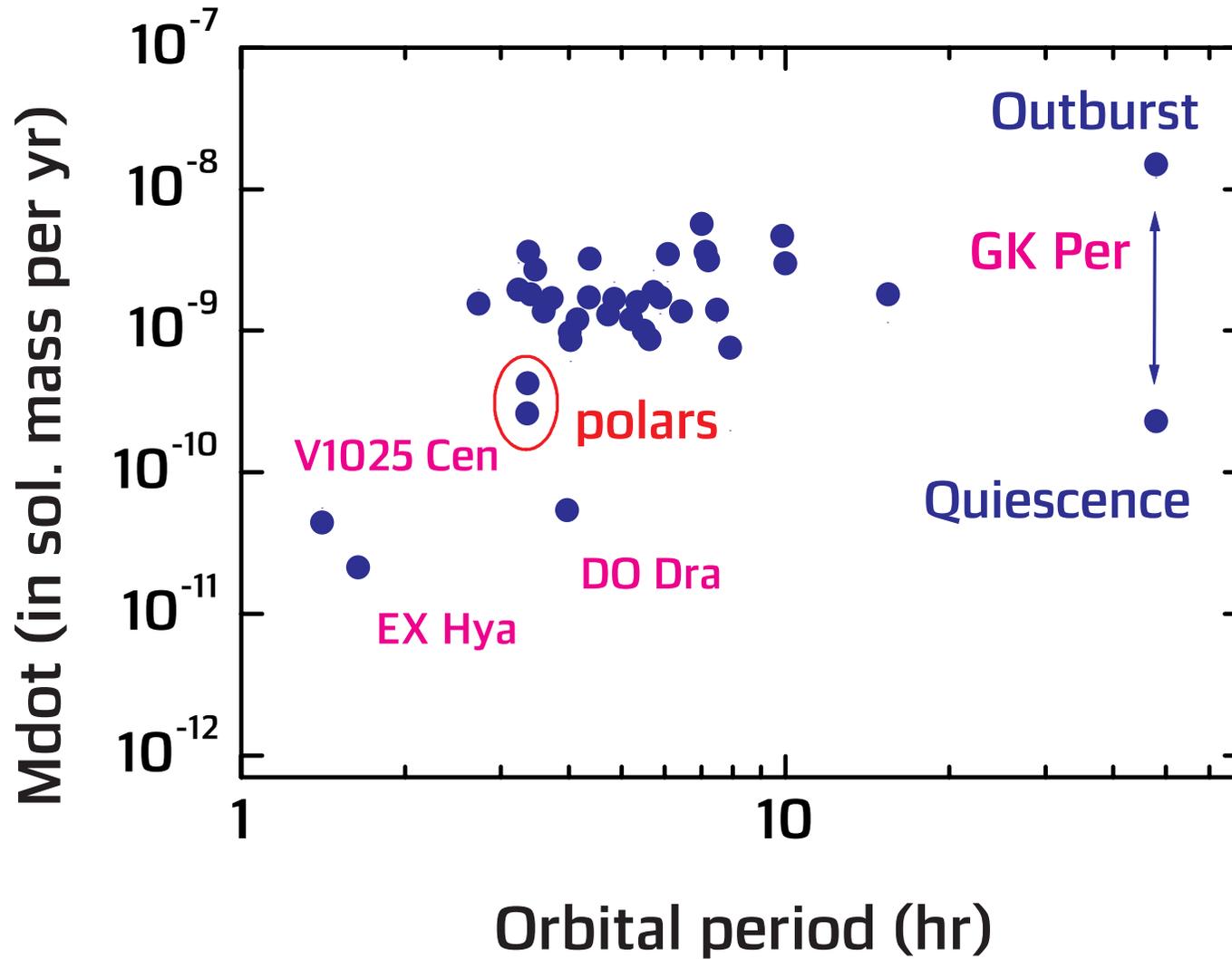
0.88 ± 0.25 - Yuasa + 2010 (IPs)

0.86 ± 0.07 - Bernardini + 2012 (IPs)

Темпы аккреции

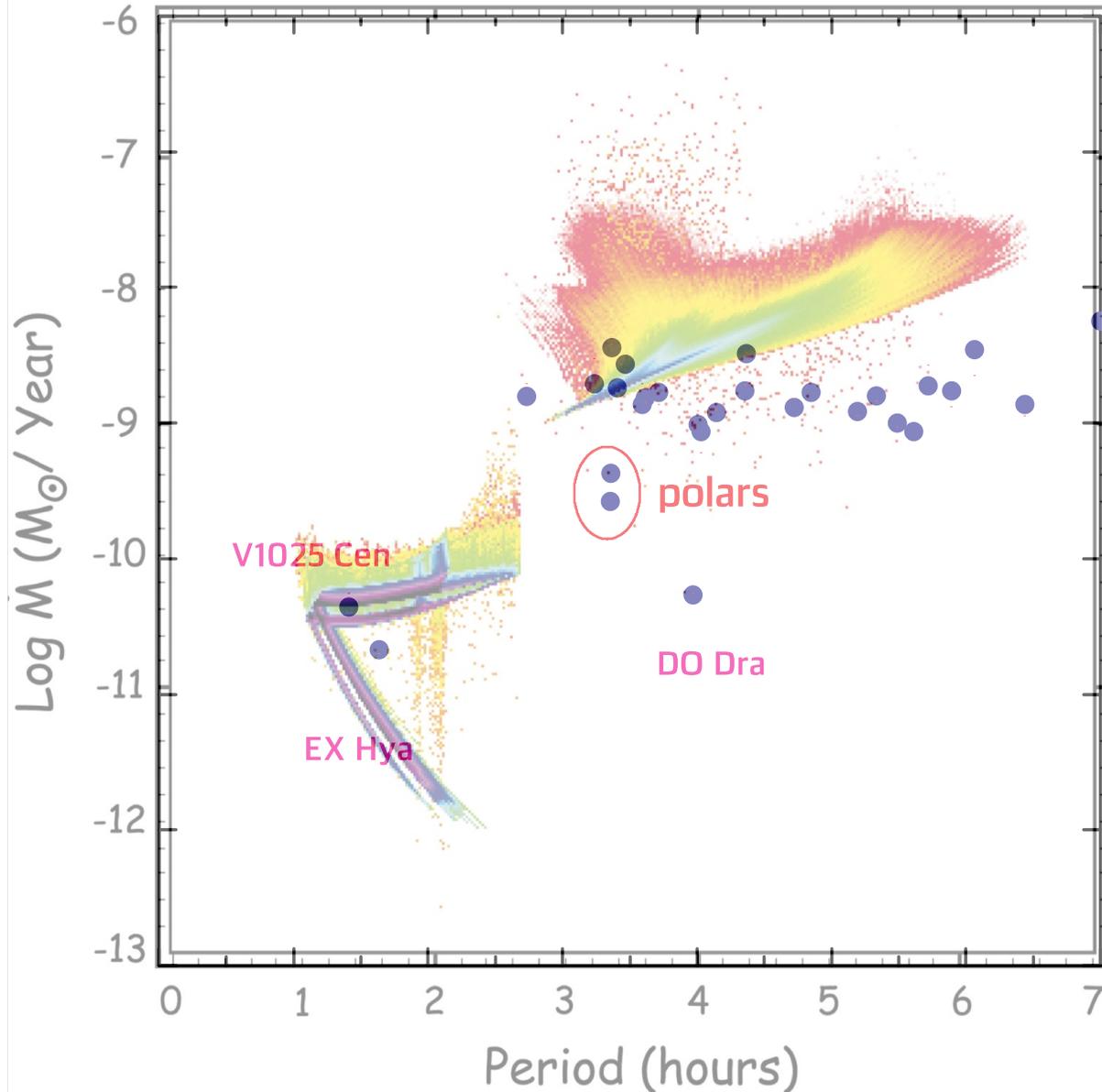
используя расстояния из Gaia DR2

37 источников



Сравнение с теоретическими предсказаниями

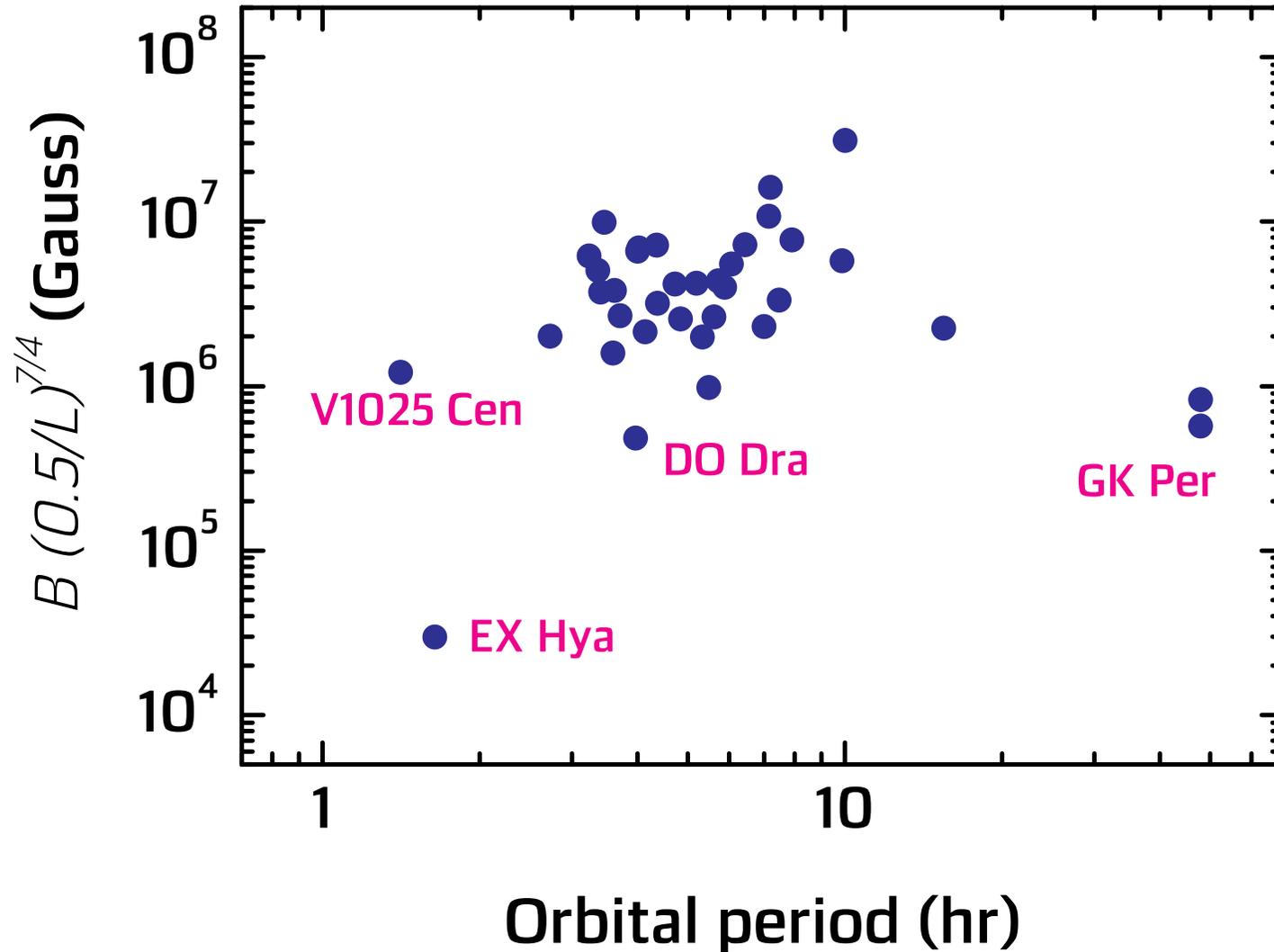
У долгопериодических IPs более низкие \dot{M} чем предсказывается
Вероятно, EX Hya это карликовая новая в спокойном состоянии



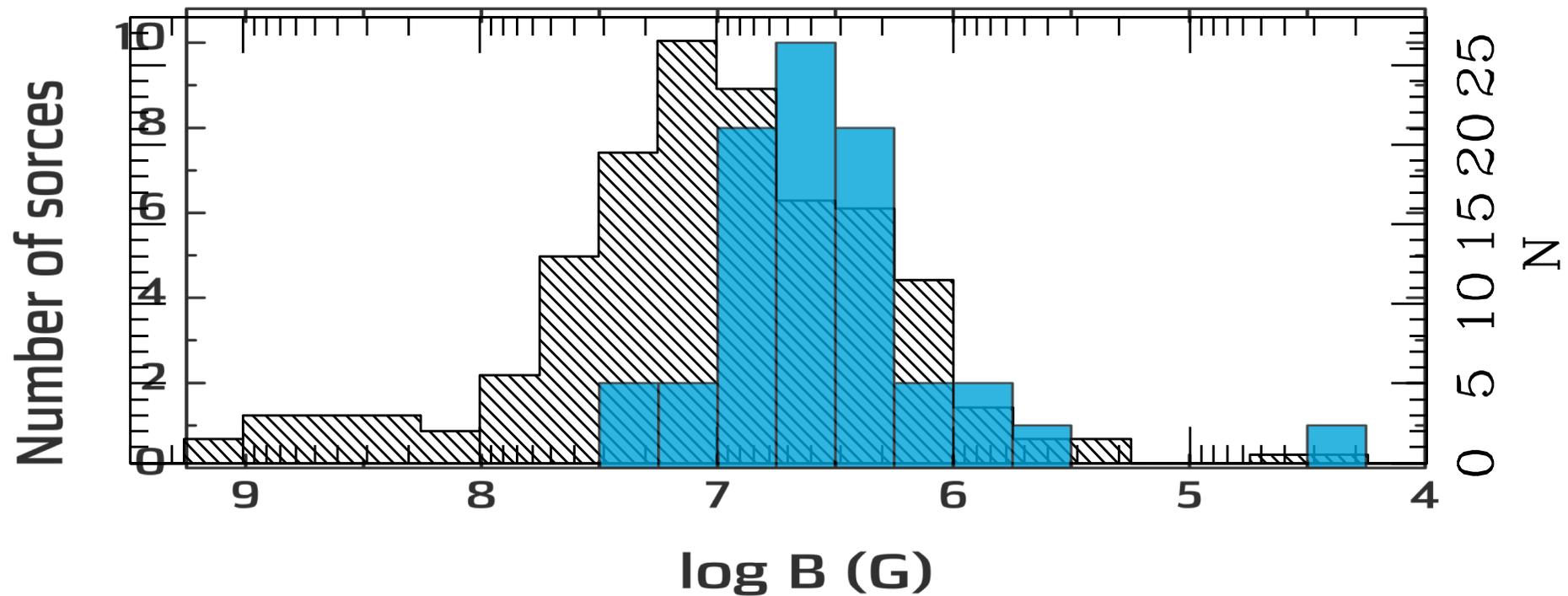
Howell + 2001

Напряженность магнитного поля

используя расстояния из Gaia DR2



Сравнение распределений белых карликов по величине магнитного поля в одиночных объектах (штрих) и IPs (синие)



Заключение

Исследованы 36 промежуточных полярных звезд и 2 полярные звезды, наблюдавшиеся Swift/BAT и NuSTAR (26 из них).

Определены массы белых карликов в них, ($\langle M \rangle = 0.78 \pm 0.13 M_{\text{sun}}$), а для части объектов и радиусы магнитосфер.

Используя расстояния, полученные из данных Gaia DR2 определены темпы аккреции в них ($\sim 10^{-9} M_{\text{sun}}/\text{yr}$) и величина магнитного поля на поверхности БК (10^7 - 10^6 Гс).

Более подробно исследованы EX Hya, IP с низким $\dot{M} < 10^{-11} M_{\text{sun}}/\text{yr}$ и $B \sim 10^4$ Гс, и карликовая Новая GK Per с переменным радиусом магнитосферы.

