



# Спектральная эволюция термоядерных вспышек рентгеновских барстеров

Валерий Сулейманов

Universität Tübingen, Germany

Казанский (Приволжский) Федеральный Университет  
Институт Космических Исследований

Представленные результаты получены совместно с

J. Poutanen, М. Ревнивцев, К. Werner, J. Kajava, J. Nättilä,  
M.C. Miller, A. Steiner, С. Мольков, А. Лутовинов, Zh. Li,  
T. Salmi, M. Falanga, R.Xu

Государственный Астрономический Институт им. Штернберга  
16 Ноября, 2021

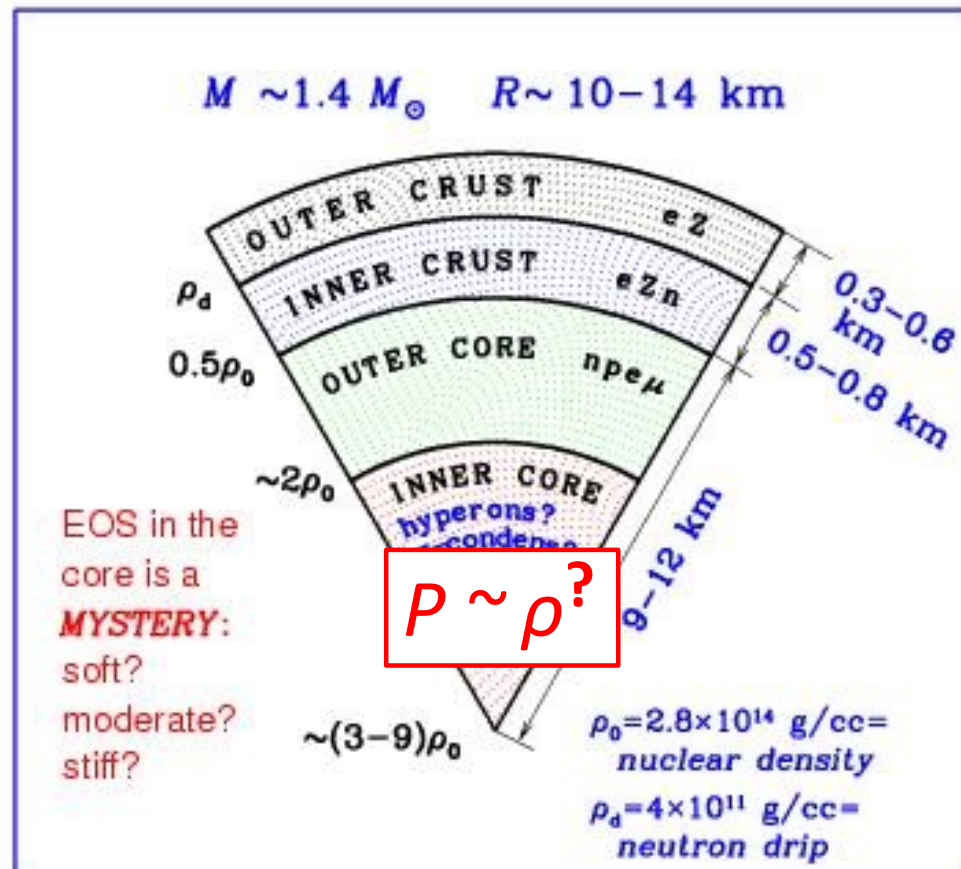
## ПЛАН

1. Мотивация – массы и радиусы нейтронных звезд  
и уравнение состояния вещества в их ядрах
2. Барстеры – нейтронные звезды в LMXBs с термоядерными вспышками на поверхности  
Формирование спектров барстеров – роль комптоновского рассеяния
3. Спектральная эволюция вспышки как основа для определения масс и радиусов  
нейтронных звезд. Direct cooling tail method. Результаты.
4. Химический состав атмосфер барстеров во время вспышки.  
Вынос продуктов термоядерного горения в фотосферу.
5. Нагрев атмосфер барстеров аккрецией на поздних стадиях вспышек.
6. Влияние быстрого вращения нейтронных звезд.

# 1. Мотивация: Радиусы Нейтронных Звезд

## Внутреннее строение нейтронных звезд

Фундаментальная проблема - свойства холодного сверхплотного вещества во внутреннем ядре нейтронных звезд, ака уравнение состояния.



$$P \sim \rho^{\Gamma}$$

$$\Gamma < 2$$

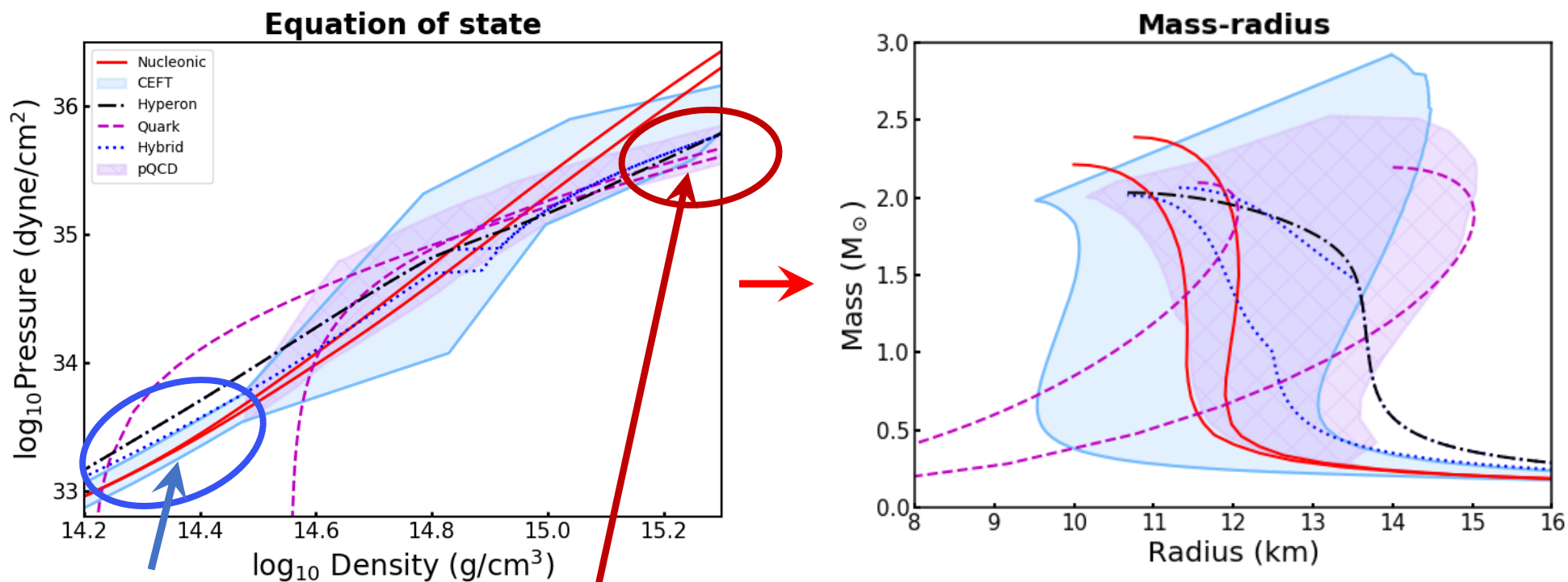
Soft EOS

$$\Gamma > 2$$

Stiff EOS

# Связь между уравнением состояния (EOS)

$\Gamma = \Gamma(\rho)$  и параметрами нейтронных звезд



Nuclei

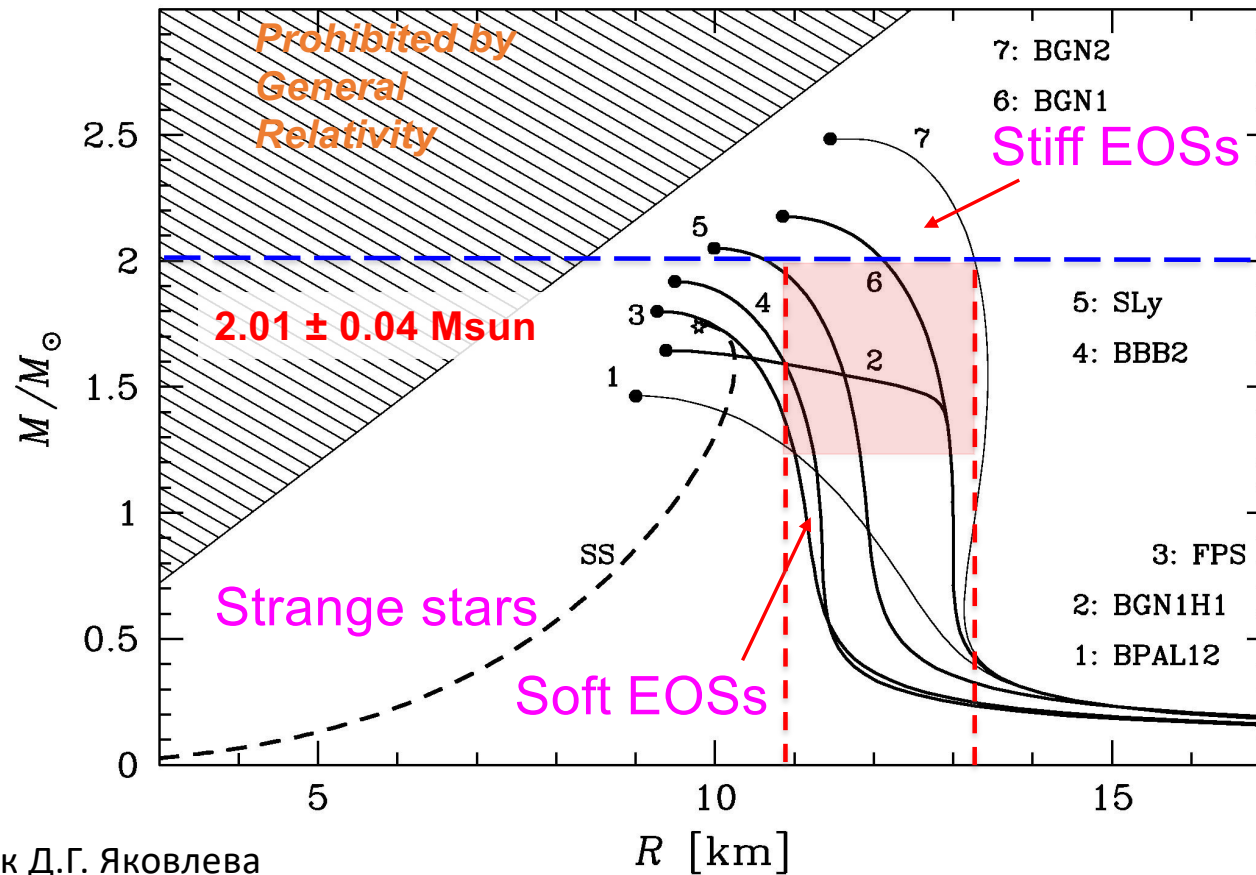
Free quarks: lattice QCD

Credit: A. Watts et al. 2018



# Ограничение на уравнение состояния (EOS) из наблюдений

Массы и радиусы нейтронных звезд



Базовый рисунок Д.Г. Яковлева

# Ограничения из события GW170817 и миллисекундных пульсаров

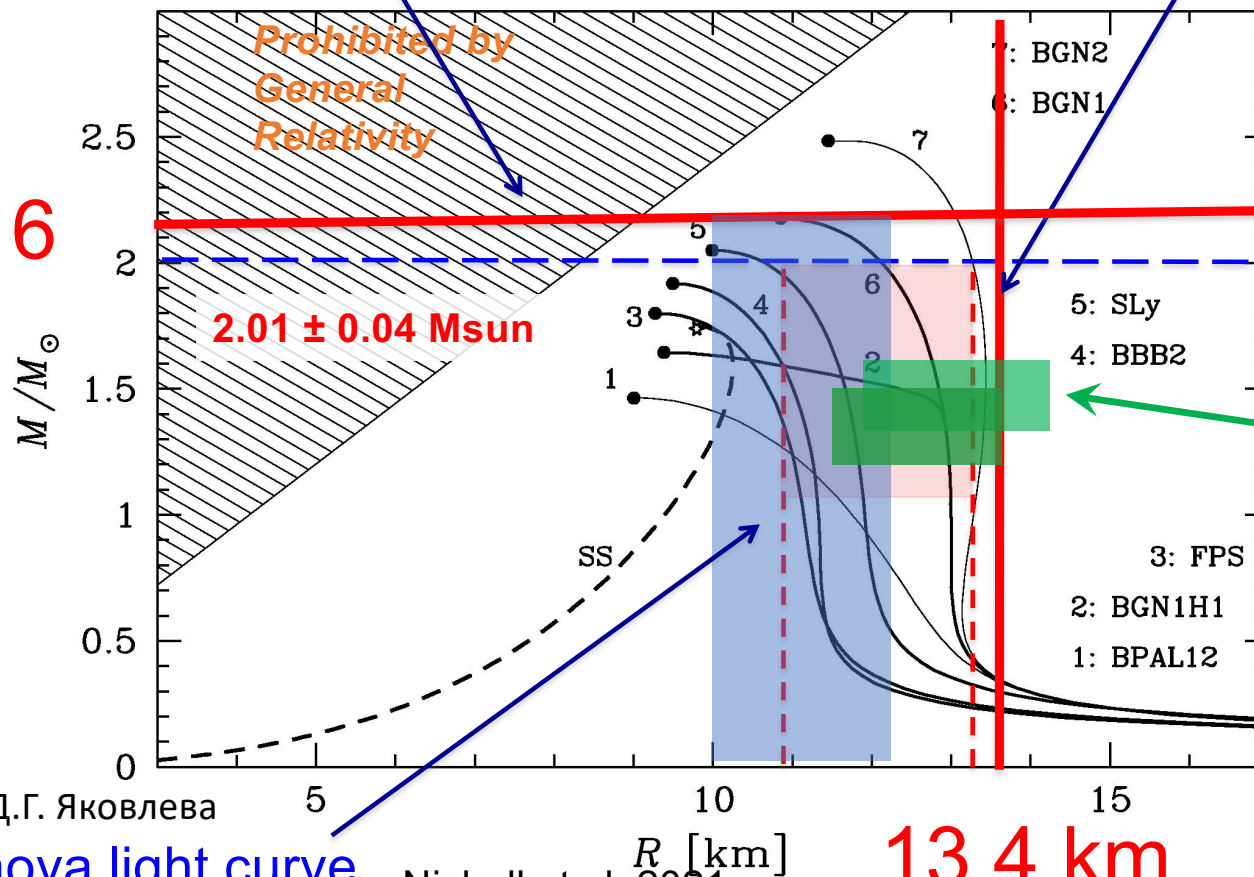
Form of GW signal

Rezzolla et al. 2018

Deformability

Most et al. 2018

2.16



$2.01 \pm 0.04 M_{\text{sun}}$

NICER,  
PSR J0030+0451

Miller et al. 2019  
Riley et al. 2019

Базовый рисунок Д.Г. Яковлева

Kilonova light curve

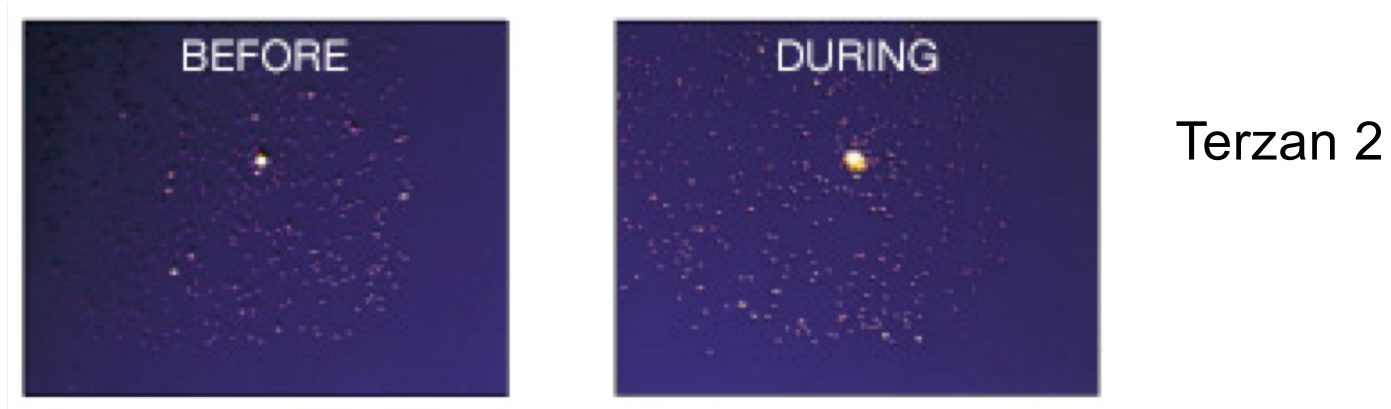
Nicholl et al. 2021

13.4 km



## 2. Барстеры и формирование спектров их излучения

# Вспыхивающие в рентгене нейтронные звезды: Барстеры



X-ray burst in Low Mass X-ray Binary (artist veiw)

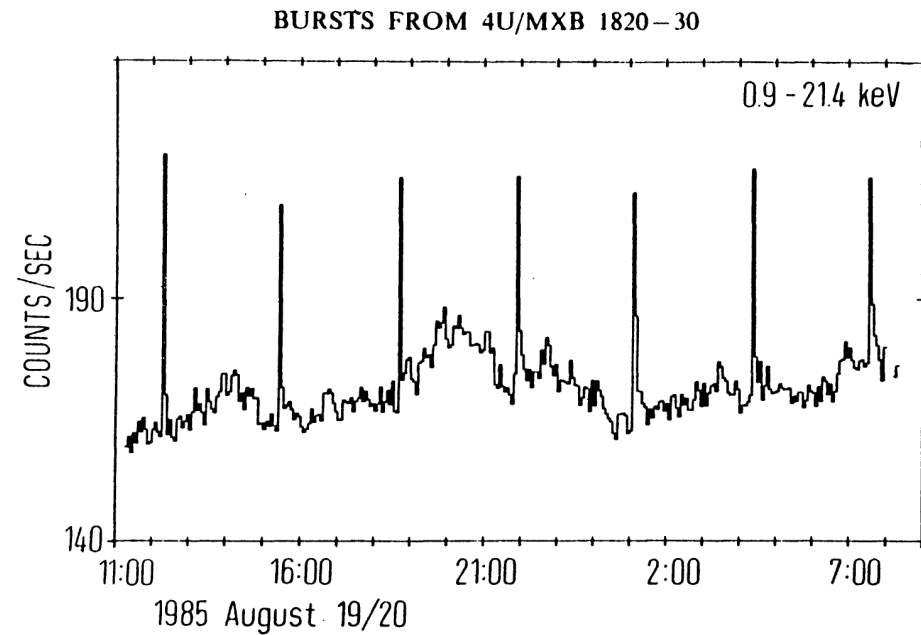


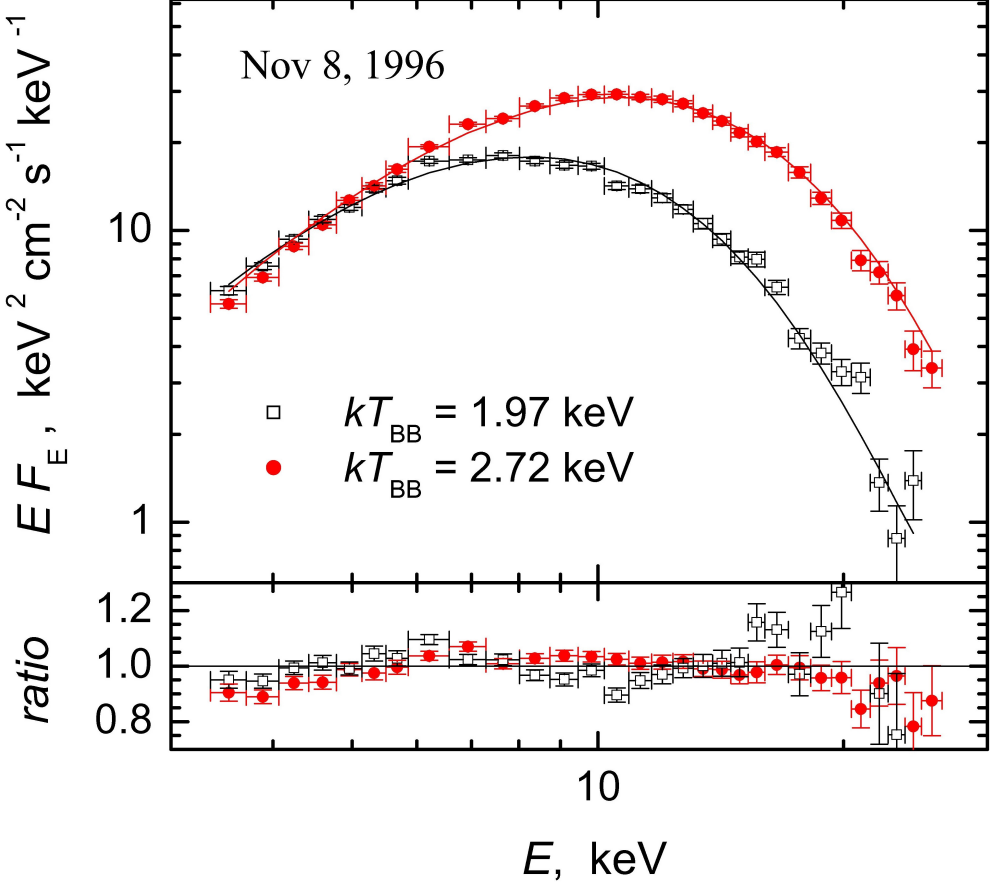
Figure from Haberl et al (1987)

## Вспыхивающие в рентгене нейтронные звезды: Барстеры

- Маломассивные рентгеновские системы (LMXBs) с термоядерными вспышками на поверхности нейтронных звезд
- Светимость особо мощных вспышек достигает предела Эддингтона (photospheric radius expansion (PRE) bursts)
- Спектры во время вспышек хорошо аппроксимируются функцией Планка

Идеальные источники для измерения масс и радиусов нейтронных звезд

# Спектр барстера во время вспышки описывается функцией Планка



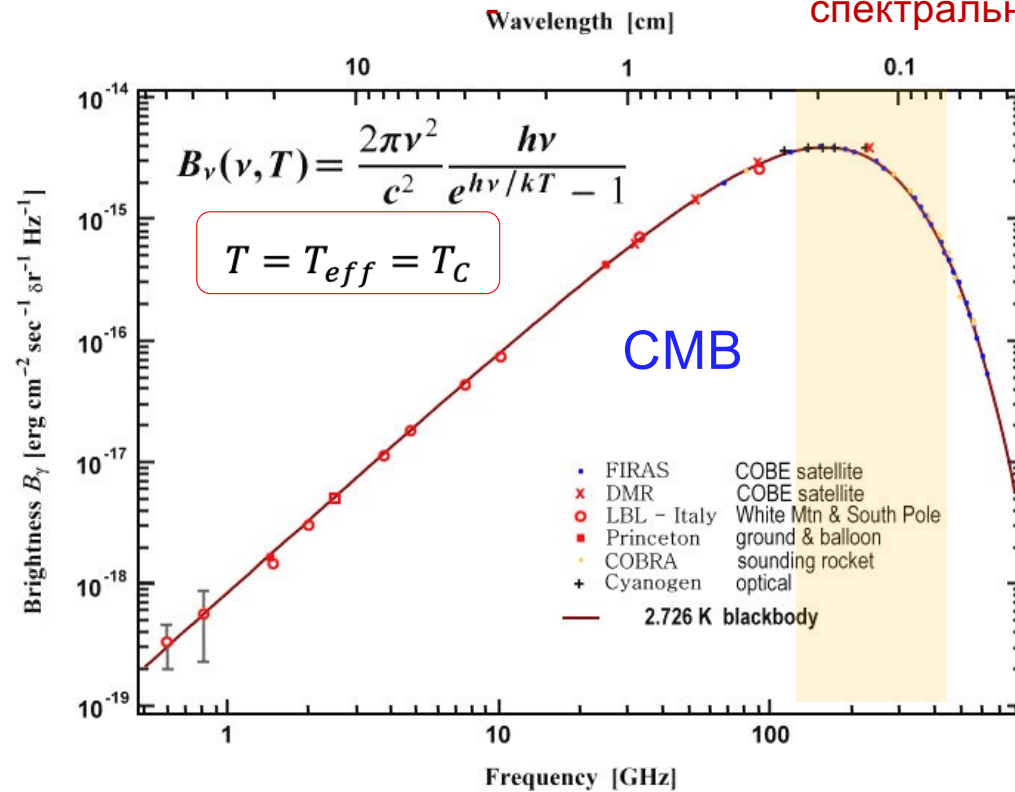
Вспышка в системе  
**4U 1724-307** (PCA/RXTE)

Suleimanov et al. 2011

# Действительно ли спектр является спектром абсолютно черного тела?

Эффективная температура  $T_{\text{eff}}$   $\sigma_{SB} T_{\text{eff}}^4 = \int_0^\infty F_E dE$

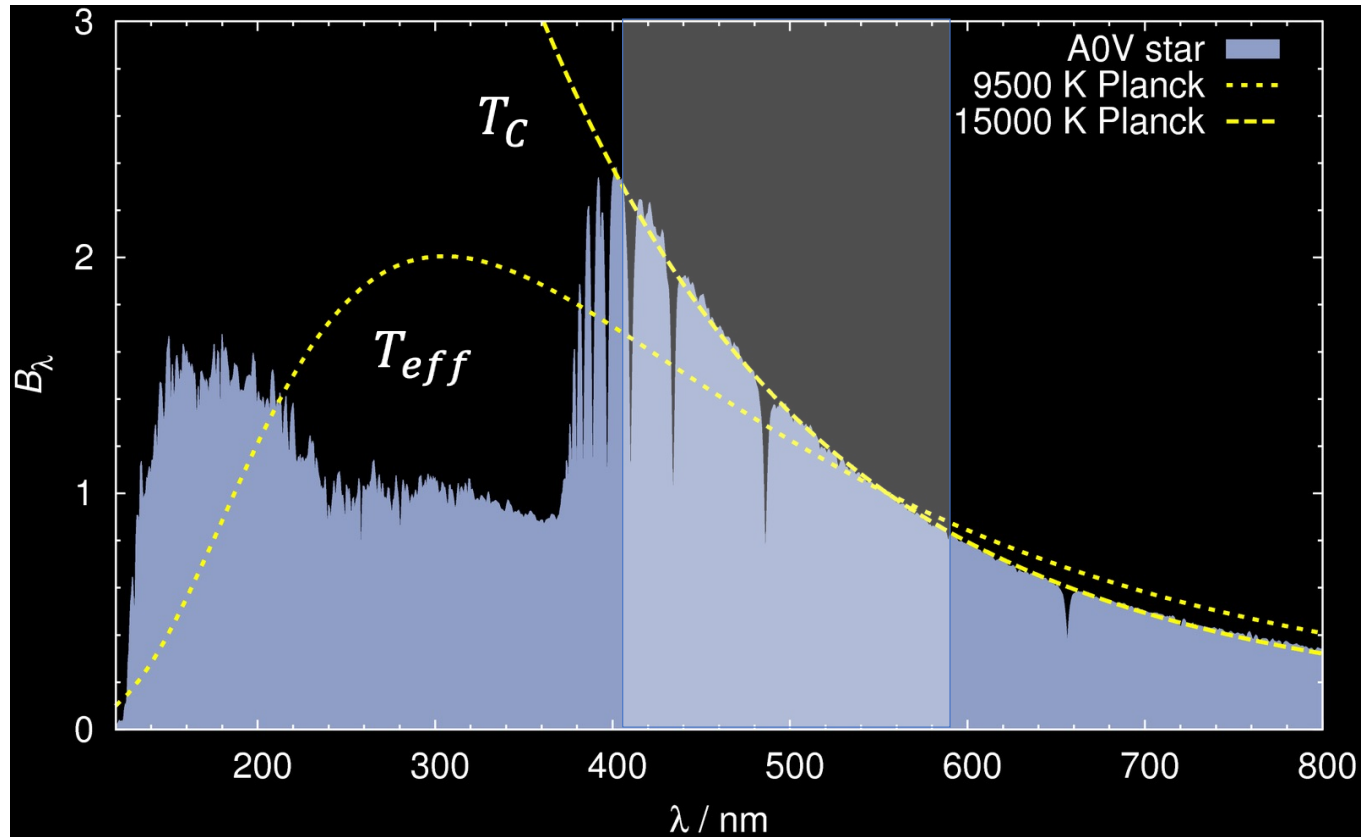
Цветовая температура  $T_C$  - Из формы спектра в кокой-либо спектральной полосе



# Пример: спектры горячих звезд

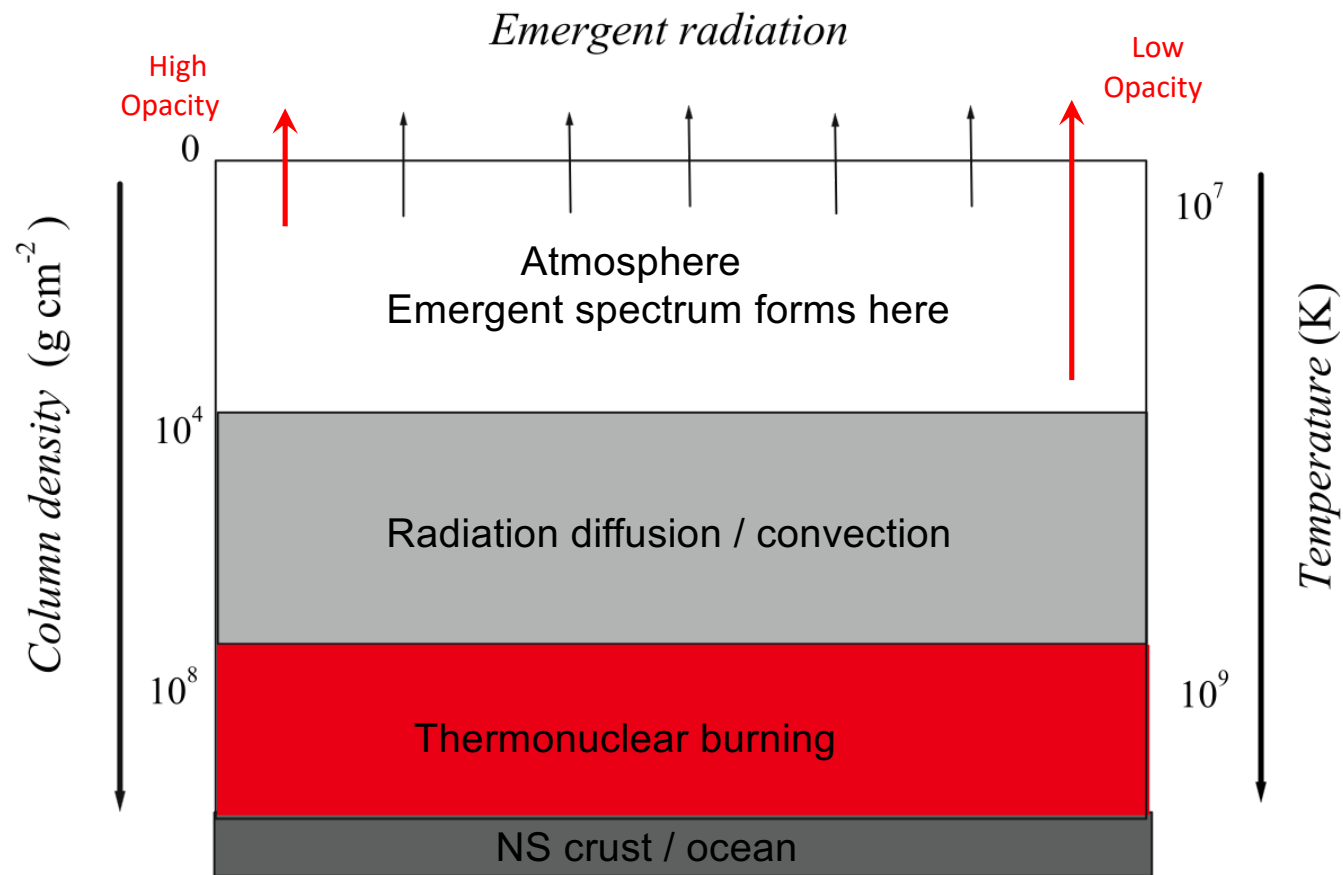
Звездные спектры являются тепловыми, НО

$$T_C \neq T_{eff}$$



← Frequency and Photon energy

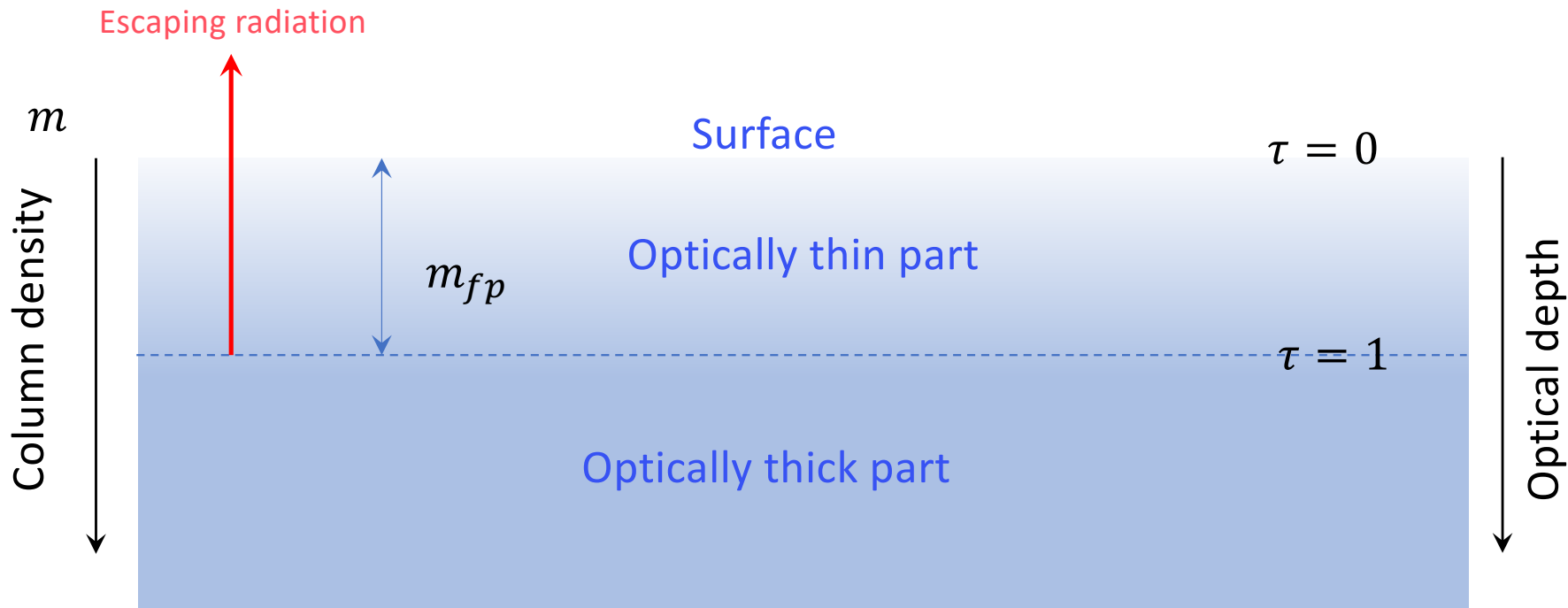
# Плоскопараллельная модель оболочки с термоядерным горением



# Непрозрачность

Коэффициент непрозрачности - величина обратная длине свободного пути фотона, выраженной через колонковую плотность

$$\kappa = m_{fp}^{-1} \quad [\kappa] = \text{cm}^2 \text{g}^{-1} \quad \tau \approx \kappa m$$





## Непрозрачность: Два физически различных процесса

**Электронное рассеяние** - фотон только меняет направление (Thomson, coherent)

$$\sigma_e = \sigma_T \frac{N_e}{\rho} \approx 0.2(1 + X) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1} \quad X \text{ is hydrogen mass fraction}$$

**Комптоновское рассеяние** – энергия и импульса фотона изменяются

$$\sigma_e = \sigma_e(E, T) \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

**Истинная непрозрачность** – результат взаимодействия двух частиц (иона и электрона)

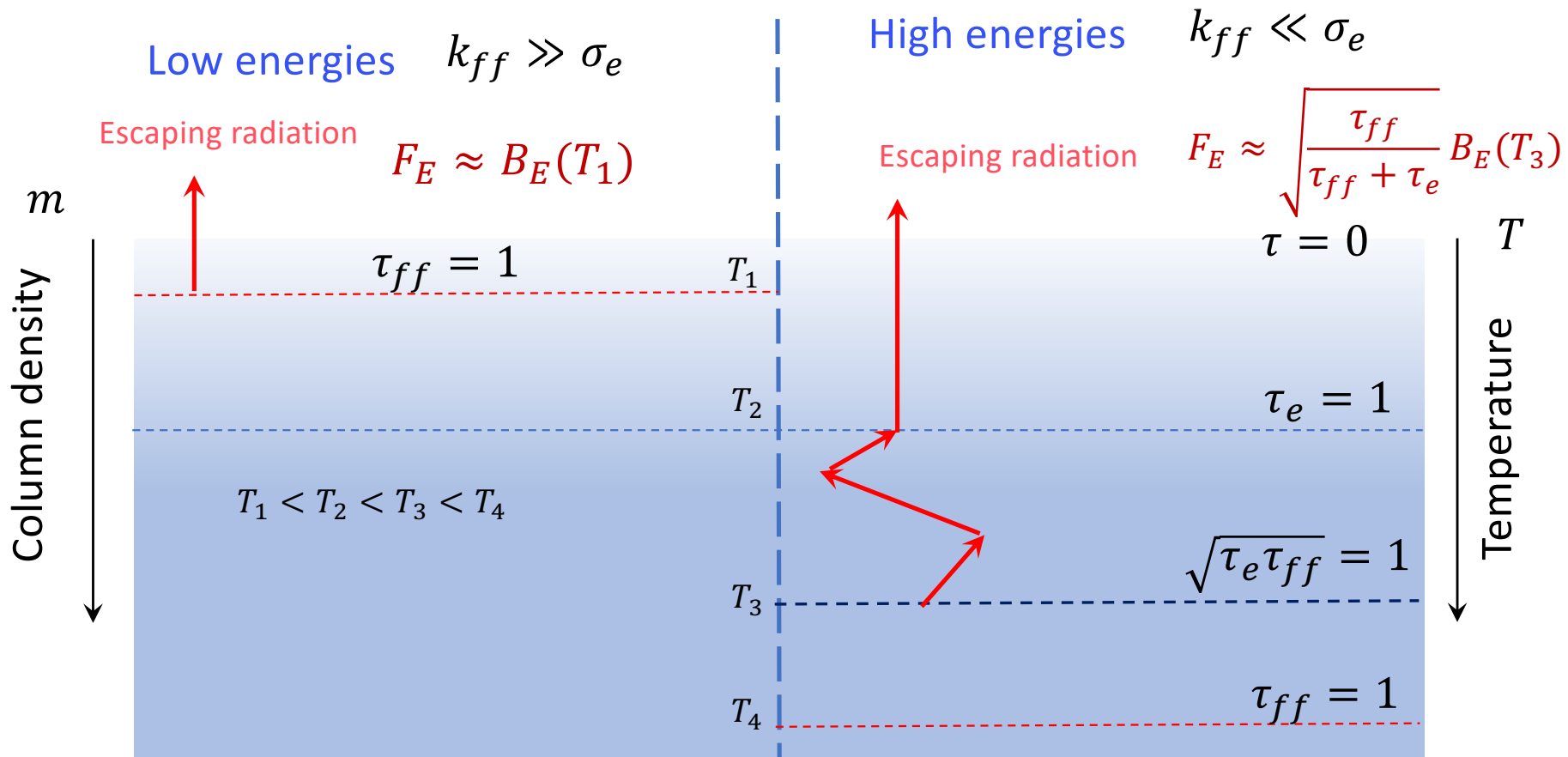
Фотон исчезает (или рождается)

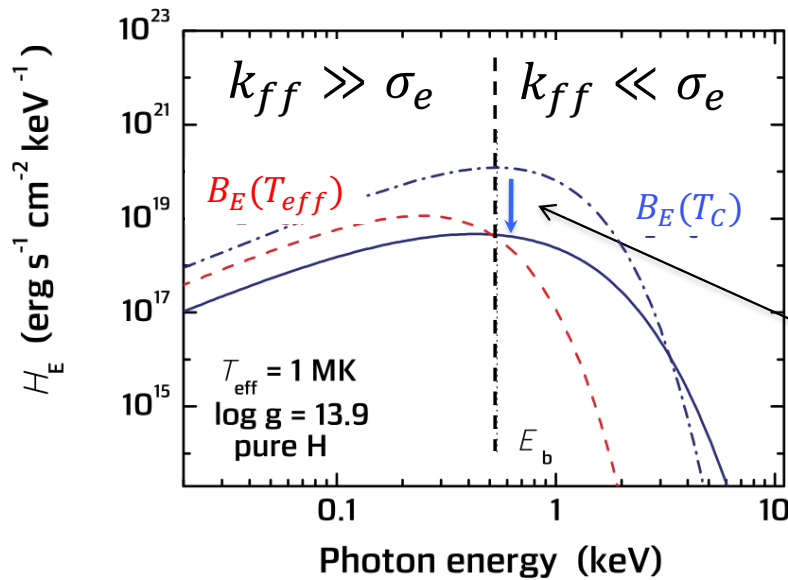
$$k_{ff} = \sigma_E \frac{N_e N^+}{\rho} \sim E^{-3} \rho T^{-1/2} \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

free-free opacity

# Формирование спектра на разных энергиях фотона

Коэффициент непрозрачности - величина обратная длине свободного пути фотона, выраженной через колонковую плотность





Фактор дилуциии w

$$F_E \approx w B_E(T_c = f_c T_{eff})$$

$$T_c > T_{eff}, \quad w \approx f_c^{-4} < 1, \quad f_c > 1$$

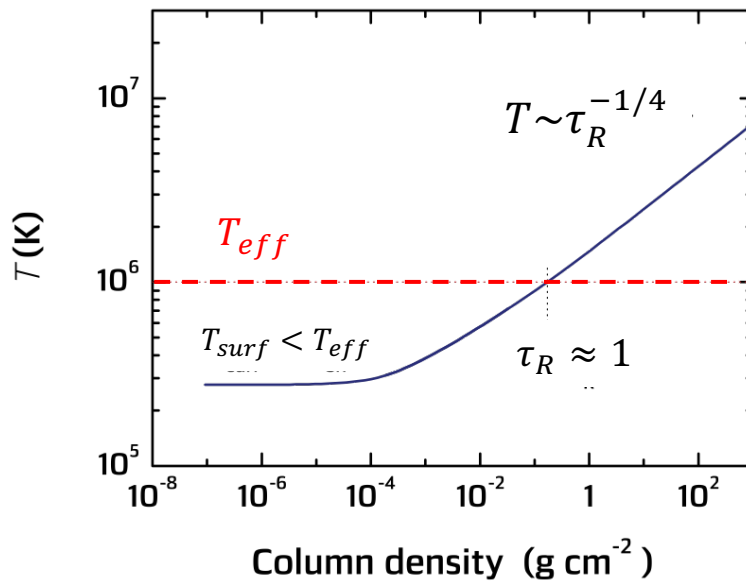
Цветовая поправка

$$F_E^{obs} \approx K_{BB} B_E(T_c) = w B_E(T_c) \frac{R^2 (1+z)^2}{D^2}$$

$$K_{BB} = \frac{R_{BB}^2}{D^2}$$

w ~ 0.1

$$R_{BB} \approx \sqrt{w} R (1+z)$$



## Атмосфера

Тонкая плазменная оболочка между источником энергии и открытом космосом. Энергия переносится сквозь оболочку и излучается в открытое пространство.

## Модель атмосферы

Численная модель, результат самосогласованного решения системы уравнений, описывающих основные физические законы и процессы:

- сохранение массы
- сохранение импульса
- сохранение энергии
- перенос энергии
- уравнение состояния плазмы

# Входные параметры модели атмосферы

Ускорение свободного падения  
на поверхности

$$g = \frac{GM}{R^2} (1 + z)$$

$$1 + z = \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{-1/2}$$

Гравитационное красное смещение

Болометрический поток  $F = \sigma_{SB} T_{eff}^4$

Эффективная температура  $T_{eff}$

или

Относительная светимость  $\ell = L/L_{Edd}$

Химический состав

Accretion – composition of the accreted matter

Low accretion – gravitational separation,  
the lightest element domination

Powerful X-ray bursts – burning ash ?

# Основные уравнения

Гидростатическое равновесие

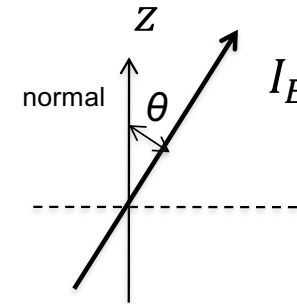
$$\frac{dP_g}{dm} = g - g_{rad}$$

Полная непрозрачность

Перенос излучения

$$\mu \frac{dI_E}{dm} = (k_E + \sigma_e)(I_E - S_E)$$

$$\mu = \cos \theta$$



Описание некогерентности рассеяния  
заключено в функции источника  $S_E$   
и в коэффициенте электронного рассеяния  $\sigma_E$

Лучистое равновесие

$$\int k_E (J_E - B_E) dE - \sigma_e \int \frac{4kT - E}{m_e c^2} J_E dE = 0$$

Уравнение состояния

$$P_g = NkT$$

Для случая оператора Компанейца

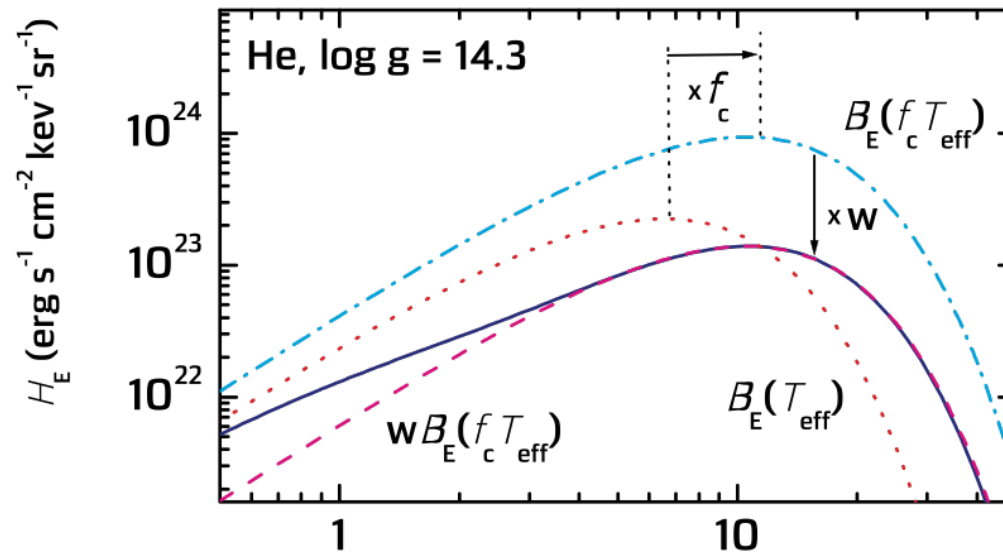
- ионизация давлением включена
- обобщенное приближение ЛТР для населенностей, формализм вероятностей заселенности

Колонковая плотность  $m$  – независимая Лагранжева переменная

$$dm = -\rho dz$$

# Спектры атмосфер горячих нейтронных звезд

Определяющая роль комптоновского рассеяния



$$F_{E'} = w B_{E'}(f_c T_{eff})$$

$$F_E^{obs} = B_E(T_{BB}) K_{BB}$$

$$K_{BB} = w \frac{R^2 (1+z)^2}{D^2}$$

Photon energy (keV)

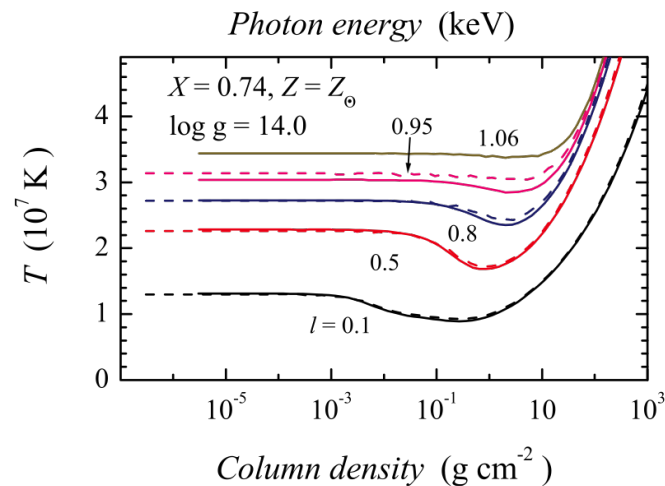
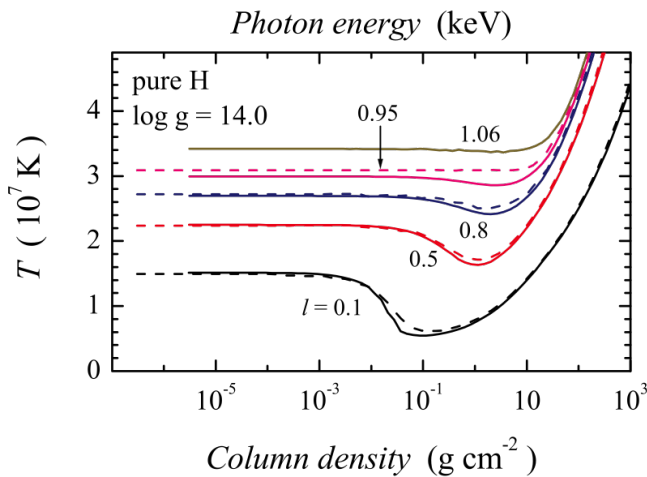
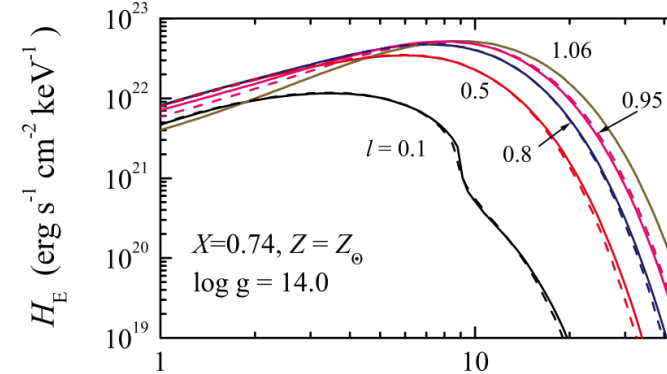
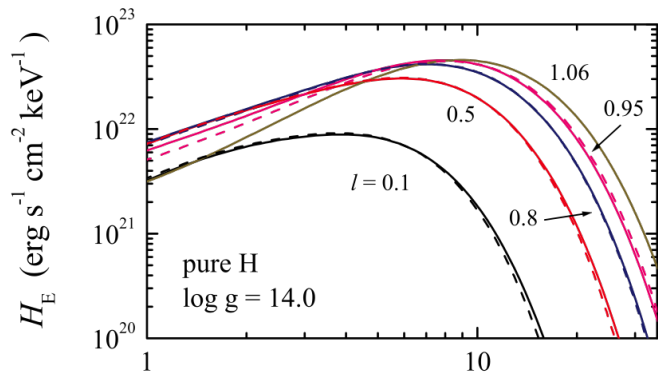
$f_c > 1$  color correction factor

$w \approx f_c^{-4} < 1$  dilution factor

$$T_{BB} = f_c T_{eff} (1+z)^{-1}$$

## Сетка моделей атмосфер горячих нейтронных звезд.

Сравнение моделей с точной релятивистской функцией перераспределения и моделей с использованием оператора Компанейца.



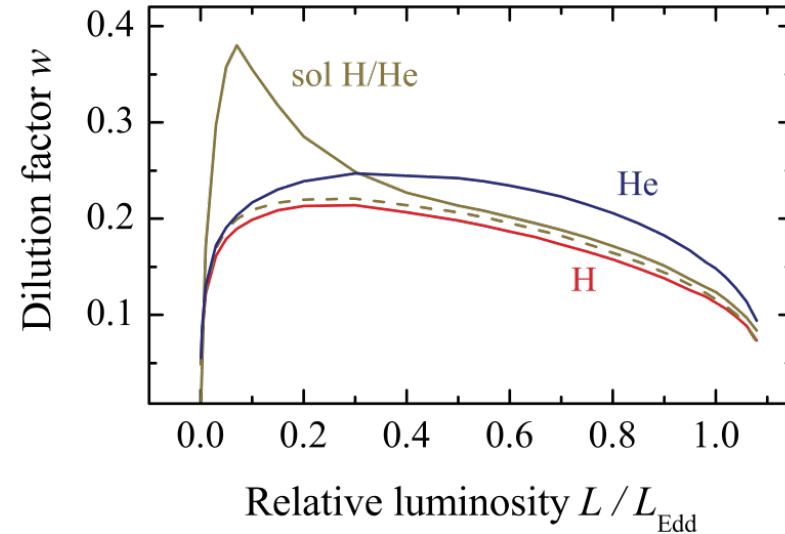
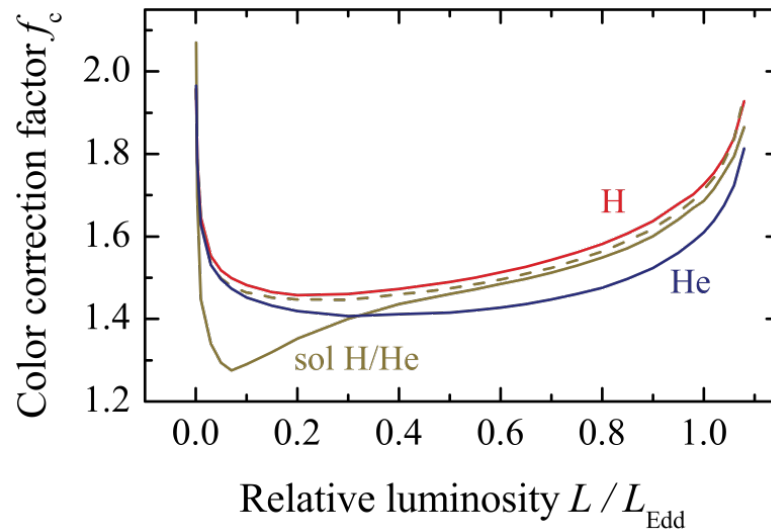
$$\ell = \frac{L}{L_{Edd}} \quad L_{Edd} = \frac{cGM(1+z)}{0.2(1+X)}$$

Возможно существование формально сверх-Эддингтоновских моделей



# Теоретические зависимости

Рассчитаны с использованием моделей атмосфер горячих нейтронных звезд



- 4 chemical compositions: H, He, solar H/He with  $Z = 1$  and  $0.01 Z_{\text{sun}}$
- 9 surface gravities:  $\log g$  from 13.7 to 14.9, with the step 0.15
- 28 relative luminosities  $l = L / L_{\text{edd}}$  from 0.001 to 1.1  
(super-Eddington luminosities for Thomson cross-section)

Suleimanov et al. 2017

# Почему спектры становятся относительно жестче при высоких светимостях?

$$P_g \approx m(g - g_{rad}) \sim \rho T$$

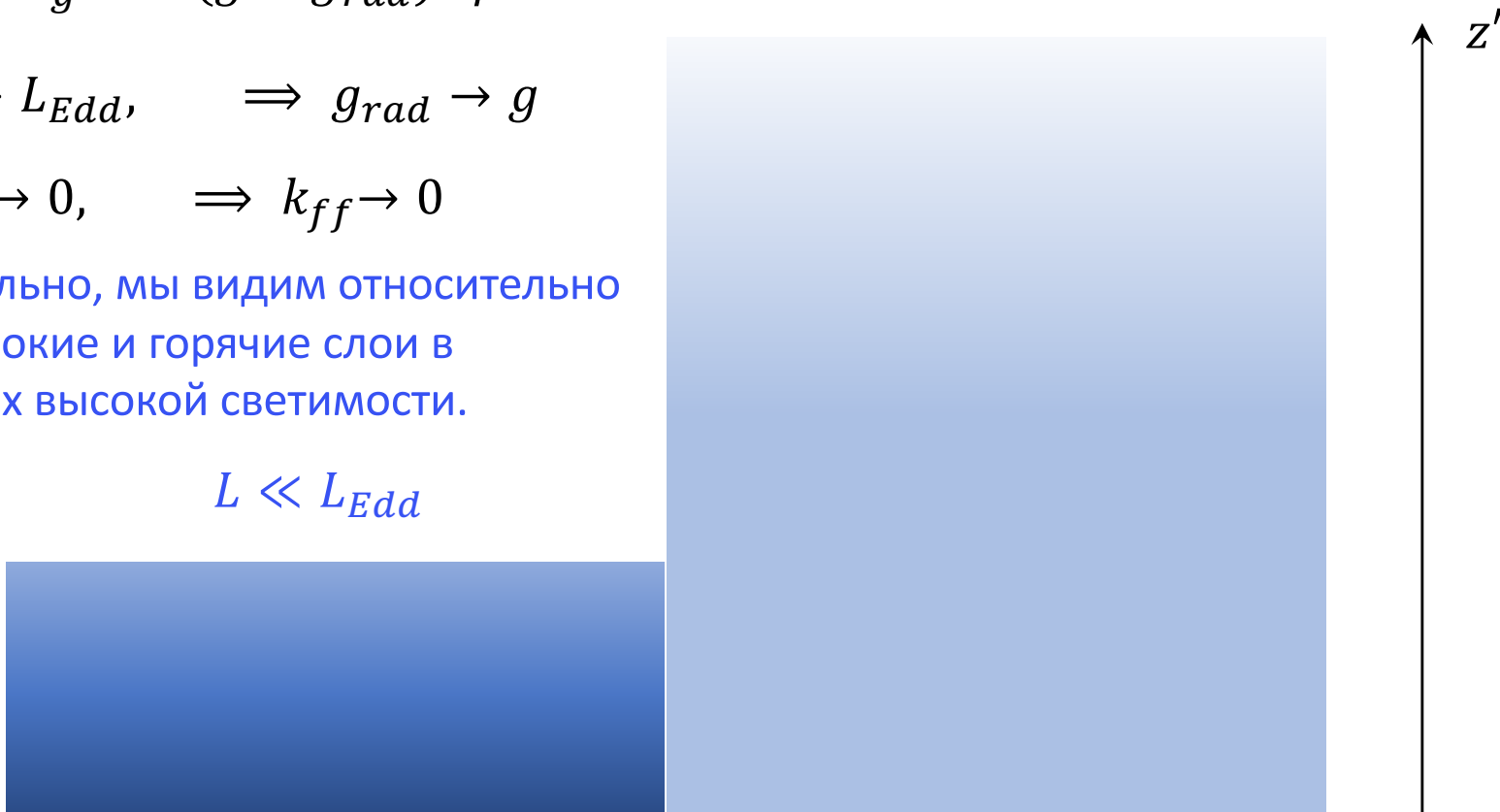
$$L \rightarrow L_{Edd}, \quad \Rightarrow \quad g_{rad} \rightarrow g$$

$$\rho \rightarrow 0, \quad \Rightarrow \quad k_{ff} \rightarrow 0$$

Следовательно, мы видим относительно более глубокие и горячие слои в атмосферах высокой светимости.

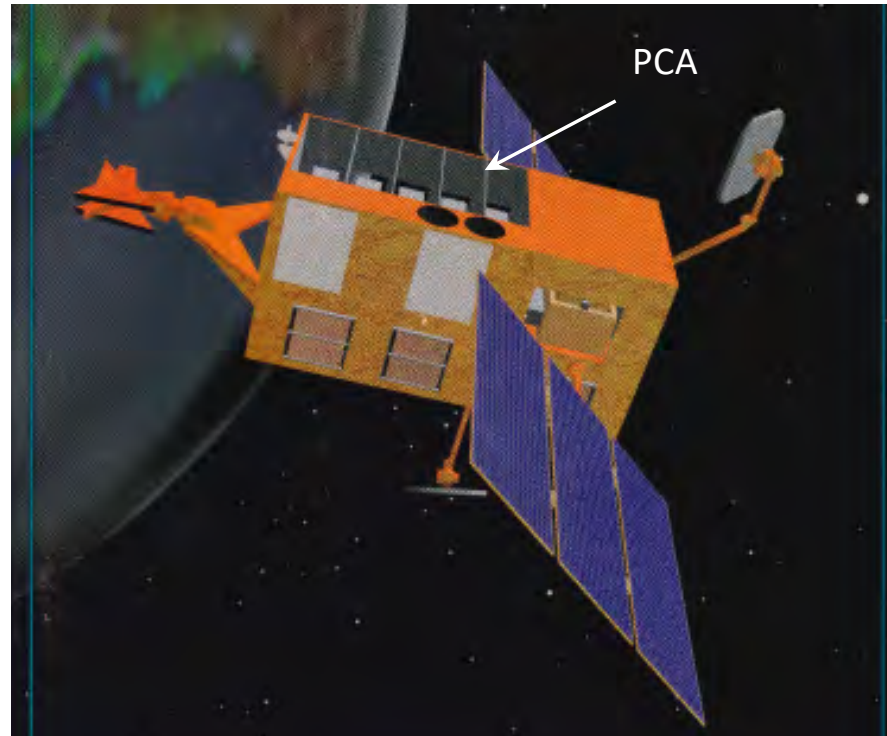
$$L \ll L_{Edd}$$

$$L \approx L_{Edd}$$



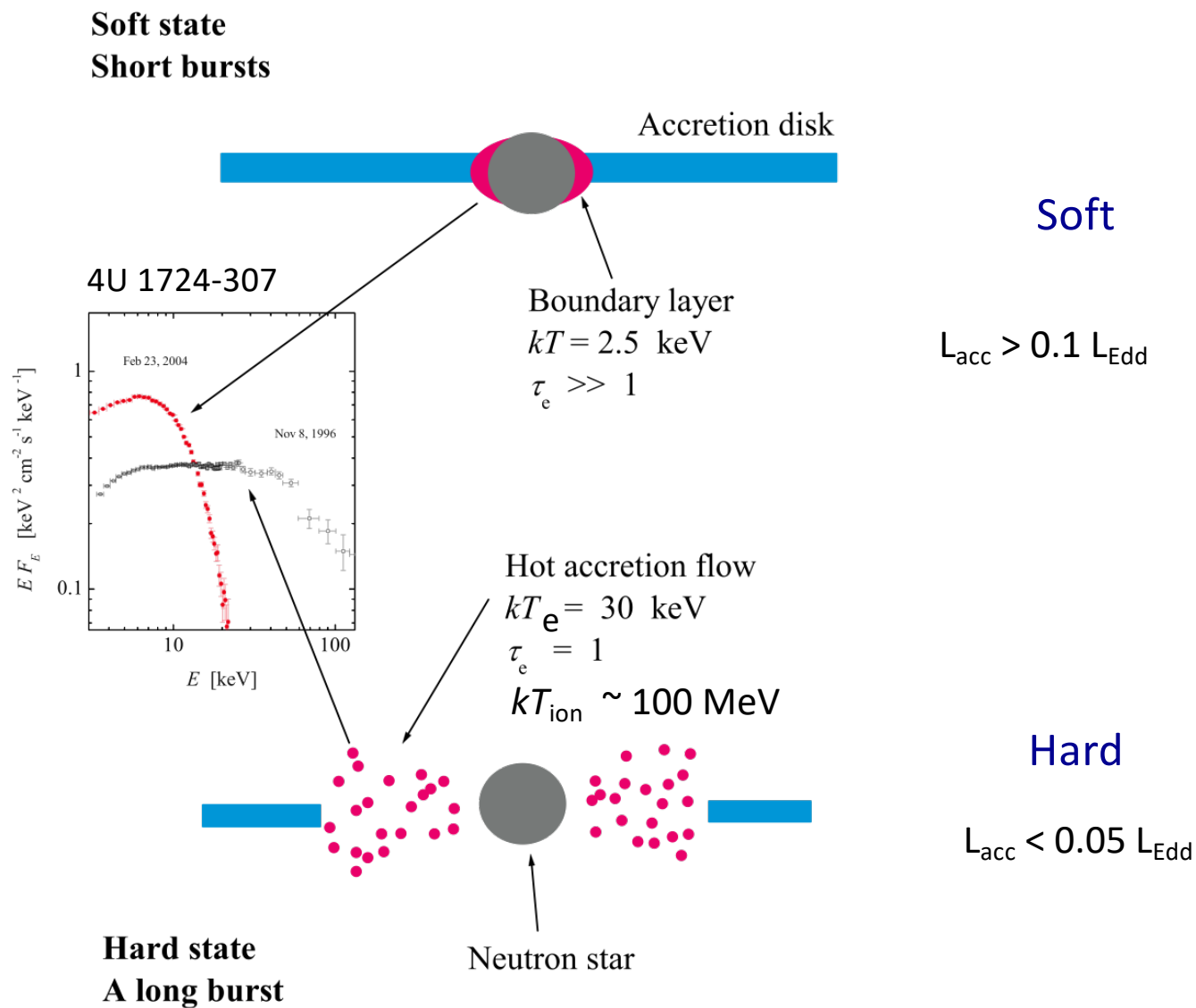
# 3. Direct cooling tail method

## X-ray observatory Rossi X-ray Timing Explorer (RXTE) 1996-2012

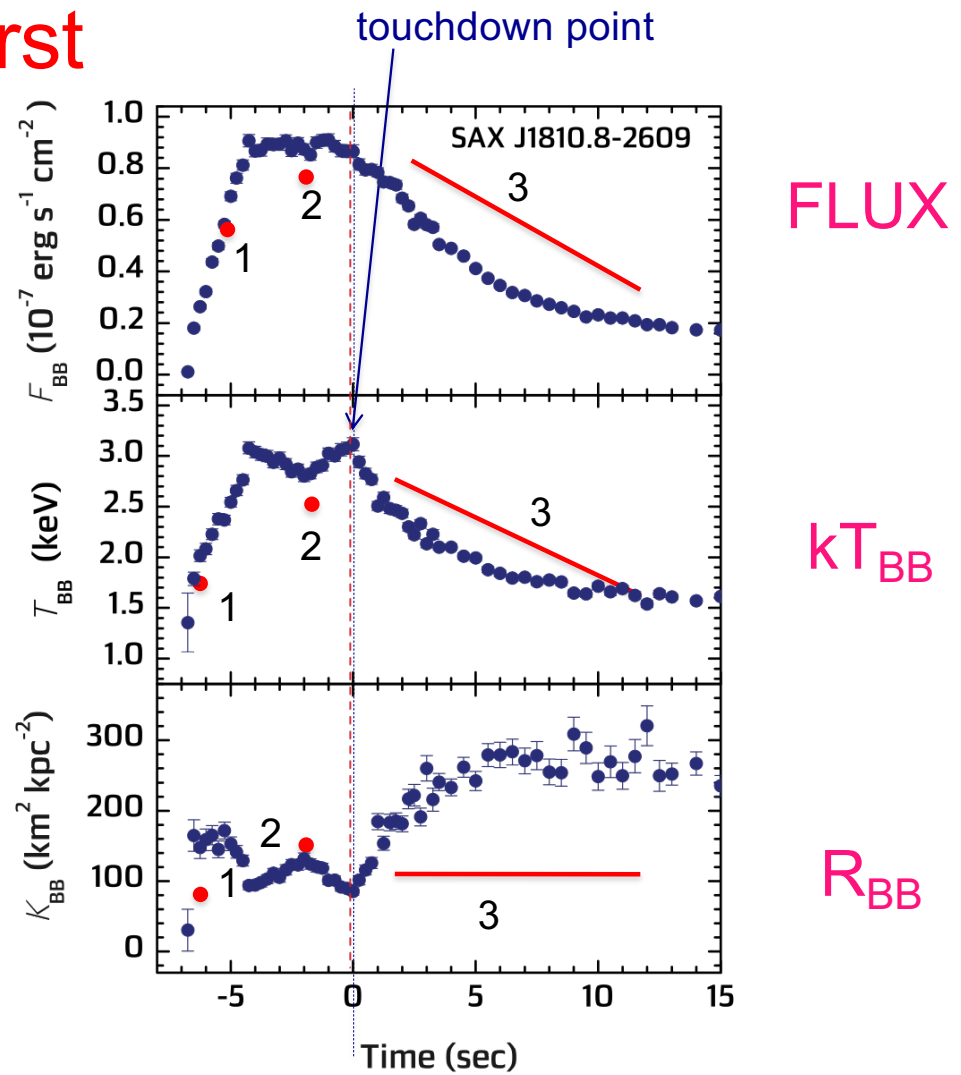
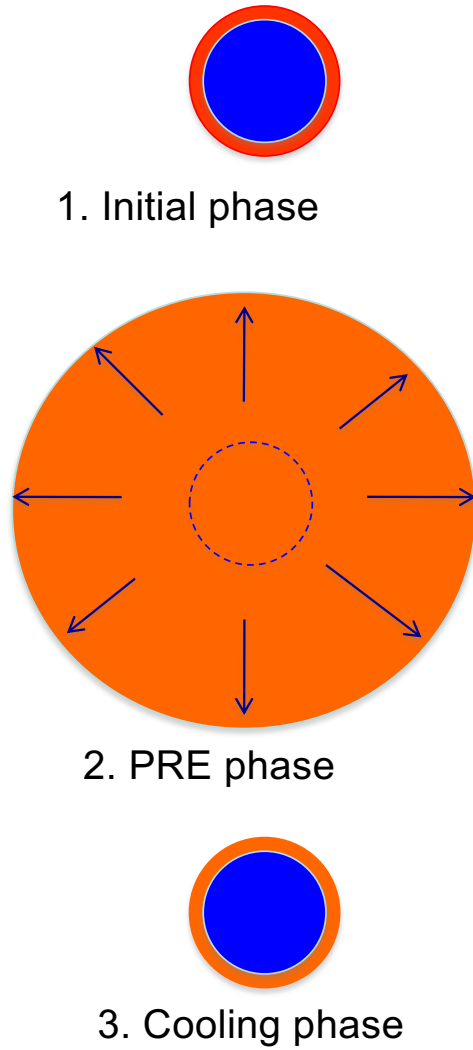


Proportional Counter Array (PCA), 3-20 keV, 6500 cm<sup>2</sup> . High time resolution, 1  $\mu$ s.  
No images – collimator with about 1 degree field of view.

# Два спектральных состояния LMXBs между вспышками

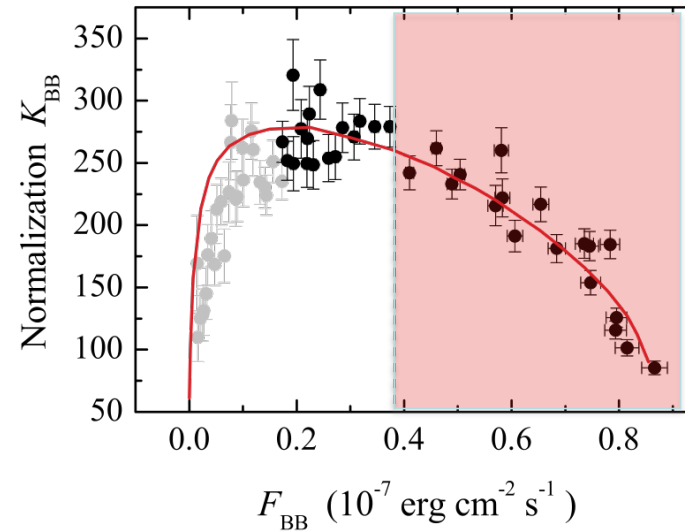
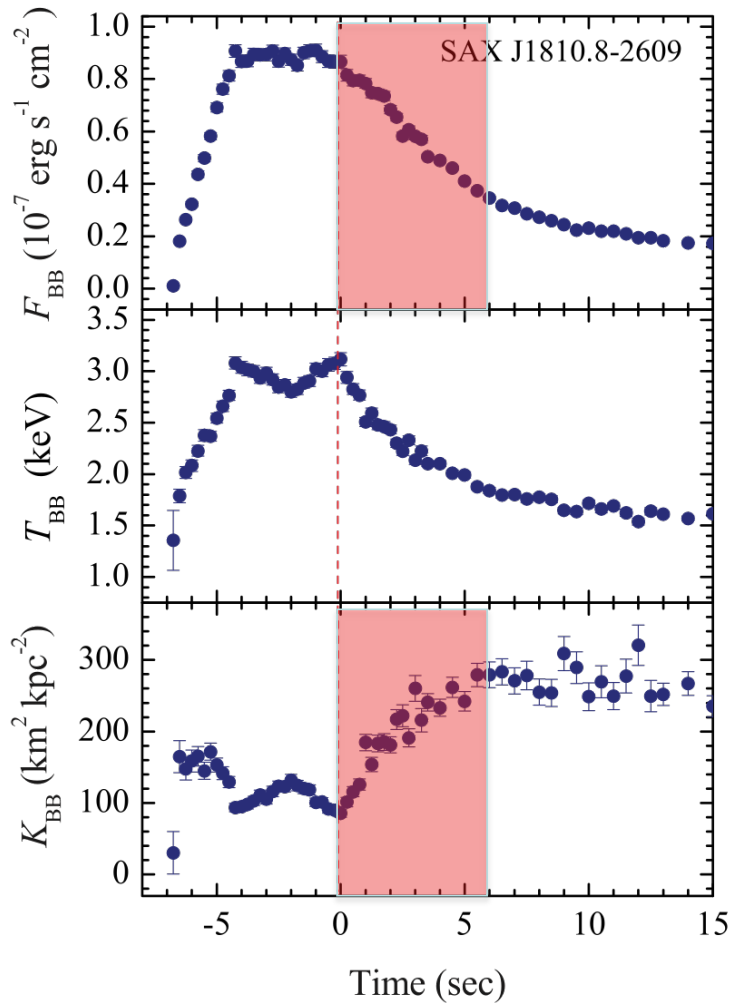


# PRE burst



# Термоядерная вспышка в LMXB SAX J1810.8-2609

## Direct cooling tail method



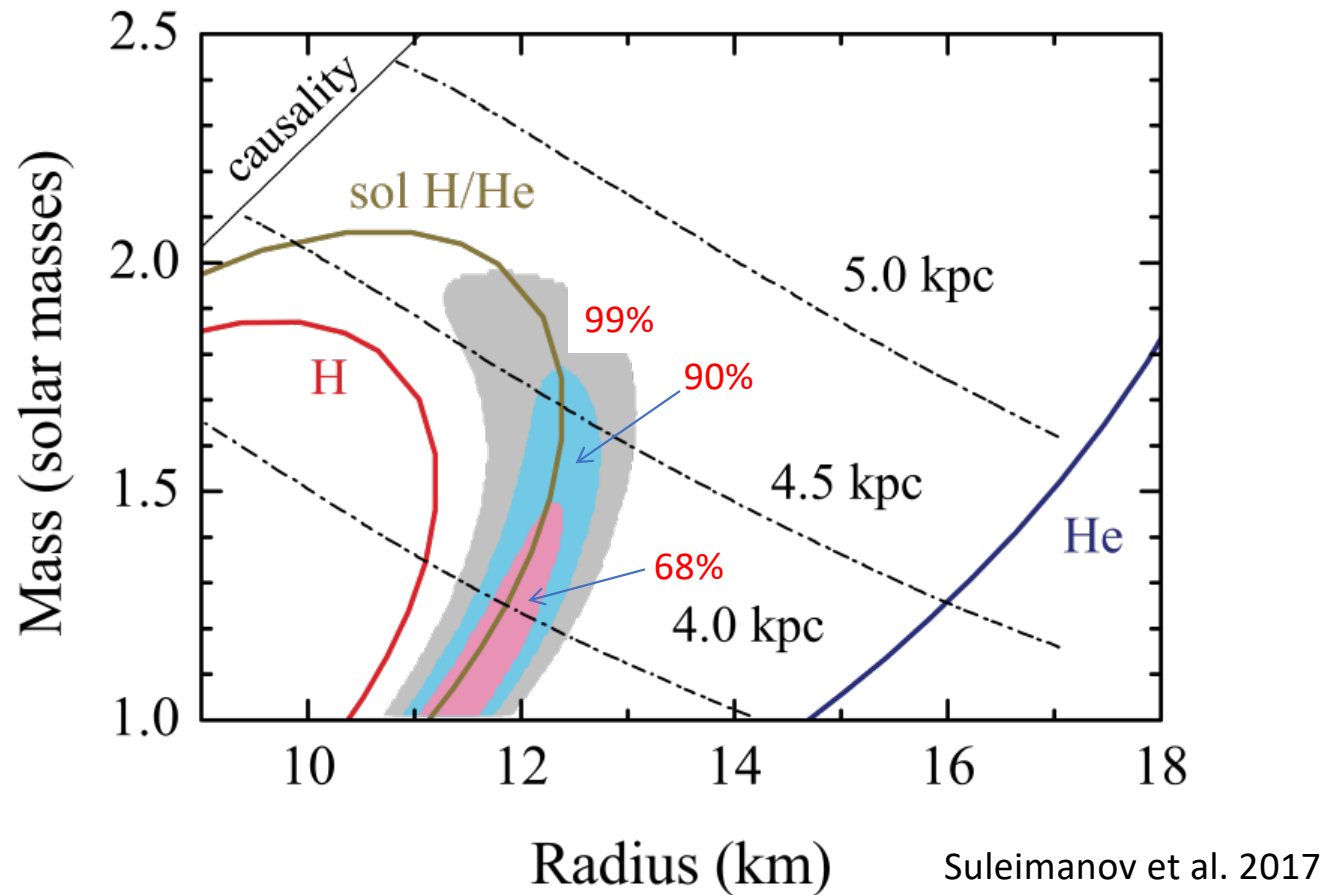
For every pair M and R we can obtain the theoretical curve  $L/L_{Edd} - w$  (interpolation) and find the best fit for the observed curve  $F_{BB} - K$ . The fitting parameters  $F_{Edd,\infty}$  and  $\Omega$

$$F_{BB} = \frac{L}{L_{Edd}} \frac{L_{Edd}(1+z)^{-2}}{4\pi D^2} \quad K_{BB} = w \frac{R^2(1+z)^2}{D^2}$$

depend on the distance to the source  $D$  only.

# Термоядерная вспышка в LMXB SAX J1810.8-2609

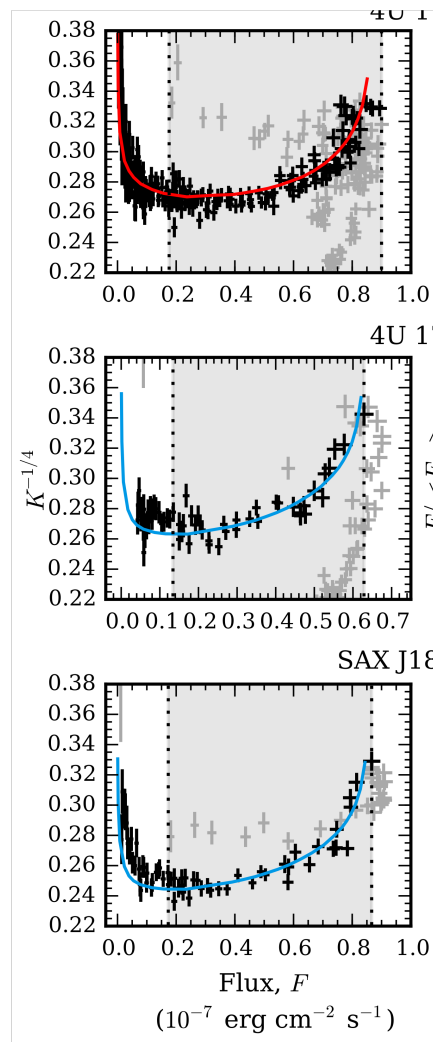
Direct cooling tail method. Результат – карта  $\chi^2$ .





# Результаты для еще двух систем

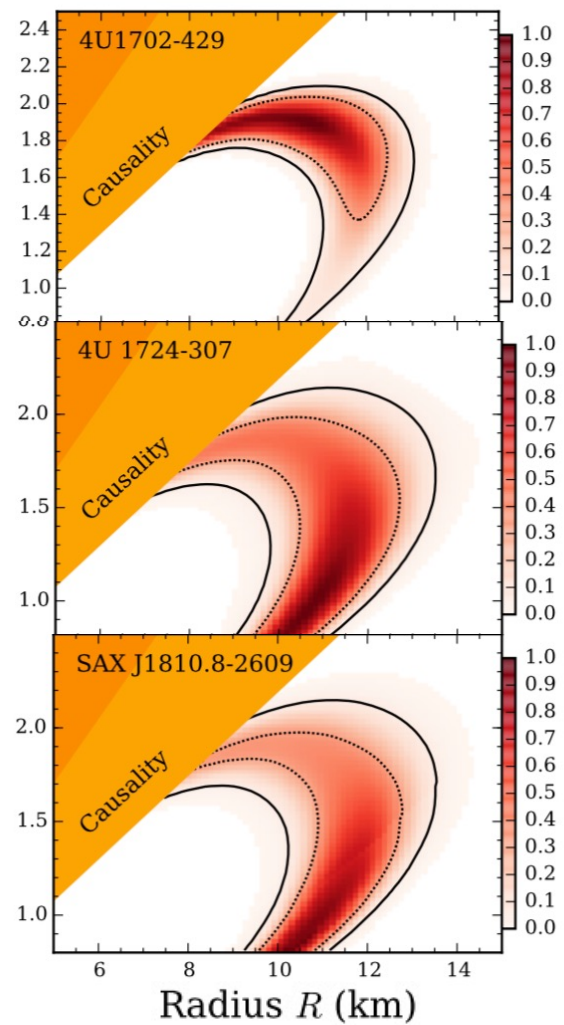
Nättilä et al. 2016



He

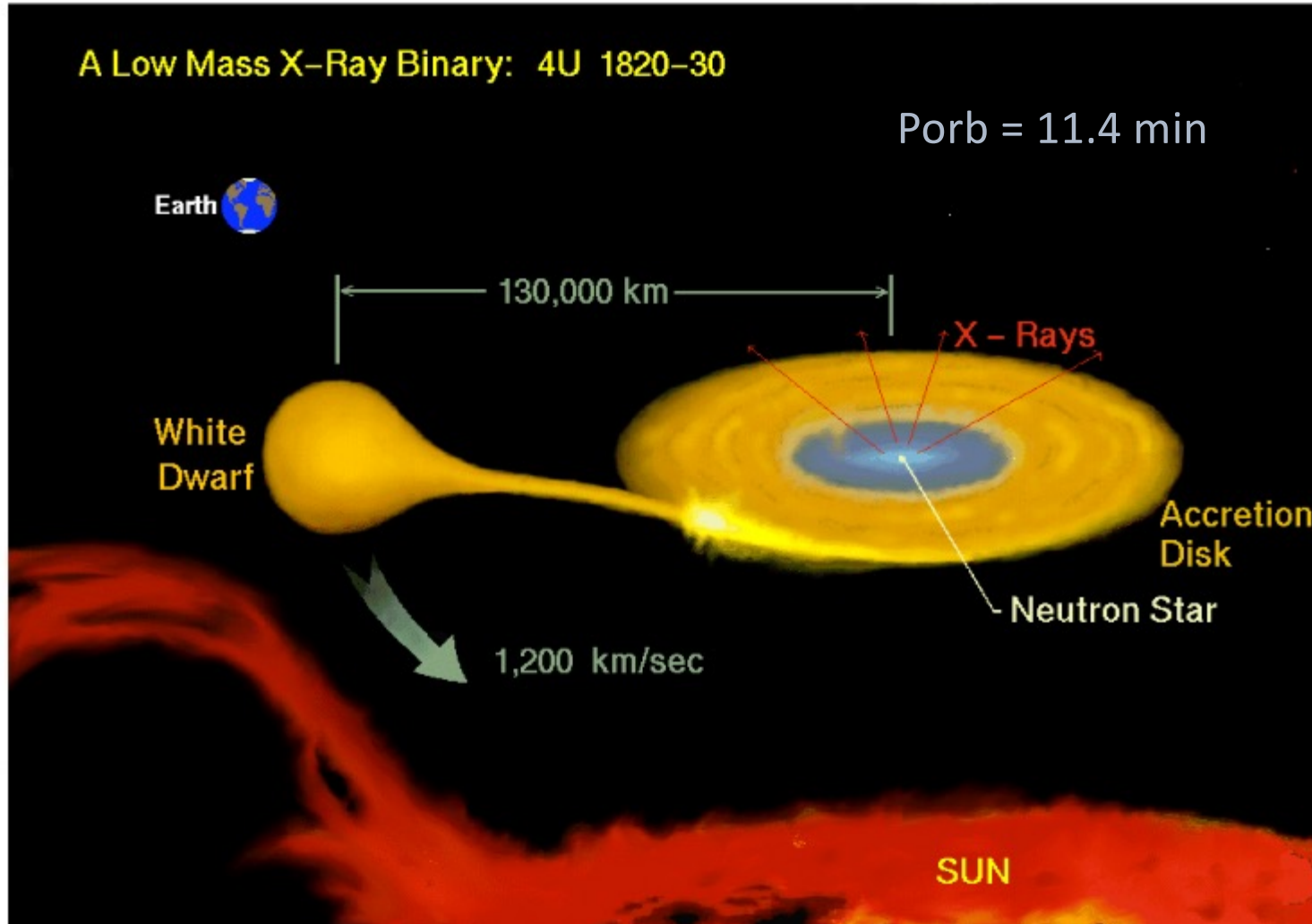
Solar  
H/He

Mass  $M (M_{\odot})$



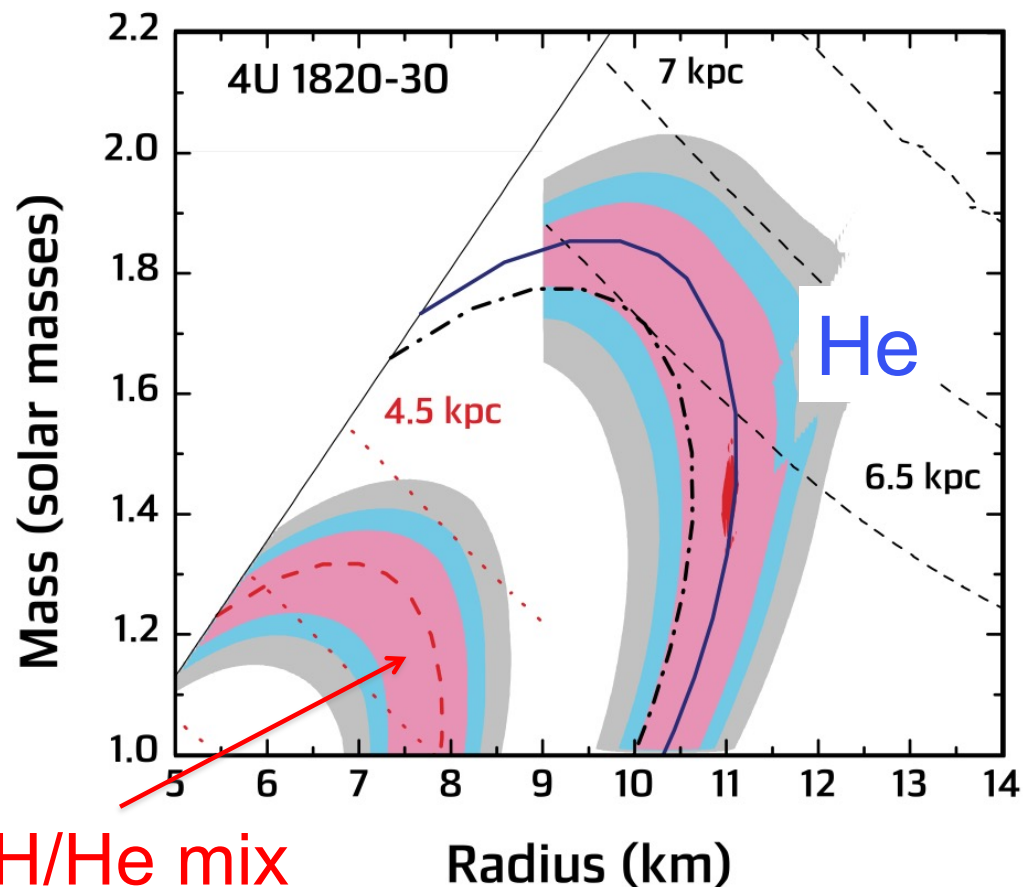
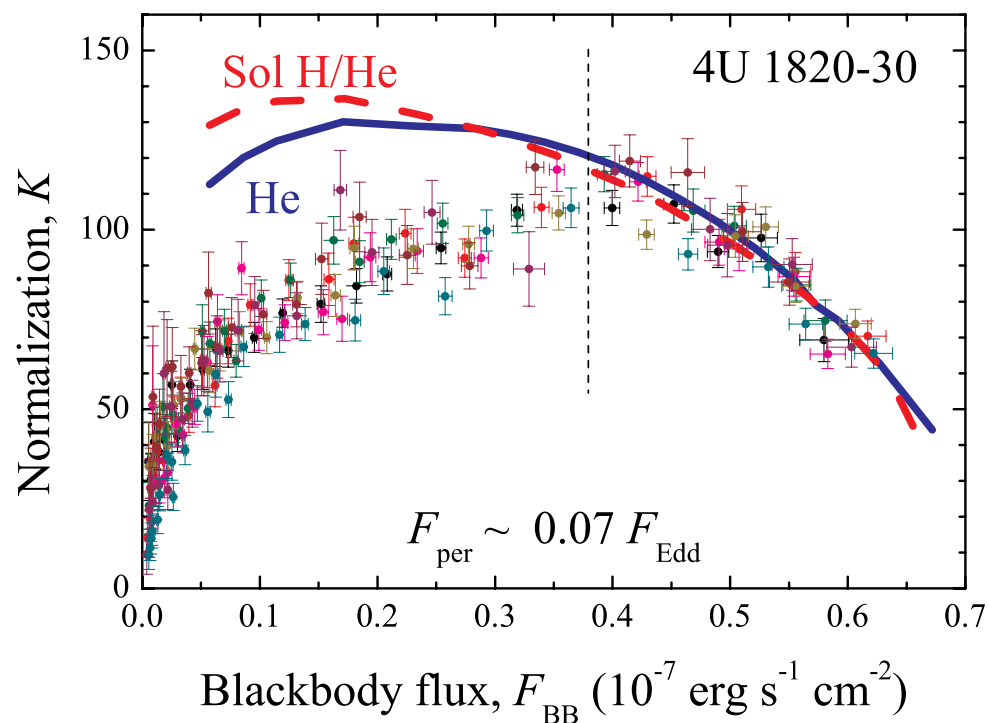
## 4. Химический состав атмосфер барстеров

# Ультракомпактная система 4U 1820-30 Гелиевый белый карлик как донор?

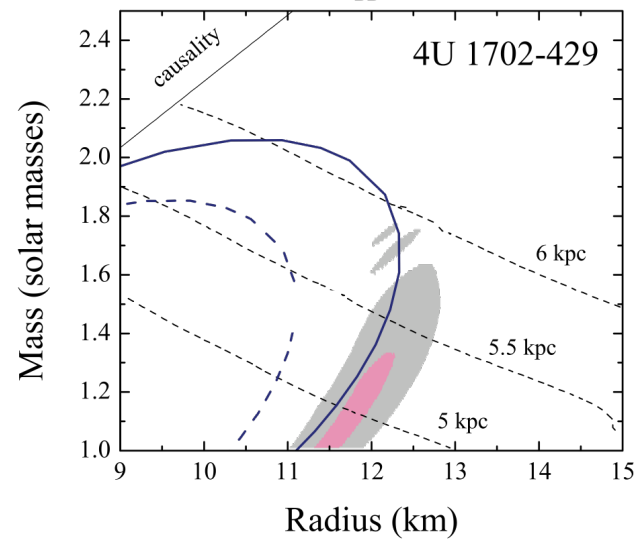
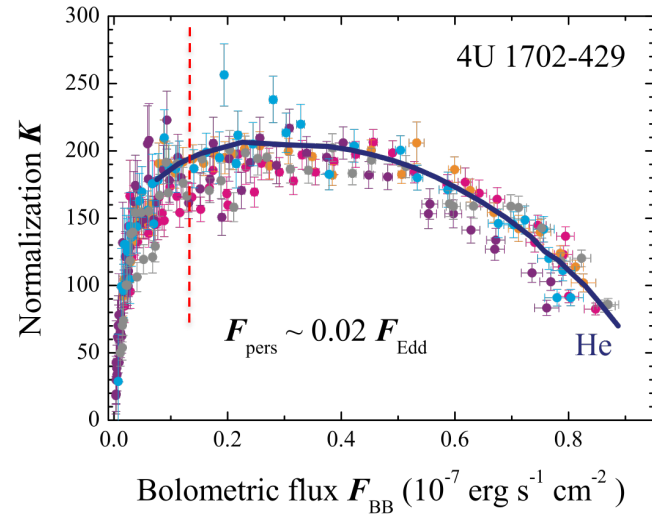
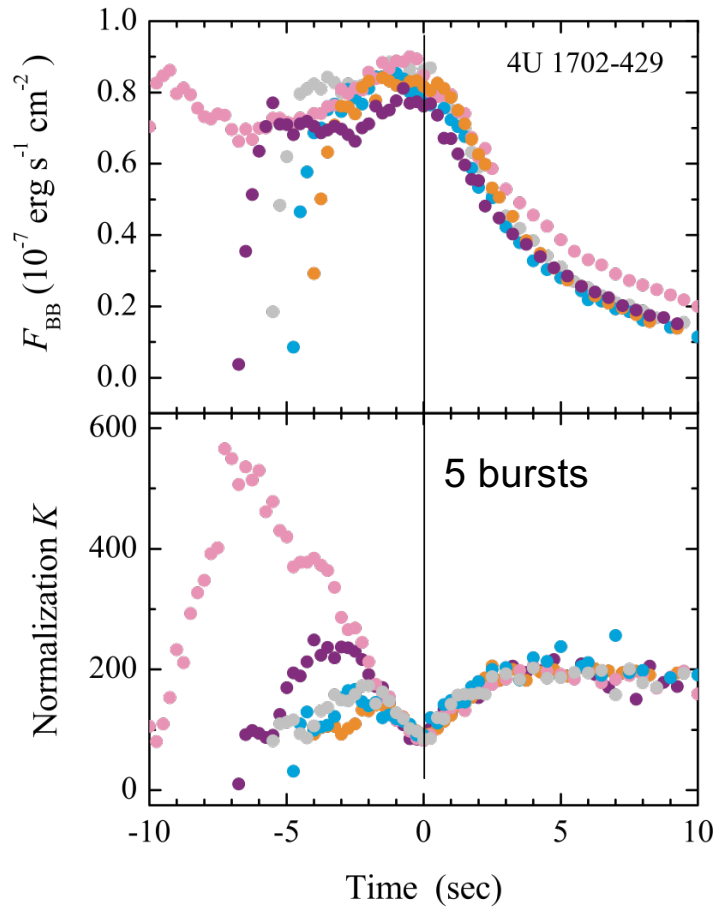


# Результаты для ультракомпактной системы 4U 1820-30

$P_{\text{orb}} = 11.4 \text{ min}$



# Еще одна система с аккрецией гелия? Случай 4U 1702-429

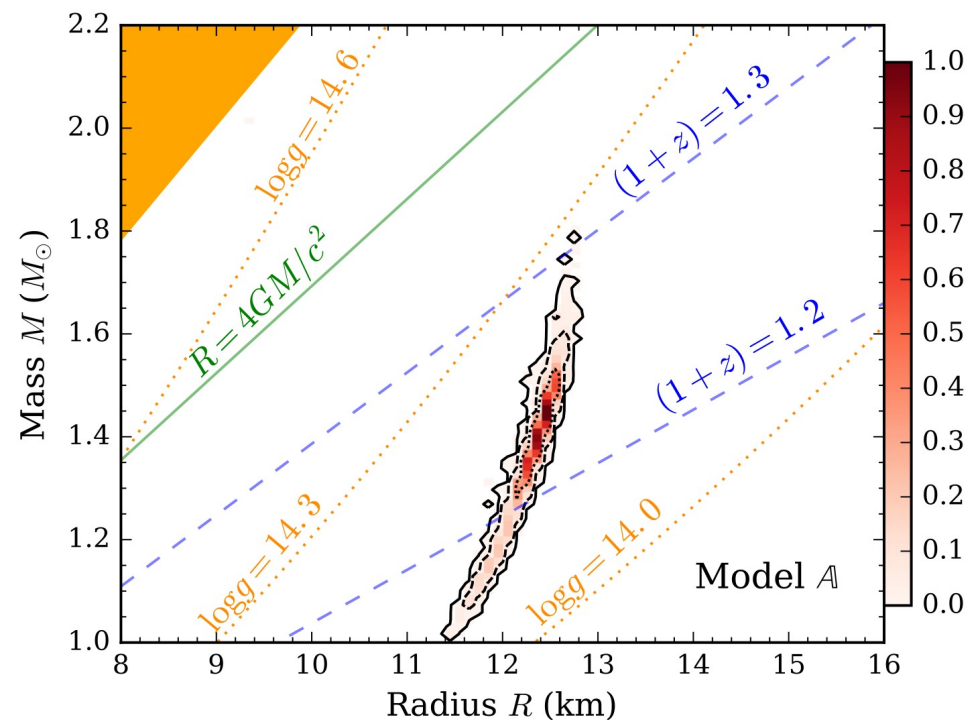
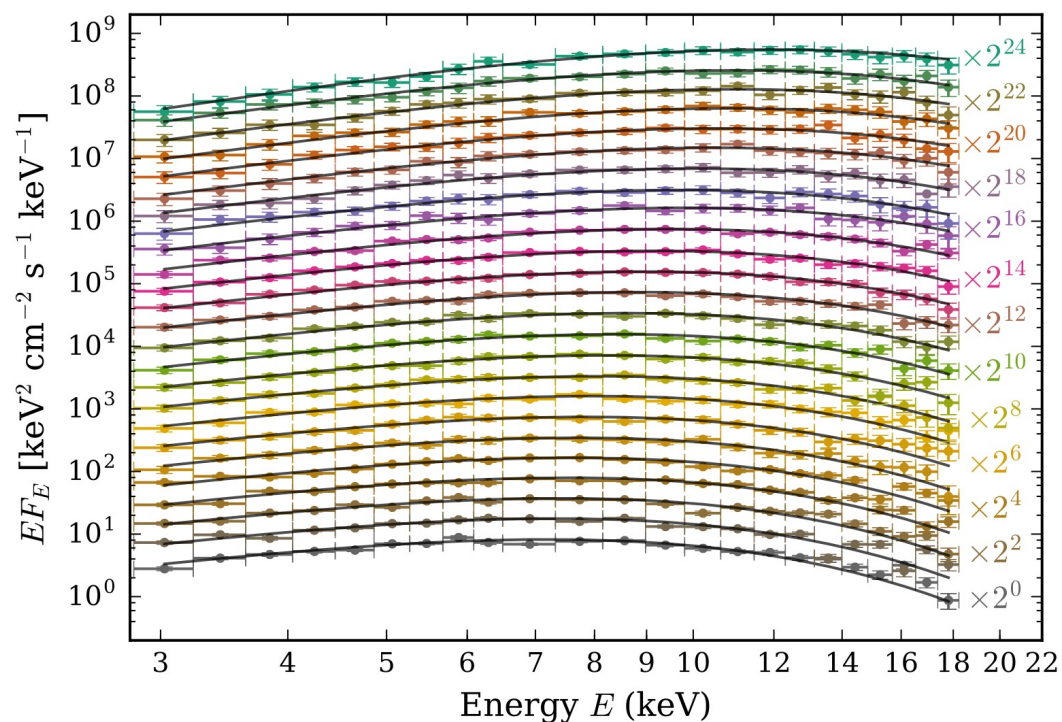


# Еще одна система с аккрецией гелия? Случай 4U 1702-429

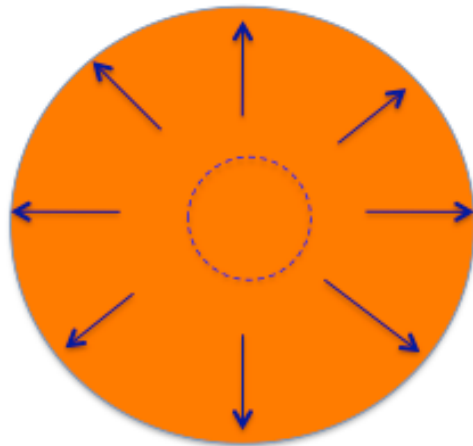
Метод прямого фитирования спектров

Nättilä et al. 2017

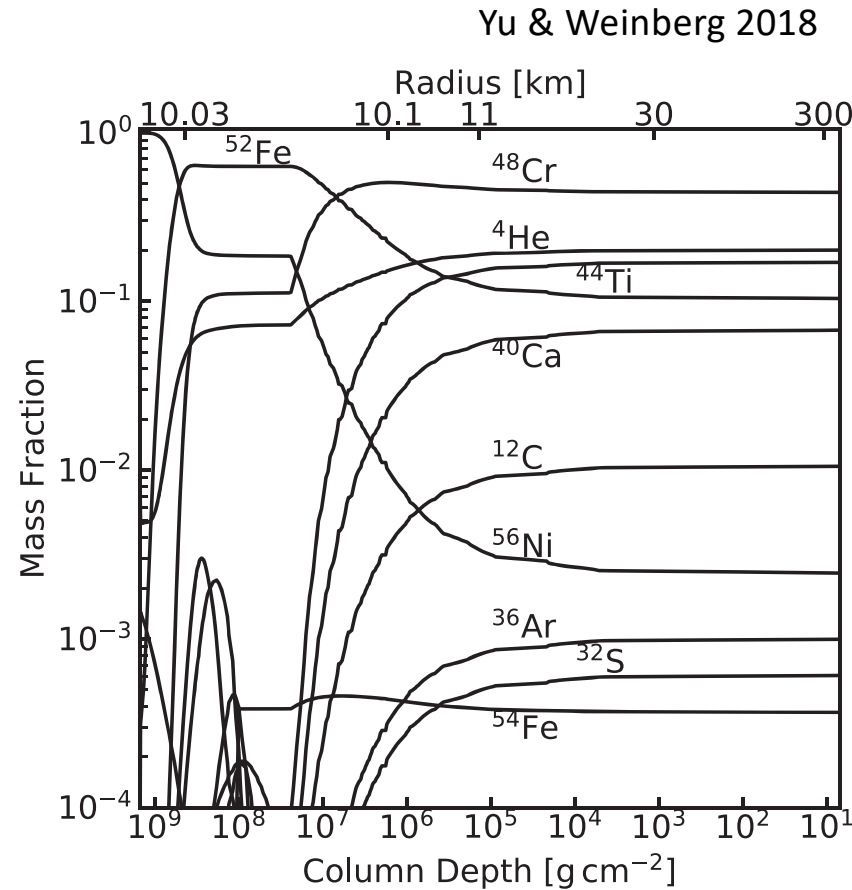
24 observed spectra were simultaneously fitted by model spectra of hot NS



Атмосферы могут быть обогащены тяжелыми элементами  
(продуктами термоядерного горения)  
во время фазы мощного сверх-Эддингтоновского ветра



2. PRE phase



X  
Cr ~ 0.5  
He ~ 0.2  
Ti ~ 0.15  
Fe ~ 0.12

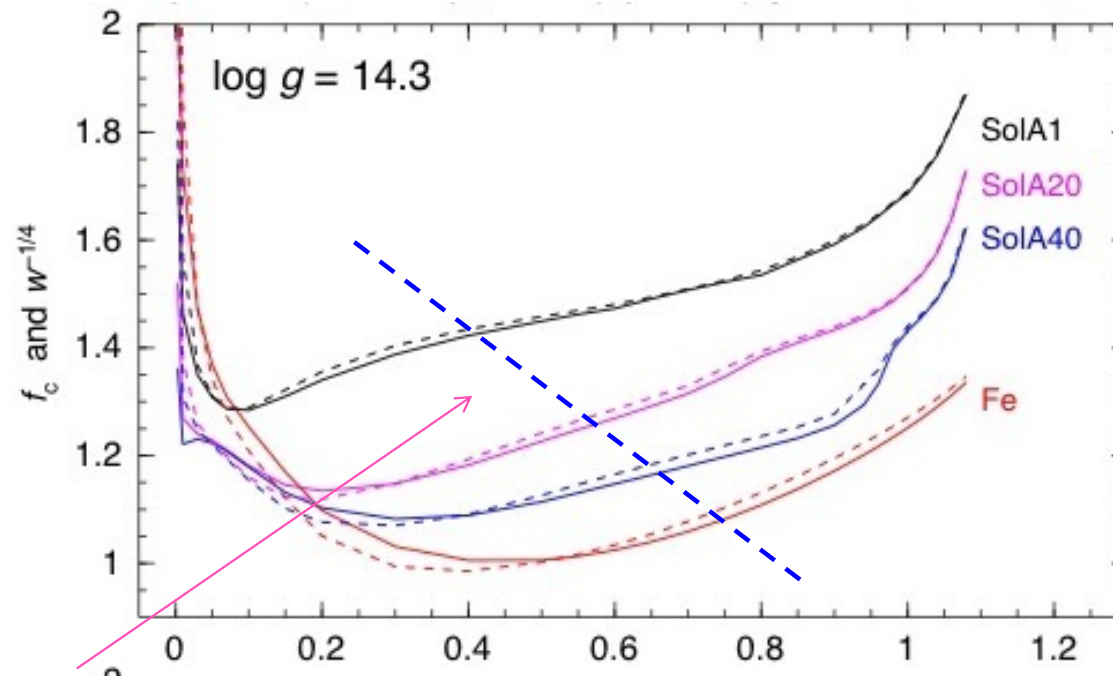
## Finnish heavy metal





# Finnish heavy metal atmospheres. Цветовые поправки

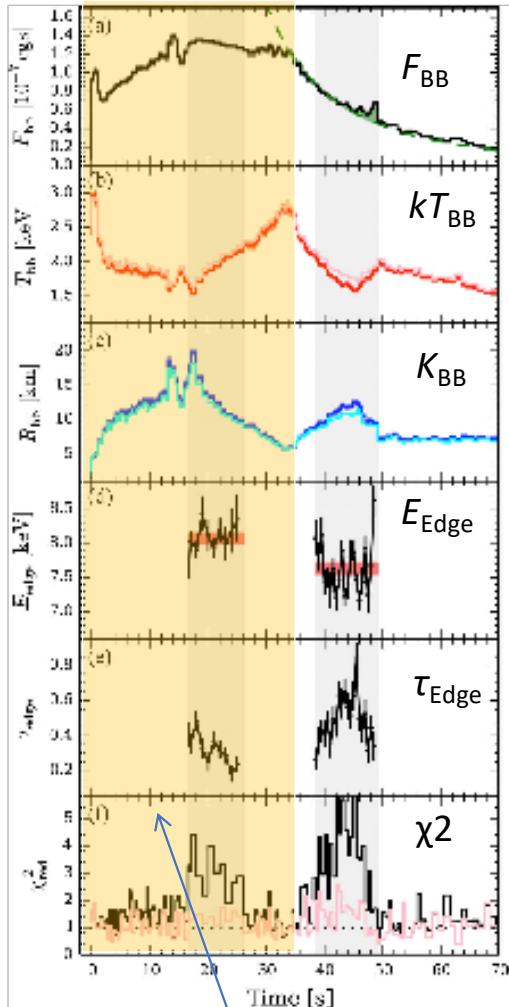
J. Nättilä, SV et al. 2015



Diluted blackbody approximation  
is not good below this line

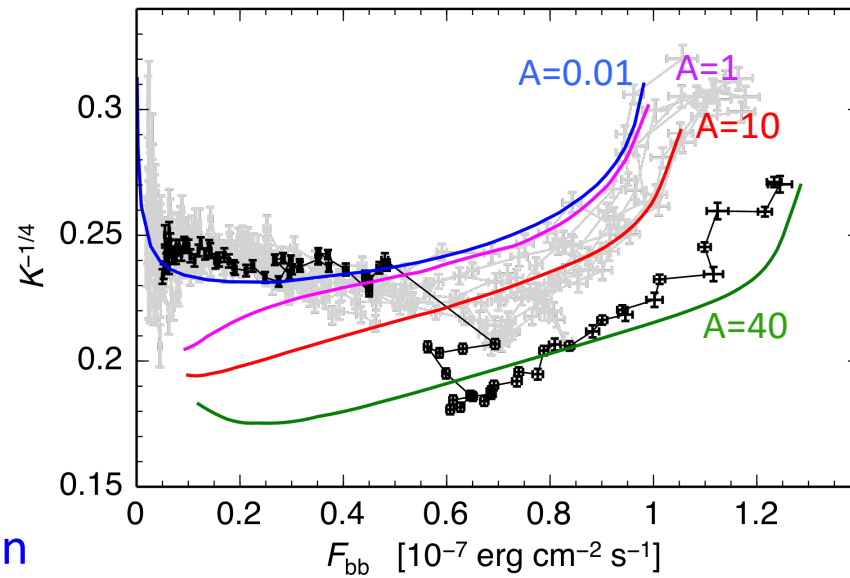
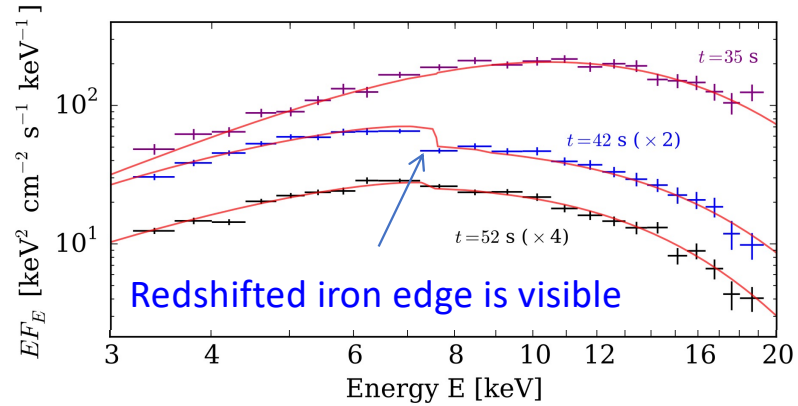
A – enhancement factor of number density of heavy element ions  
A=1 corresponds to solar abundance

# Мощная длинная вспышка в системе HEXE J1900.1-2455



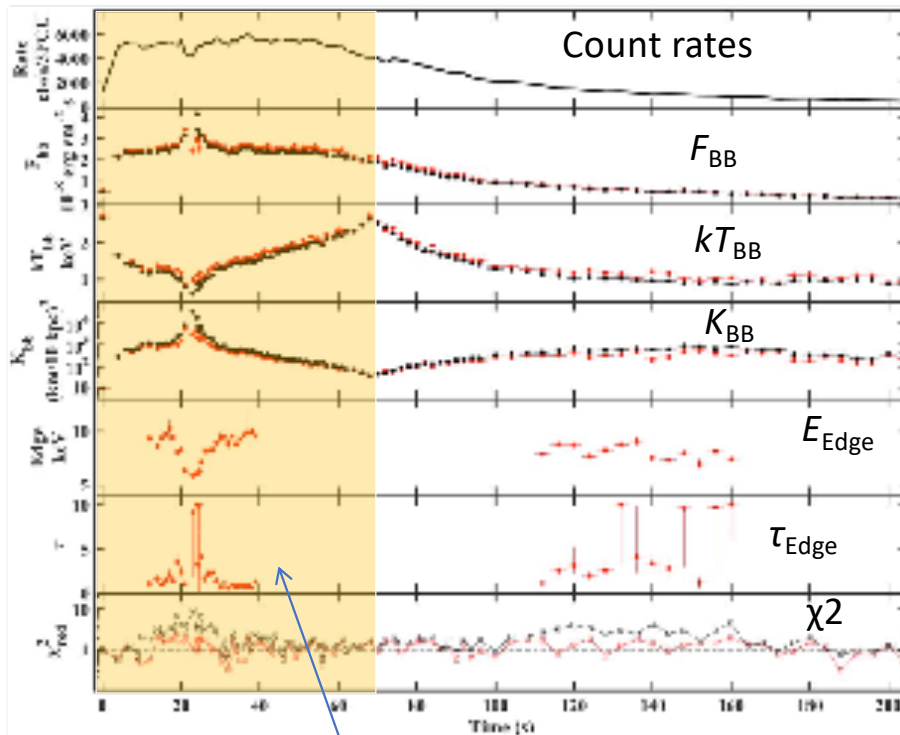
PRE phase, 35 s long duration

Kajava et al. 2017, MNRAS, 464, L6

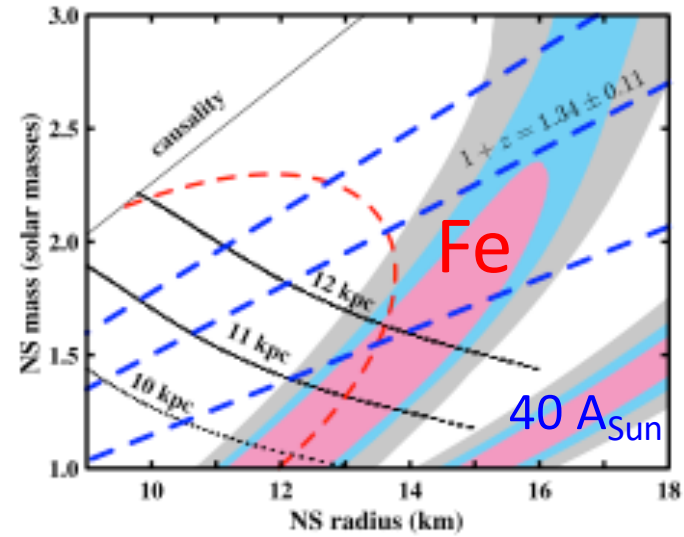
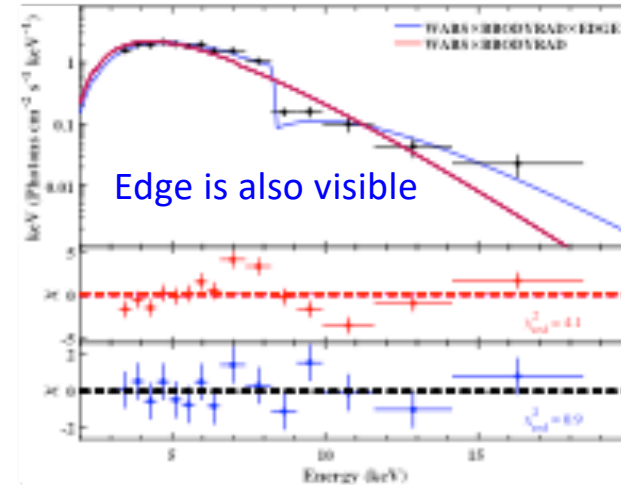


# Мощная вспышка в GRS 1747-312 с длинной PRE фазой

Li Zhaosheng, SV et al. 2018



PRE phase, 70 s long duration

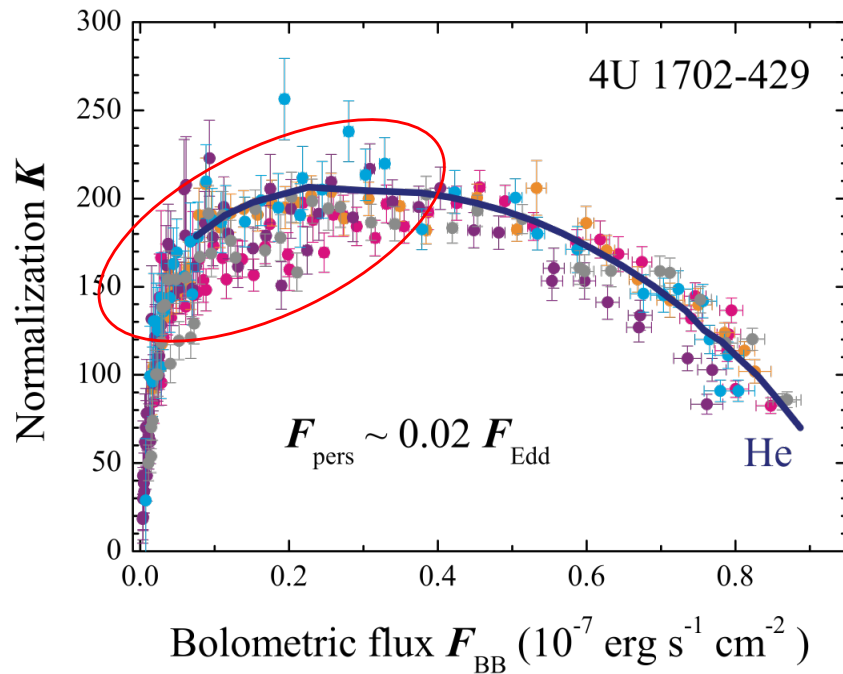


# 5. Взаимодействие с аккреционным потоком

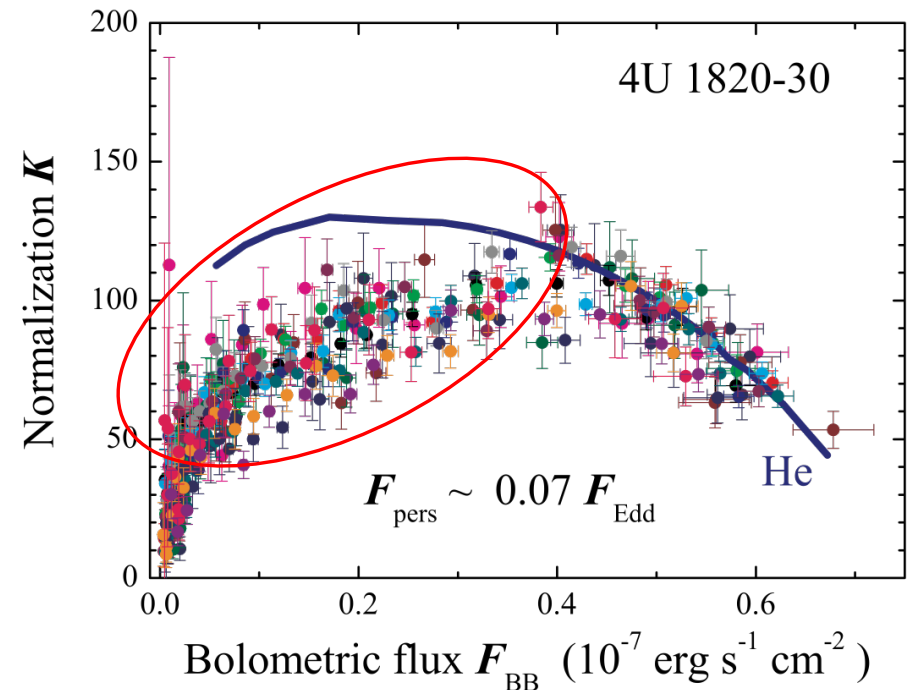
# Сравнение с наблюдениями на поздних стадиях вспышек

Величина отклонений от модели зависит

от относительной величины потока до вспышки



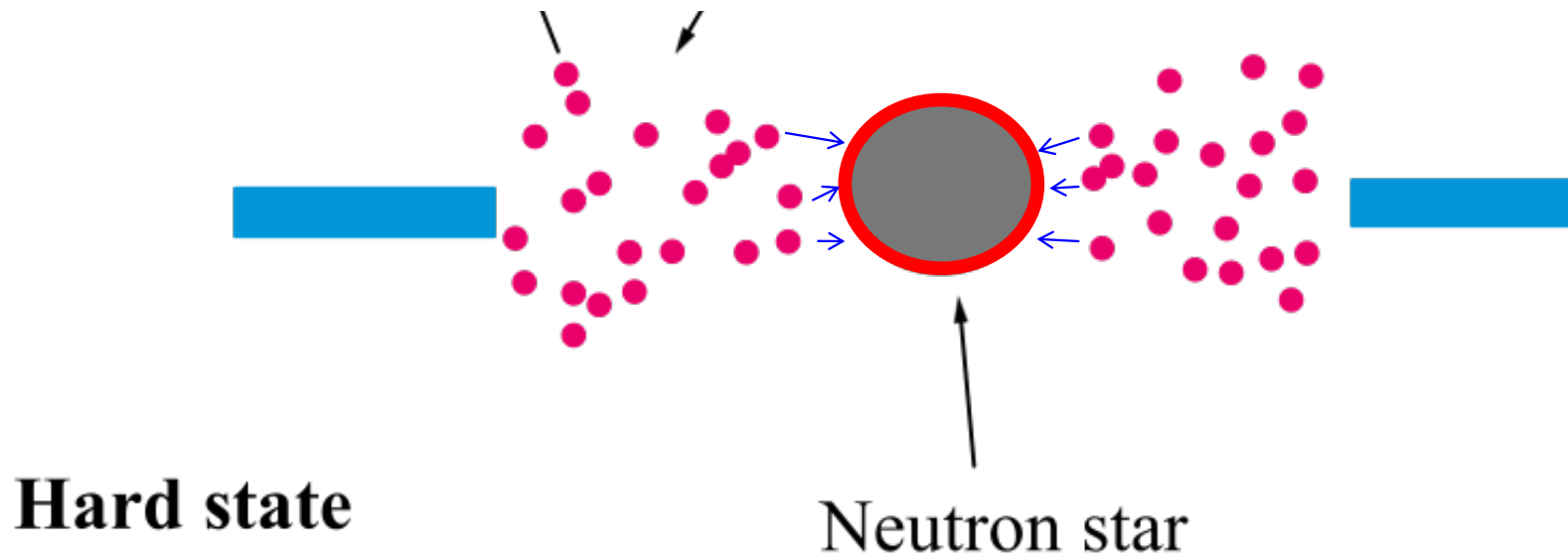
Низкий относительный поток



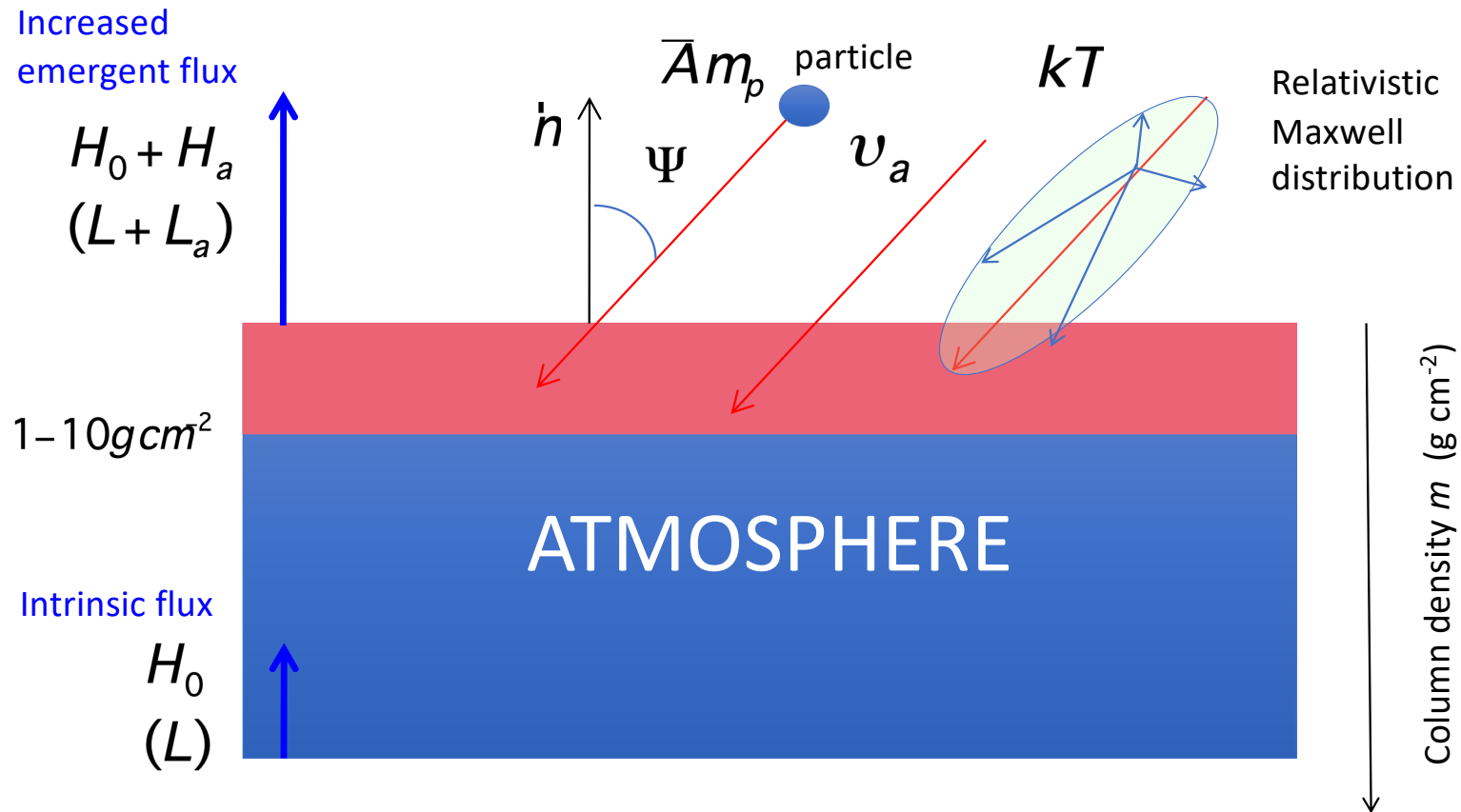
Высокий относительный поток

# Возможное решение: Аккреция горячего потока плазмы на поздних стадиях вспышки

Fast ions with  $kT_{\text{ion}} \sim kT_{\text{vir}}$  and  $V_a \sim V_{\text{ff}}$  bombard neutron star atmosphere and heat it



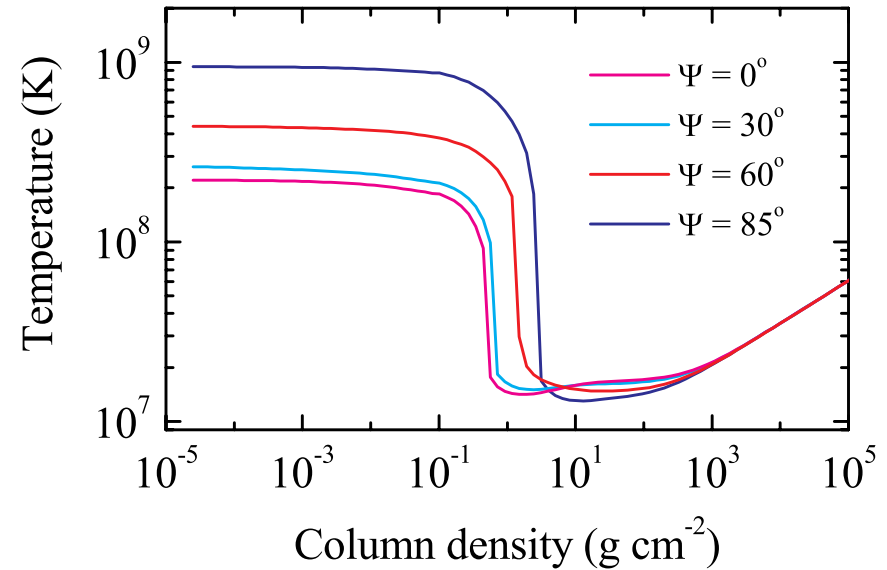
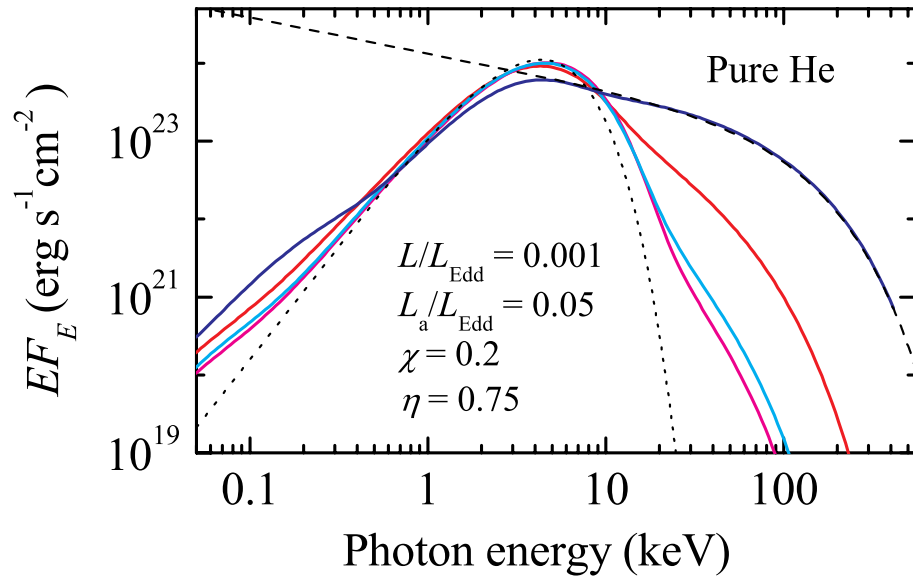
# Атмосферы нагреваемые аккрецией



$\dot{m}_a(H_a, \bar{A}m_p, v_a, kT, \psi)$  - local mass accretion rate,  $\text{g s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$

Атмосферы низкой светимости нагретые аккреционными потоками с различными значениями угла падения потока  $\Psi$

$$L = 0.001 L_{Edd} \quad L_a = 0.05 L_{Edd} \quad \chi = \frac{kT_{ion}}{kT_{vir}} = 0.2 \quad \eta = \frac{V_a}{V_{ff}} = 0.75$$



Blackbody and exponential cutoff power law model  $E^{-\Gamma} \exp(-E/E_{cut})$  are also shown

$$\Gamma = 2.45 \quad E_{cut} = 85 \text{ keV}$$

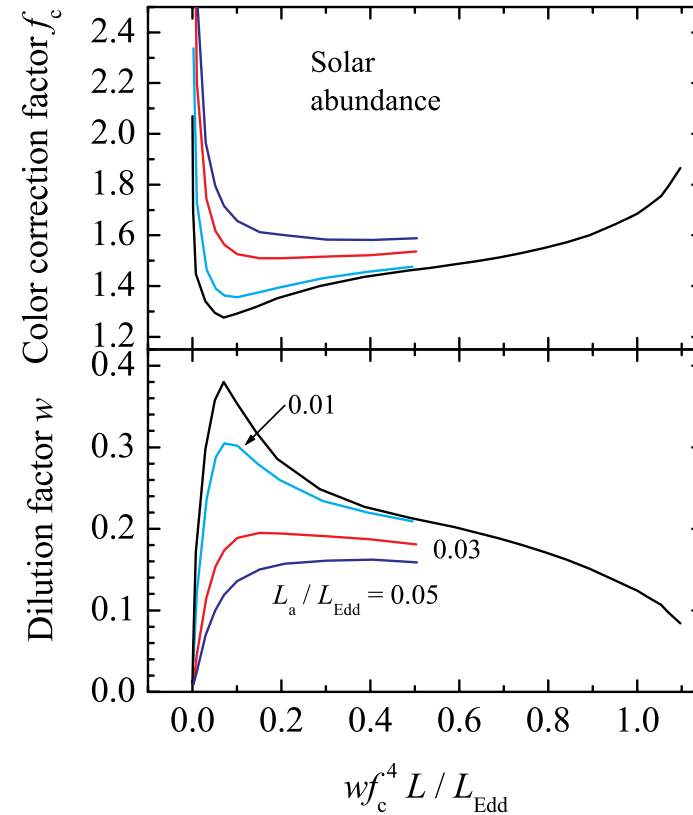
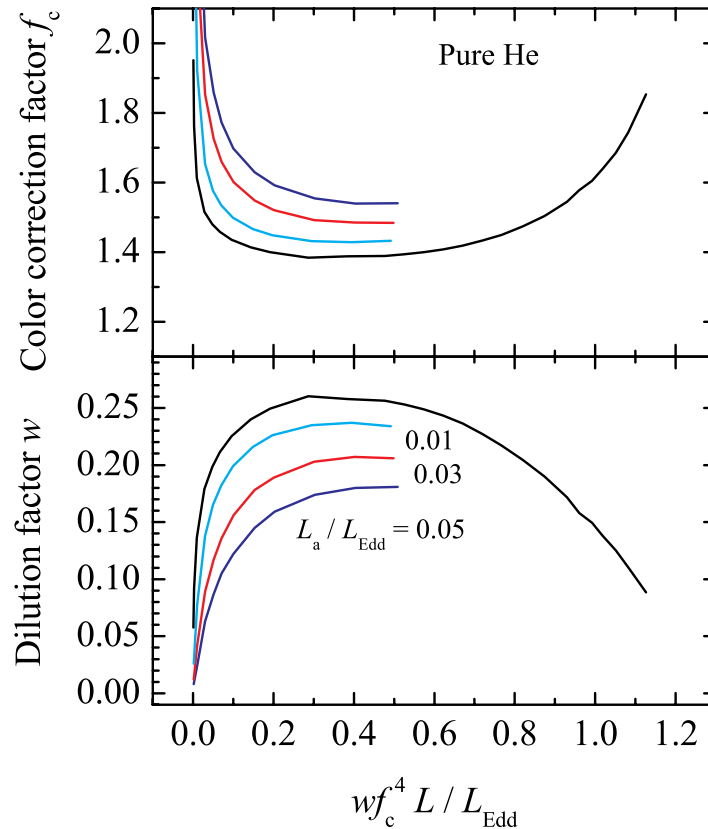
$$\text{and} \quad T_{BB} = 1.1 \text{ keV}$$

Suleimanov, Poutanen, & Werner 2018



## Модельные кривые для атмосфер, нагретых аккрецией

Цветовые поправки  $f_c$  больше, а факторы дилуции  $w$  меньше, чем для невозмущенных атмосфер. Величина отклонений пропорциональна темпу аккреции.



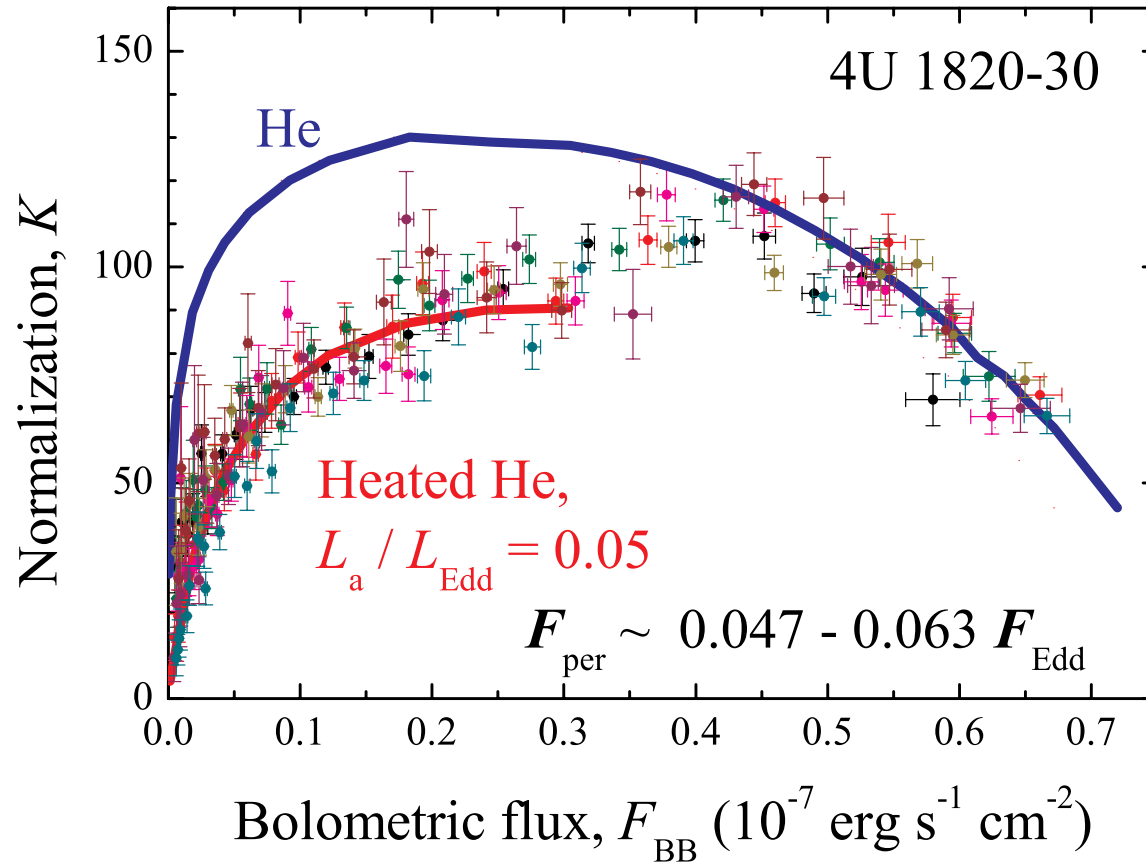
$$\eta = 0.75, \quad \chi = 0.25, \quad \Psi = 60^\circ$$

Suleimanov, Poutanen, & Werner 2018

# Термоядерные вспышки в системе 4U 1820 - 30

Обе кривые имеют одинаковые значения аппроксимационных параметров.

$$F_{Edd,\infty} = \frac{L_{Edd}(1+z)^{-2}}{4\pi D^2} \approx 6 \times 10^{-6} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \quad \Omega = \frac{R^2(1+z)^2}{D^2} \approx 500 \frac{\text{km}^2}{(10 \text{ kpc})^2}$$

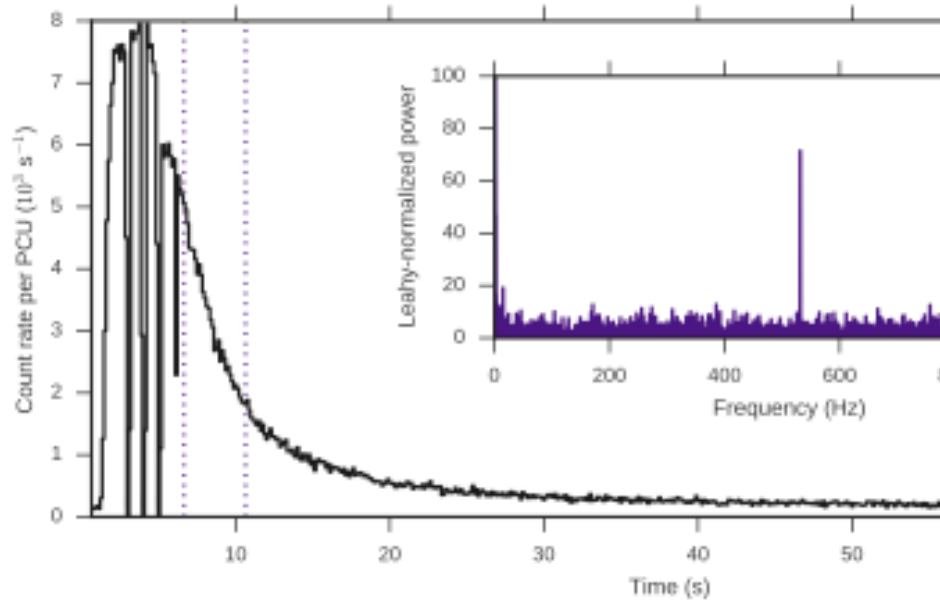


Suleimanov, Poutanen,  
& Werner 2018

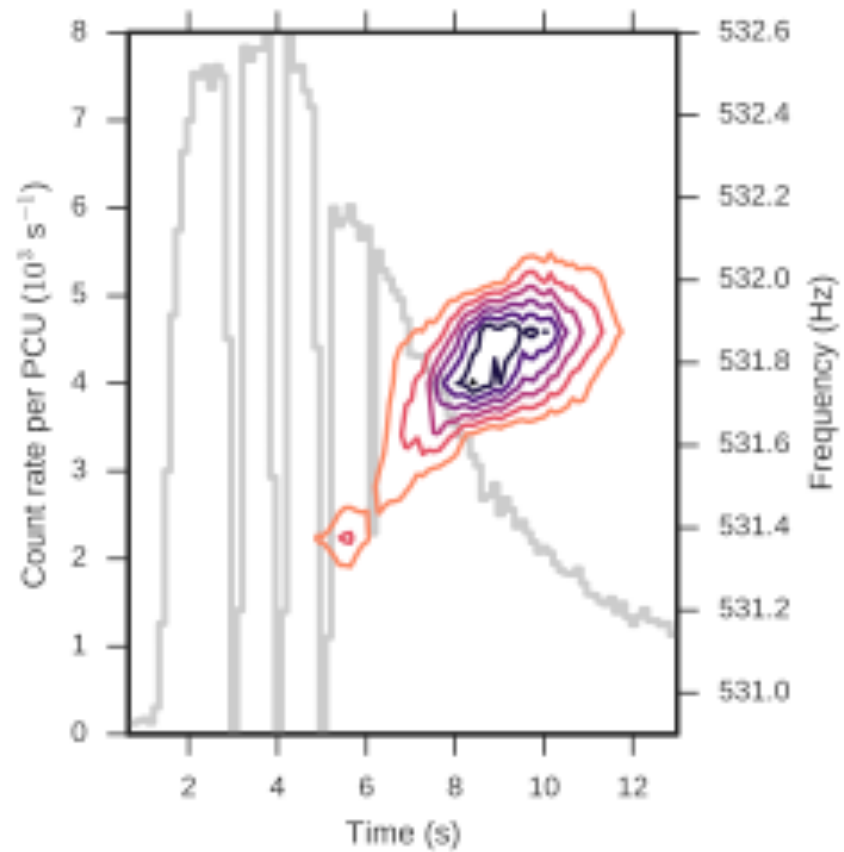
# 6. Влияние быстрого вращения нейтронных звезд

# Нейтронные звезды в LMXBs вращаются быстро (200-600 Гц)

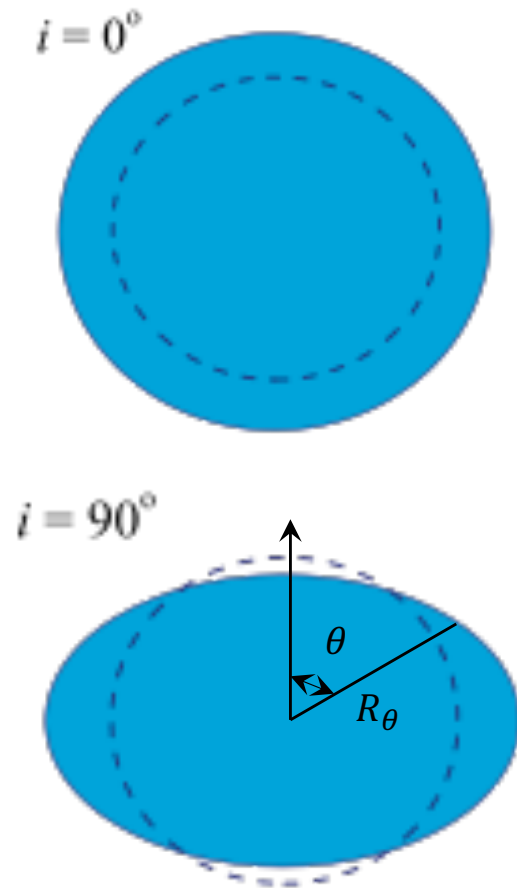
SAX J1810.8-2609



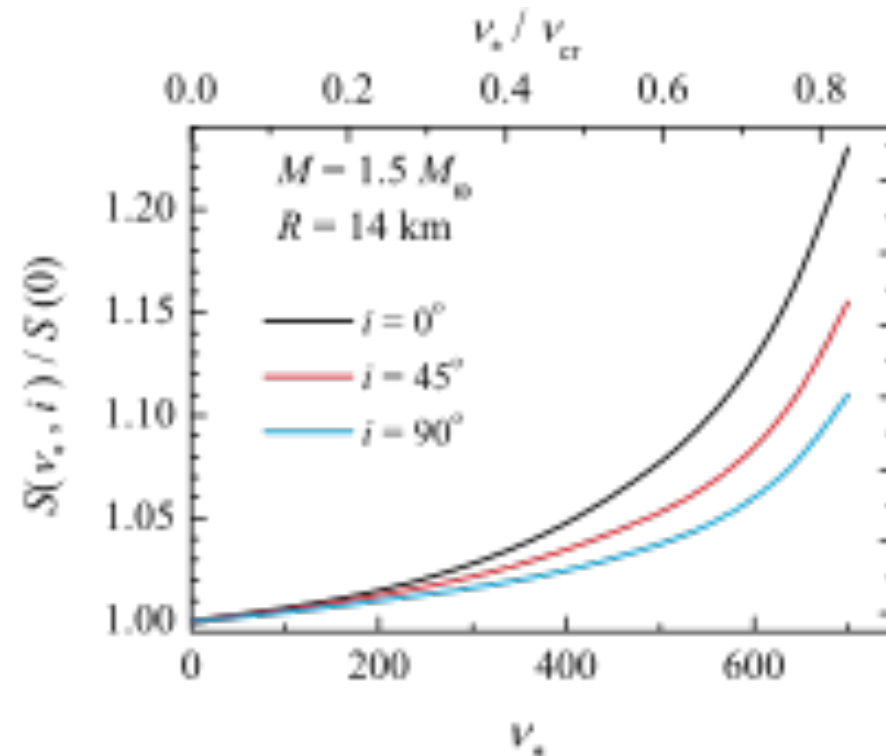
From Bilous et al. 2018



**Особенности:** увеличивается видимая площадь  
и эффективная сила тяжести уменьшается от полюса к экватору

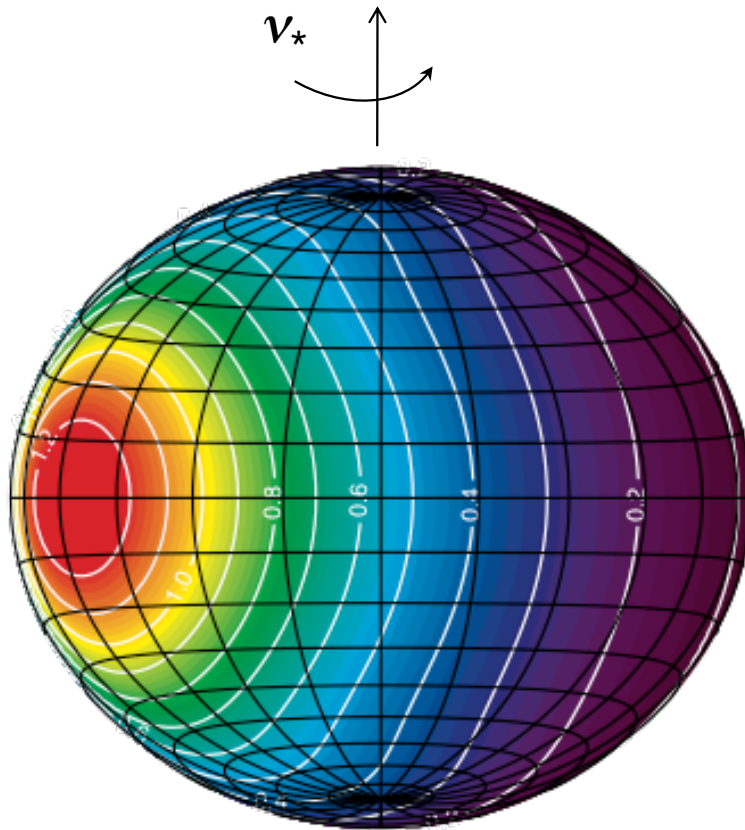


$i$  – угол наклона оси вращения к лучу зрения

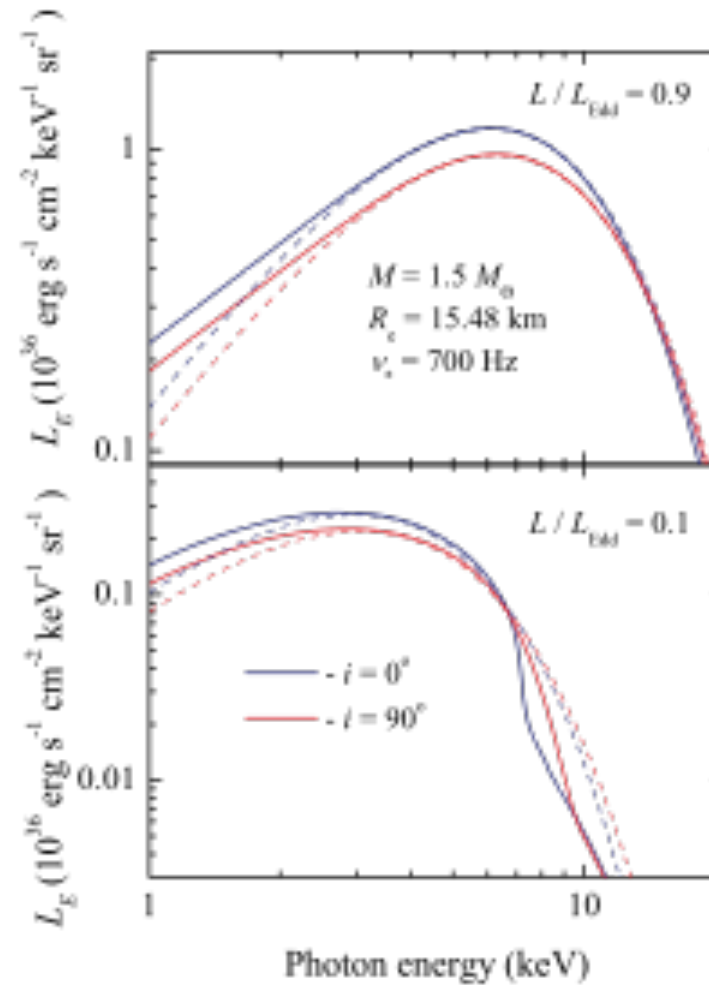


$$g_{eff} \approx g(R_\theta) - \Omega_*^2 R^2$$

# Особенности: Релятивистский эффект Доплера



Локальный спектр взят как черное тело  
с угловым распределением как для электронной  
рассеивающей атмосферы



## Основная идея:

Расширить применимость direct cooling tail method на случай быстро вращающихся нейтронных звезд

Два дополнительных параметра, частота вращения  $\nu_*$  ( $\Omega_* = 2\pi\nu_*$ ) и  $i$

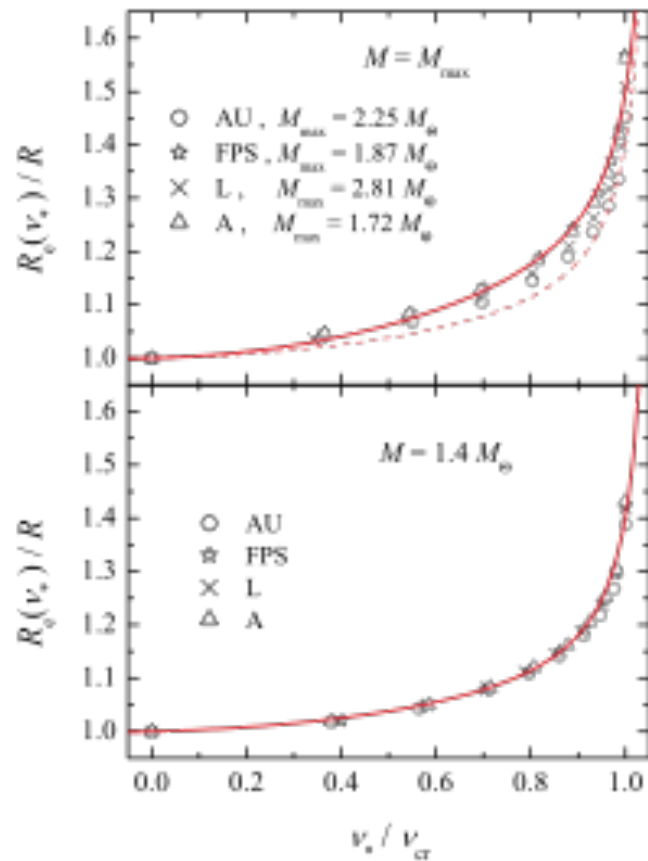
### последовательность действий:

- 1) Для данных  $M$  и  $R$  невращающейся НЗ найти экваториальный радиус  $R_e$  и увеличенную массу  $M'$  быстро вращающейся НЗ.
- 2) Рассчитать все свойства быстро вращающейся НЗ на ее поверхности.
- 3) Рассчитать спектры такой звезды при различных значениях  $L/L_{\text{edd}}$  и аппроксимировать их спектрами дилютированного черного тела. Рассчитать модельную кривую  $w - L/L_{\text{edd}}$  и сравнить с наблюдаемой кривой  $F_{\text{ВВ}} - K$  используя расстояние как свободный параметр.
- 4) Повторить для всех  $M$  и  $R$ .
- 5) Результат – карта  $\chi^2$  на плоскости  $M - R$  для данных  $\nu_*$  и  $i$

Здесь  $L_{\text{Edd}}$  рассчитывается для невращающейся НЗ с данными  $M$  и  $R$

## Приближенное соотношение между

$$R_e/R - v_*/v_{cr} \text{ и } M'/M - v_*/v_{cr}$$



$$R_e = R \left[ 0.977 + \frac{0.025}{1.07 - \bar{v}} + 0.07 \left( \frac{M}{1.4 M_{sun}} \right)^{3/2} \bar{v}^2 \right]$$

$$\bar{v} = \frac{v_*}{v_{cr}}$$

$$v_{cr} = 1080 \frac{M}{M_{sun}} \left( \frac{R}{10 km} \right)^{-3/2} \text{ Hz}$$

(Haensel et al. 2009)

Based on the accurate computations performed by Cook et al. 1994



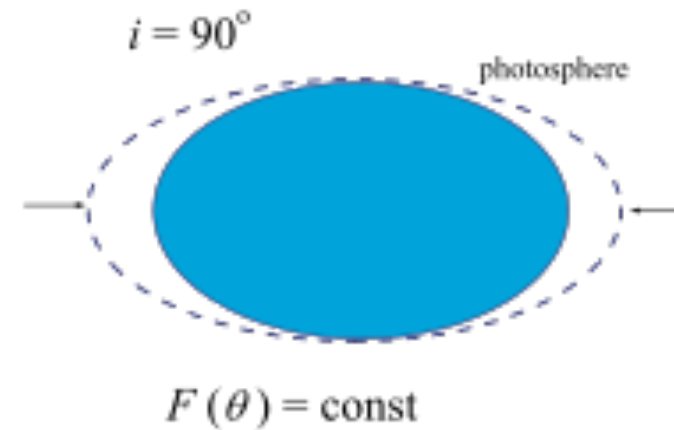
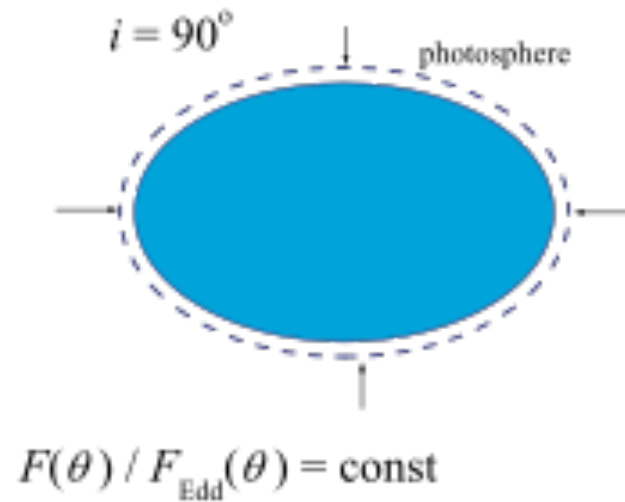
## Поверхность вращающейся звезды +

Приближенные выражения для формы звезды  $R(\vartheta)$ , метрического тензора  $g_{ij}$  и эффективного ускорения силы тяжести  $g(\vartheta)$  на поверхности были взяты из Al Gendy & Morsink (2014)

Гравитационное красное смещение вычисляется точно из  $g_{ij}$ , Доплеровское смещение и frame dragging считаются приближенно (точно для экватора и полюса).

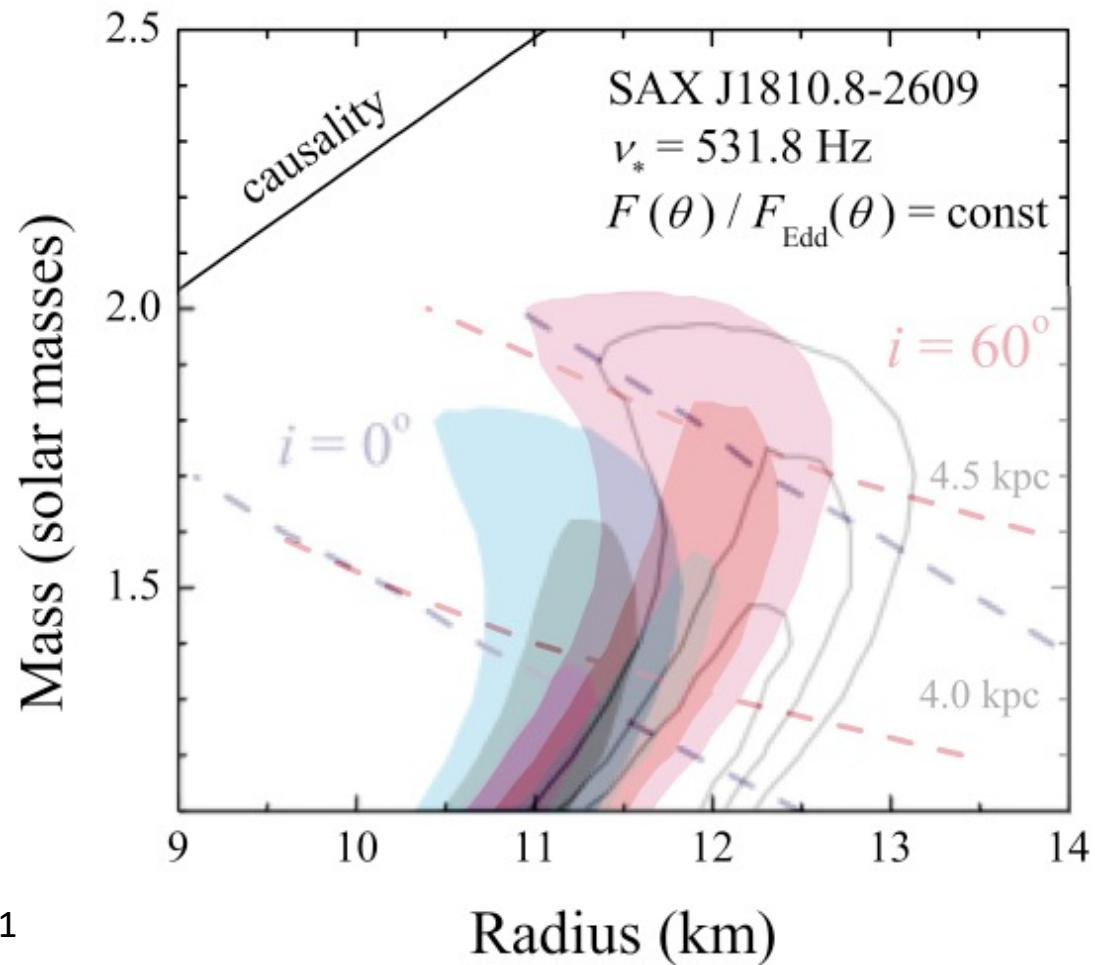
Искривление лучей света считается в геометрии Шварцшильда по аналитической формуле Белобородова, улучшенной Юрием Поутаненом

Два возможных предположения о распределении потока по поверхности быстро вращающейся нейтронной звезды во время вспышки



## Термоядерная вспышка в LMXB SAX J1810.8-2609

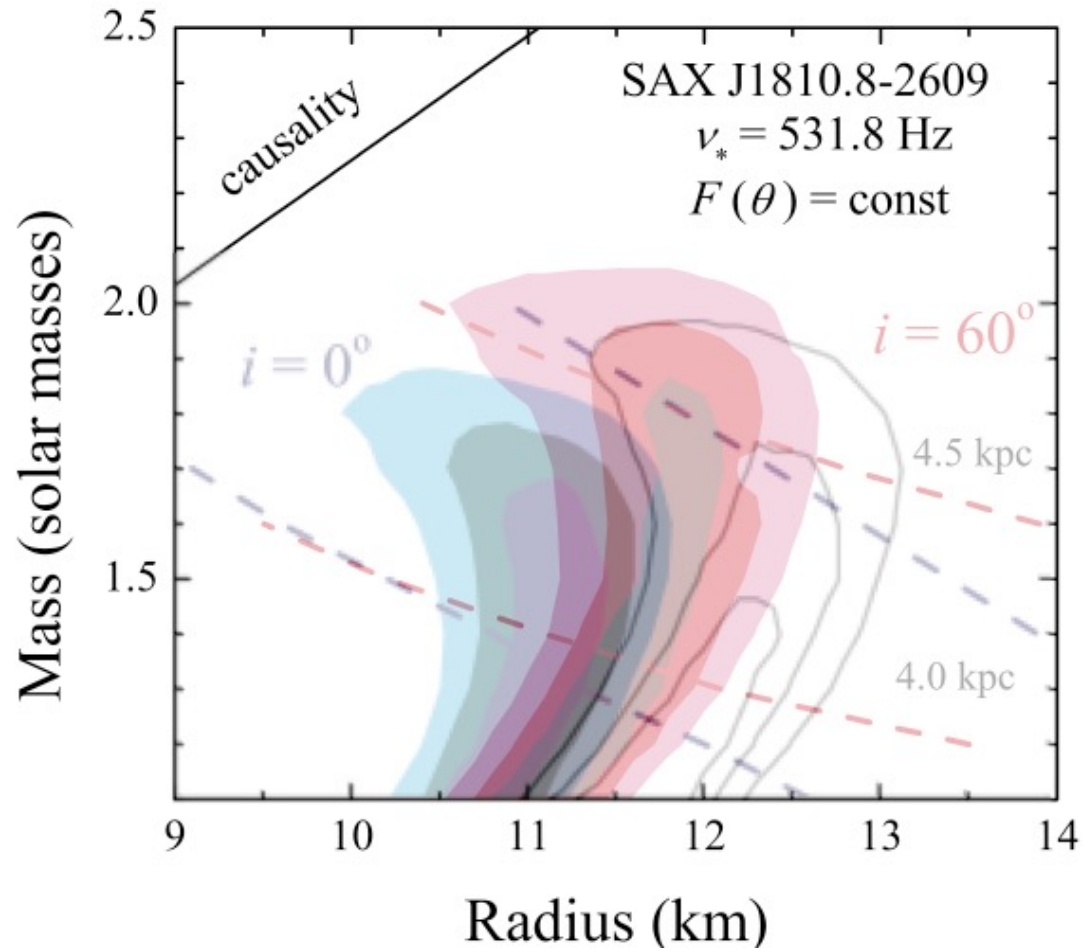
$\chi^2$  карта после использования direct tail cooling method модифицированного для вращающихся нейтронных звезд



Solar mix with  $A=0.01$

## Термоядерная вспышка в LMXB SAX J1810.8-2609

$\chi^2$  карта после использования direct tail cooling method модифицированного для вращающихся нейтронных звезд



Solar mix with  $A=0.01$

## Выводы

Изучение спектральной эволюции термоядерных вспышек на поверхности нейтронных звезд является мощным инструментом исследования как собственно термоядерных вспышек, так и непосредственно нейтронных звезд.

Радиусы нейтронных звезд заключены в пределах 11-13 км.

Возможно исследование химического состава атмосфер барстеров.

Аккреционный нагрев атмосфер важен на поздних стадиях вспышек.

Учет быстрого вращения нейтронной звезды уменьшает оценку радиуса невращающейся НЗ на 1 -1.5 км.