

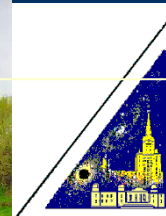


Рентгеновские наблюдения ядра в галактике M87. Пузыри Ферми

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

БАЗИС



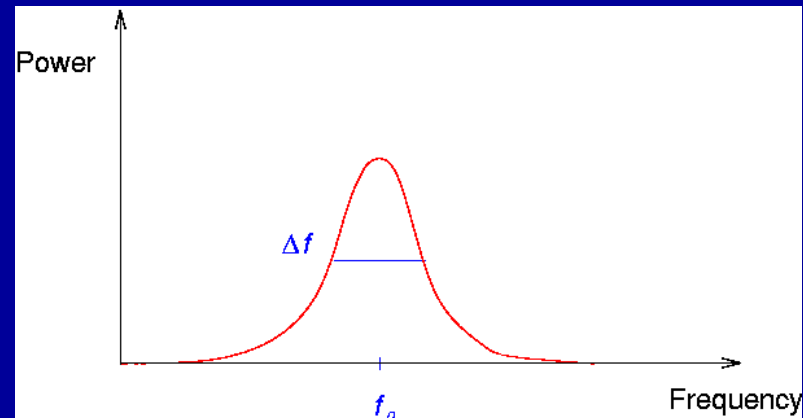
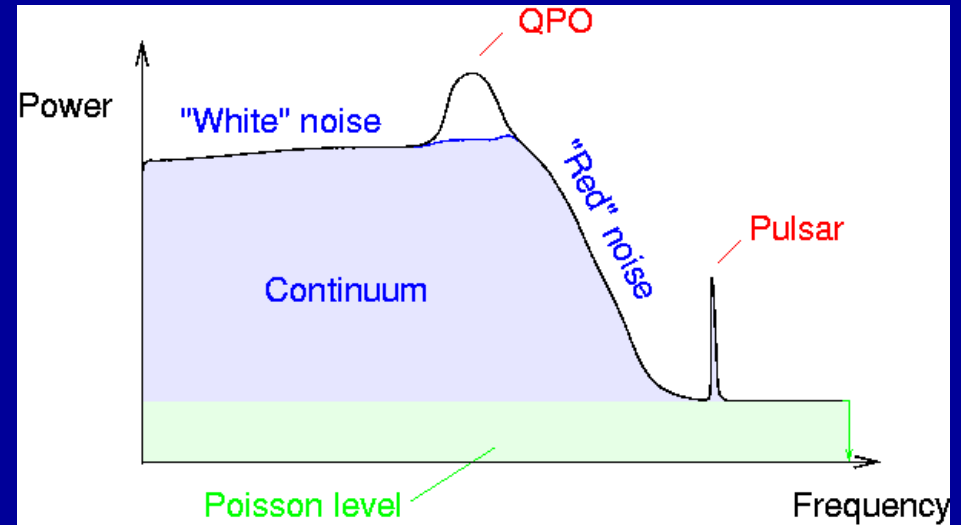


What is a QPO?

A *quasiperiodic oscillation* is a “sloppy” oscillation—can be due to:

- intrinsic frequency variations
- finite lifetime
- amplitude modulation

$$Q\text{-value} = f_o / \Delta f$$



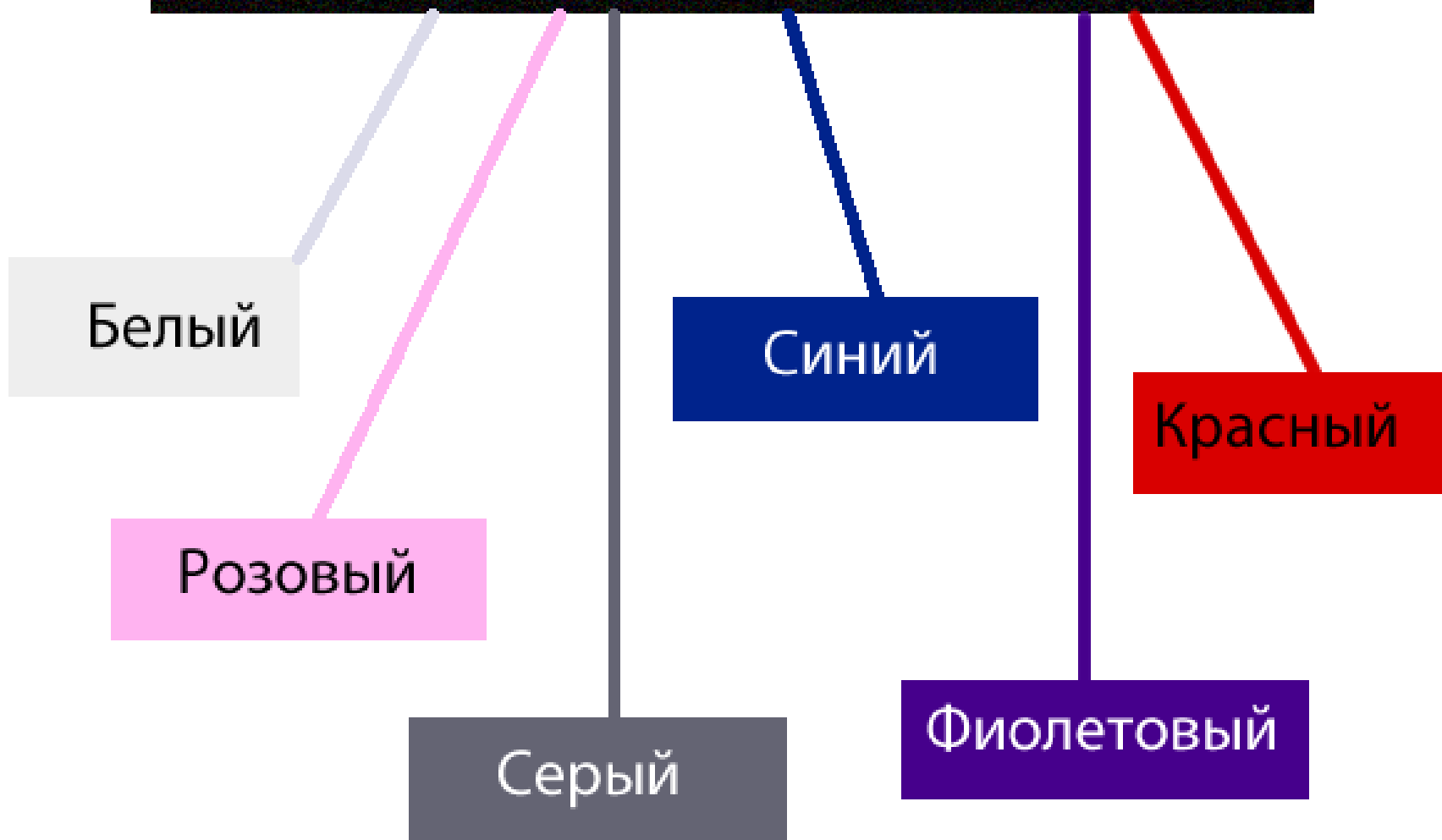


Шум – хаотичные колебания волн разного происхождения, которые характеризуются сложной временной и спектральной структурами.





Цвета шумов (основные)





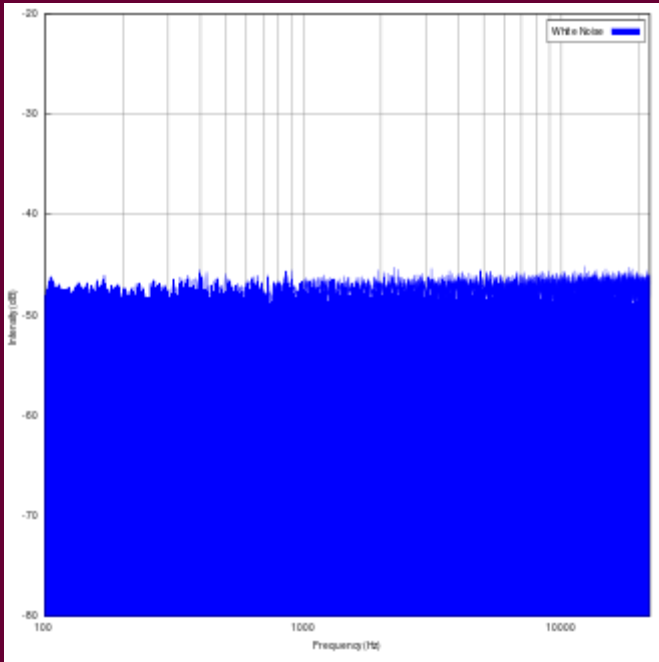
Цвета шума



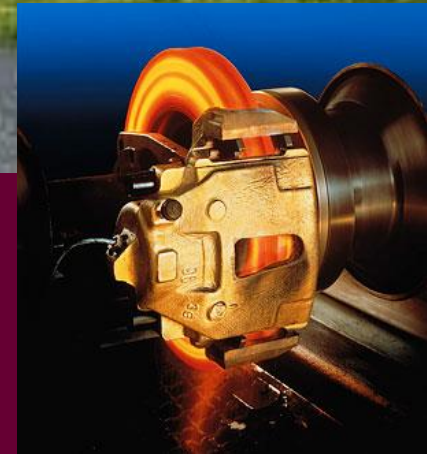
— система терминов, приписывающая некоторым видам шумовых сигналов определённые цвета исходя из аналогии между спектром сигнала произвольной природы и спектрами различных цветов видимого света. Эта абстракция широко используется в отраслях техники, имеющих дело с шумом (акустика, электроника, физика и т. д.).



Белый шум

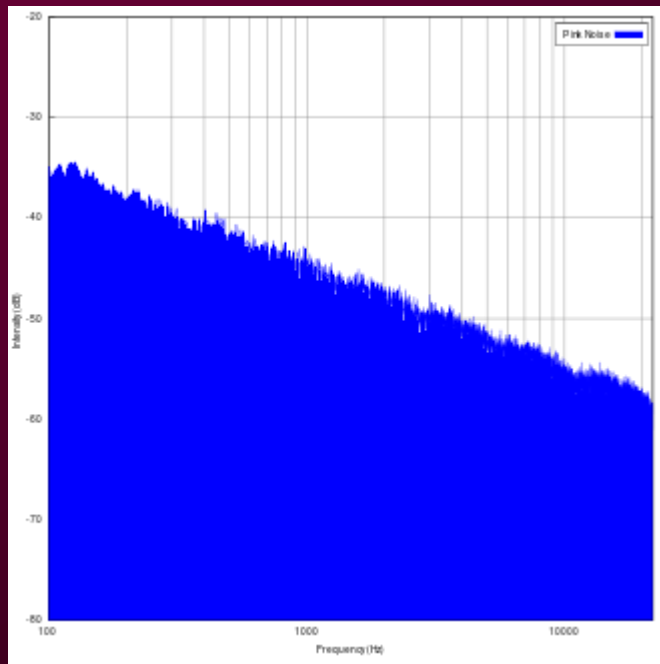


- Белый шум спектр. Плоский спектр мощности. (ось логарифмической частоты)
- Примеры: звуки водопада, мотора, работающей стиральной машины, бурление воды из крана, шум вентилятора или иных бытовых приборов.



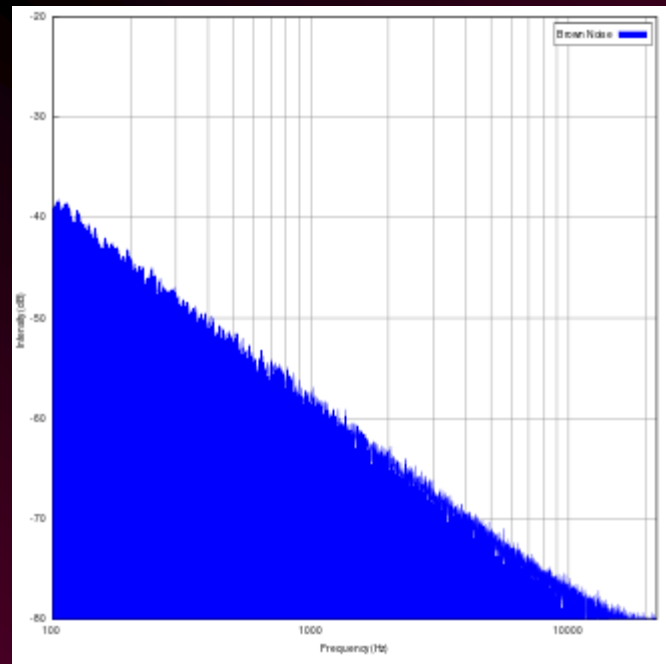


Розовый шум



- Розовый шум спектр. Плотность мощности падает на 10 дБ / декада (-3 дБ / октаву, *т.е. $\sim 1/F$*).





Коричневый (красный) шум

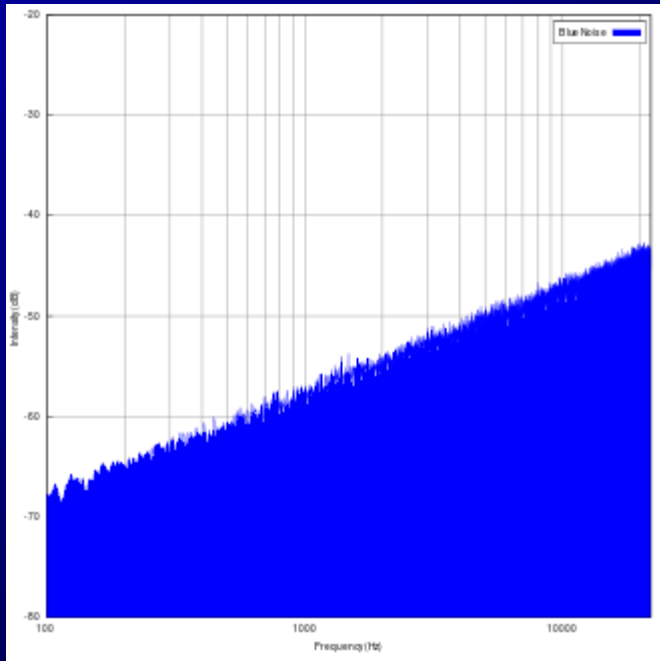
- Коричневый спектр (-6 дБ / октава)

Красный шум характерен для большинства водоемов: морей и океанов

- **Синоним броуновского шума, как указано выше,**
- **Подобен розовому шуму, но с различным спектральным составом и различными отношениями (т.е. $\sim 1/F$ для розового шума, в то время как $1/F^2$ для красного шума).**

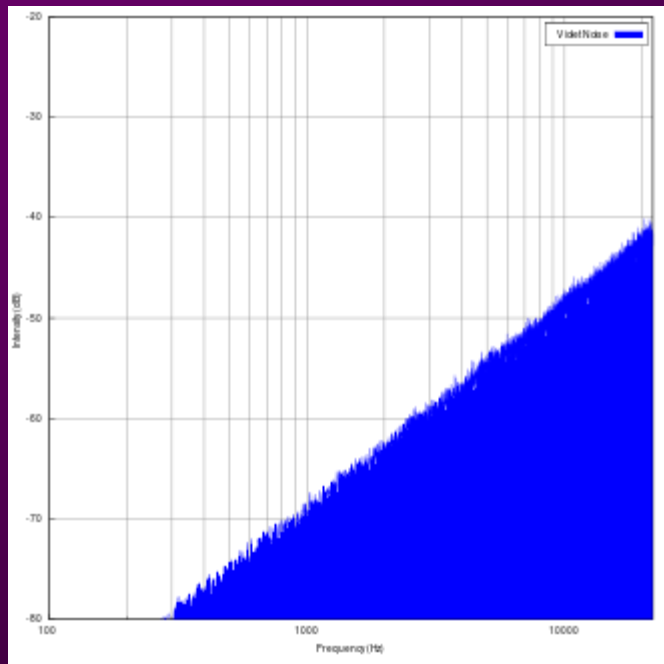


Синий шум



- Синий спектр (+3 дБ/октава)

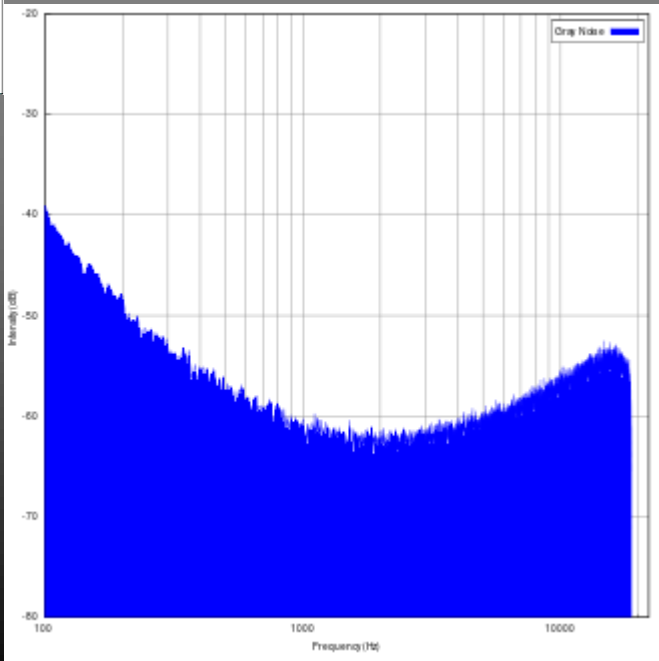
- сигнал, спектральная плотность которого увеличивается с ростом частоты.. На слух он воспринимается более резким, нежели белый.



Фиолетовый шум

- Фиолетовый спектр (+6 дБ / октаву)

- спектральная плотность пропорциональная квадрату частоты (т.е. $\sim F^2$).
- Фиолетовый шум получается, если продифференцировать белый шум.



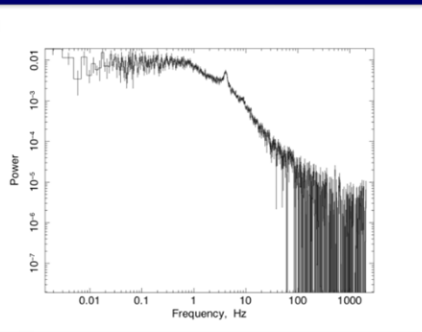
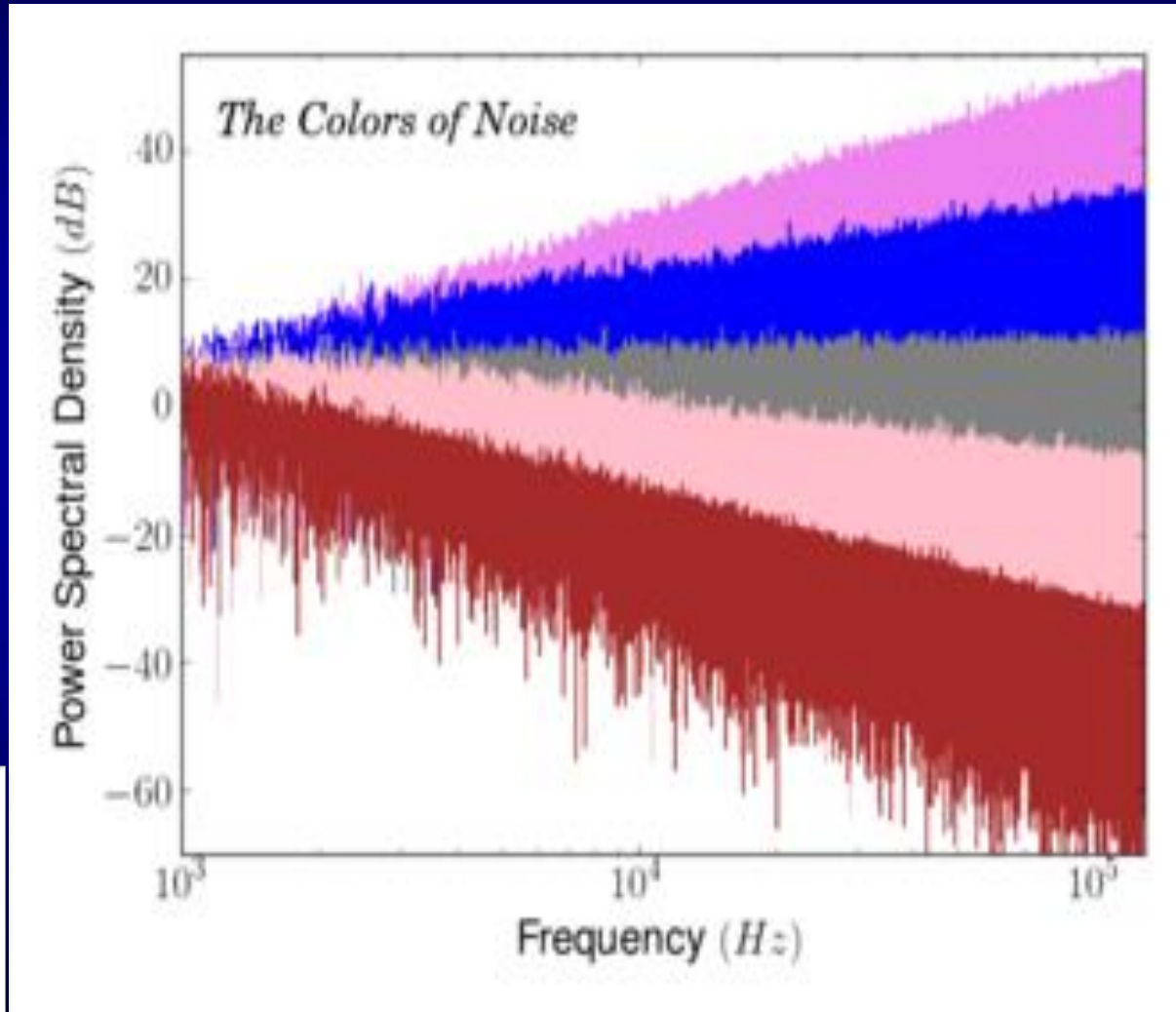
Серый шум

- **Спектр серого шума получается, если сложить спектры броуновского и фиолетового шумов. Спектр данного шума содержит большой «провал» на средних частотах, но человеческий слух субъективно воспринимает серый шум как равномерный по спектральной плотности**

- Серый спектр



Цвета шума определяются зависимостью от частоты



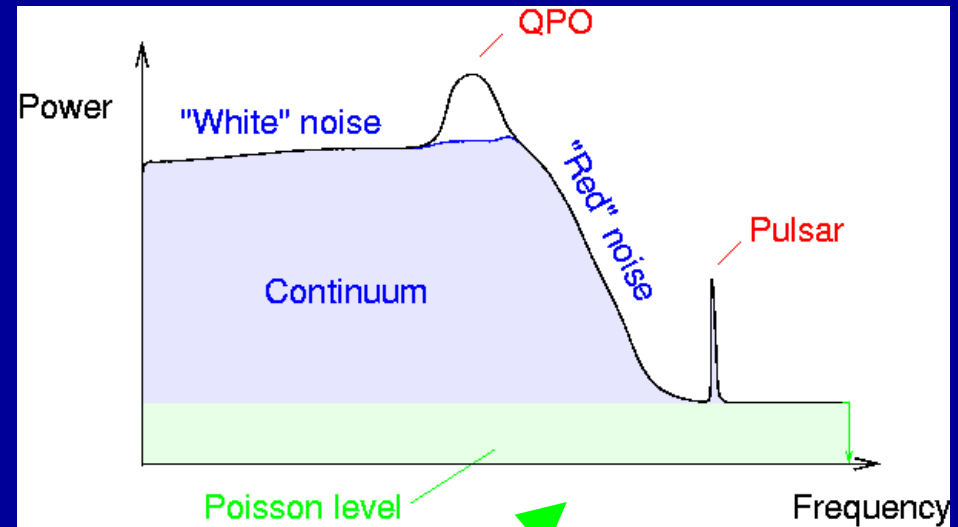


Что такое Пуассоновский шум?

Шум, обусловленный квантовой природой света называется фотонным (дробовым, Пуассоновским) шумом и описывается

распределением

Пуассона (*см. Постнов, Засов «Курс общей астрофизики» п.3.3.4*)

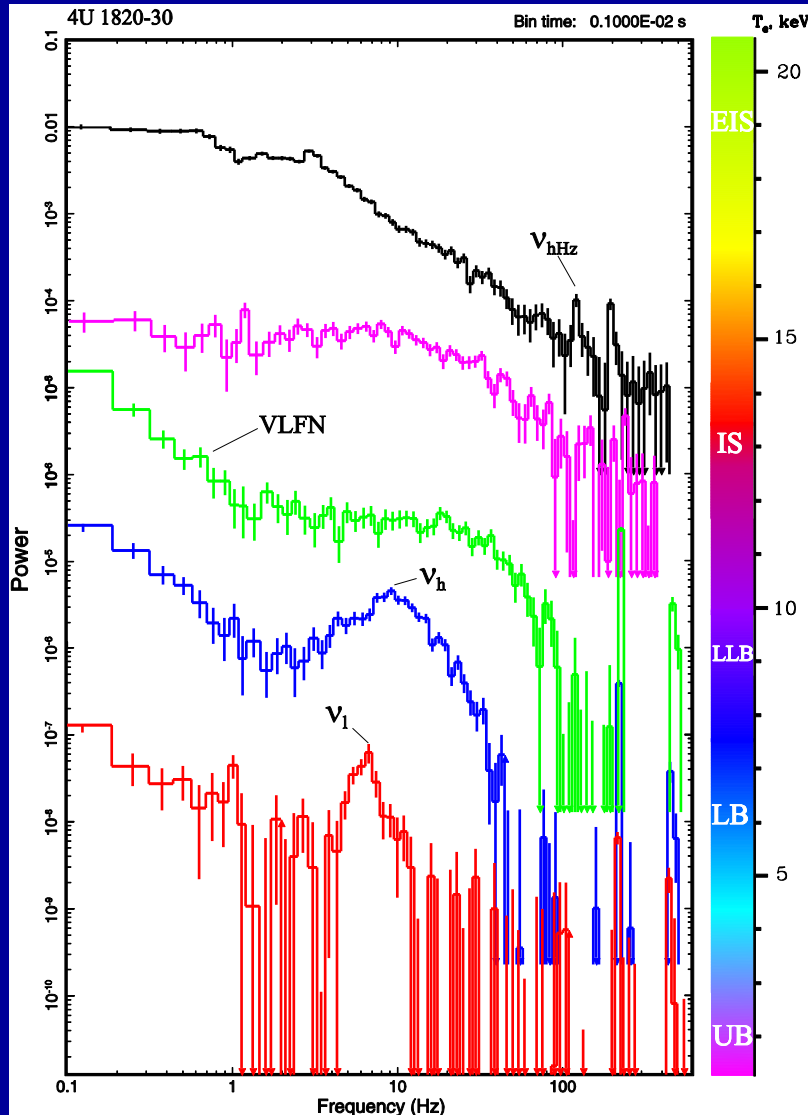


Удаление

Пуассоновского шума в rowspec
`rowspec <filename> norm=-2`



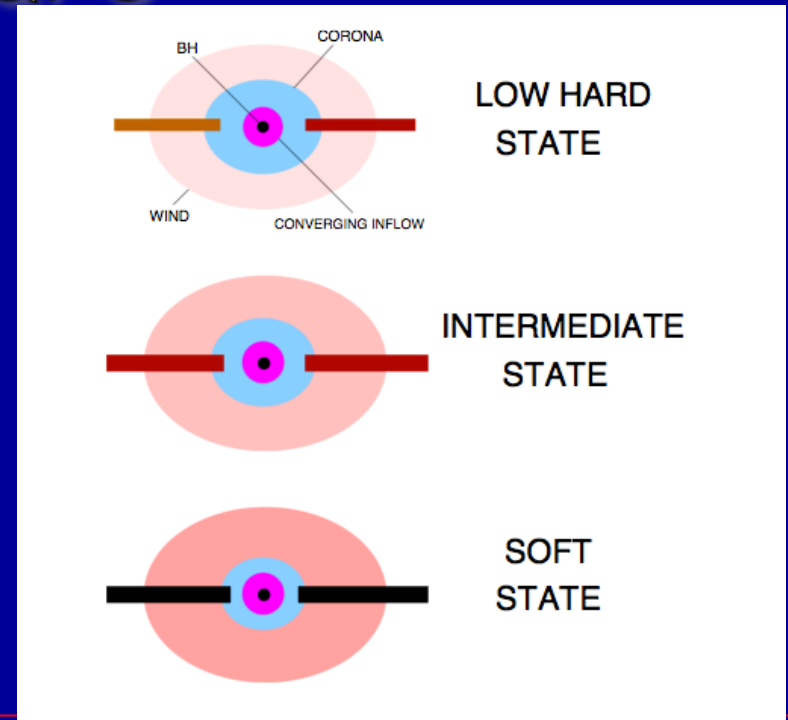
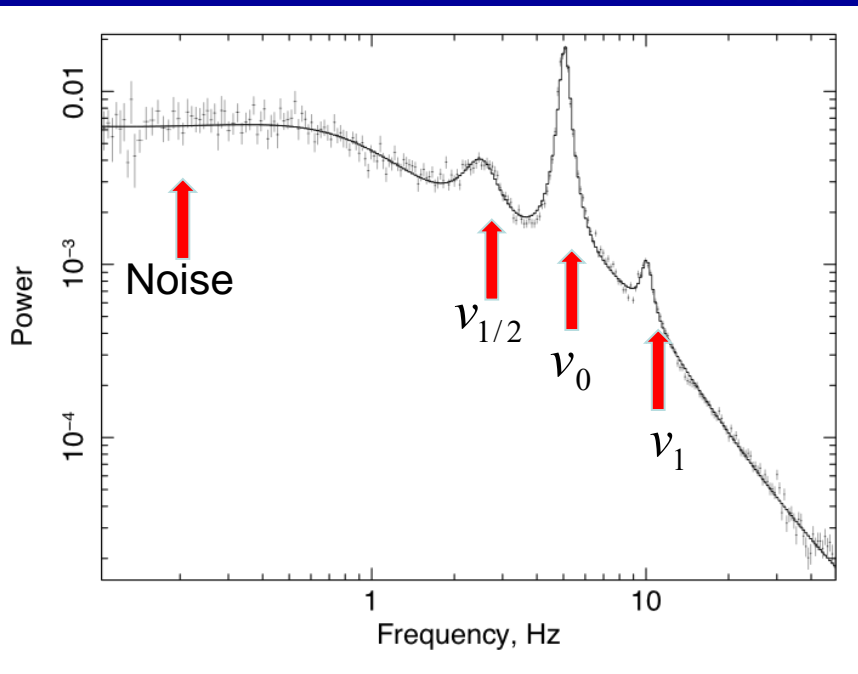
Интерпретация шума в спектрах мощности ЧД и НЗ



- Происхождение низкочастотного шума (Low-frequency noise, LFN, < 1 Гц) в спектрах мощности галактических ЧД остается неизвестным, несмотря на многочисленные попытки его моделирования. В частности, не известна и область аккреционного диска, ответственная за него.
- ➔ шум, обусловленный распространением электромагнитных сигналов в межзвездной среде
- ➔ шум, вызываемый близкими пролетами тел вблизи пульсара
- ➔ белый шум, связанный с резким увеличением толщины диска в сверхкритической области (TL)



On the nature of QPO



Осцилляции описываются Лоренцианами с ненулевой шириной на фоне широкополосного шума (broad-band). Такая система имеет резонанс на частоте $\nu_{1/2}$, т.е. Должна показывать суб-гармоники

Моделирование в рамках сценария «усеченного внутри диска» предполагают, что внешний диск обеспечивает возмущающую силу, внутренний «переходный слой» выступает в качестве осциллирующей системы



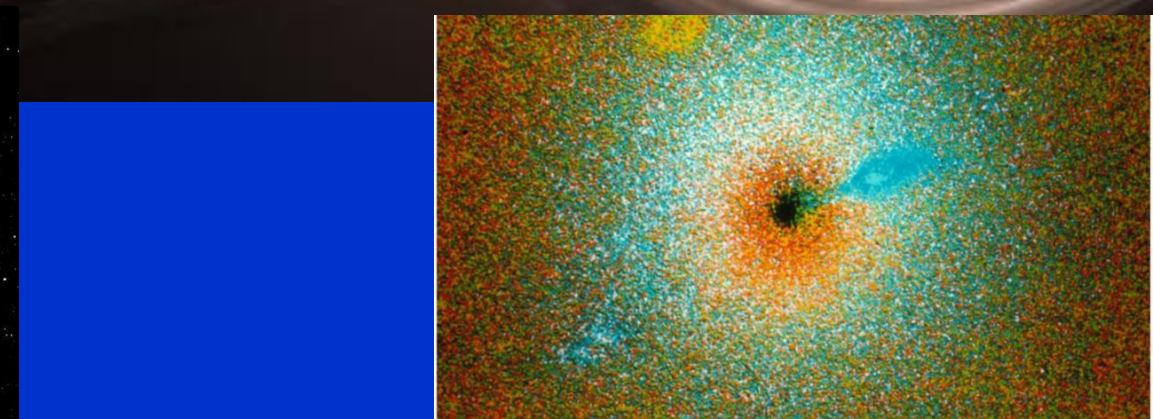
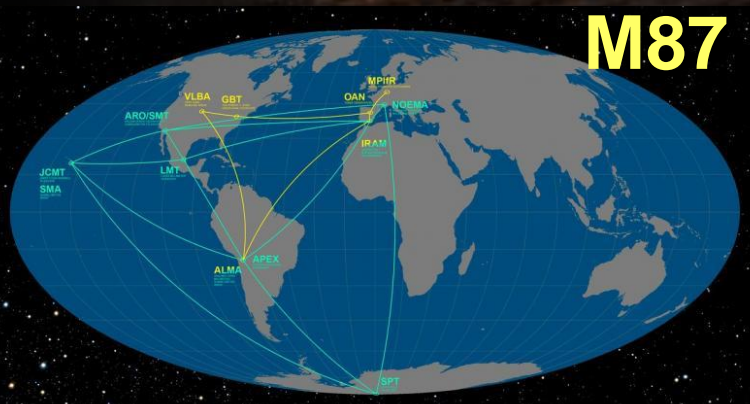
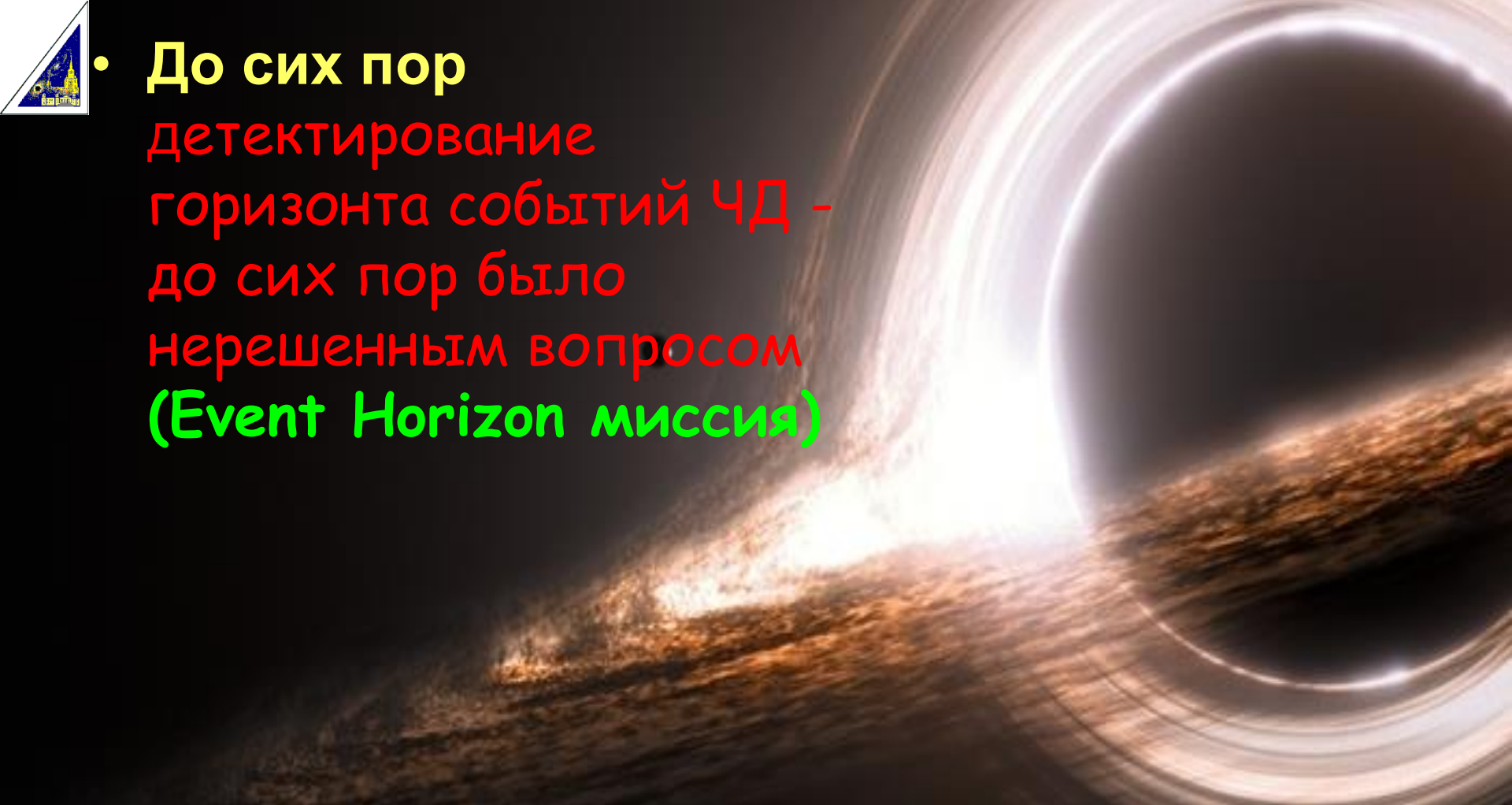
План:

- ➔ Основные параметры M87
- ➔ Рентгеновские наблюдения M87
- ➔ Временной и спектральный анализ
- ➔ Оценка массы ЧД
- ➔ Заключение

Цель – сравнить массу ЧД в M87, полученную разными методами



- До сих пор детектирование горизонта событий ЧД - до сих пор было нерешенным вопросом (Event Horizon миссия)





Возможность существования черных дыр

- следует из общей теории относительности Альберта Эйнштейна, эти объекты были впервые теоретически описаны более 100 лет назад.
- С тех пор получено множество косвенных доказательств того, что черные дыры действительно распространены во Вселенной. А само фото ГС – самое прямое из всех косвенных доказательств существования ЧД во Вселенной



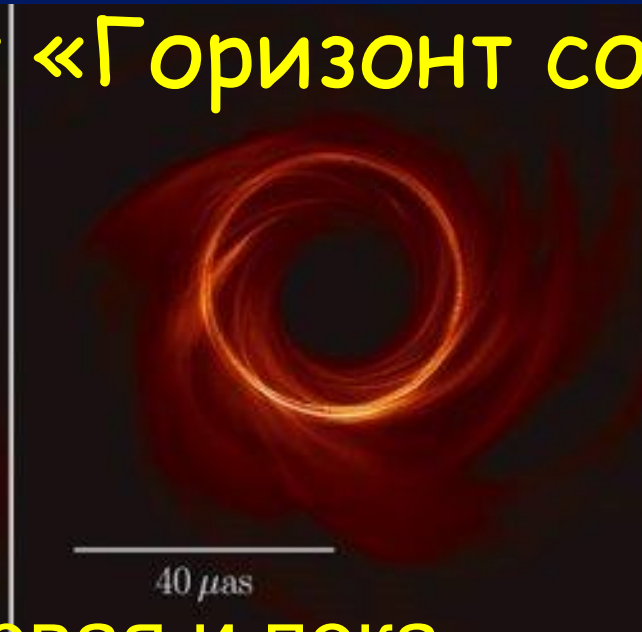
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ - **конечный результат эволюции звёзд**, масса которых выше солнечной в три или больше раз. После использования всех резервов ядерного горючего и прекращения реакций звезда умирает.

чёрная дыра,
согласно общей
теории
относительности
Альберта
Эйнштейна
(1915), влечет
искривление
пространства-
времени.





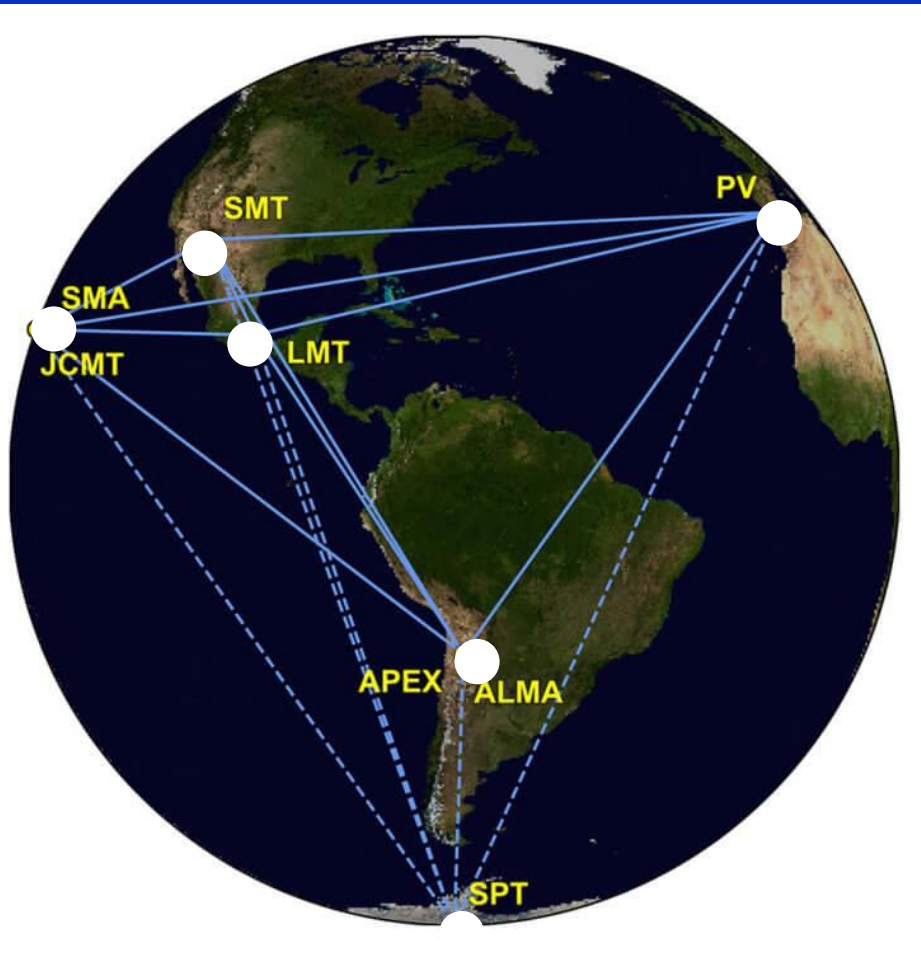
Проект «Горизонт событий»



- M87 - это первая и пока единственная ЧД, которая была исследована с потрясающей тщательностью
- Причины невозможности таких наблюдений ранее:
 - Гигантское расстояние
 - Слабый сигнал + плохое разрешение



Радиоинтерферометр со сверхдлинной базой



- Цель проекта:
- Объединить усилия нескольких телескопов (8 наземных **синхронно работающих** радиотелескопов, распределенных по всему миру, и объединенных в единую сеть)
- **Получение прямого изображения черной дыры**
- Наблюдения: **апрель 2017 г.,**
1.3 мм (230 ГГц)
- Обработка: 2 года

Почему в проекте не участвовала Россия?



Объекты, выбранные для наблюдений телескопом «Горизонт событий» (проект Event Horizon Telescope)



Черные дыры



В центре нашей
Галактики
(Стрелец А*)



В центре
эллиптической
галактики М87



Почему выбрали именно эти

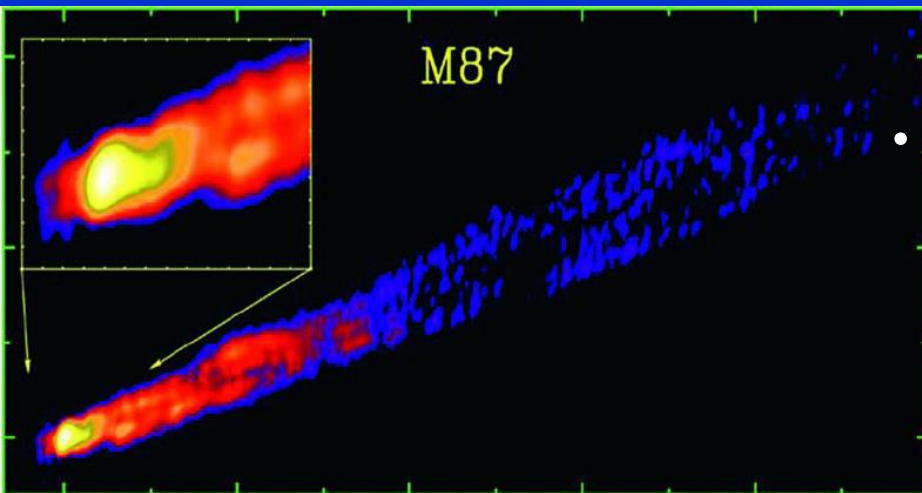
объекты ?

Sgr A*



- Для того чтобы наблюдать тень черной дыры, она должна быть либо достаточно близкой, либо достаточно массивной.

Стрелец А – ближайшая к нам черная дыра, **центр Девы А** в 20 раз дальше, но и во много раз больше.

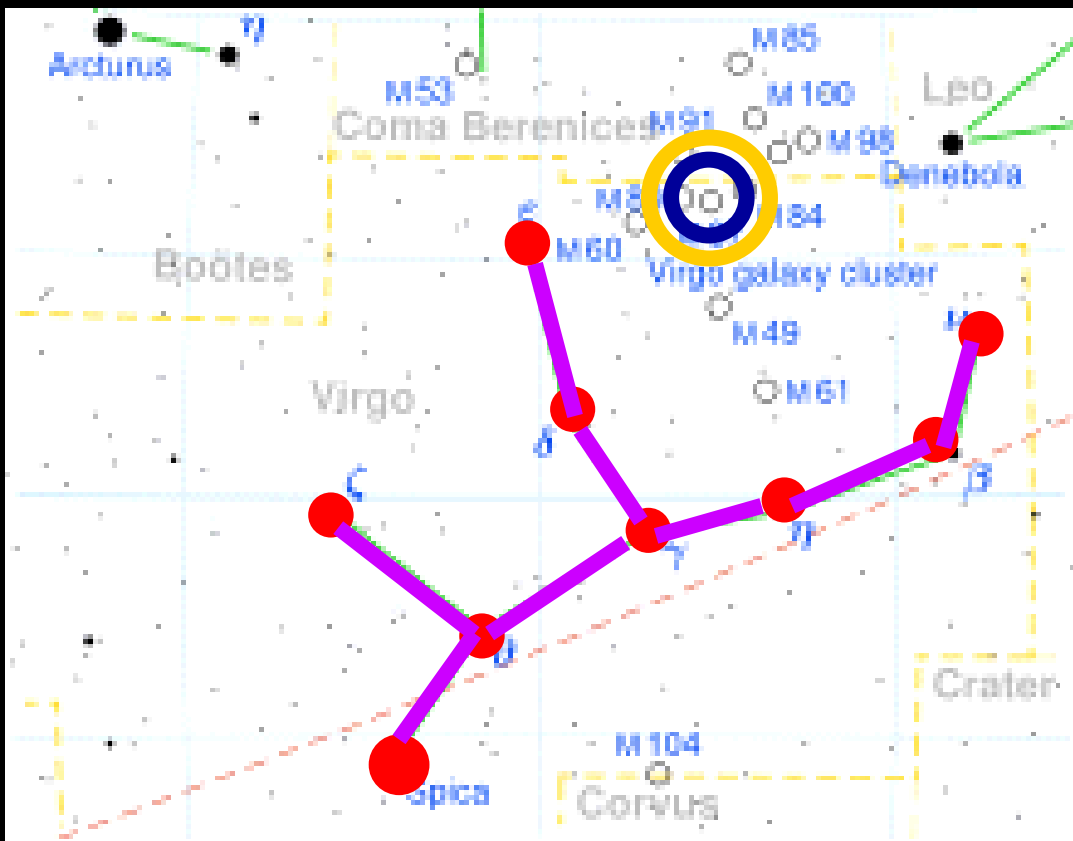


- Другие подходящие черные дыры для наблюдения ЕНТ просто пока не известны



M87

(Messier 87, NGC 4486, Virgo A (Дева А), 3С 274)



■ **сверхгигантская эллиптическая галактика,**

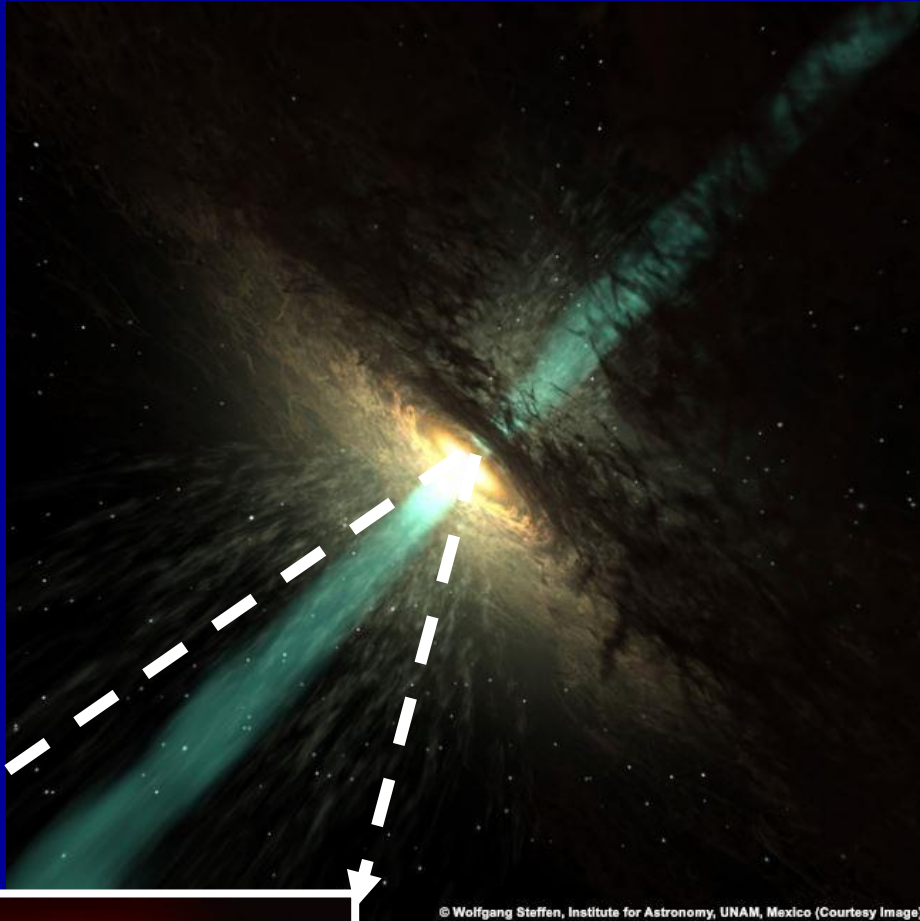
■ **расстоянии ~16,4 млн пс**

■ **открыта в в 1781 г.**

■ **масса ЧД в центре M87 ~ 5 млрд. M_{\odot}**

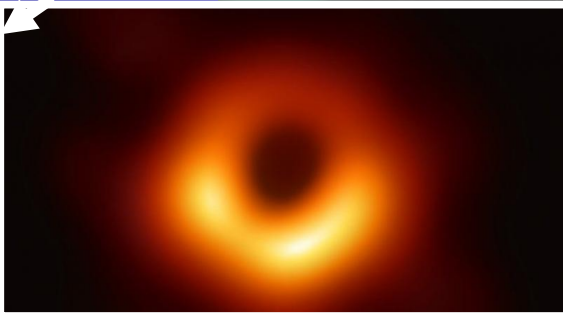


Опубликована первая в истории **настоящая** фотография тени черной дыры

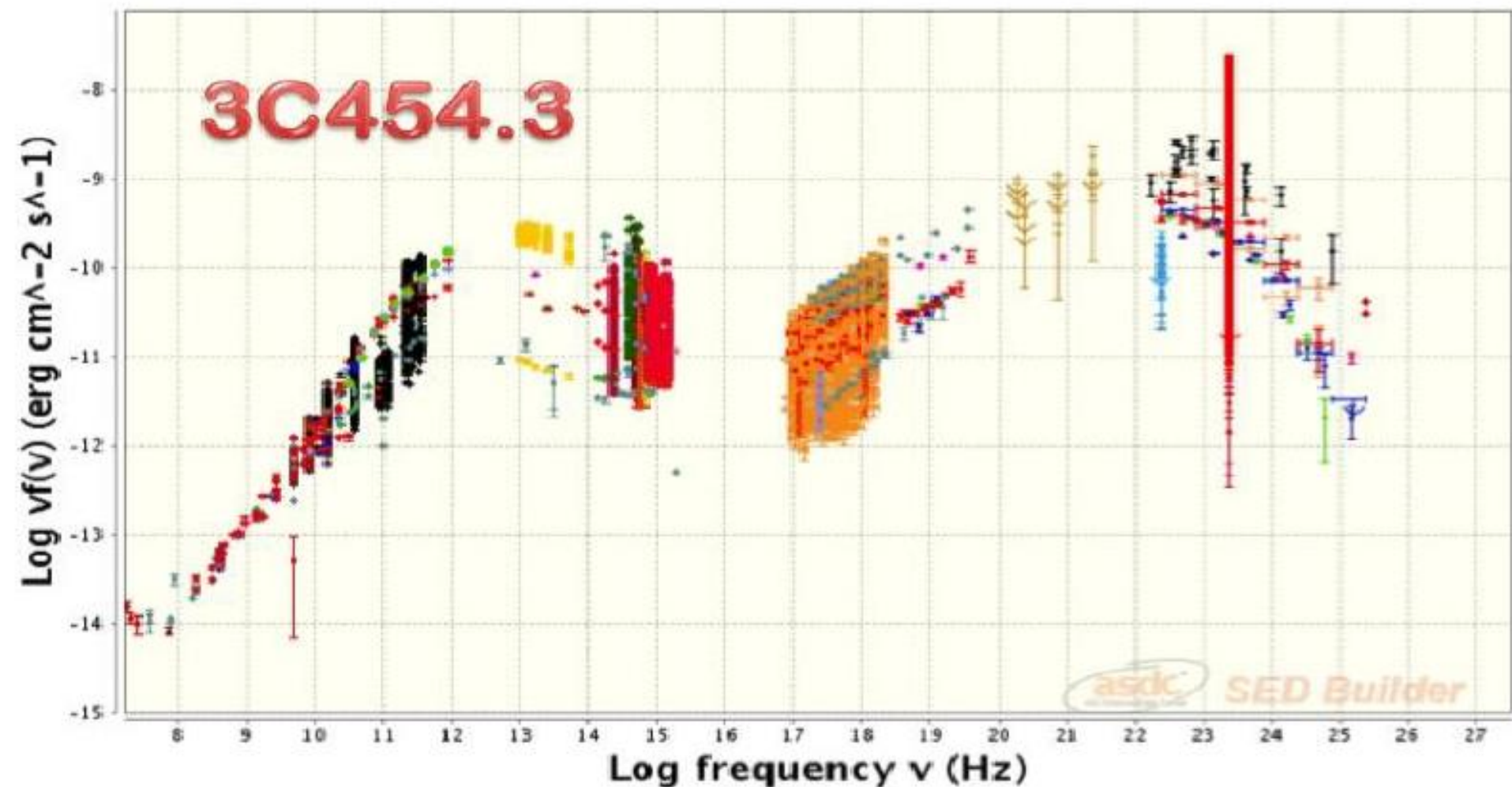


© Wolfgang Steffen, Institute for Astronomy, UNAM, Mexico (Courtesy Image)

- ➔ Ученые-астрофизики впервые в истории обнародовали изображение черной дыры.
- ➔ **Область расположена в активной галактике M87, которая находится в 53 млн световых лет от Земли.**
- ➔ Презентация изображений прошла на пресс-конференции Национального научного фонда США
- ➔ 10 апреля 2019 г..

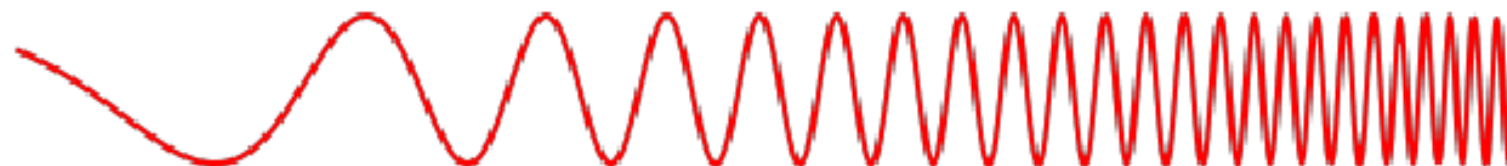
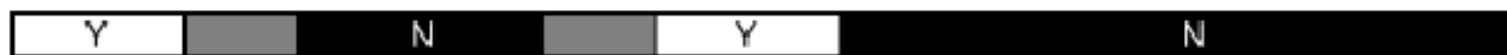


Распределение энергии в спектре блазаров

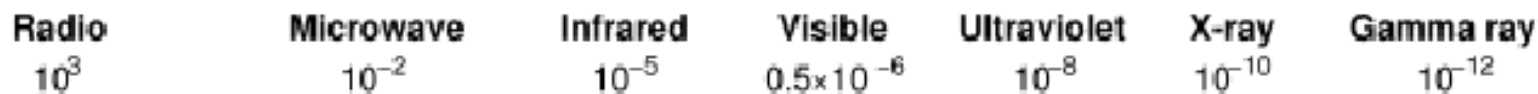


Шкала электромагнитных волн

Penetrates Earth's Atmosphere?



Radiation Type
Wavelength (m)



Approximate Scale
of Wavelength

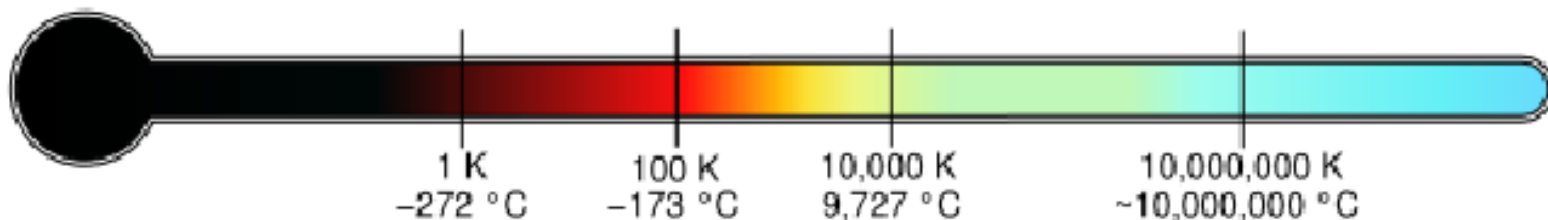


Buildings Humans Butterflies Needle Point Protozoans Molecules Atoms Atomic Nuclei

Frequency (Hz)

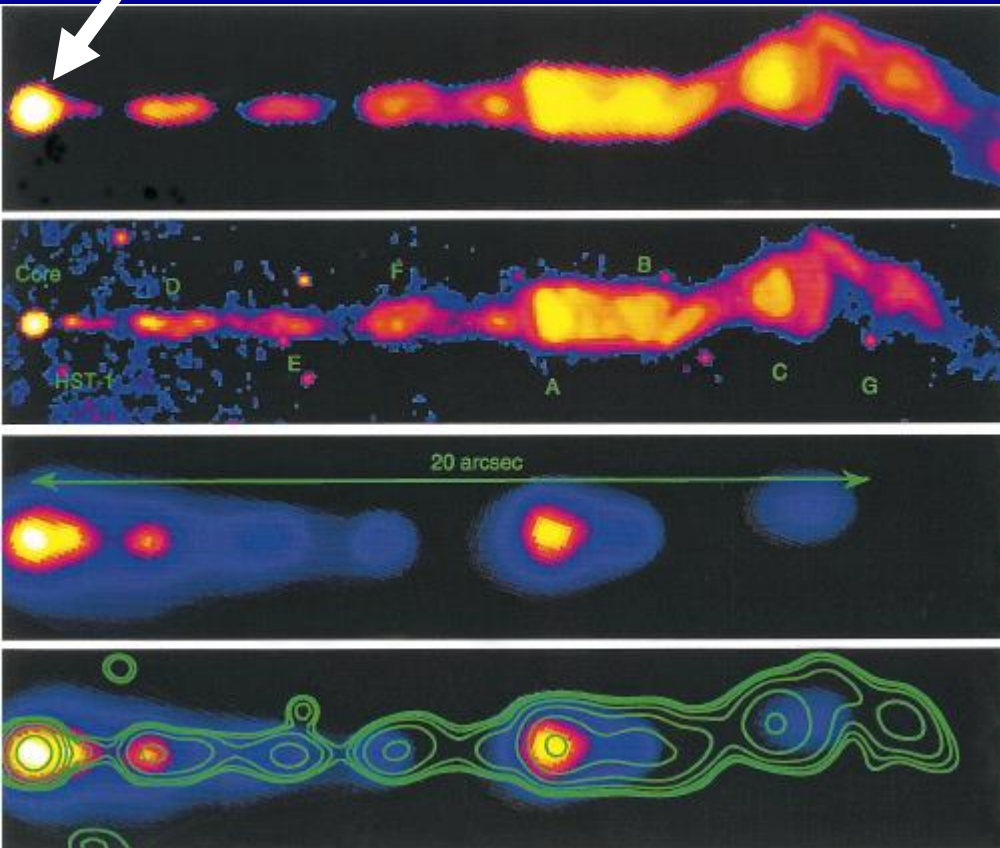


Temperature of objects at which this radiation is the most intense wavelength emitted

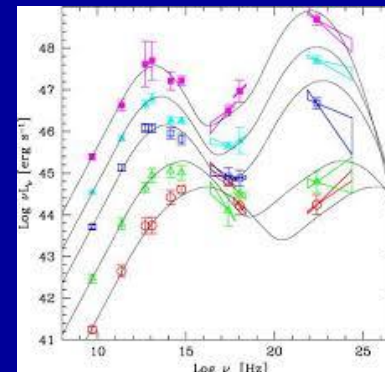




История исследования



- ➔ **Открыватель:**
Шарль Мессье
- ➔ **Дата открытия:**
18 марта 1781 г.
- ➔ **Масса ЧД в центре M87 ~ 5 млрд. солнечных масс**



Изображение радио джета M87

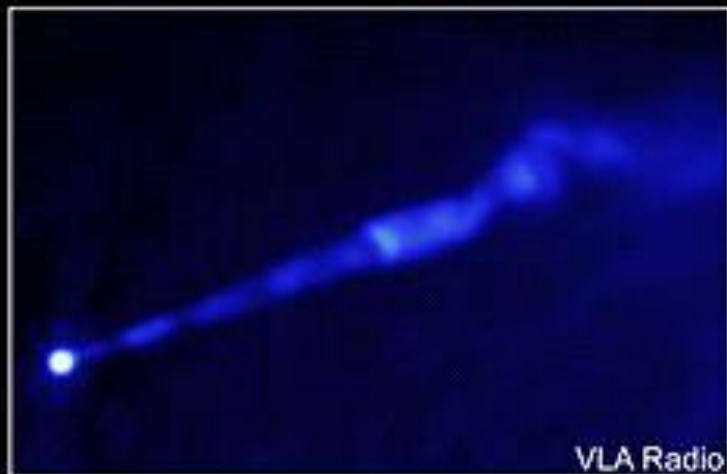


Джет (выброс) из М87

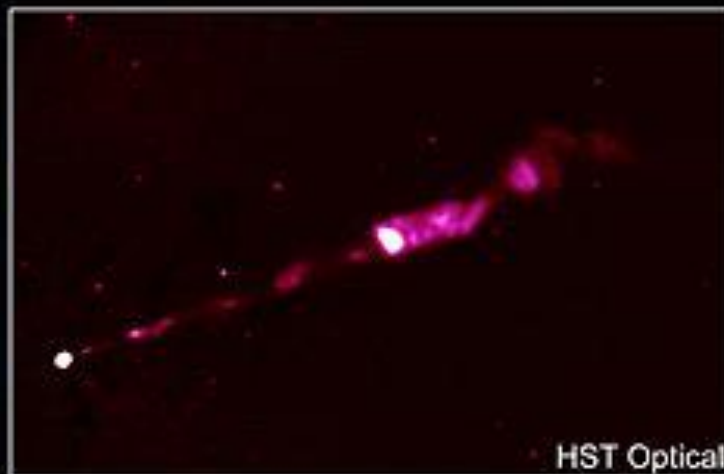
В 1918 г.
американский
астроном *Гербер*
Кертис обнаружил
«любопытный
прямой луч ...
видимо, связанный
с ядром тонкой
линией материи».



Chandra X-Ray



VLA Radio

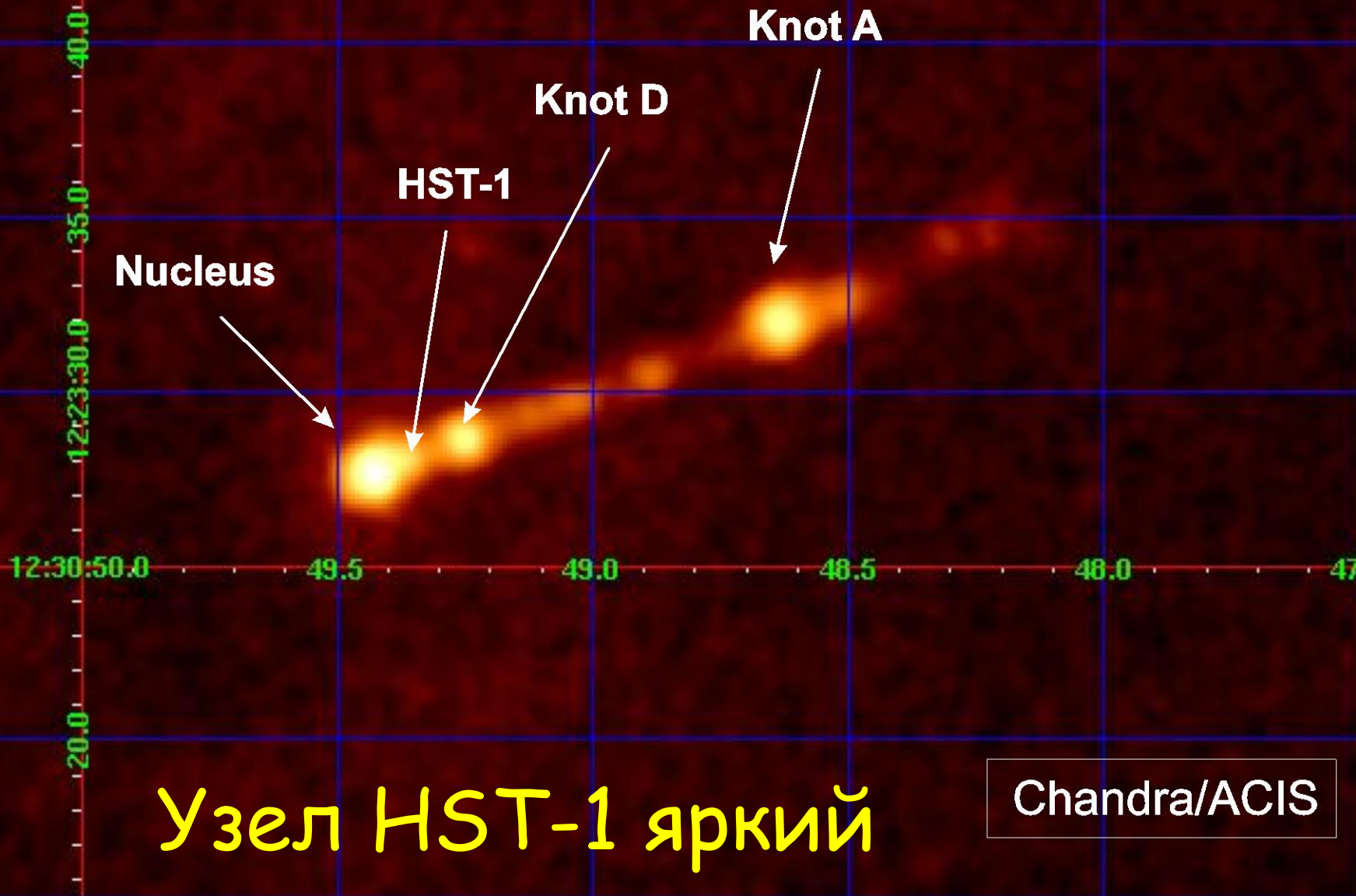


HST Optical



M87: ядро и узлы джета

M 87



Nucleus

HST-1

Knot D

Knot A

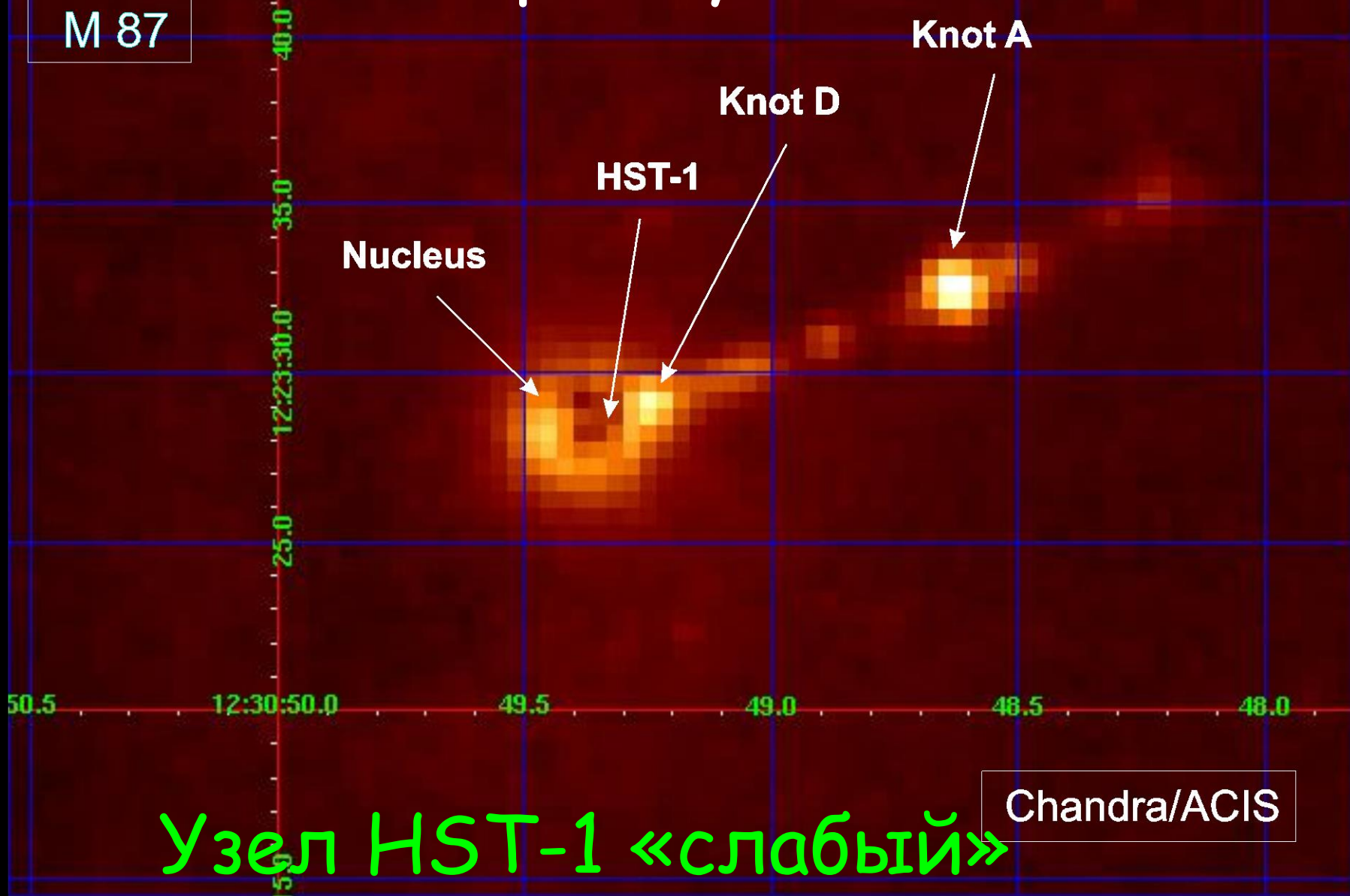
Узел HST-1 яркий

Chandra/ACIS



M87: ядро и узлы джета

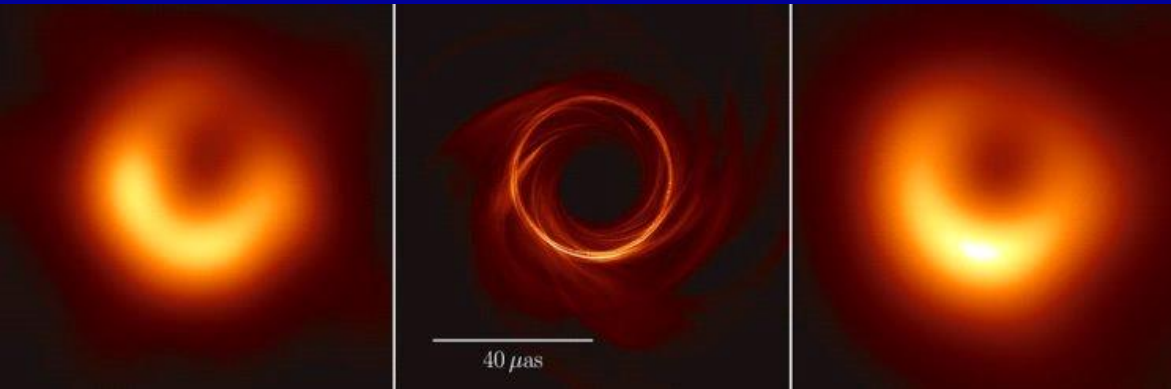
M 87



Узел HST-1 «слабый»



Общая теория относительности Эйнштейна (ОТО)



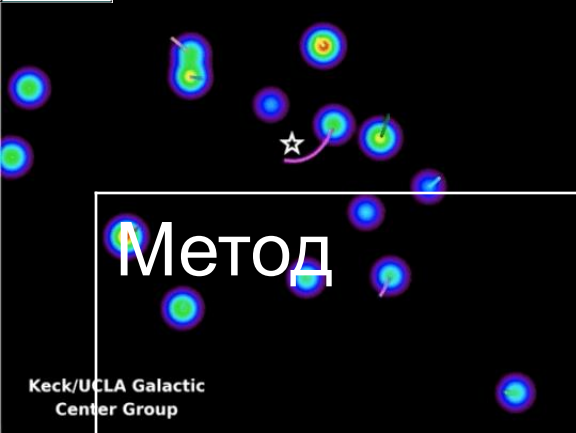
Слева направо: настоящее изображение черной дыры галактики M87, полученное телескопом *Event Horizons* 6 апреля 2017 года; компьютерная модель черной дыры; компьютерная модель с подогнанным под телескоп *Event Horizon* разрешением

- предсказывает, что тень черной дыры должна выглядеть как темный круг, окруженный полумесяцем из яркого света.

• Не все ученые были согласны с подобным предсказанием, но наблюдения **Event Horizons Telescope** смогли указать на неправоту скептиков — предсказания Эйнштейна полностью подтвердились, в чем вы можете убедиться, взглянув на снимок.



1996.6



Оценки массы ЧД в М87

Метод	M (M_{\odot})	Ссылки
Gas dynamics	$(3.45 \pm 0.5) \times 10^9$	<i>Walsh et al. (2013); Akiyama et al. (2019)</i>
Stellar dynamics	$(6.14 \pm 0.6) \times 10^9$	<i>Gebhardt et al. (2011); Akiyama et al. (2019)</i>
EHT image	$(6.5 \pm 0.7) \times 10^9$	<i>Akiyama et al. (2019)</i>



Рентгеновские данные M87, полученные со спутника RXTE



N of set	UT dated	Type of light curve
R1	30 дек 1997-2 фев 1998	ordinary
R2	10 – 15 апр 2010	outburst



Рентгеновские данные M87, полученные со спутников Suzaku, ASCA и BeppoSAX

спутник	UT dated	X-RAY Spectral state
Suzaku	29 ноя - 2 дек 2006	IS
ASCA	7 – 8 июня 1993	IS
BeppoSAX	14 – 15 июля 1996	IS

Spectral states of BHs:

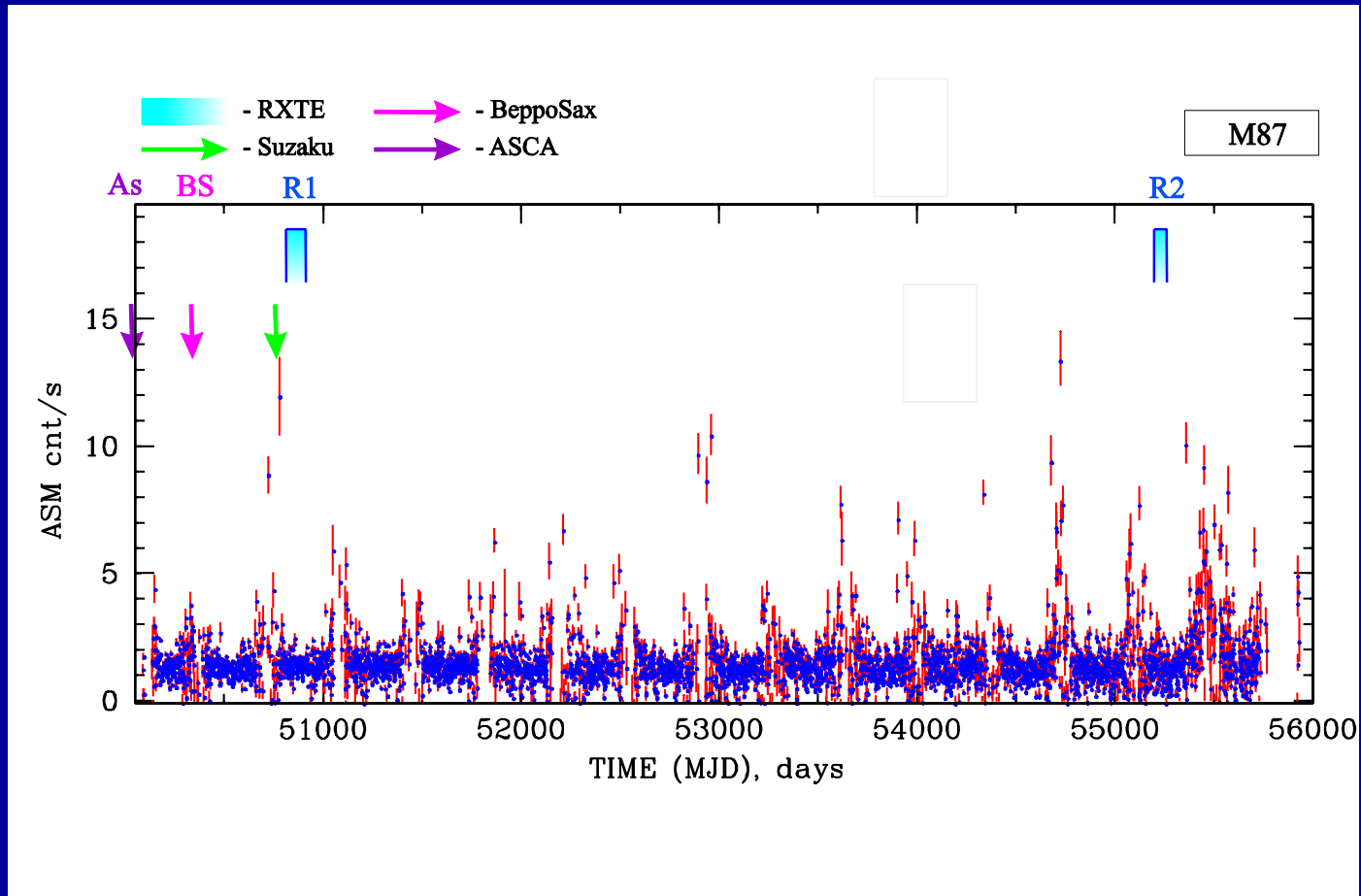
LHS – *Low/Hard state*

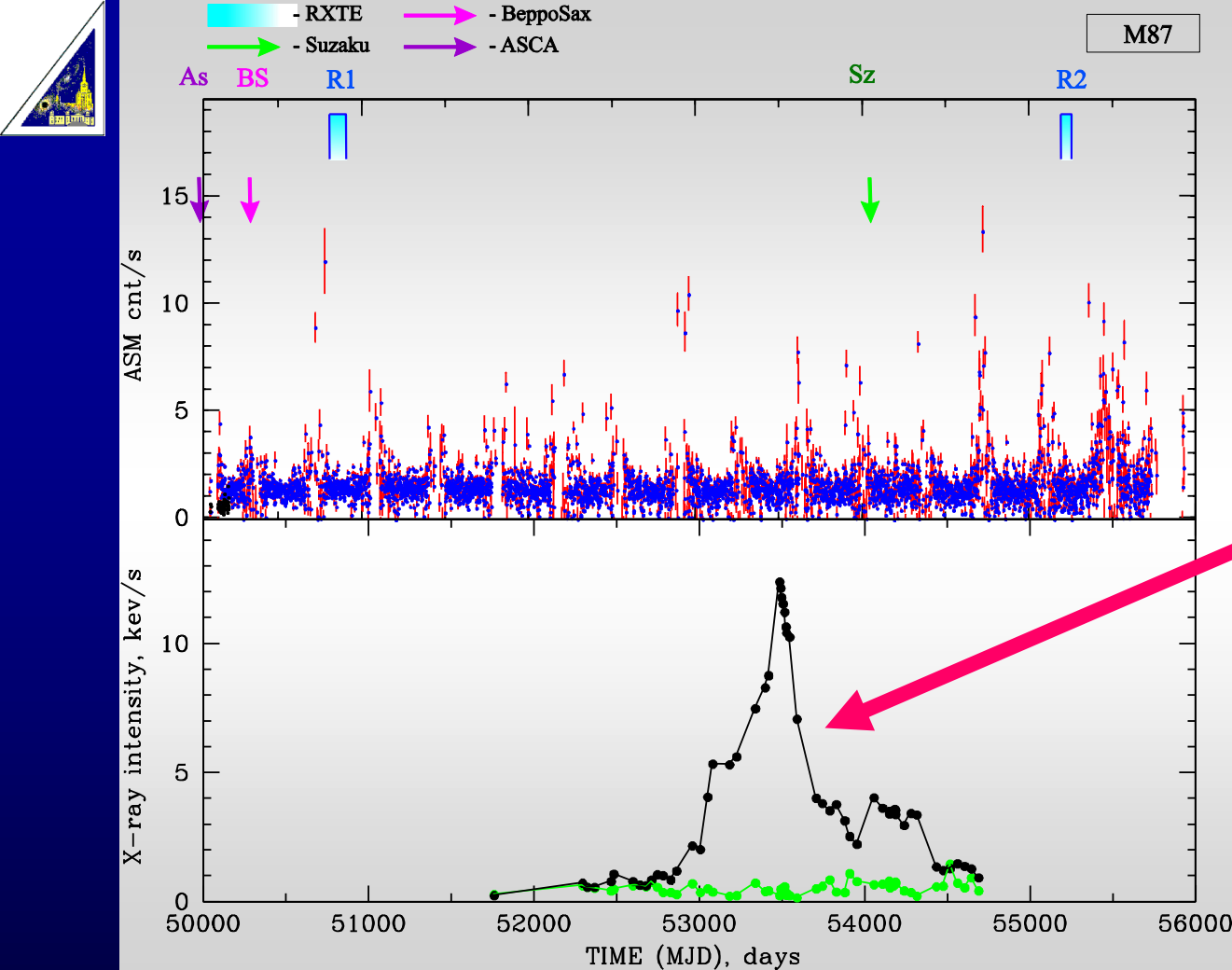
IS – *Intermediate state*

HSS – *High/Soft state*



Рентгеновская кривая блеска: распределение наблюдений



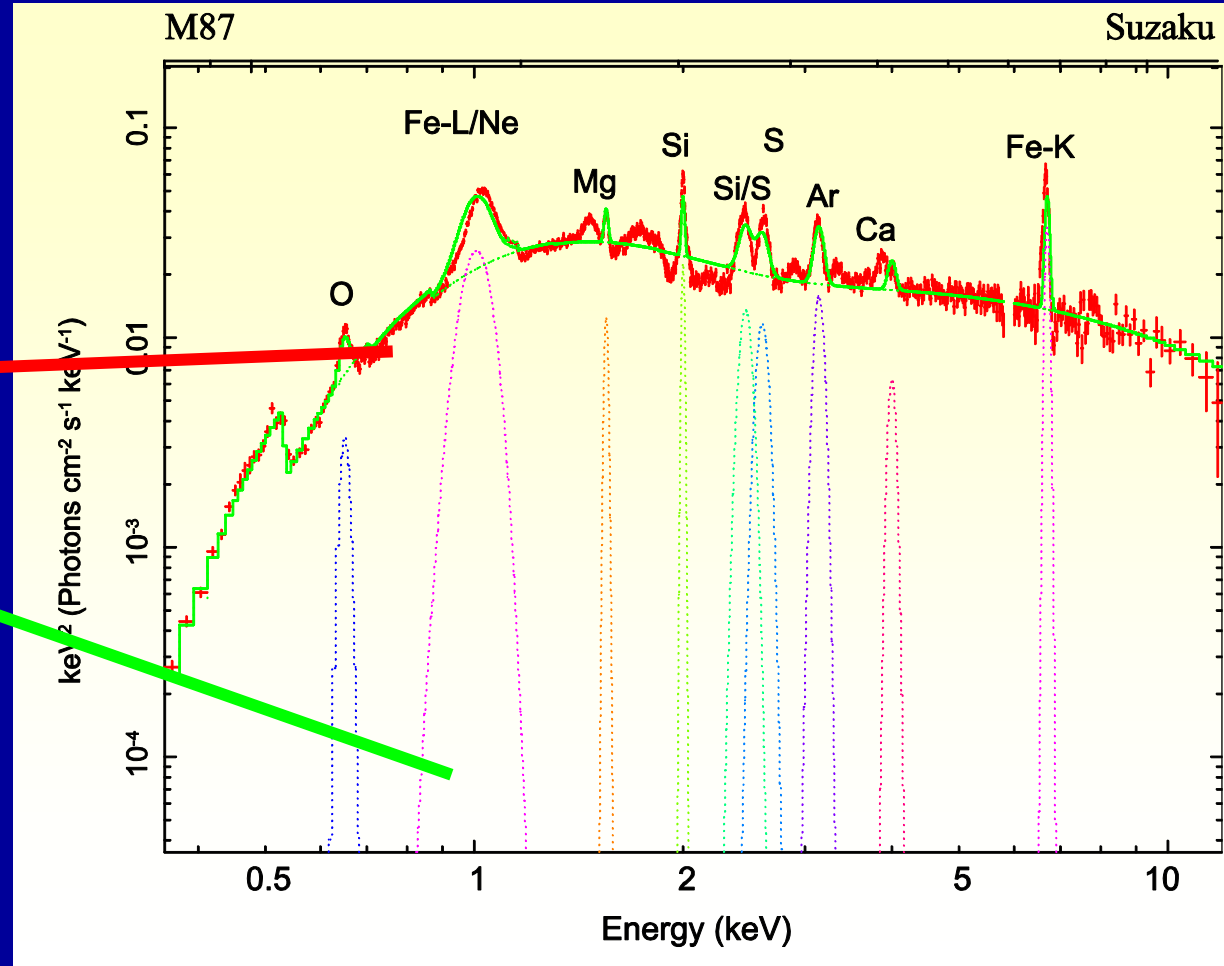
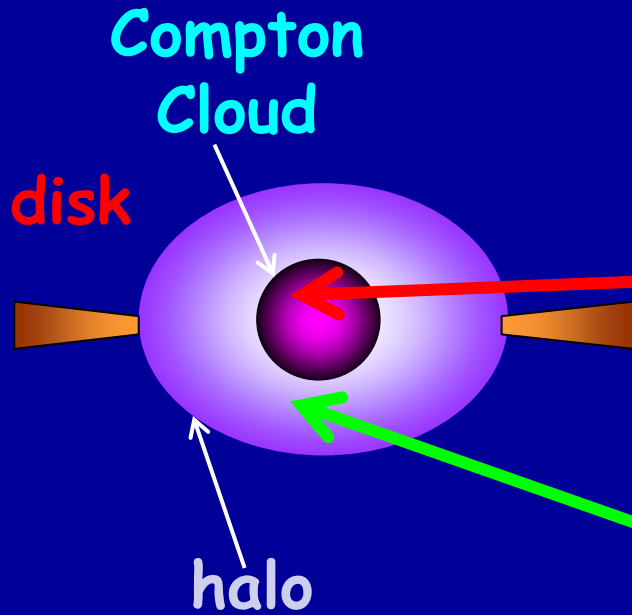


В эти даты
 HST-1
 доминирует в
 рентгеновско
 м спектре
 M87, сложно
 выделить
 ядро и
 информации
 о ЧД нет

Top: Evolution of ASM/RXTE count rate during 1996 -- 2012 observations of M87. Vertical arrows (at the top of panel) indicate temporal distribution of the RXTE (blue) and Suzaku (green) data sets. Bottom: Evolution of Chandra X-ray intensity of the nucleus (green) and HST-1 (black) during 2000 -- 2008 observations of M87 according to data taken from Harris et al. (2009).



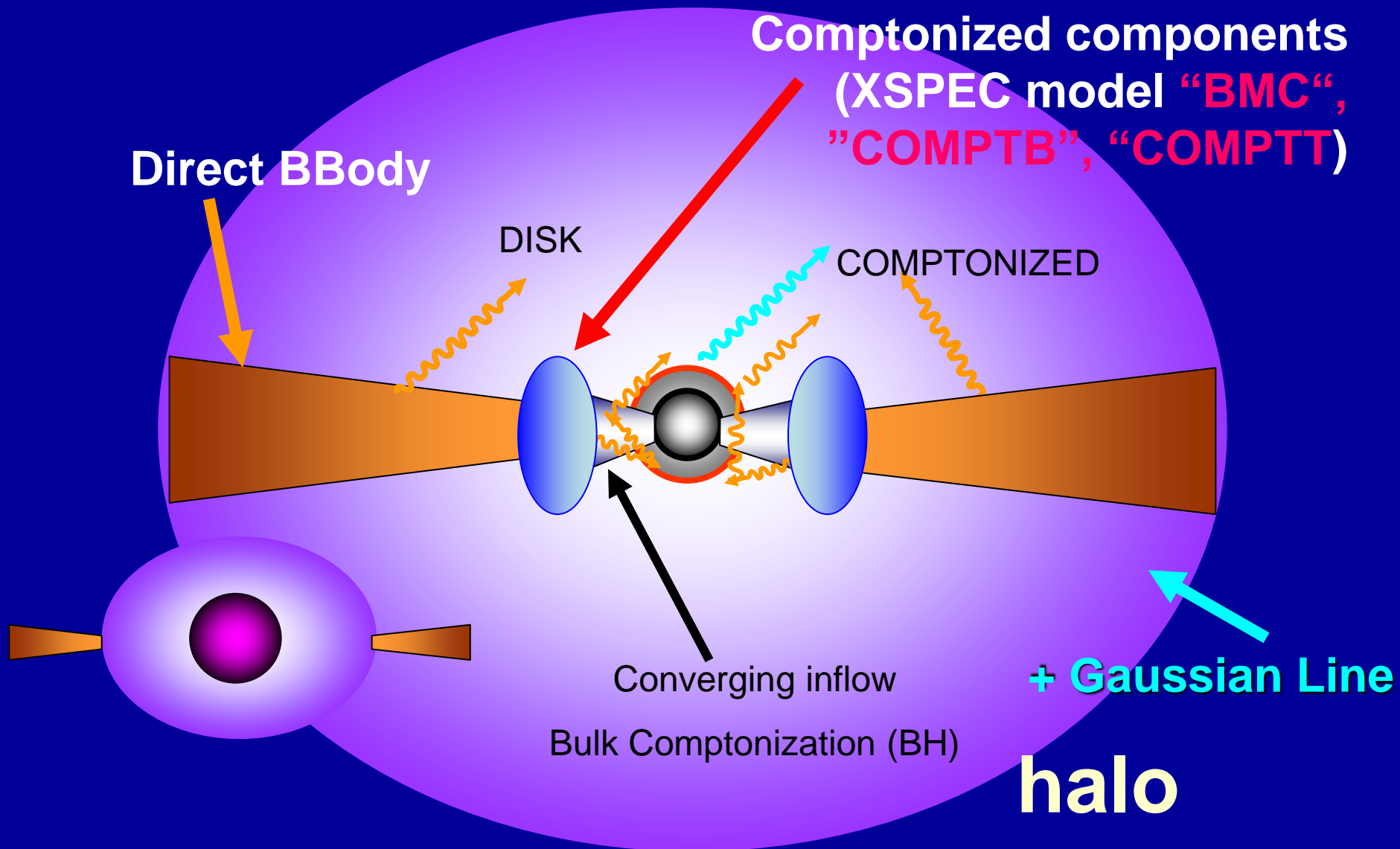
Suzaku: X-ray spectrum M87



- Model: $wabs^*(bmc^*highcut+N^*Gauss)$



Generic model



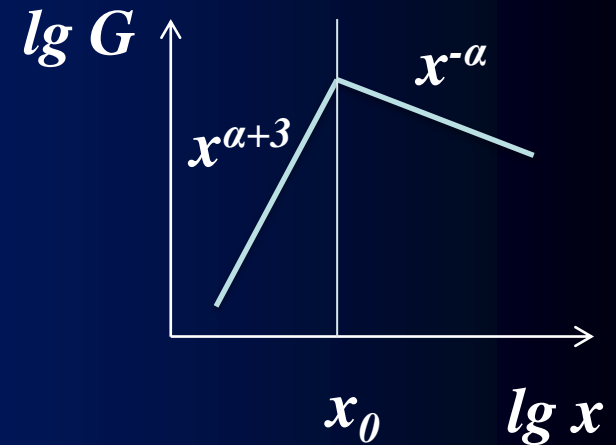


Model used to describe energy spectra of BHs:

- A generic model consists of direct BB-like and Comptonized components
- (XSPEC model “BMC“, ”COMPTB“, ”COMPTT” is a sum of $BB+f \cdot BB^*G$)

$$G(x, x_0) \sim \begin{cases} x^{-\alpha} & , x > x_0, \\ x^{\alpha+3} & , x < x_0, \end{cases}$$

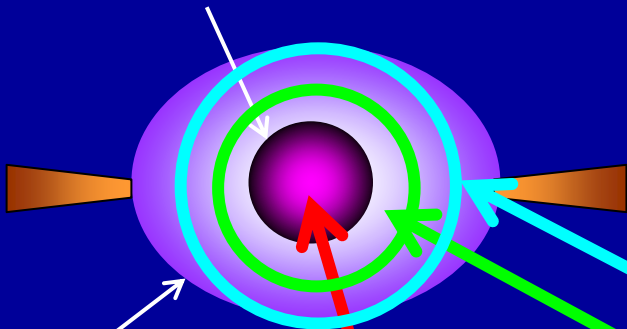
where $x = hv/kTe$



Gaussian/mekeal line component



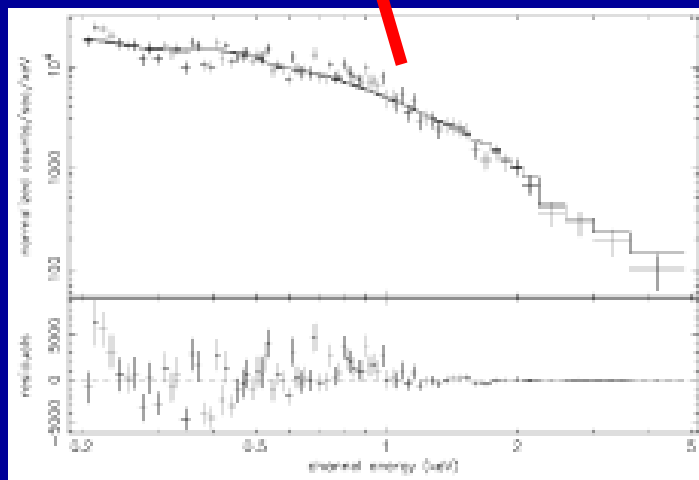
Compton
Cloud



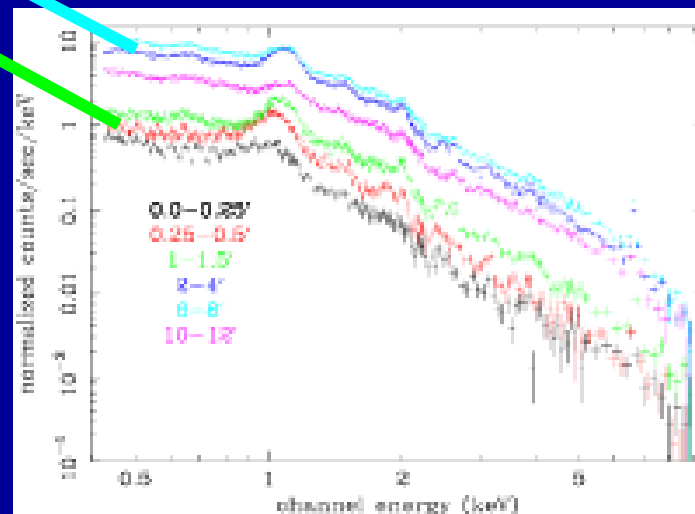
halo

XMM-Newton: разделение спектров ядра и гало

- *Bohringer & Werner 2010, A&ARv, 18, 127*



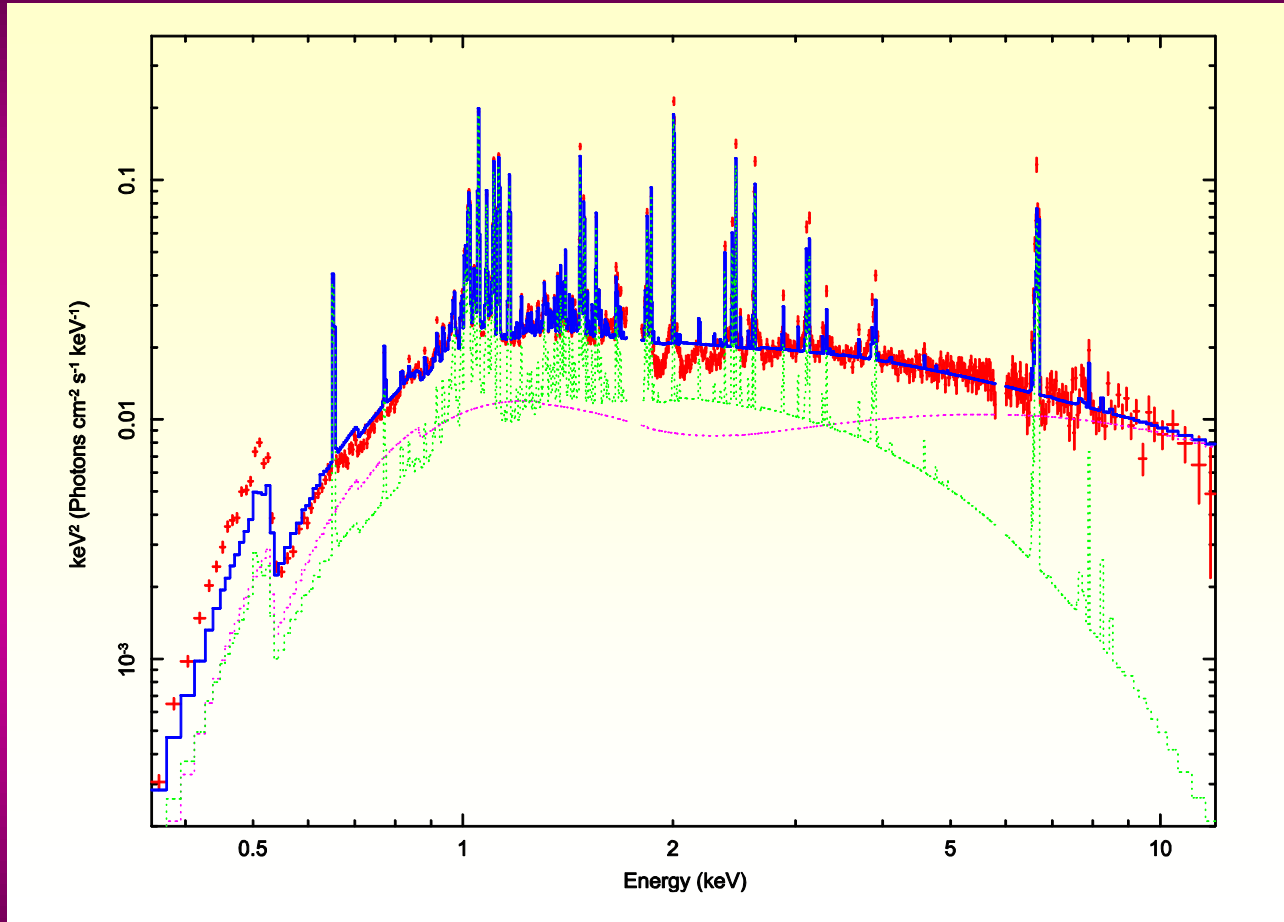
*XMM-Newton pn spectrum of the
nucleus of M87*



*XMM-Newton pn spectra of the X-ray emission in
concentric rings (halo) around M87*



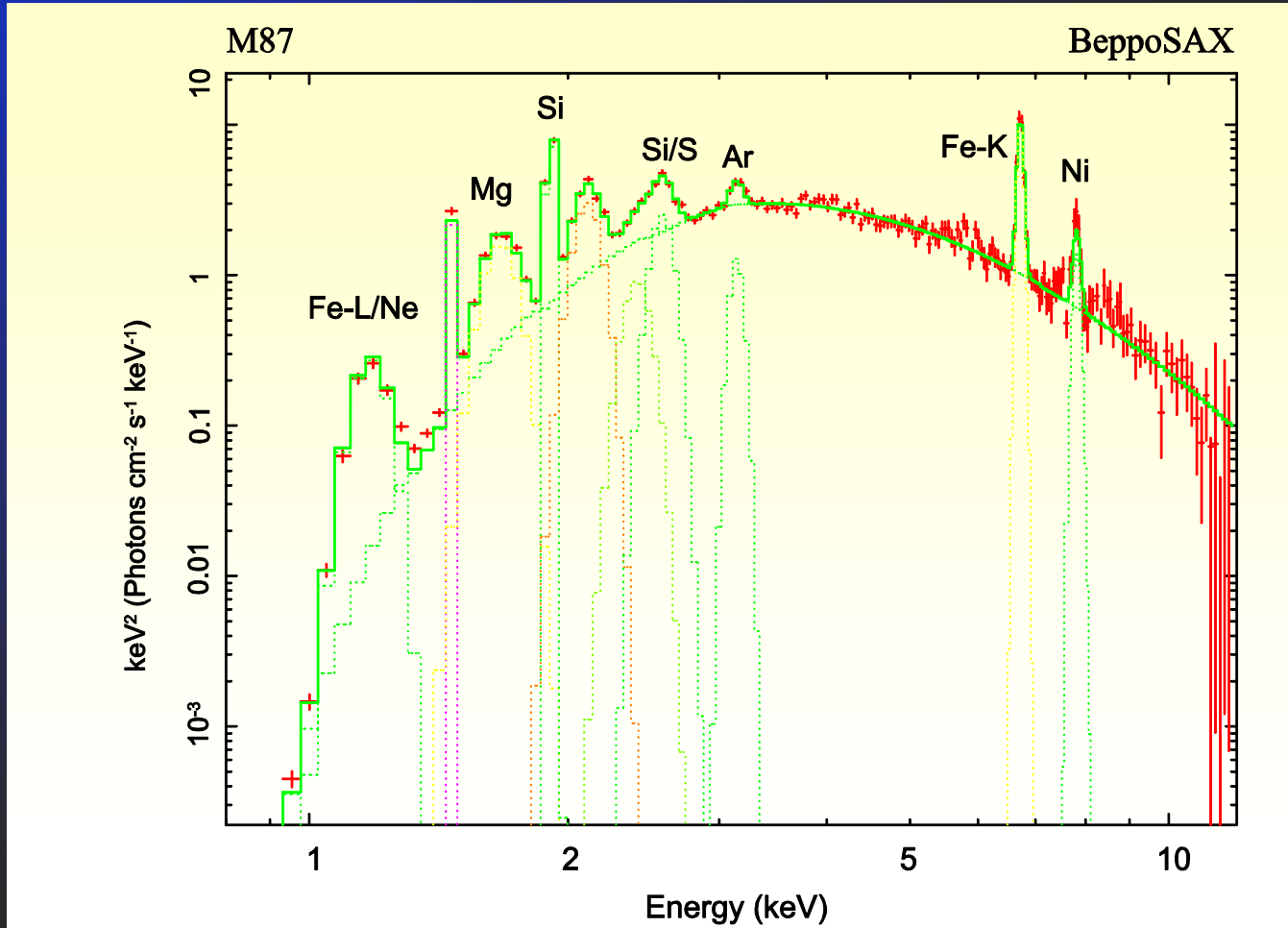
Suzaku: Рентгеновский спектр М87



- Модель: $wabs^*(bmc^*highcut+mekal)$



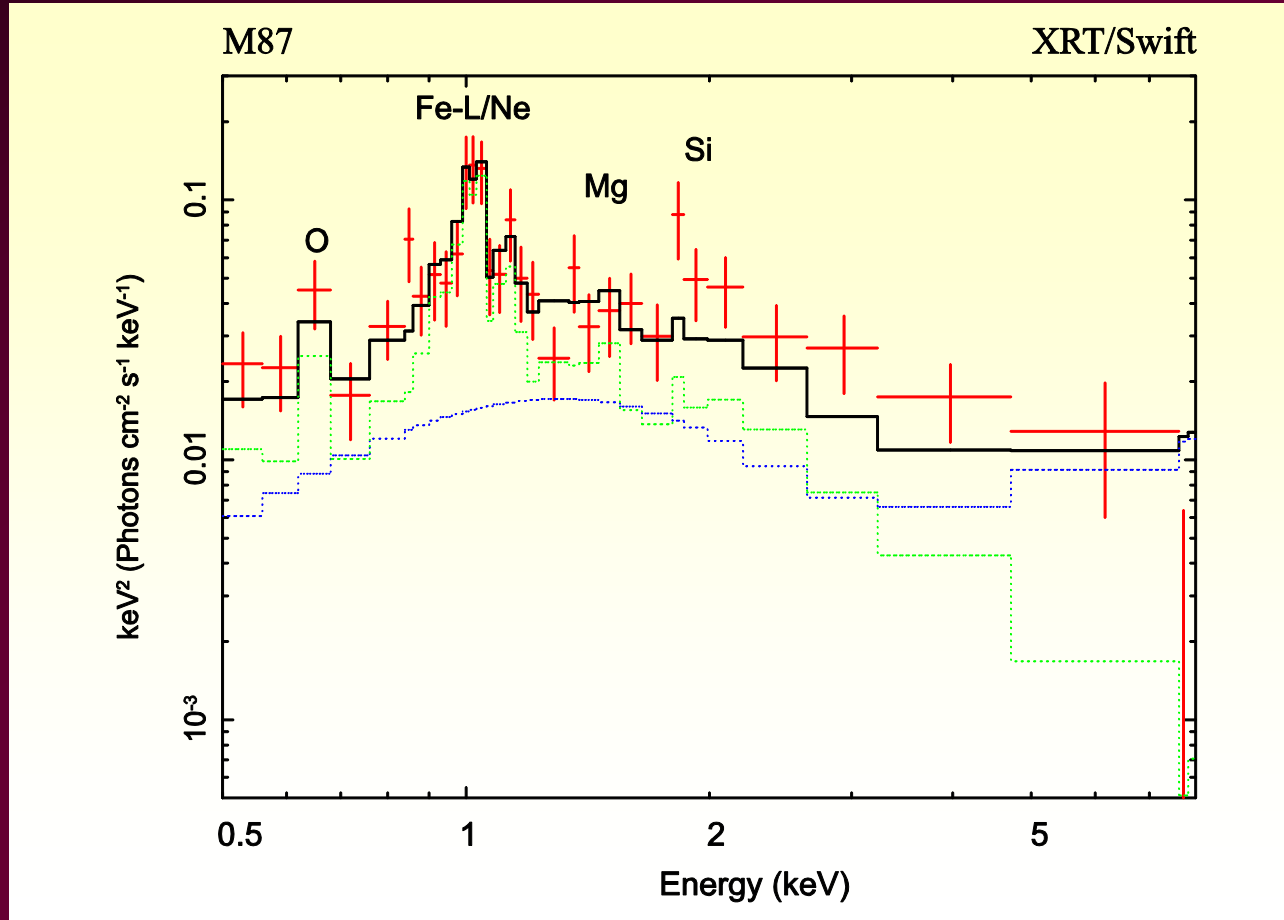
ВерроSAX: Рентгеновский спектр М87



- Модель: $wabs^*(bmc^*highcut + mekal)$



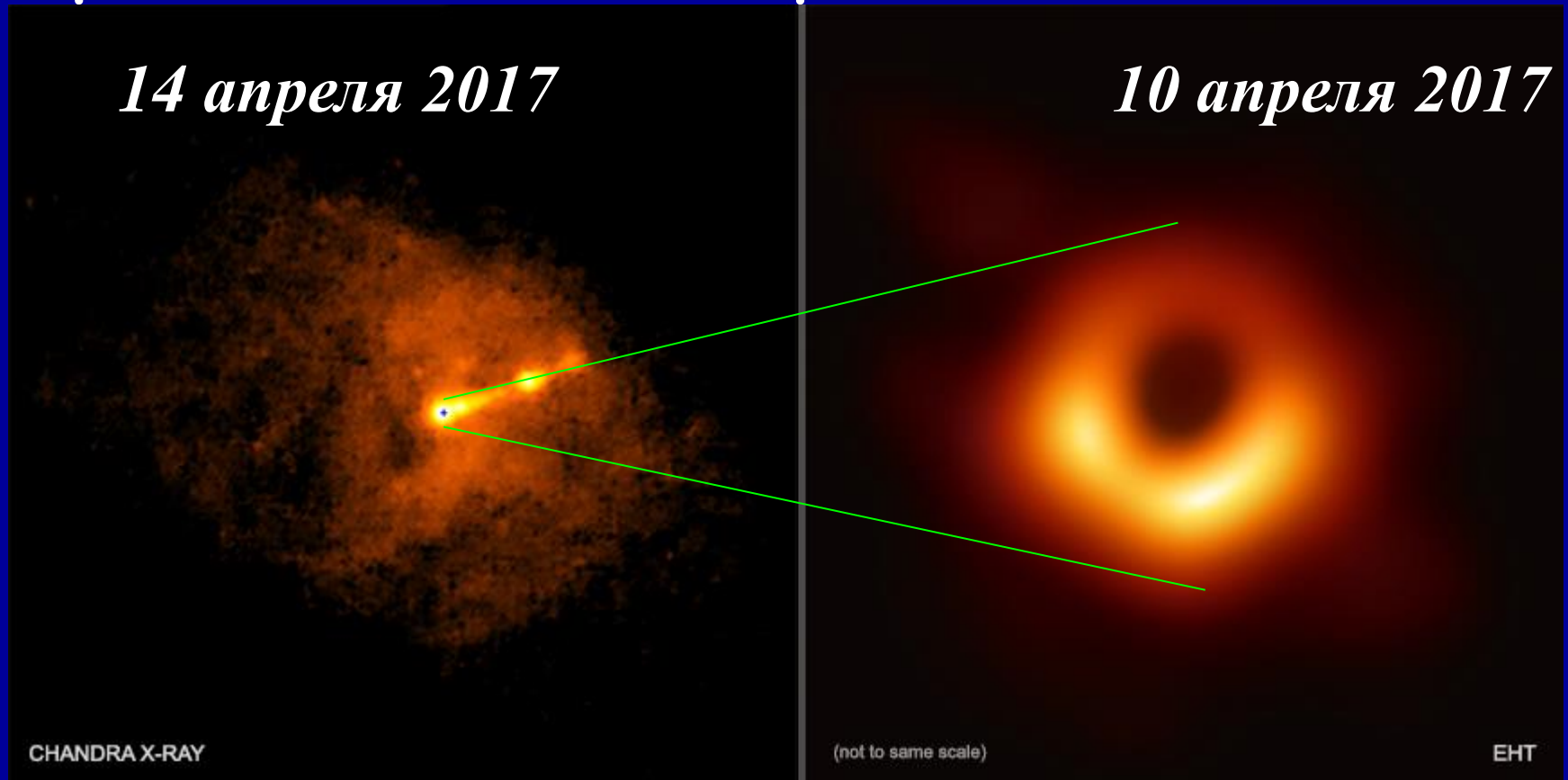
Swift/XRT: Рентгеновский спектр М87



- Модель: $wabs^*(bmc^*highcut+mekal)$



Центр галактики M87 в рентгеновском и радио диапазоне

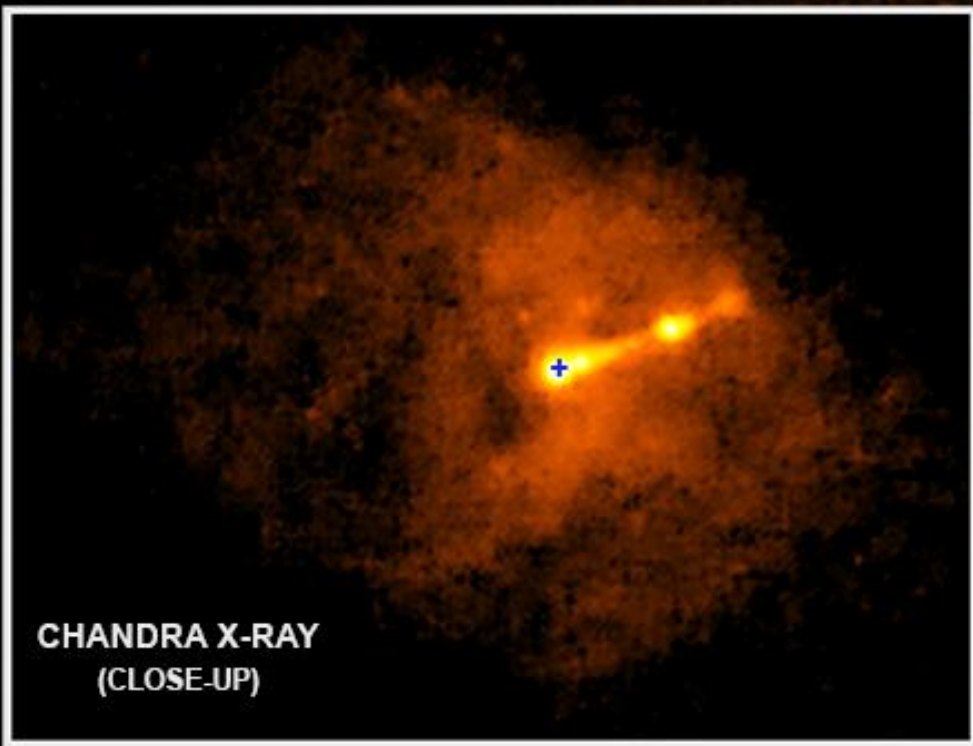
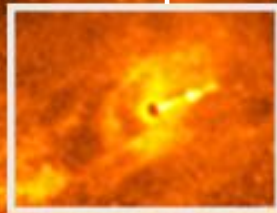


• *Chandra*

Event Horizon Telescope (EHT)



В отличие от радиотелескопов ЕНТ, *Chandra* обладает намного большим полем зрения



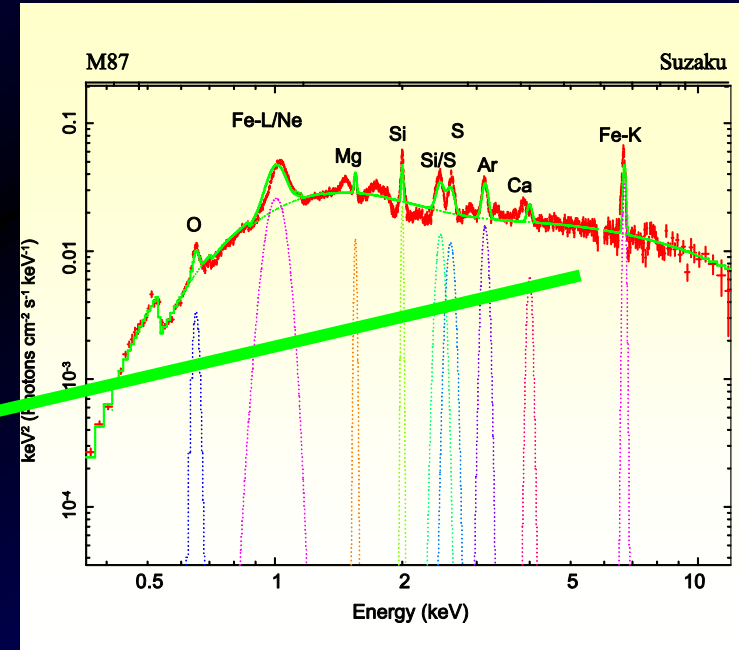
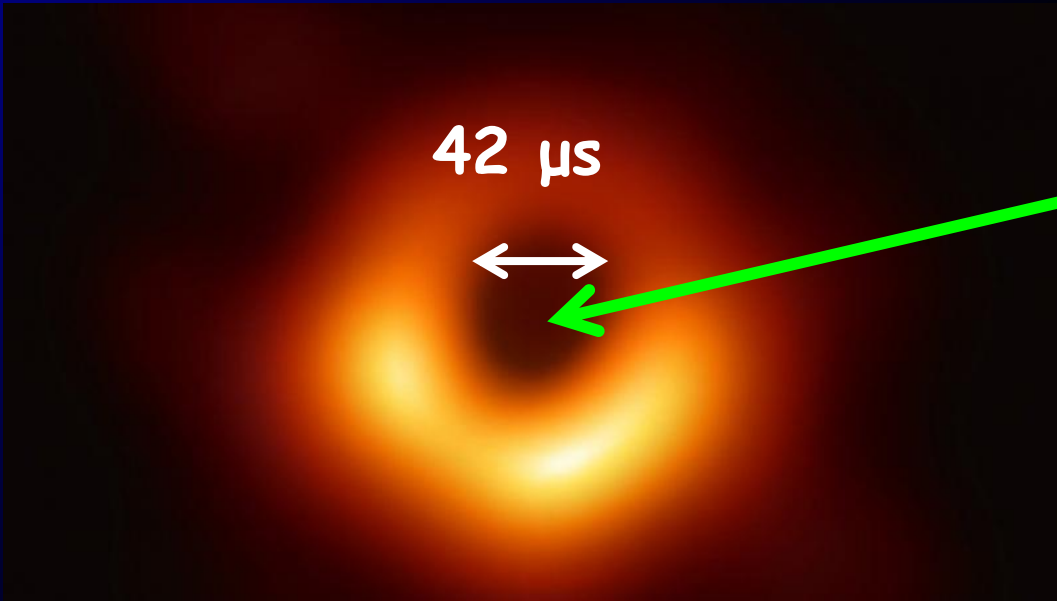
CHANDRA X-RAY
(CLOSE-UP)

CHANDRA X-RAY
(WIDE-FIELD)



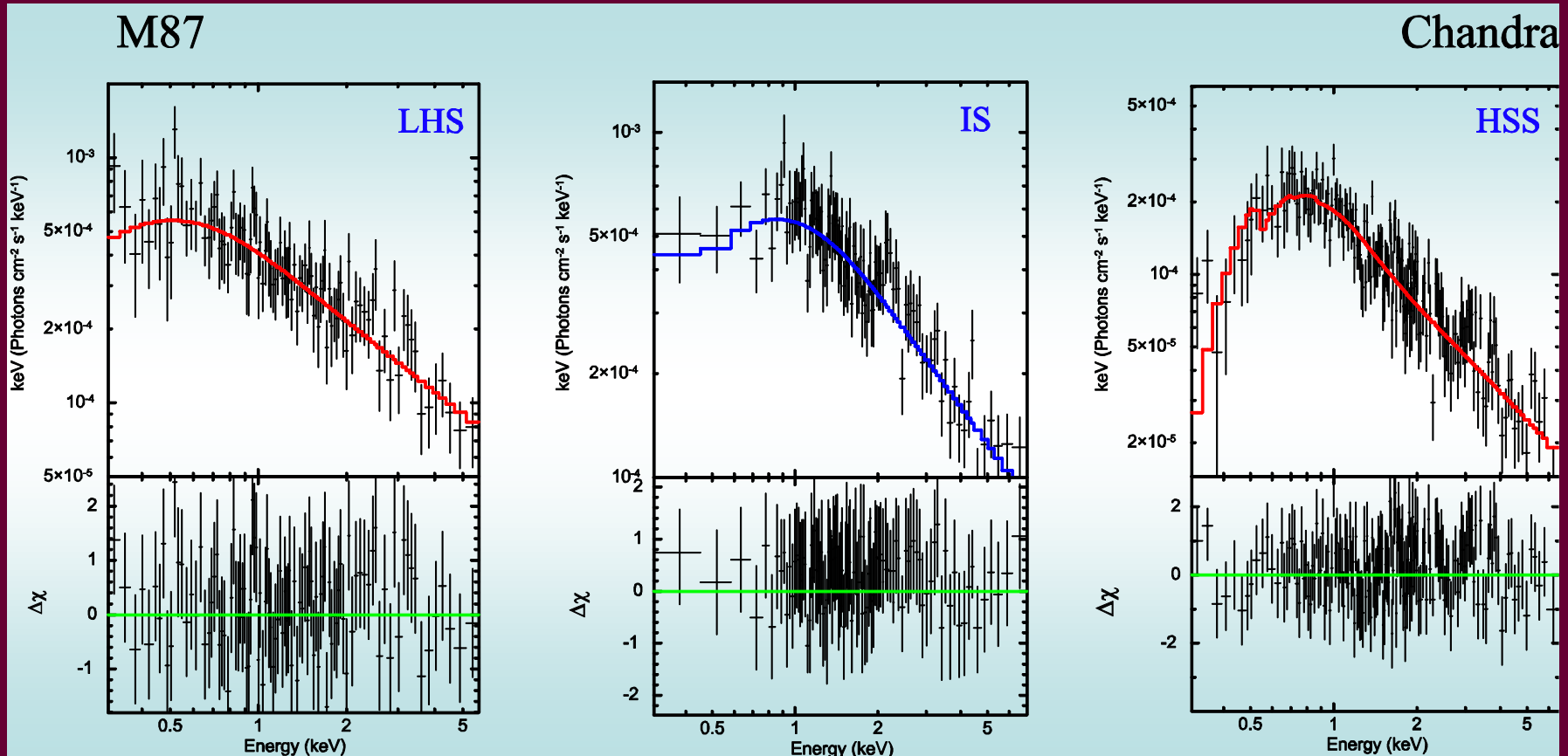
Event Horizon Telescope (EHT) vs X-ray

Radio image: 1.3 mm





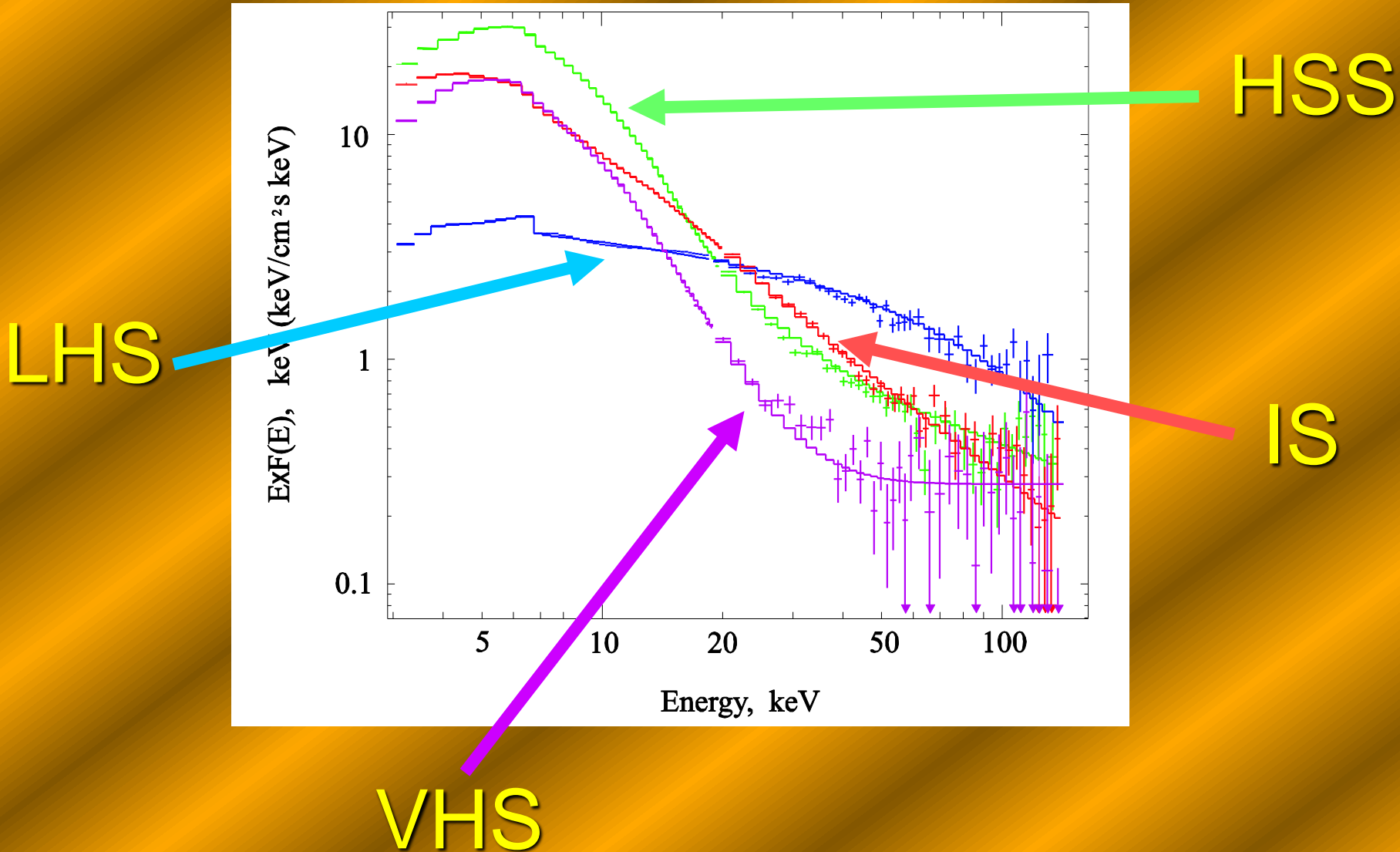
Chandra: РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТР M87



- Модель: wabs*bmc

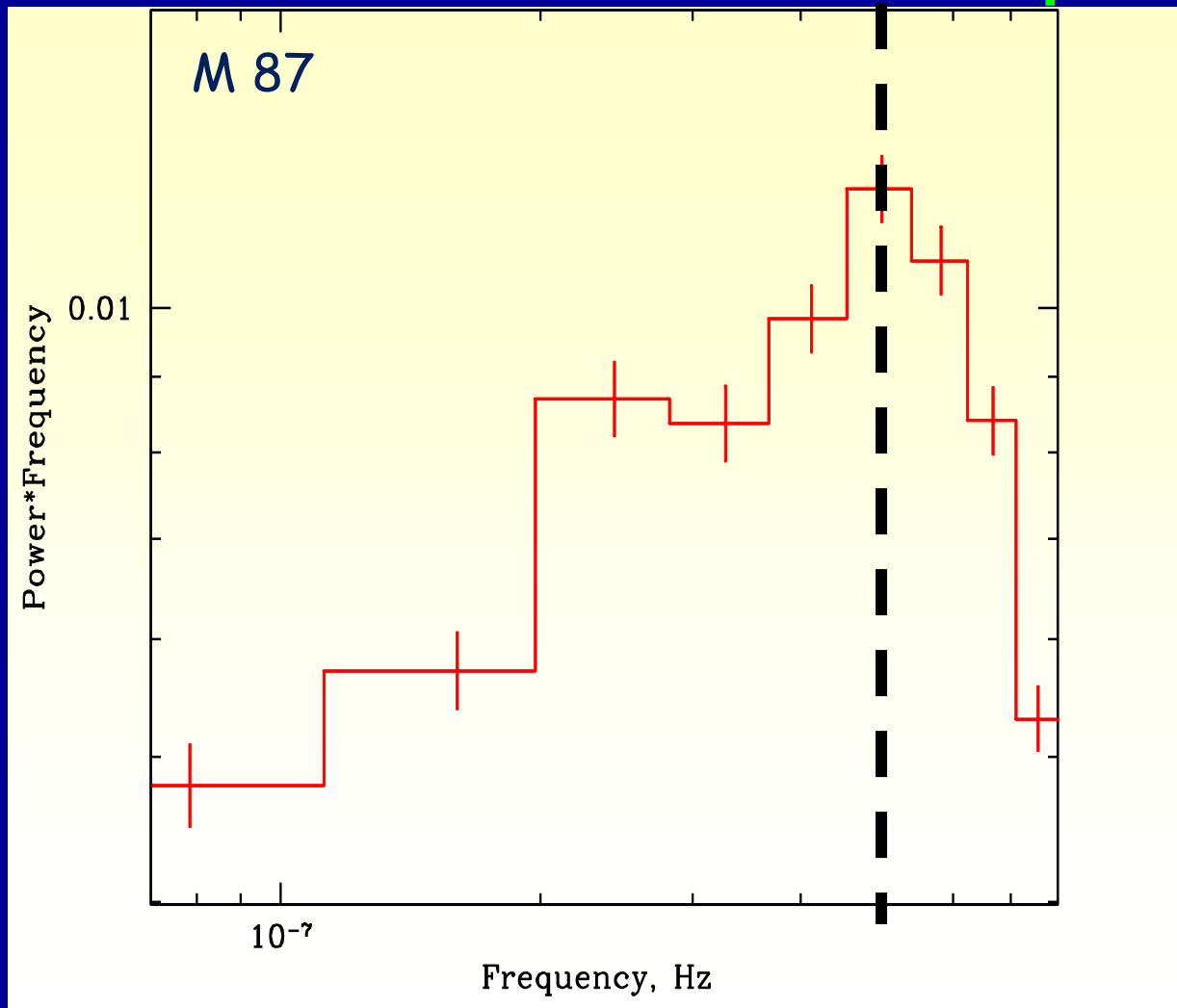


Evolution of energy spectra during outburst (GRS1915+105)



Lc: bintime 200 ks

5×10^{-7} Гц



RXTE/ASM:
Временной
анализ
(2-12 кэВ)



1996-01-06

2010-04-07

Total observational
time ~450 Ms

$v_{QPO} = v_p / R$ R (CC size) $\sim 2 \times 10^{15}$ см \times $[v / 10^8 \text{ см/с}] / [v / 5 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}]$
обычно $v_p \sim 10^8 \text{ см/с}$.



Шварцшильдовские радиусы черных дыр, обладающие разными массами

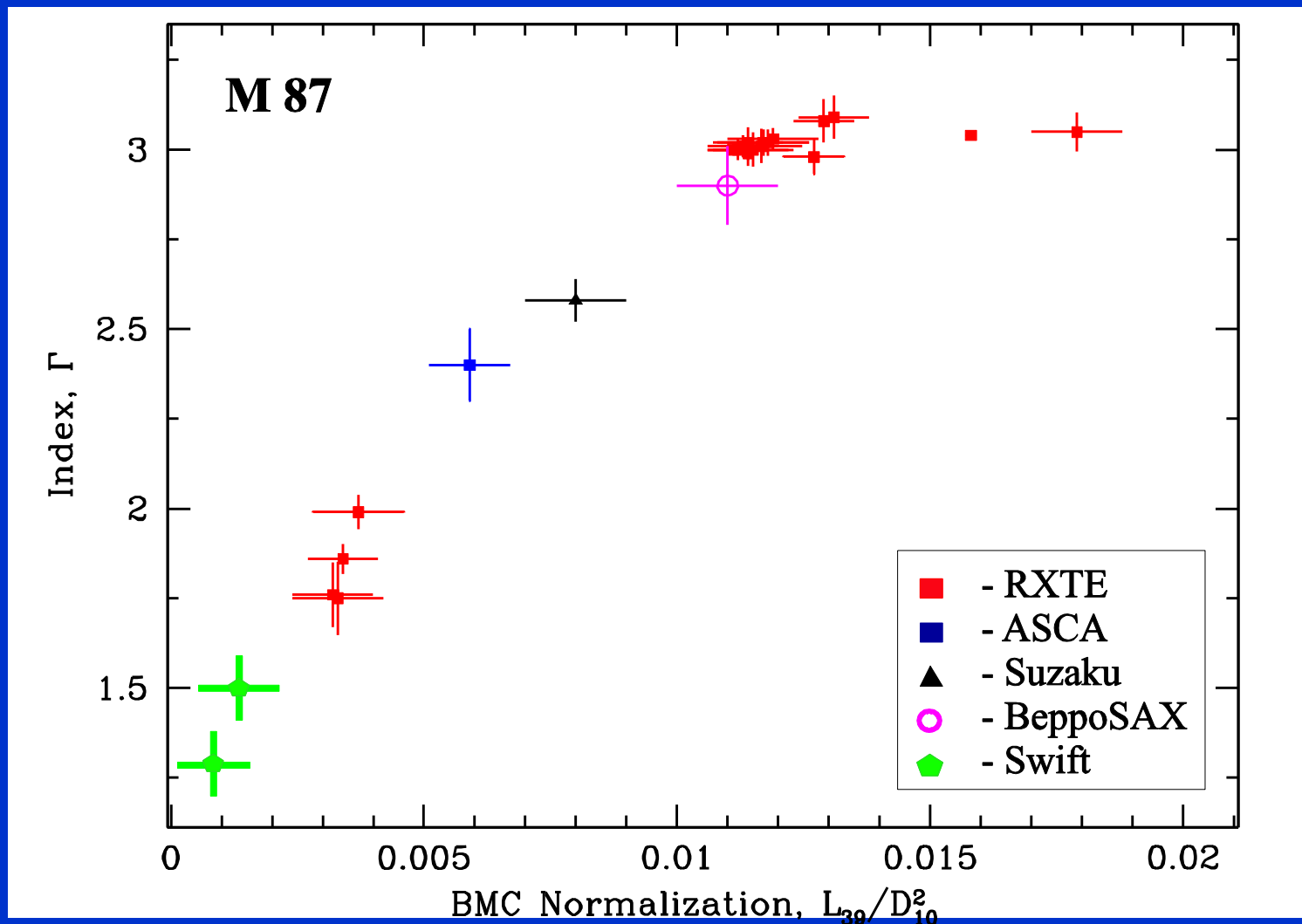
Масса черной дыры	Шварцшильдовский радиус (радиус горизонта событий)
10 т	$13 \cdot 10^{-13}$ А
10^6 т	$13 \cdot 10^{-9}$ А
10^{12} т	$13 \cdot 10^{-3}$ А
10^{13} т	13 А
1 масса Земли	0,8 см
1 масса Юпитера	2,8 м
1 масса Солнца	3 км
2 массы Солнца	6 км
3 массы Солнца	9 км
5 масс Солнца	15 км
10 масс Солнца	30 км
50 масс Солнца	150 км
100 масс Солнца	300 км
10^3 масс Солнца	$3 \cdot 10^3$ км
10^6 масс Солнца	10 световых секунд
10^9 масс Солнца	2,8 свет. часов
10^{12} масс Солнца	117 свет. дней
10^{13} масс Солнца	320 свет. лет

$$r_s = 2Gm/c^2$$

Немецкий астроном Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild, 1873–1916) в последние годы своей жизни, используя уравнения общей теории относительности Эйнштейна, рассчитал гравитационное поле вокруг массы нулевого объема)

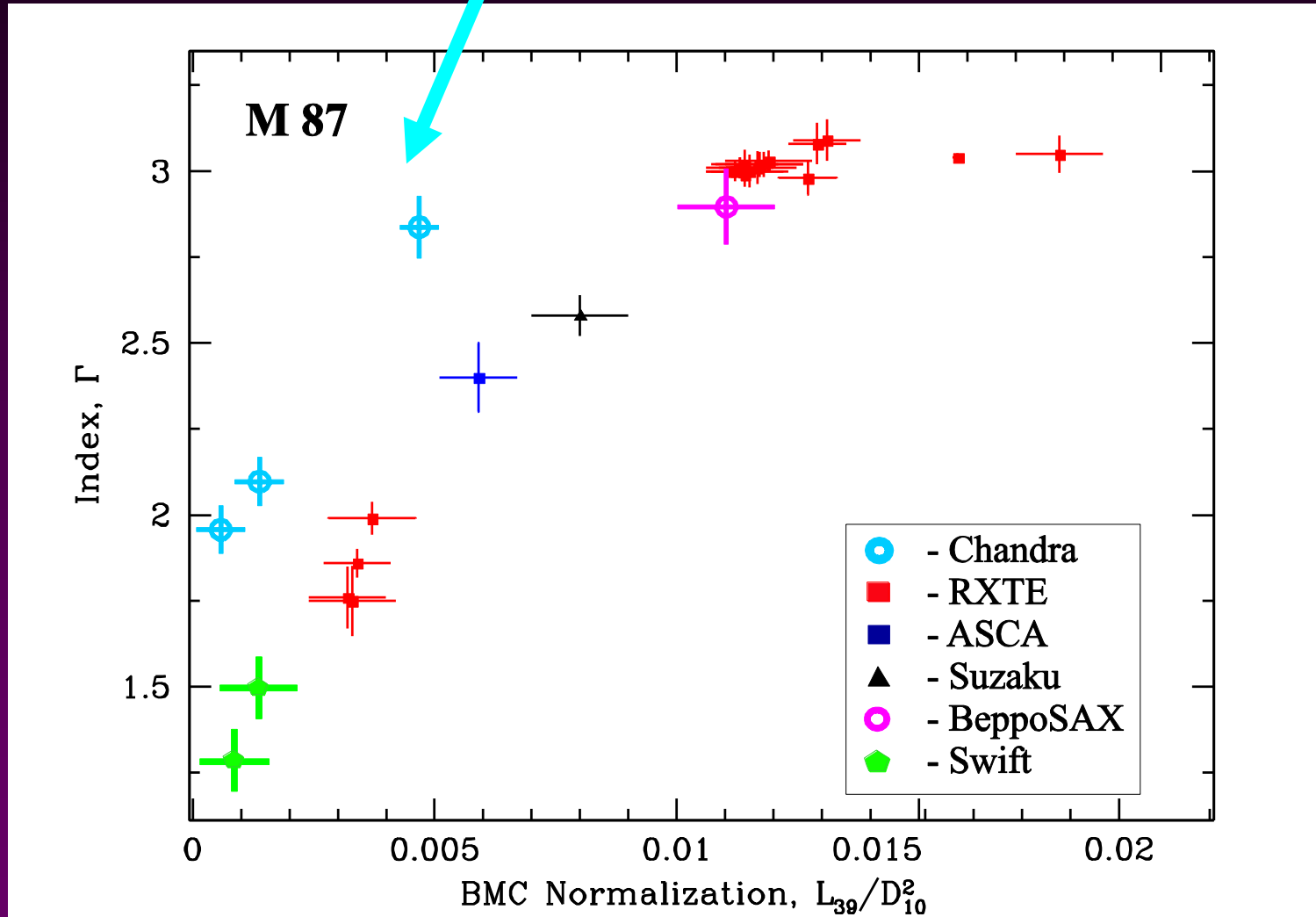


Корреляция фотонного индекса как функция темпа аккреции



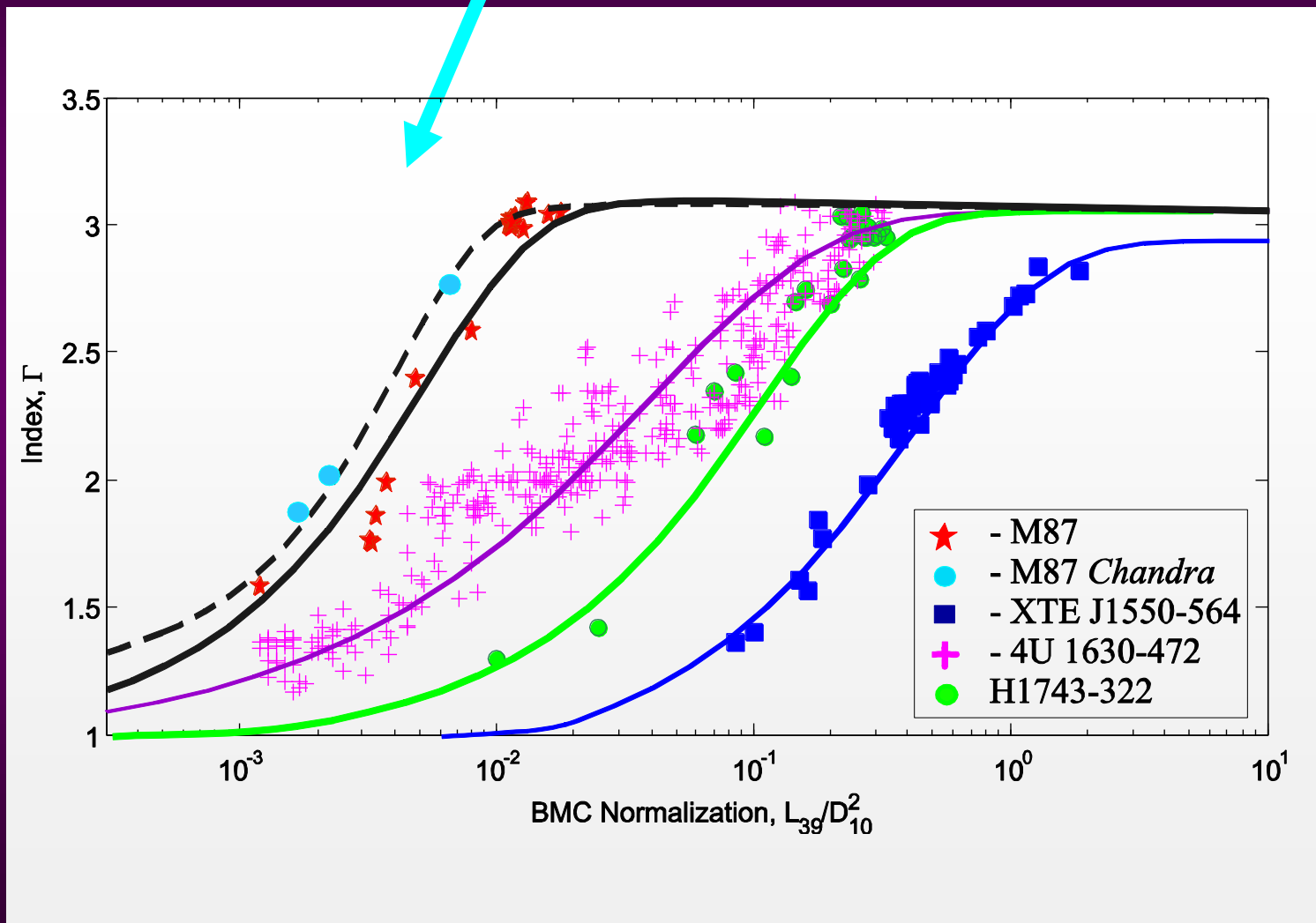


Корреляция фотонного индекса в M87 как функция темпа аккреции с учетом данных Chandra





Корреляция фотонного индекса в М87 как функция темпа аккреции с учетом данных Chandra





Оценка масс ЧД методом масштабирования («скалирования»)

Эмпирическое подобие корреляций



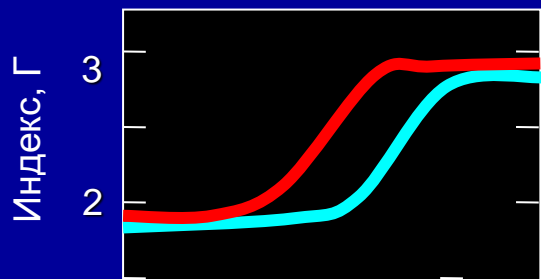
основные физические процессы являются подобными в каждом из этих источников

Условия самоподобия корреляционных кривых метода скалирования:

- ✓ получены в рамках одинаковых Комptonизационных спектральных моделей;
- ✓ характеризуются одинаковыми уровнями насыщения индекса;
- ✓ имеют примерно одинаковые углы наклонной части корреляций.

Shaposhnikov & Titarchuk, ApJ, 2009, 699, 453

Принципы скалирования:



1)

$$s_v = \frac{v_r}{v_t} = \frac{M_t}{M_r},$$

$$M_t = s_v M_r$$

$$f_G = (\cos \theta)_r / (\cos \theta)_t$$

2)

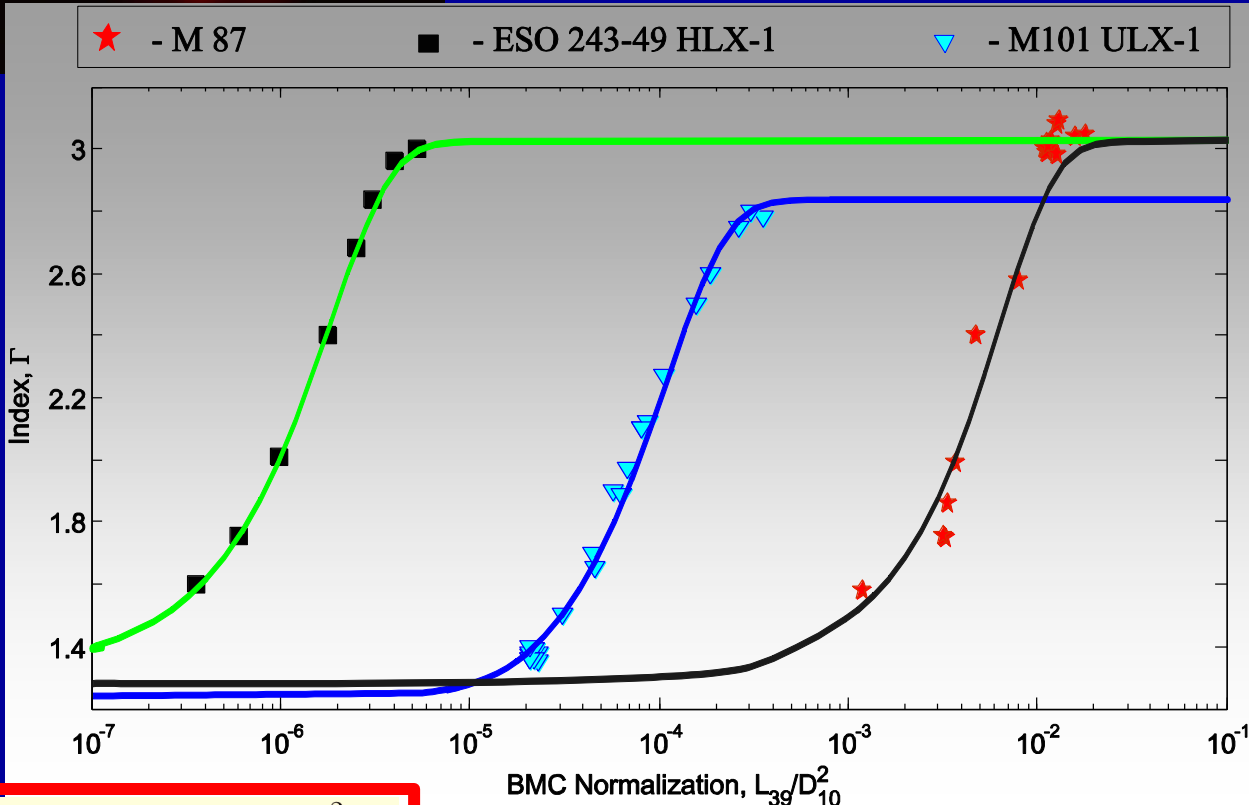
v_{QPO} / \dot{M}

$$\frac{F_r}{F_t} = \frac{L_r}{L_t} \frac{d_t^2}{d_r^2}$$

$$s_N = \frac{N_r}{N_t} = \frac{L_r}{L_t} \frac{d_t^2}{d_r^2} f_G$$

$$M_t = M_r \frac{N_t}{N_r} \left(\frac{d_t}{d_r} \right)^2 f_G$$

Оценка массы ЧД в M87



ESO 243-49:

$M_r = 7 \times 10^4 M_\odot$

$D = 95 \text{ Mpc}$

$N_r = 5 \times 10^{-6}$

M87:

$M_t = ?$

$D = 19 \text{ Mpc}$

$N_t = 0.1$

$$M_t = M_r \frac{N_t}{N_r} \left(\frac{d_t}{d_r} \right)^2 f_G$$

• $M_{87} \sim 7 \times 10^4 M_\odot (0.1 / 5 \times 10^{-6}) (19 \text{ Mpc} / 95 \text{ Mpc})^2 \sim 6 \times 10^7 M_\odot$

IMBHs: ESO 243-49 HLX-1 и M 101 ULX-1

Оценка массы ЧД в M87

H1743-322:

$M_r = 13.3 M_\odot$

$D = 9.1 \text{ kpc}$

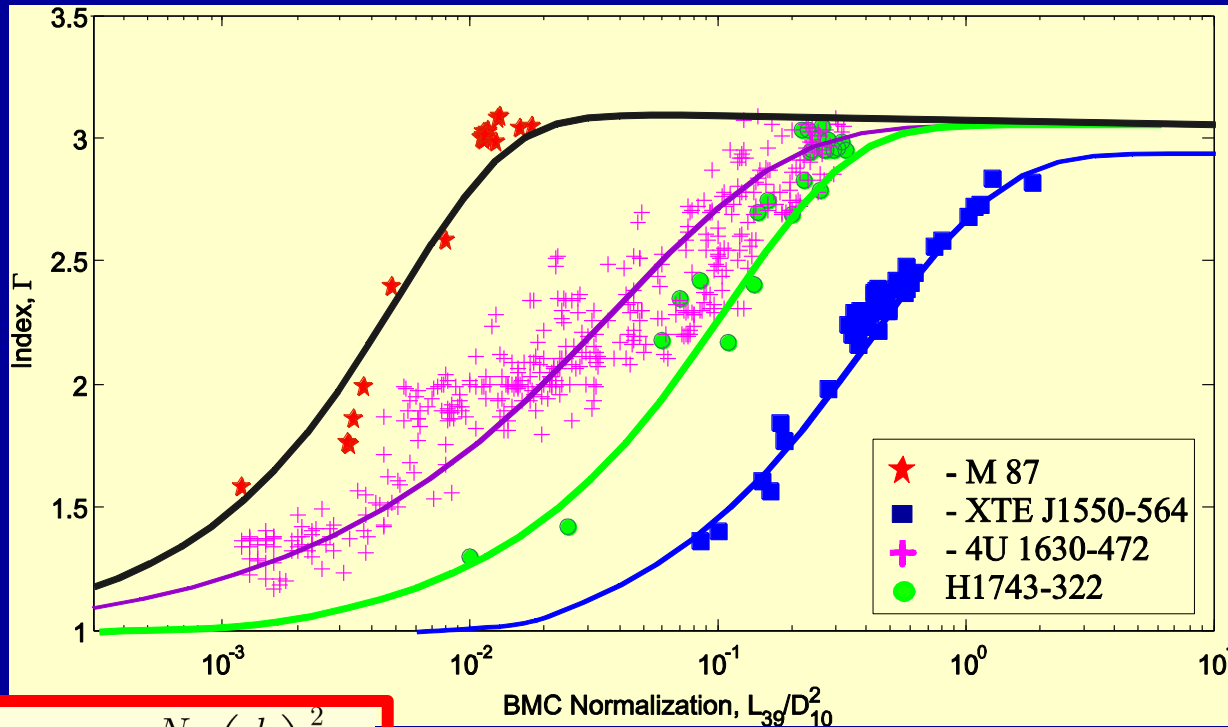
$N_r = 0.1$

M87:

$M_t = ?$

$D = 19 \text{ Mpc}$

$N_t = 0.1$



$$M_t = M_r \frac{N_t}{N_r} \left(\frac{d_t}{d_r} \right)^2 f_G$$

• $M_{87} \sim 13.3 M_\odot (0.1/0.1) (19 \text{ Mpc}/9 \text{ kpc})^2 \sim 6 \times 10^7 M_\odot$

XTE J1550-564, 4U 1630-472, GRS 1915+105 и H 1743-322



BH masses and distances

Source	$M_{\text{disk}} (M_{\odot})$	$i_{\text{orb}} (\text{deg})$	$d (\text{kpc})$	$M_{\text{lum}} (M_{\odot})$	$M_{\text{scal}} (M_{\odot})$
GRO J1655-40	$6.3 \pm 0.3^{(1,2)}$	$70 \pm 1^{(1,2)}$	$32 \pm 0.2^{(3)}$	...	...
Cyg X-1	$6.8 - 13.3^{(4,5)}$	$35 \pm 5^{(4,5)}$	$2.5 \pm 0.3^{(4,5)}$	...	7.9 ± 1.0
NGC 4051 ^(6,7,8,9,10)	...	...	$\sim 10 \times 10^3$	...	$\geq 6 \times 10^3$
NGC 7469 ^(11,12,13)	...	...	$\sim 70 \times 10^3$	...	$\geq 3 \times 10^6$
XTE J1550-564 ^(14,15,16)	9.5 ± 1.1	72 ± 5	~ 6	...	10.7 ± 1.5^c
H 1743-322 ⁽¹⁷⁾	...	75 ± 3	8.5 ± 0.8	...	13.3 ± 3.2^c
GRS 1915+105 ⁽¹⁸⁾	...	60-70	8.5 ± 0.8	...	13.3 ± 3.2^c
4U 1630-47 ⁽¹⁹⁾	...	≤ 70	$\sim 10 - 11$	...	9.5 ± 1.1
M101 ULX-1 ^(20,21,22,23,24)	$3 - 1000$	60 ⁽²⁵⁾	$(6.4 \pm 0.5) \times 10^3,$ $(7.4 \pm 0.6) \times 10^3$	...	$\geq 3.2 \times 10^4, \geq 4.3 \times 10^4$
ESO 243-49 HLX-1 ^(26,27)	...	70 ⁽²⁸⁾	$\sim 95 \times 10^3$	$8 \pm 4 \times 10^4$	$\geq 7.2 \times 10^4$
3C 454.3 ⁽²⁹⁾	...	$\leq 4^{(29)}$	$\sim 30 \times 10^3$	...	$\sim 3.4 \times 10^3$
M87 ^(30,31)	...	$\leq 20^{(31)}$	$(16.8 \pm 0.8) \times 10^3$	$6.5 \pm 0.7 \times 10^9$	$\sim 5.6 \times 10^7$

Оценка массы ЧД в М87
методом скалирования $\sim 6 \times 10^7 M_{\odot}$





Заключение

- Проанализированы данные M87, полученные со спутников *RXTE, Suzaku, ASCA и BeppoSAX*
- Рентгеновский спектр M87 хорошо описывается в модели Комptonизации + линии (Gauss/mekal)
- Обнаружено насыщение индекса в M87
- Временной анализ указывает на размер СС $L \sim 5 \times 10^{15}$ см и, соответственно, массу ЧД в M87 порядка $10^8 M_{\odot}$
- Получены оценки массы ЧД методом скалирования $> 6 \times 10^7 M_{\odot}$, что дает близкий результат по временному анализу

■ Проанализированы данные M87, полученные со спутников *RXTE*, *Suzaku*, *ASCA* и *BeppoSAX*

■ Рентгеновский спектр M87 хорошо описывается в модели Комptonизации + линии (*Gauss/mekal*)

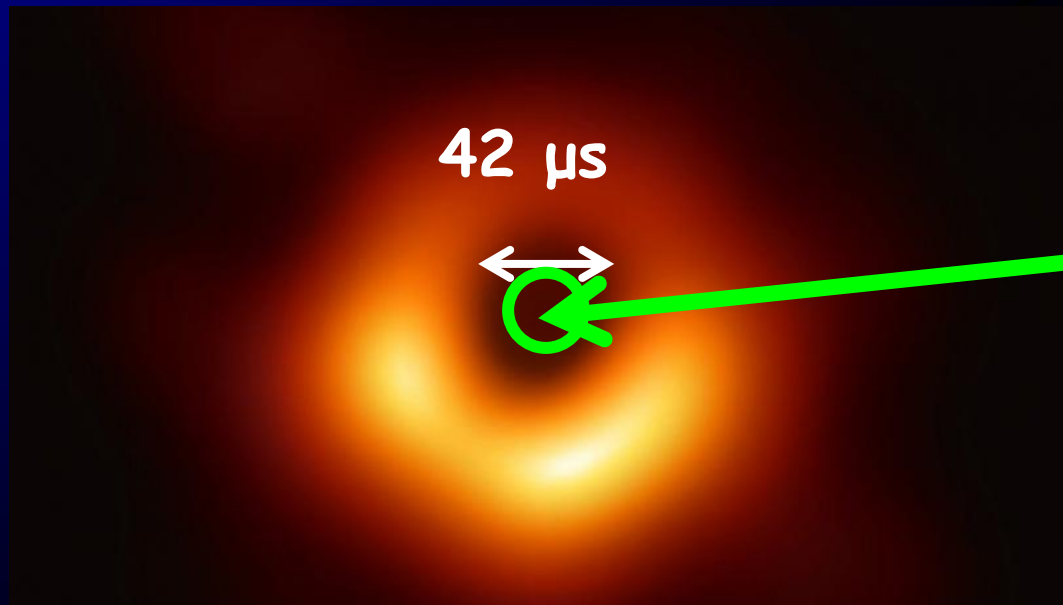
■ Обнаружено насыщение индекса в M87

■ Временной анализ указывает на размер СС $L \sim 5 \times 10^{13}$ см и, соответственно, массу ЧД в M87 порядка $10^8 M_{\odot}$

■ Получены оценки массы ЧД

Черная дыра в M87 оказывается «мельче», чем это считалось раньше

Radio image: 1.3 мм

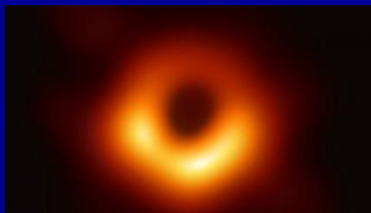
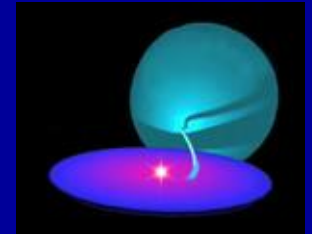


Рентгеновское
излучение ЧД



Разные типы черных дыр

- ЧД звездных масс ($5-10 M_{\odot}$)
- Сверхмассивные ЧД ($10^5-9 M_{\odot}$)



- ЧД промежуточных масс ($100-10^4 M_{\odot}$)
- Первоначальные ЧД



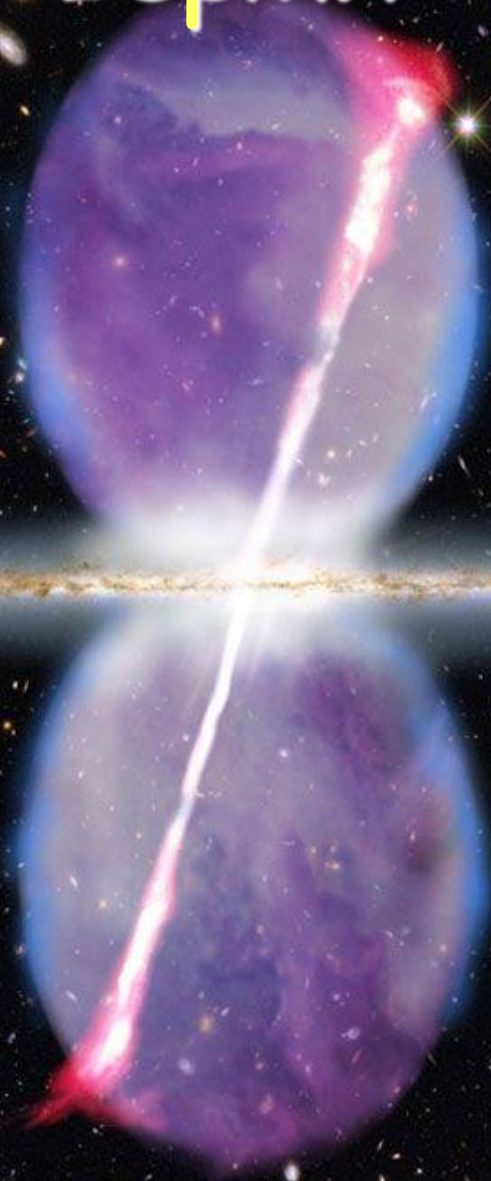
«Пузыри Ферми»

25 тыс
свет. лет
(~6 крс)



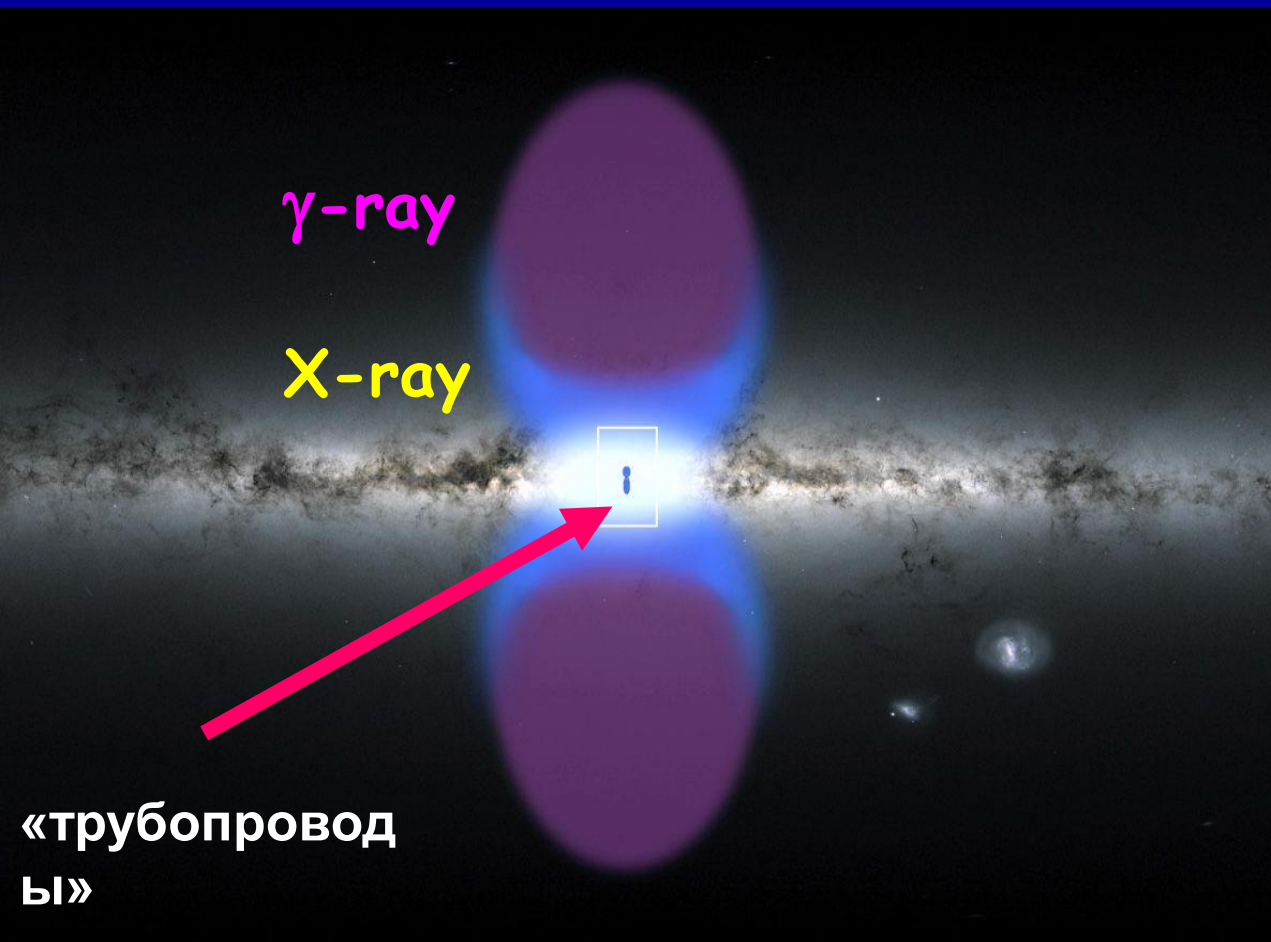
$$M_{smbh} \sim 4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

Выше и ниже
плоскости Галактики
над ними выступает
пара гигантских
«пузырей Ферми» —
областей,
излучающих в
рентгеновском и
гамма-диапазоне.





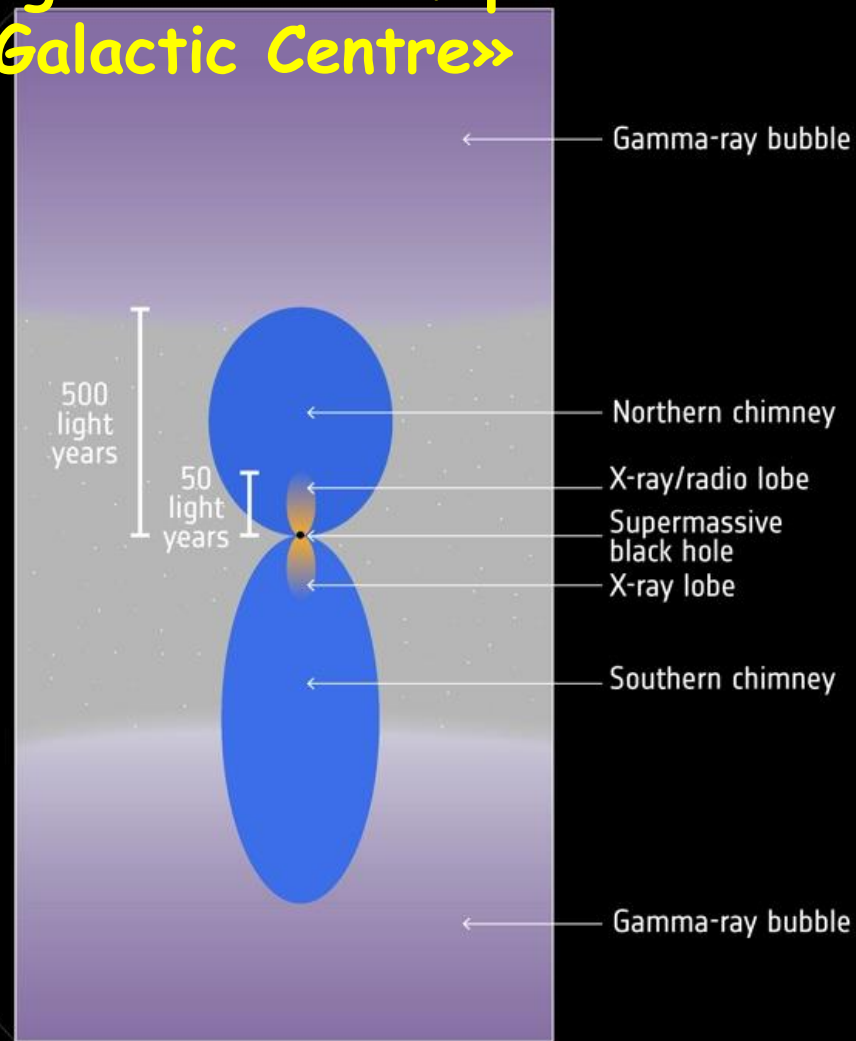
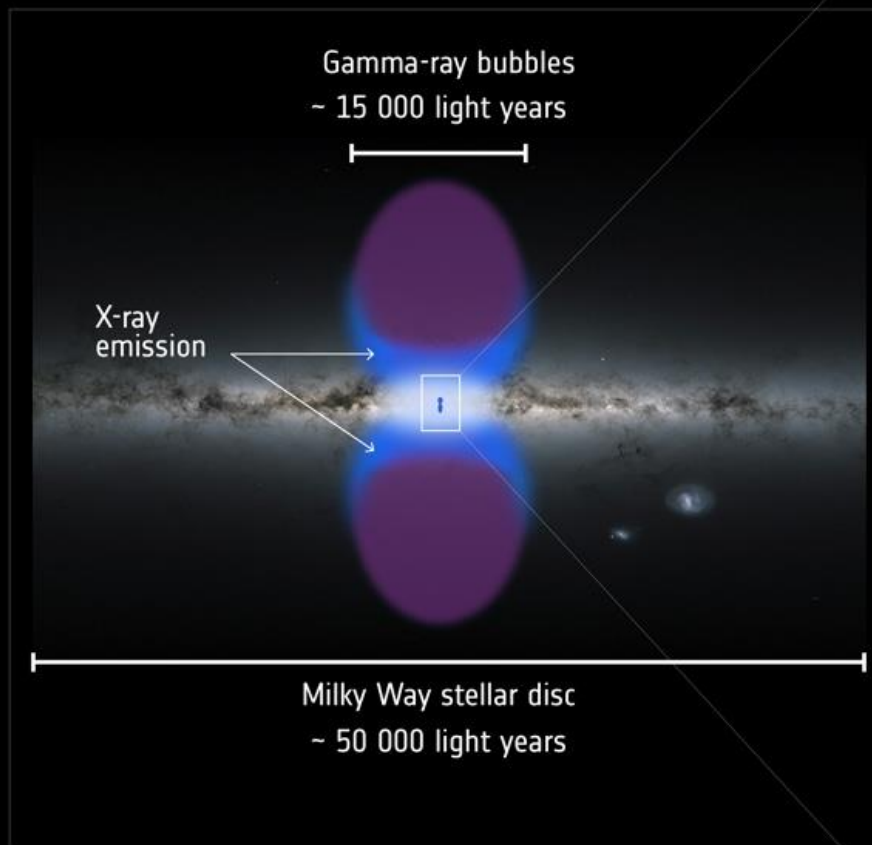
Наблюдения XMM-Newton позволили напрямую связать пузыри Ферми с ядром Млечного Пути



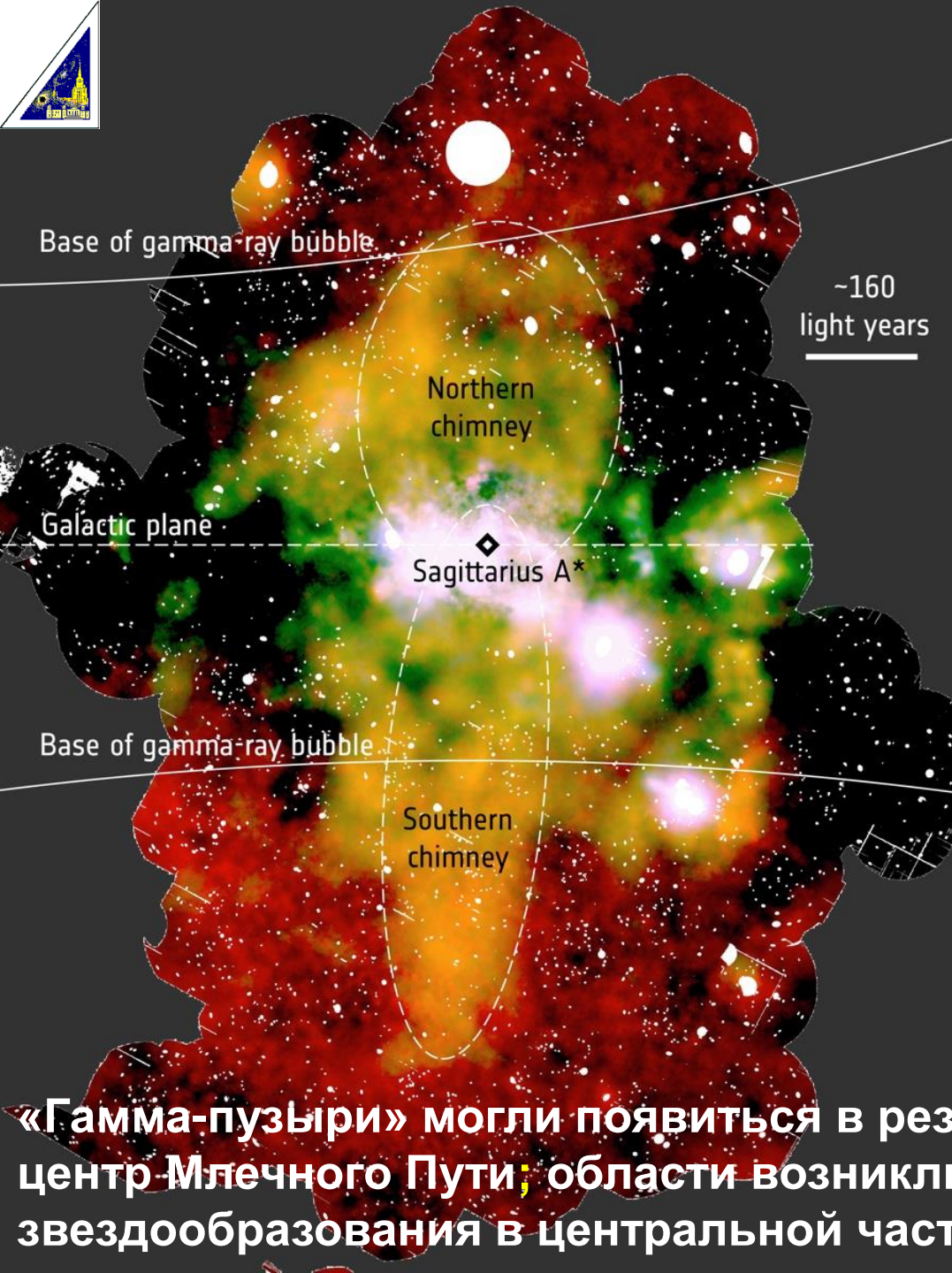
- Ядро нашей Галактики может терять вещество и энергию через пару «трубопроводов» — структур, уходящих в огромные пузыри Ферми, которые раздуваются по ее сторонам



«An X-ray chimney extending hundreds of parsecs above and below the Galactic Centre»



G. Ponti, F. Hofmann, E. Churazov, M. R. Morris, F. Haberl, K. Nandra, R. Terrier, M. Clavel & A. Goldwurm 2019, *Nature*, 567, 347



XMM-Newton: «Пузыри Ферми»

От сверхмассивной
черной дыры Стрелец
A* вверх и вниз от
плоскости
поднимаются
северная и южная
«трубы», а над ними
видны нижние части
гигантских пузырей
Ферми,

*Ponti et al. 2019, Nature,
567, 347*

«Гамма-пузыри» могли появиться в результате «закачки» энергии в центр Млечного Пути; области возникли из-за интенсивного процесса звездообразования в центральной части Галактики.



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



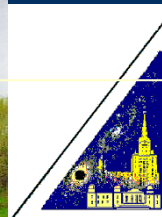


Нейтронные звезды

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

БАЗИС



Повседневные представления - ассоциации

➤ а) Белый карлик ?



➤ б) Нейтронная звезда ?

➤ в) Черная дыра ?





Нейтронные звезды - это удивительные и непредсказуемые объекты



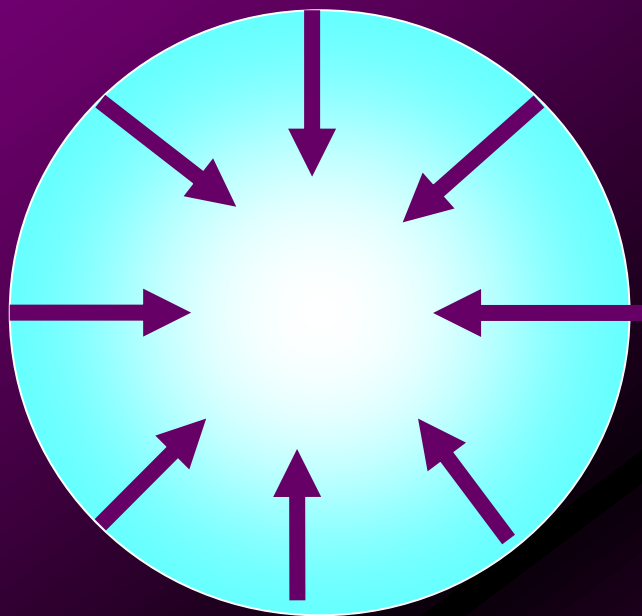
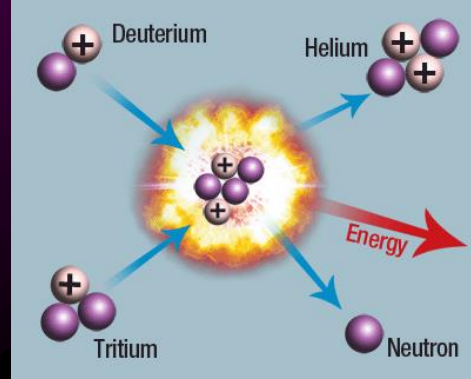


Рождение

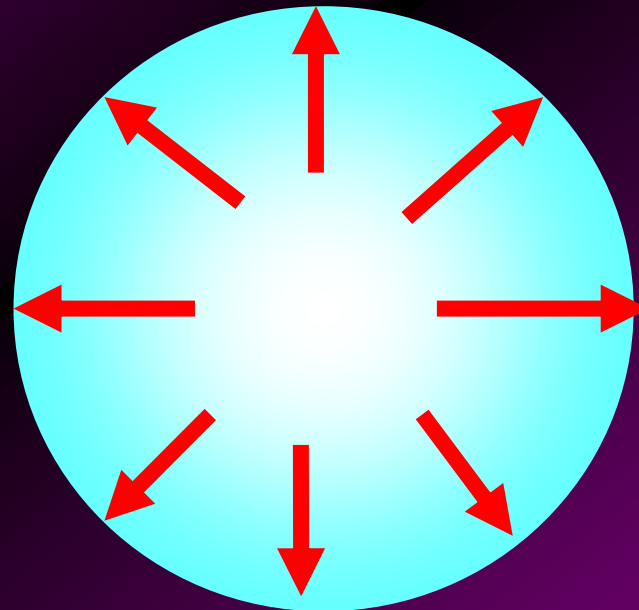




Что удерживает звезду в стабильном состоянии ?



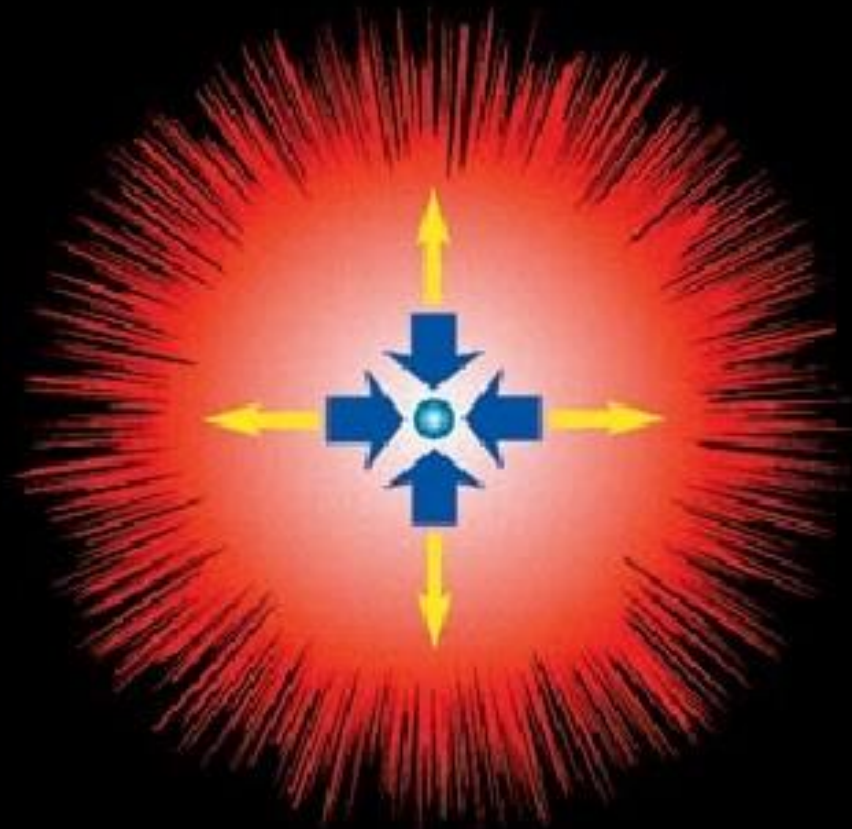
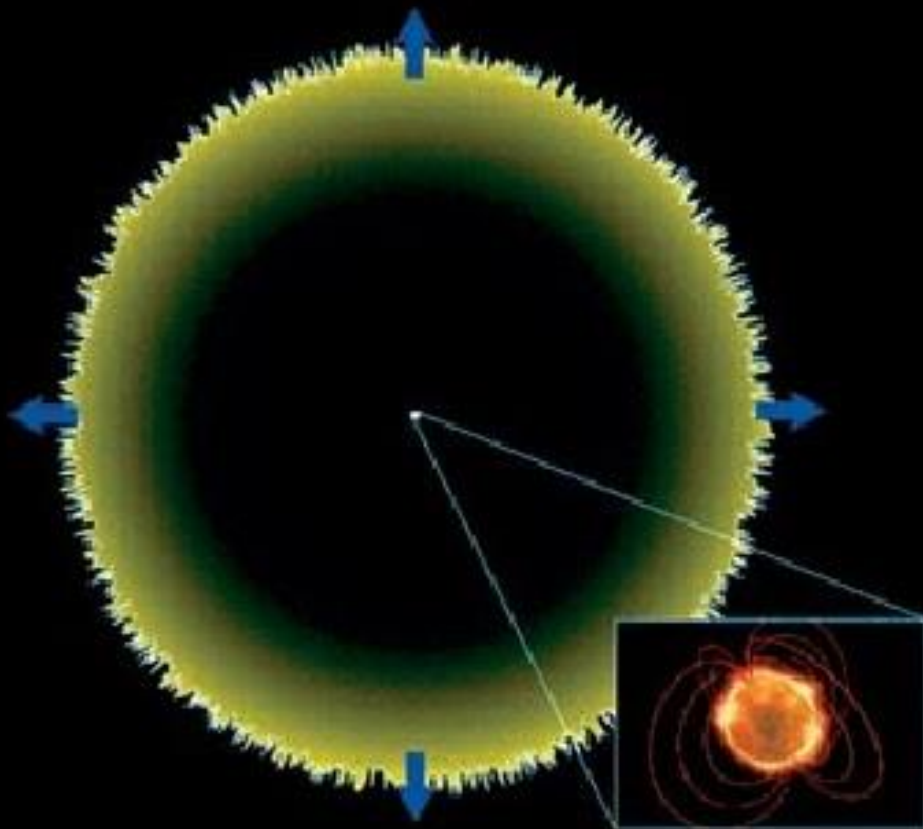
Сила гравитации сжимает звезду к ее центру



Горение H , He , $O_2 \rightarrow$ давление излучения – распирает звезду +газовое давление

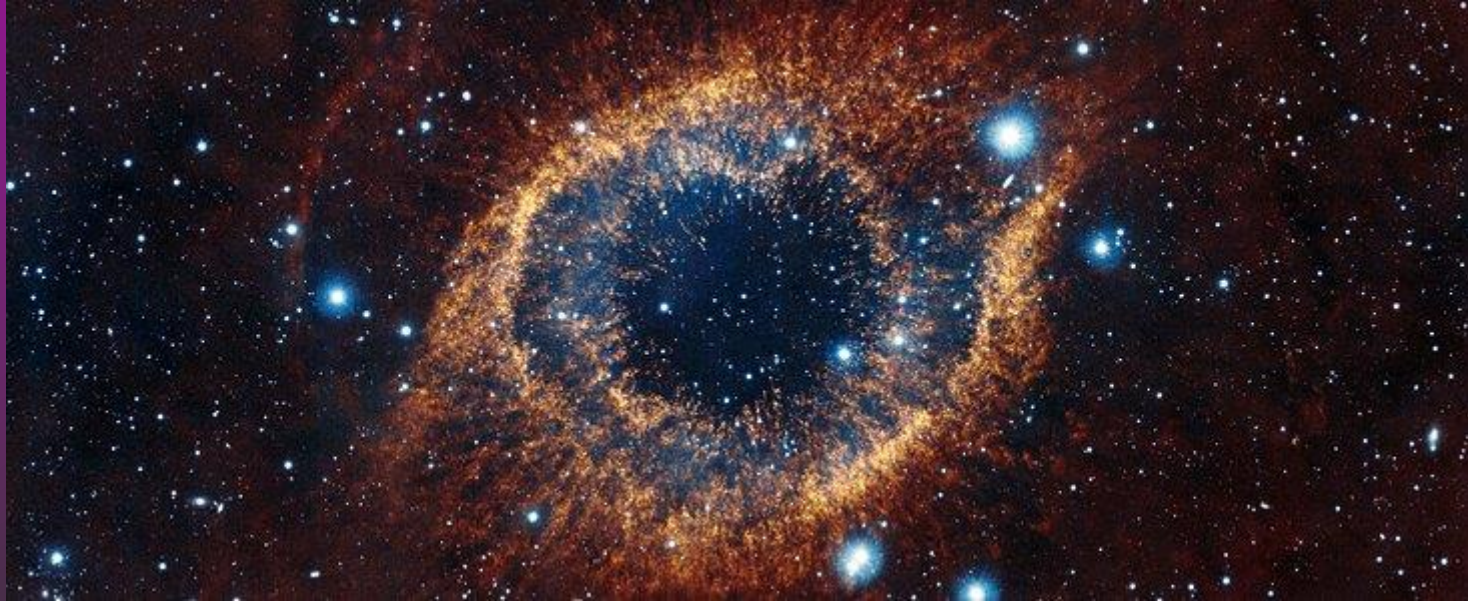


Варианты развития



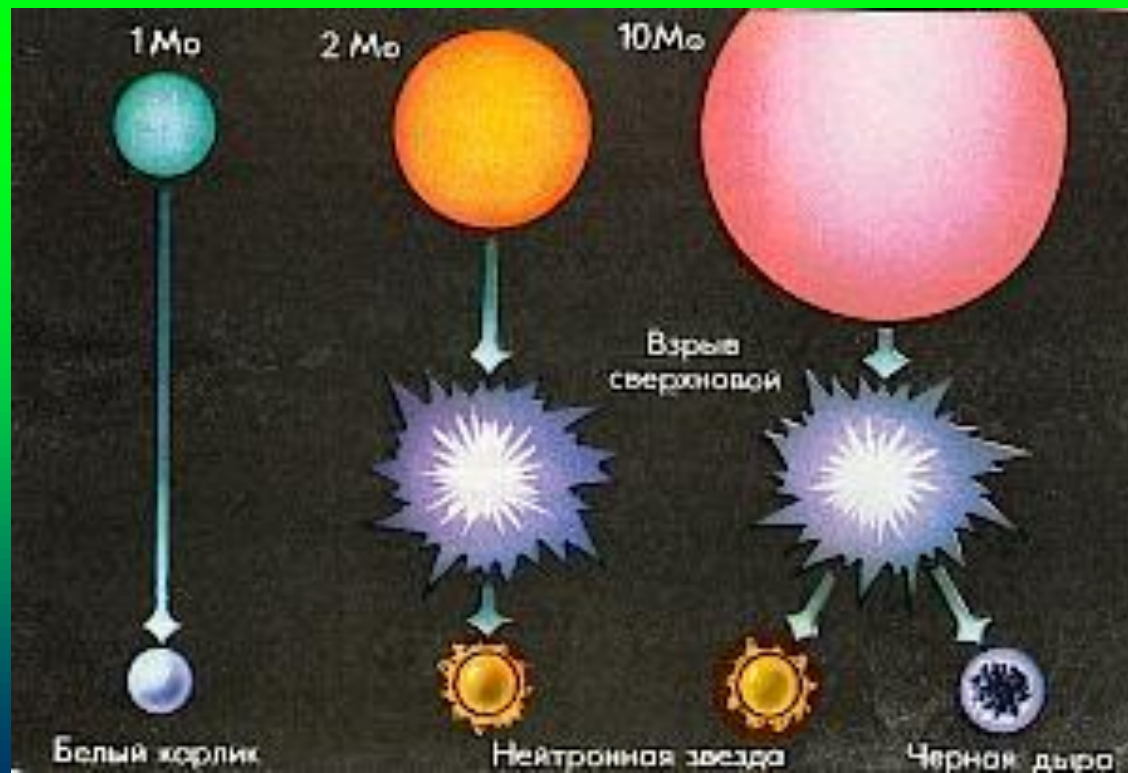


Коллапс и вспышка Сверхновой



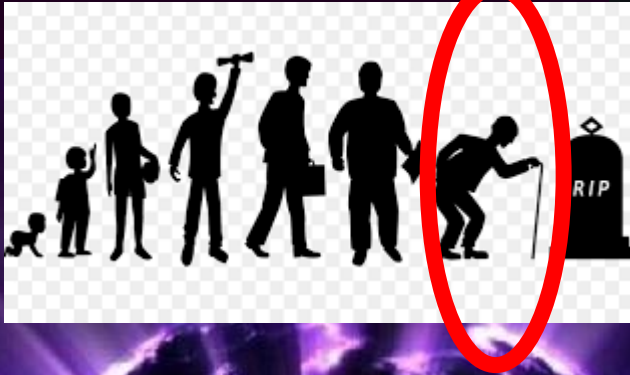
- Постоянно увеличившиеся силы гравитации приводят к трансформации звездного вещества в тепловую энергию. Этот процесс невольно сопровождается колоссальным выбросом – взрывом Сверхновой. Результатом такого катаклизма становится новый космический объект – нейтронная звезда.

Образование компактных источников – в случае, когда гравитация победила





НЗ - ПОЗДНИЙ ЭТАП ЭВОЛЮЦИИ

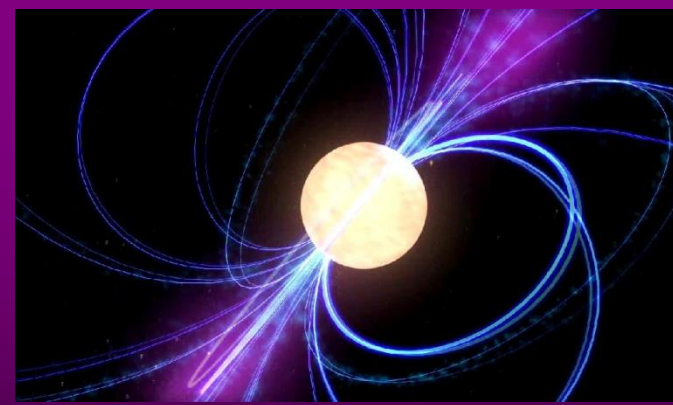


- Мы видим Вселенную во всей красе, наблюдая жизнь звезд, этапы эволюции **и момент предсмертной агонии**. Смерть звезды – это всегда грандиозное и яркое событие. Чем крупнее и массивнее звезда, тем масштабнее катаклизм.





Размер и масса НЗ



- Нейтронные звезды являются финальным этапом жизни массивных звезд и являются компактными объектами. Обычная нейтронная звезда имеет массу 1.5-2 масс Солнца и радиус всего 10-20 км.

Нейтронные звезды не очень массивны



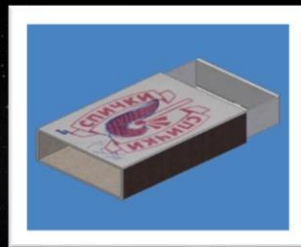
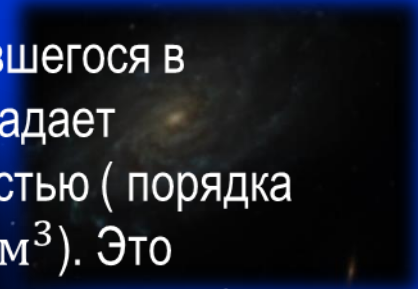


Нейтронная звезда в масштабах центра г. Лондон



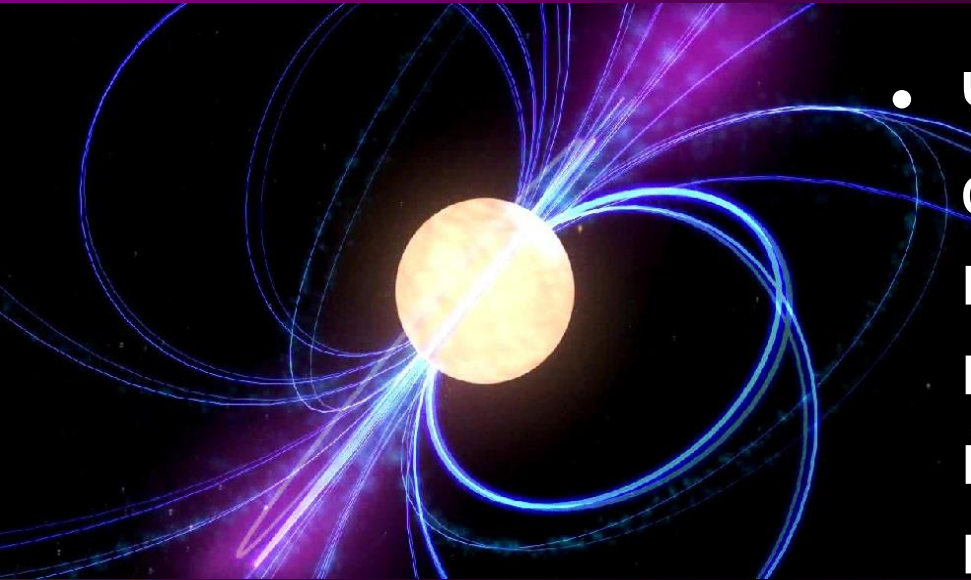


Вещество образовавшегося в результате тела обладает невероятной плотностью (порядка 2,8 000 000 000 т на м³). Это примерно как гора Эверест в объёме спичечного коробка. При такой плотности протоны атомов вжимаются в электроны и образуют нейтроны.





Вращение НЗ



- Чтобы такому плотному объекту не схлопнуться в черную дыру, ему нужна противодействующая гравитации сила.

• В этом случае — это центробежная сила, поскольку скорость вращения нейтронной звезды составляет порядка тысячи оборотов в секунду.

Случаи «антисбоев» НЗ

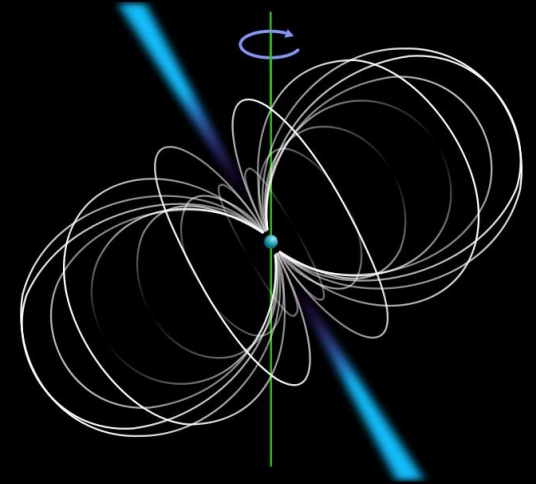


- Группа астрономов (рук. *Victoria Kaspi*) из *Университета Макгилла* (Канада), по данным *Swift*, впервые обнаружили нейтронную звезду, **внезапно резко замедлившую скорость своего вращения.**
- Чтобы правильно оценить находку, достаточно вспомнить, что в норме НЗ довольно быстро вращаются. Энергия их вращения колоссальна, поскольку, **несмотря на малые размеры, чайная ложка их вещества имеет массу в миллиарды тонн.**





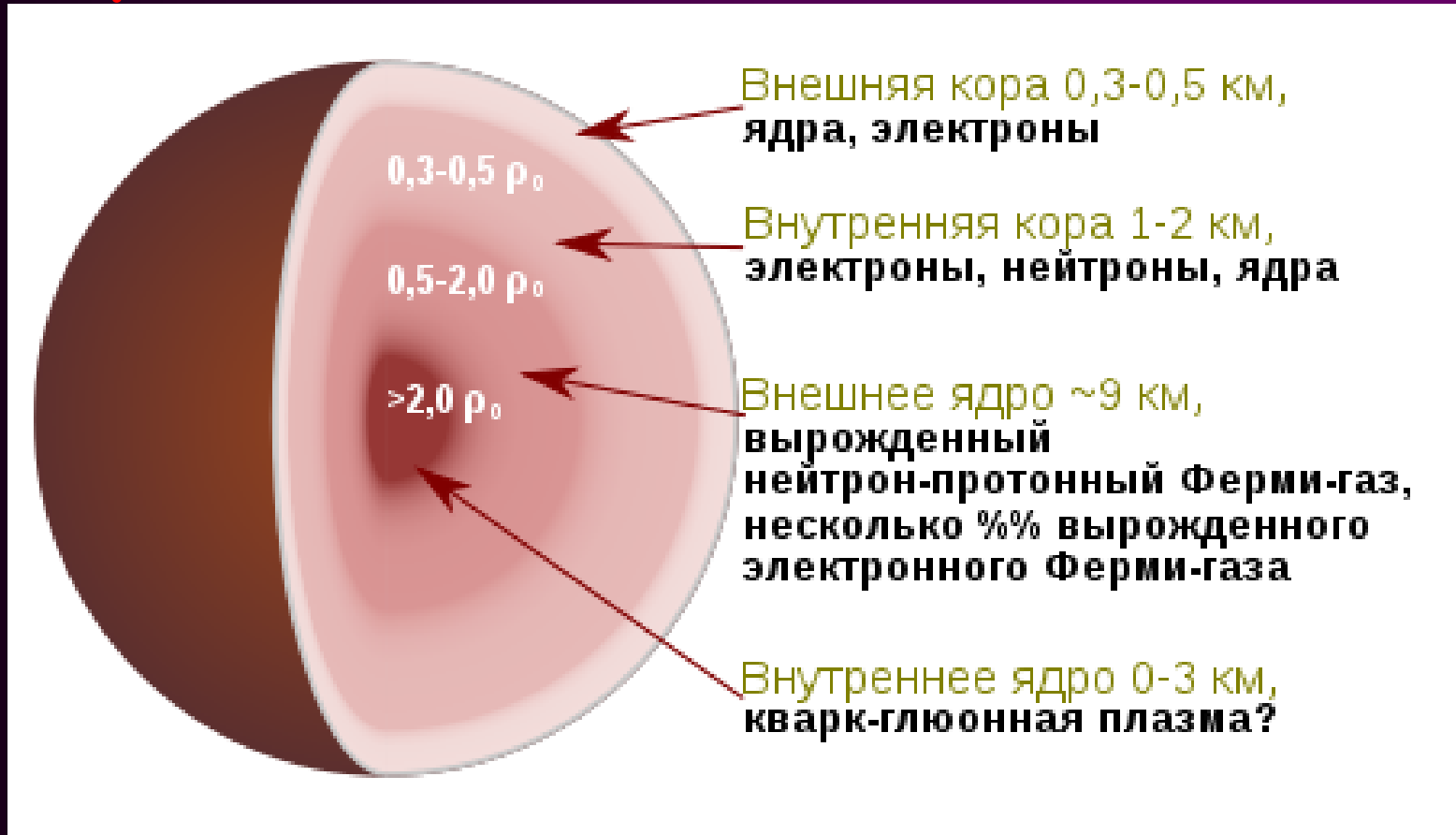
«Глитчи»:



- Периодически с НЗ что-то происходит, из-за чего они резко ускоряются. Такое событие астрономы называют глитчем (от англ. «сбой»).
- Если обычно скорость вращения НЗ очень плавно падает из-за торможения, вызываемого выбросами еѳ излучения и частиц высоких энергий, во время глитча она, напротив, быстро возрастает.



Строение НЗ

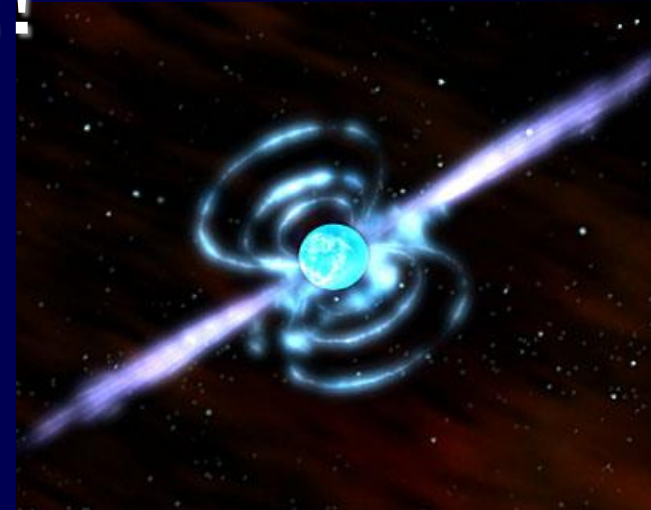


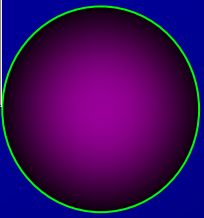
- Нейтронная звезда носит такое название именно потому, что она в основном состоит из **сверхтекучих нейтронов**. Из чего состоит ядро нам до сих пор не ясно, но вероятно оно состоит из кварк-глюонной плазмы.



Открытие !!!!

- **Элементарная частица нейтрон была открыта в 1932 году Джеймсом Чэдвигом.**
- **В 1935 году его наградили Нобелевской премией за это открытие.**
- **Далее последовало предсказание и открытие НЗ**





Предсказание ...

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.
1932 г.: **первая версия о существовании звезд с огромной плотностью с подачи советского ученого Л. Д. Ландау**
Звезда-ядро



(Ландау)

1933 г.: Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые

(Цвикки)



(Бааде)



- ✳ **звезды с необычным строением**
- ✳ **обоснована теория, согласно которой на месте вспышки Сверхновой обязательно остается U^2**

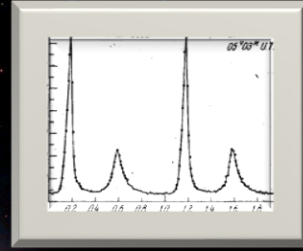


Фриц Цвикки (1898 – 1974) — американский астроном.



Вальтер Бааде (1893 - 1960) — немецкий астроном и астрофизик.

Открытие

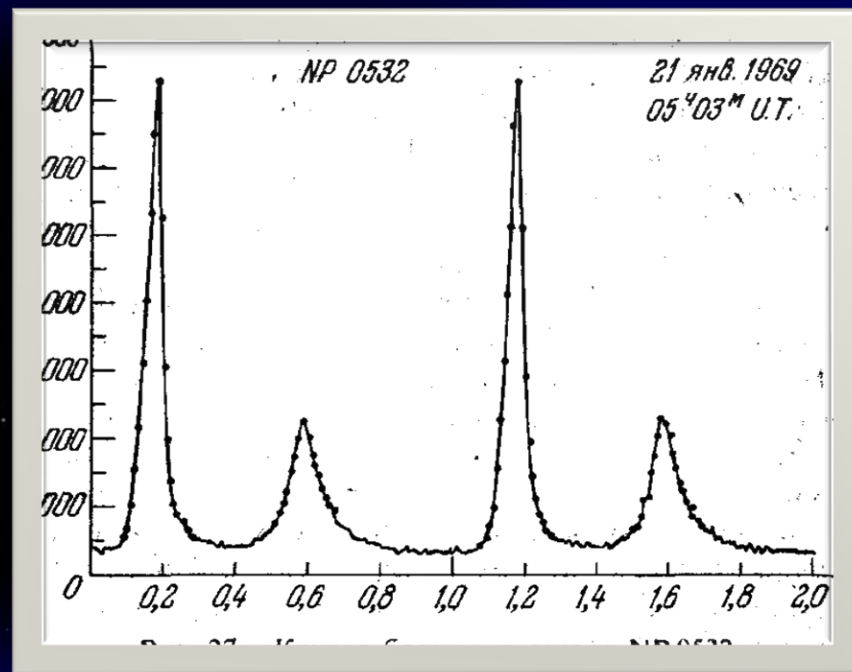


- В 1960-х годах при помощи рентгеновского телескопа был обнаружен **пульсирующий сигнал**, приходящий из далекого космоса. Поскольку сигнал казался **искусственным**, то предполагалось, что он испущен **разумной инопланетной расой**, но впоследствии выяснилось, что сигнал идет от нейтронной звезды.



Сигнал от внеземных цивилизаций ? 9

В июне 1967 г. британские ученые открыли в космосе странный, повторяющийся с точным интервалом времени радиосигнал. Вначале ученые всерьез считали, что пойман сигнал от внеземных цивилизаций, и эта информация была засекречена. Но потом было установлено что источником данных сигналов является быстро вращающаяся НЗ, из полюсов которой исходит радиоизлучение и заряженные частицы. Т.к. ось звезды слегка наклонена по отношению к Земле, то и наблюдается строго переменный периодичный сигнал. Источник такого сигнала был назван пульсаром.



Сигналы первого пульсара





Jocelyn Bell

В 1967 г. **Джоселин Белл, аспирантка Э. Хьюиша**, открыла объекты, излучающие **регулярные радиоимпульсы**.

Это явление было объяснено узкой направленностью радиолуча от быстро вращающегося космического объекта — своеобразный **«космический радиомаяк»**.

Но любая обычная звезда **разрушилась бы от центробежных сил** при столь высокой скорости вращения. На роль таких «космических маяков» были пригодны только НЗ. Пульсар **PSR B1919+21** считается первой открытой НЗ.





Джоселин Белл

- Радиопульсары были открыты. За это дали Нобелевскую премию. Дали ее **не тому** человеку. Это тоже отдельная, довольно типичная, история: главный автор открытия — *Джоселин Белл* — осталась без приза. Но важно, что НЗ наконец то обнаружены и люди начали их изучать!
- **И первая НЗ была открыта в радиодиапазоне, а не в рентгеновском!**

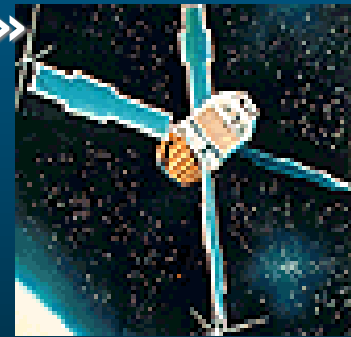


Uhuru: Открытие первой HЗ Sco-1



Р. Джаккони (Riccardo Giacconi)
– один из лауреатов
Нобелевской премии за 2002 г. «за
пионерский вклад в астрофизику,
который привел к открытию
космических источников
рентгеновского излучения»

2-20 кэВ



1962 – ракета «Наироби»

1970 - Первый рентгеновский телескоп

SAS-1 (**Uhuru**) был запущен 12 декабря 1970 г. и именно он нашел первое доказательство существования черных дыр (запущен в Кении, «UHURU» с суахили – “свобода”)

Спутник закончил работу в марте 1973 г.

Первый полный обзор неба.

339 источников.



Scor X-1

- *Риккардо Джиаккони, Герберт Гурски и их коллеги* обнаружили несколько рентгеновских источников. Одним из них был объект, получивший наименование
- Scor X-1.
- ➔ Scor — обозначение созвездия Скорпион, именно там находится источник.
- ➔ X указывает на то, что это рентгеновский источник, во многих странах рентгеновские лучи называют X-лучами (как обозначал их и сам Вильгельм Рентген).
- ➔ Цифра 1 говорит о том, что это первый обнаруженный рентгеновский источник в созвездии Скорпион.



Классификация НЗ

- Взаимодействие НЗ с окружающим веществом определяют два основных параметра и, как следствие, их наблюдаемые проявления:
 - ➔ период (скорость) вращения и
 - ➔ величина магнитного поля.
- Со временем звезда расходует свою вращательную энергию, и её вращение замедляется. Магнитное поле также ослабевает.
- По этой причине НЗ за время своей жизни может **менять свой тип**.



В зависимости от этих двух параметров нейтронные звезды делят на четыре типа:

- ✿ **Радиопульсары (эжекторы)**
- ✿ **Нейтронная звезда – пропеллер**
- ✿ **Рентгеновский пульсар (аккректор)**
- ✿ **Георотатор**





Радиопульсары (эжекторы)

представляют собой объекты, которые имеют **малый период вращения**, однако **сила магнитного поля** у них остается достаточно **большой**.

Заряженные частицы, совершая движение вдоль силовых полей, в местах обрыва (**на «радиусе светового цилиндра»**) покидают оболочку звезды. Небесное тело данного типа **эжектирует**, периодически наполняя Вселенную радиоимпульсами, фиксируемыми в радиочастотном диапазоне;





Радиопульсар в представлении художника



частицы, которые вращались в этом поле улетают на бесконечность.



Пропеллер- Скорость вращения уже недостаточна для эжекции частиц, поэтому такая звезда не может быть радиопульсаром. Однако она всё ещё велика, и захваченная магнитным полем окружающая нейтронную звезду материя не может упасть на нее.





Нейтронная звезда – пропеллер в представлении художника

Пропеллер - Скорость вращения уже недостаточна для эжекции частиц, поэтому такая звезда не может быть радиопульсаром. Однако она всё ещё велика, и захваченная магнитным полем окружающая нейтронную звезду материя не может упасть на нее





Магнетар – нейтронная звезда с исключительно сильным магнитным полем (более 10^{14} Гс). .
Магнитное поле этой звезды таково, что с расстояния сотен земных радиусов из человека был бы вытянут весь гемоглобин и кровь стала бы бесцветной.





Магнетар в представлении художника

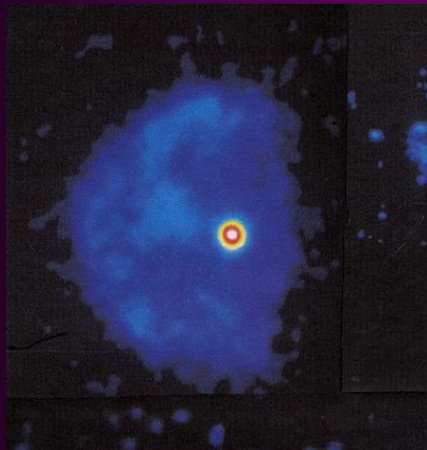
Магнетар – нейтронная звезда с исключительно сильным магнитным полем (более 10^{14} Гс). .
Магнитное поле этой звезды таково, что с расстояния сотен земных радиусов из человека был бы вытянут весь гемоглобин и кровь стала бы бесцветной.





Известные магнитары

- SGRs (МПГ)
- 0526-66
- 1627-41
- 1806-20
- 1900+14
- +кандидаты
- AXPс (АРП)
- CXO 010043.1-72
- 4U 0142+61
- 1E 1048.1-5937
- 1 RXS J170849-40
- XTE J1810-197
- 1E 1841-045
- AX J1844-0258
- 1E 2259+586



(СТВ 109)



Крабовидная туманность с пульсаром в центре

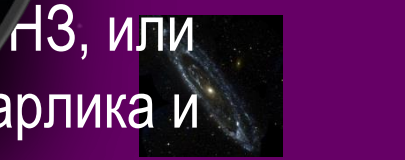
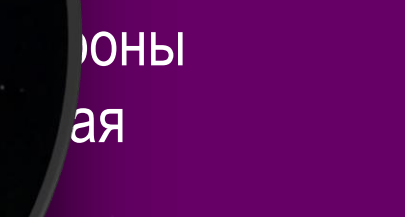
Часто НЗ встречаются в **остатках взрывов** звезд, представляющих

собой разлетающиеся газы, называемых

В качестве примера можно привести Крабовидную туманность

Можно увидеть пульсары в остатках звездных взрывов, например, в Крабовидной туманности.

Бывают также пульсары в НЗ вращающихся звезд, например, в Крабовидной туманности, т.д..





объект RX J1856.5-3754





В отличие от ЧД, НЗ надежно обнаружены.

Но как светит НЗ ?

- **Нейтронные звезды очень горячие и очень плотные**
- **Температура их поверхности достигает 60 тысяч Кельвинов, что в десять раз больше температуры на поверхности Солнца.**



Нейтронные звезды представляют собой мощные гравитационные линзы

- Все массивные объекты имеют способность изгибать проходящие мимо них лучи света. Но нейтронные звезды превосходят в этом умении почти все остальное. В среднем, гравитационное поле НЗ в 200 миллиардов раз сильнее, чем земное.
- ➔ Свет, который исходит с той стороны звезды, которая отвернута от нас, огибает ее и становится видимым нам.
- ➔ В некоторых случаях гравитационное поле НЗ может быть таким сильным, что излученный ею свет не может покинуть ее, и тогда она становится невидимой.



Ваша кредитная карточка размагнитится...



- У магнетаров же магнитные поля самые сильные среди всех известных нам объектов во Вселенной. Они в триллионы раз сильнее полей на Солнце или на Земле. Если вы поместите магнетар на расстояние, на котором **Луна** находится от Земли, а сами будете на **Земле**, **ваша кредитная карточка размагнитится.**



Мощность излучения НЗ

- Крошечная нейтронная звезда диаметром от 10 до 20 километров может за одну минуту произвести больше энергии, чем Солнце за четверть миллиона лет.
- Одним из интересных свойств магнетаров является то, что некоторые из происходящих в них взрывов столь мощны, что они могут нейтрализовать детекторы на спутниках. Мы называем такие явления **гигантскими вспышками**.



Влияние ГИГАНТСКИХ ВСПЫШЕК НЗ на земную атмосферу

- Гигантская вспышка оказывает существенное воздействие на нашу атмосферу, в частности, на ионосферу. Во время гигантских вспышек ионосфера Земли претерпевает существенные изменения. Это интересный феномен. Магнетары, несмотря на то, что они находятся очень и очень далеко, способны на такое...



Сверхновая и пульсар

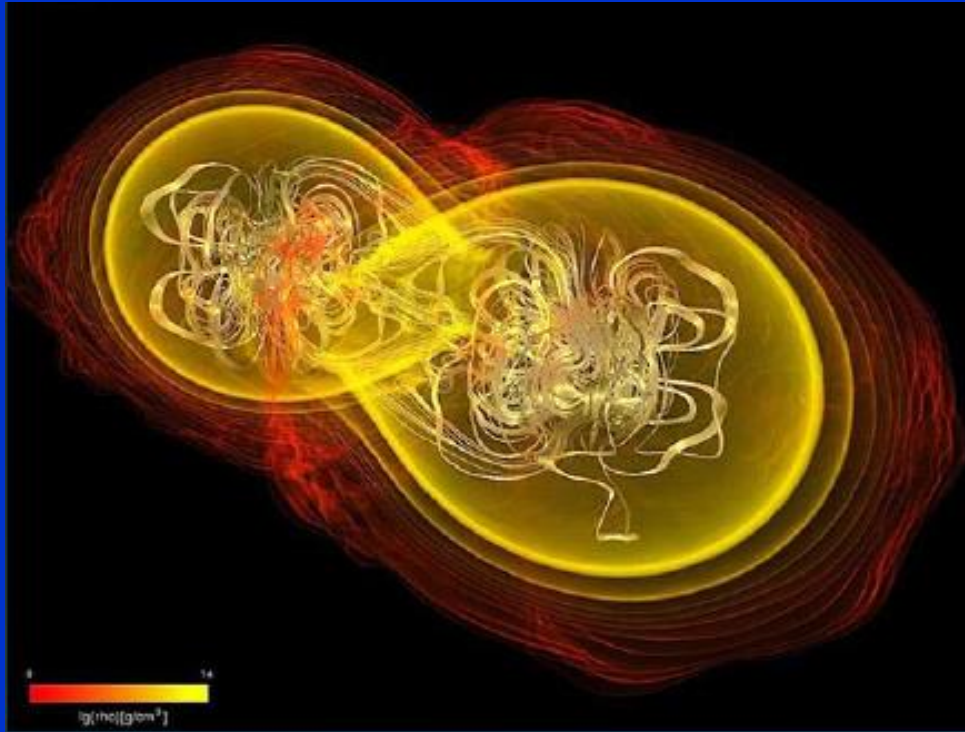


- Ударная волна сверхновой в массивной тесной двойной системе может провзаимодействовать с магнитосферой нейтронной звезды, создав магнитосферный хвост.
- Пересоединение в хвосте может привести в появлению всплеска.
- (Егоров, Постнов 0810.2219)

Т.о., радиовсплеск ВСЕГДА должен сопровождаться вспышкой сверхновой.



Слияние нейтронных звезд



- Придумано несколько сценариев, в которых в результате слияния нейтронных звезд возникает радиоисточник
- *(Луиунов, Панченко; Hansen, Lyutikov; Постнов, Пиширков).*



НЗ в Солнечной системе

- В настоящее время приближающийся к нашей планете объект ошибочно называют «звезда» (иногда «планета?») **Нибиру**, которая ранее находилась между орбитами Марса и Юпитера, и в далеком прошлом была разрушена тяготением массивного объекта.
- - это необычное небесное тело «потухшая» НЗ, вещество которой выгорело в процессе эволюции обычной звёзды.
- В нашей Галактике, по предположениям астрономов, находится около миллиарда НЗ



В нашей Галактике около 100 миллионов нейтронных звезд

- Эта цифра основывается на стандартной модели развития галактики и происходит из представления о примерном количестве взрывов сверхновых, которые случились за все время жизни нашей галактики.
- Только относительно молодые НЗ легко засечь.
- Большинство нейтронных звезд медленно вращаются, холодные и не поглощают вещество из звезд-спутниц, что делает их обнаружение чрезвычайно затруднительным.



Судьба НЗ

- Почему одни нейтронные звезды становятся магнетарами, а другие – нет. Мы обсуждаем, что крупные звезды разрушаются, образуя **нейтронные звезды**, но мы до сих пор не знаем, почему некоторые нейтронные звезды превращаются в обычные **радиопульсары**, а некоторые становятся **магнетарами**. В то же время с некоторыми НЗ вообще ничего не происходит. У них нет пульсаций. Это еще одна интересная проблема

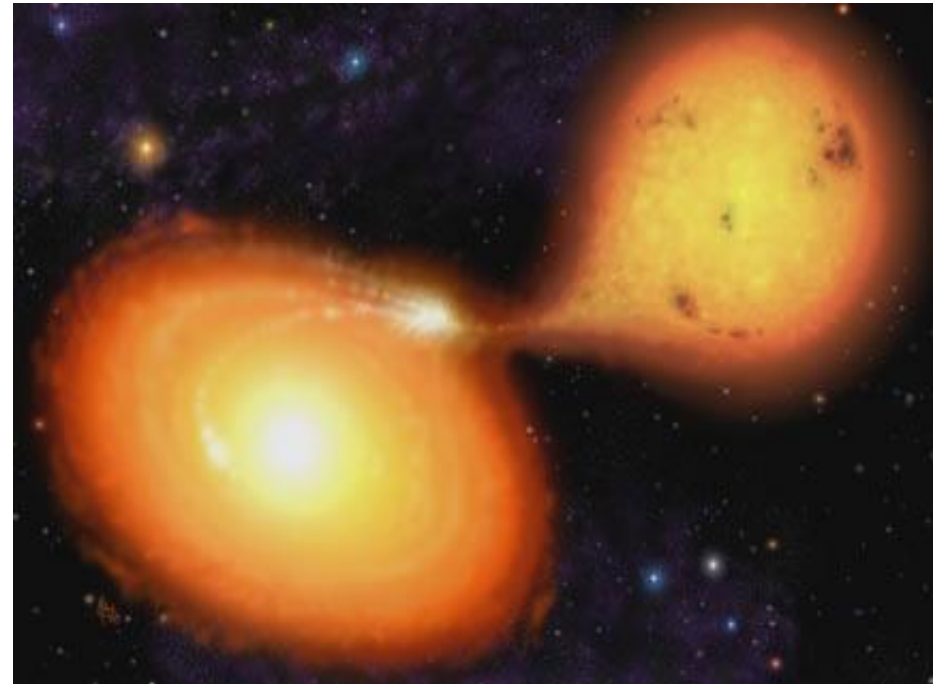


Классификация маломассивных двойных рентгеновских систем

- **Black Hole Candidates in X-ray binaries:**
Most of them have a low mass companion
but a massive primary
Most (if not all) are transient



- **Low magnetic field neutron stars in X-ray binaries:**
Low luminosity Atoll sources
High luminosity Atolls (GX)
High luminosity Z-sources
High inclination sources

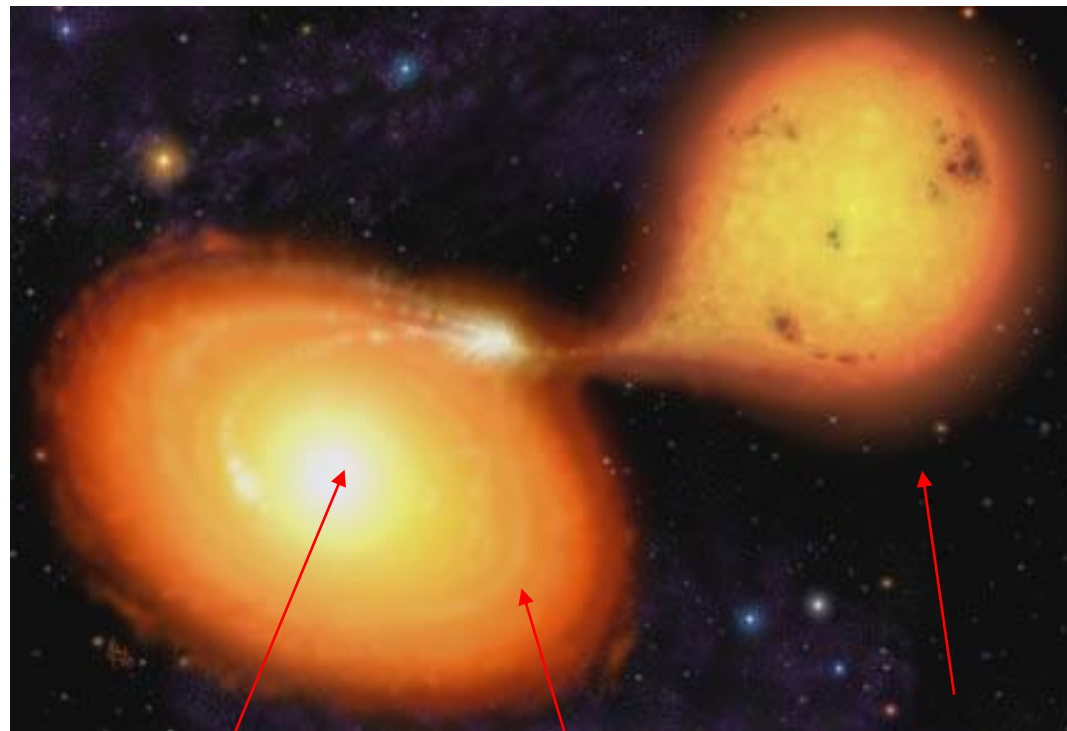




NS Low Mass X-ray Binaries

Close X-ray binaries:

- Rich time variability, such as twin **QPOs at kHz frequencies (from 400 to 1300 Hz)**, increasing with increasing mass accretion rate); kHz QPOs are thought to reflect Keplerian frequencies at the inner accretion disk.
- **Type-I X-ray bursts**, with nearly coherent oscillations in the range 300-600 Hz (reflecting the NS spin frequency).
- Most are transient, with quiescent luminosities of 10^{32} - 10^{33} erg/s and outburst luminosities of 10^{36} - 10^{38} erg/s.



Compact object:
NS with $B < 10^{10}$ G

Accretion
disk

Companion star:
 $M < 1 M_{\text{SUN}}$

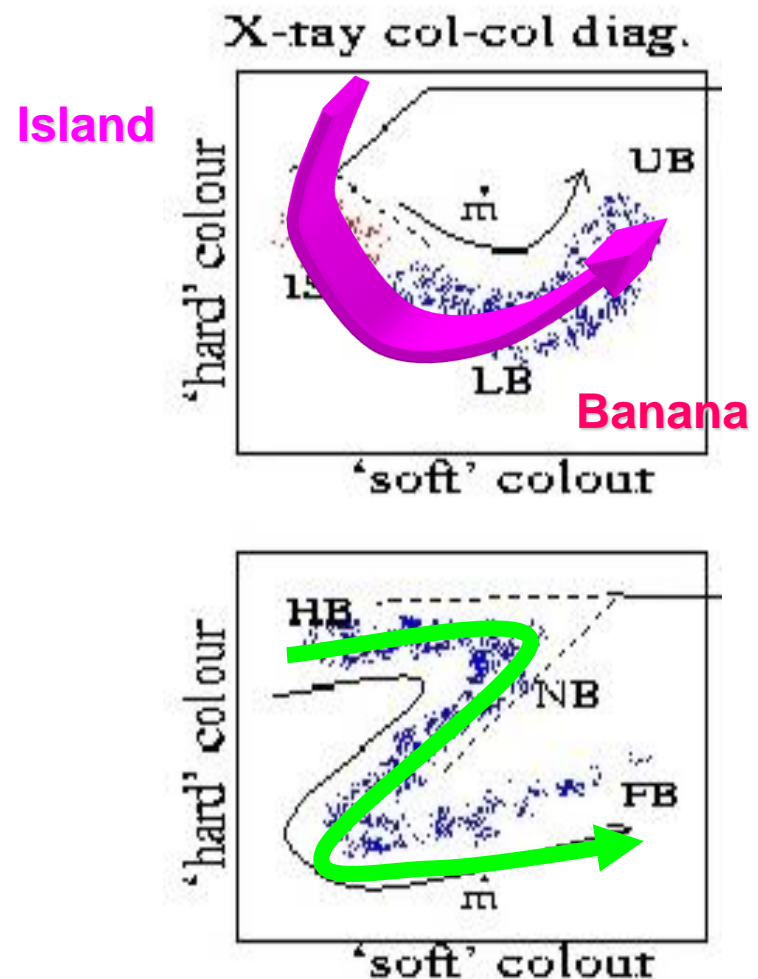
Классификация нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах

Atoll sources:

$L_x \sim 0.01-0.1 L(\text{Edd})$
type I X-ray bursts
most are transients
Hard & Soft spectral states
X-ray millisecond pulsars

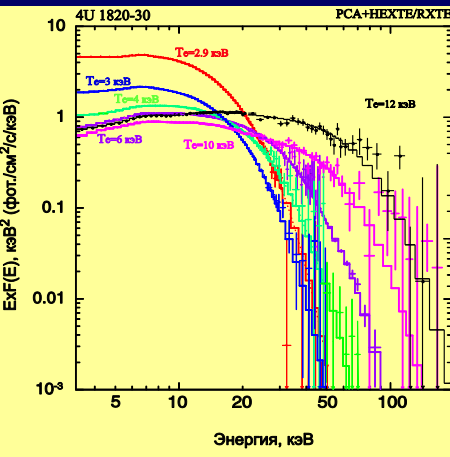
Z-sources:

$L_x \sim 0.1-1.0 L(\text{Edd})$
a few X-ray bursts
all persistent
(except for XTE J1701-462,
the first transient Z source,
Homan et al. 2007, ApJ)





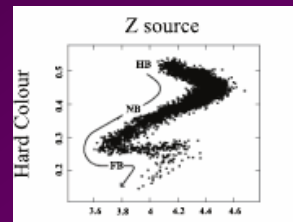
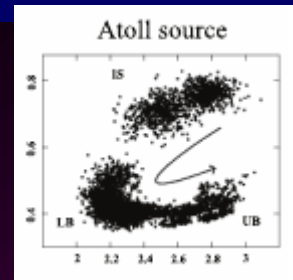
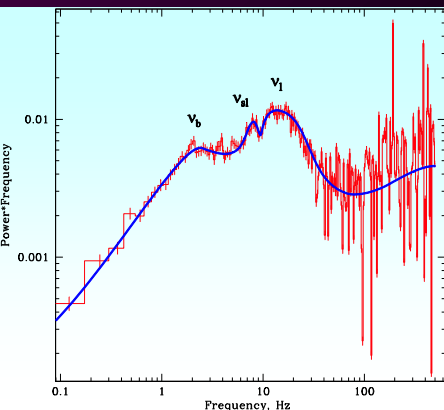
Слабозамагниченные НЗ в рентгеновских двойных системах



➔ Классификация на основе **спектральных и временных свойств**:

- ➔ Atoll-источники и
- ➔ Z-источники

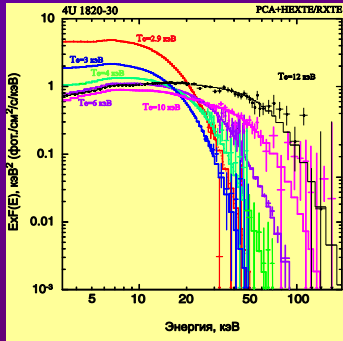
➔ Их названия происходят от **формы треков** на рентгеновских **цветовых диаграммах**





Смена состояний при вспышках слабозамагниченных НЗ

- Для транзиснтных систем с НЗ
МОЖНО выделить четыре
ОСНОВНЫХ СОСТОЯНИЯ:

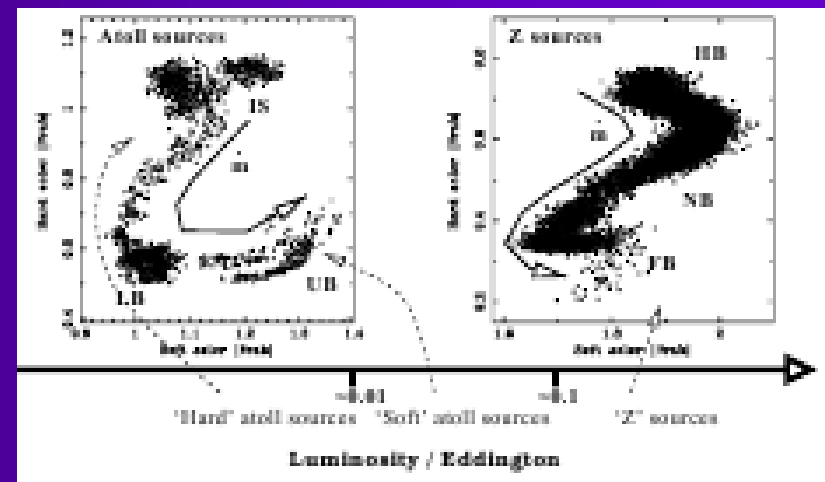


- ▶ спокойное,
- ▶ состояние низкой светимости с жестким спектром,
- ▶ промежуточное состояние и
- ▶ состояние высокой светимости с мягким спектром (*по Хасингеру и ван дер Клицу [9]*).



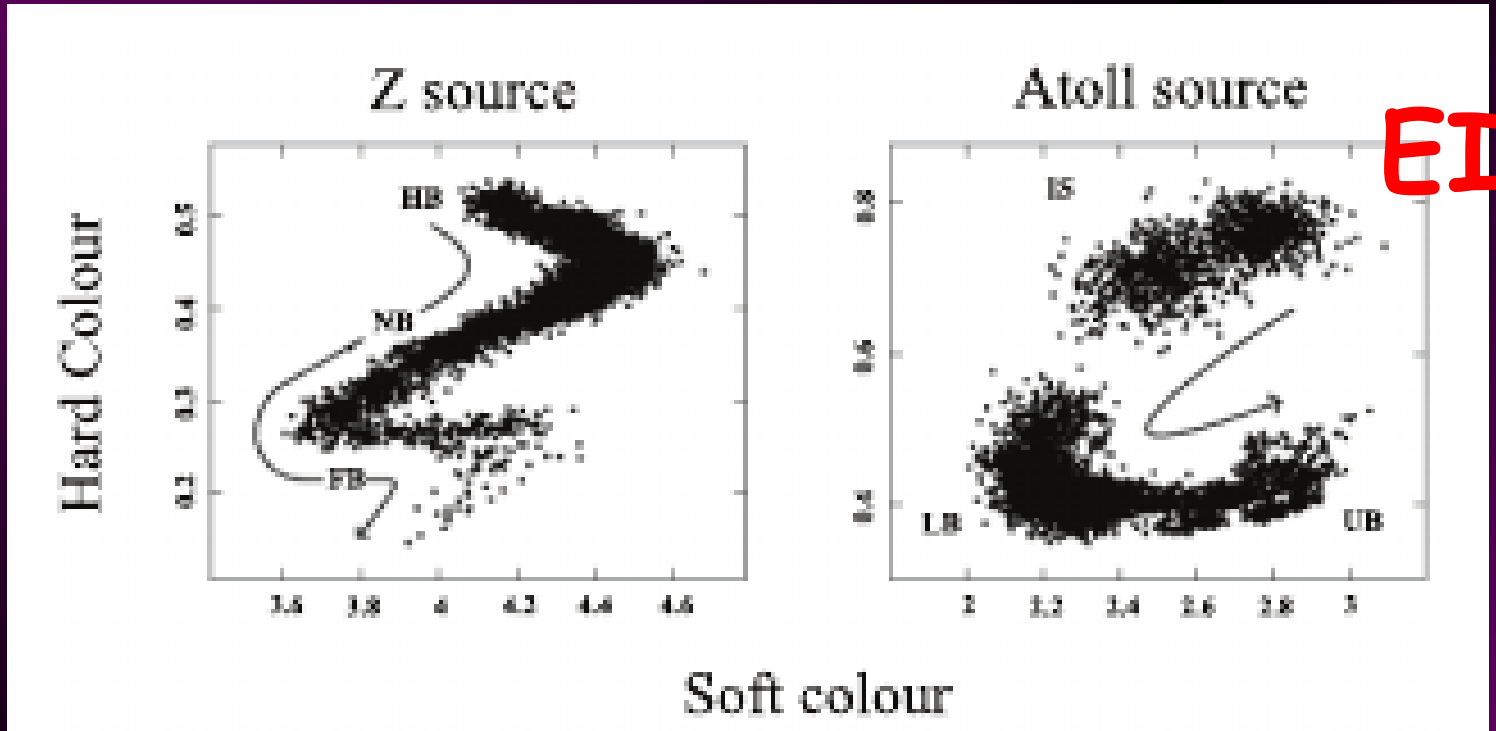
АТОЛЛ- и Z-ИСТОЧНИКИ

- Выделяют более детальную классификацию спектральных состояний
- **«atoll»-источников:**
 - *Island (IS),*
 - *Extreme Island (EIS),*
 - *Left Lower Banana (LLB),*
 - *Lower Banana (LB) и*
 - *Upper Banana (UB)*
- **Z-ИСТОЧНИКОВ:**
 - *Horizontal Branch (HB),*
 - *Normal Branch (NB) и*
 - *Flaring Branch (FB),*
- которые отличаются уровнем средней светимости, а также спектральными и временными характеристиками





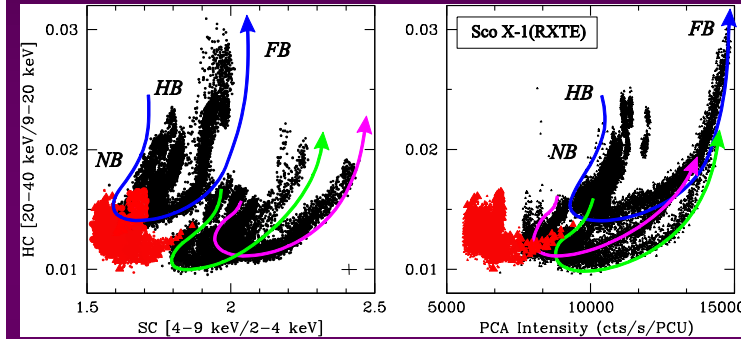
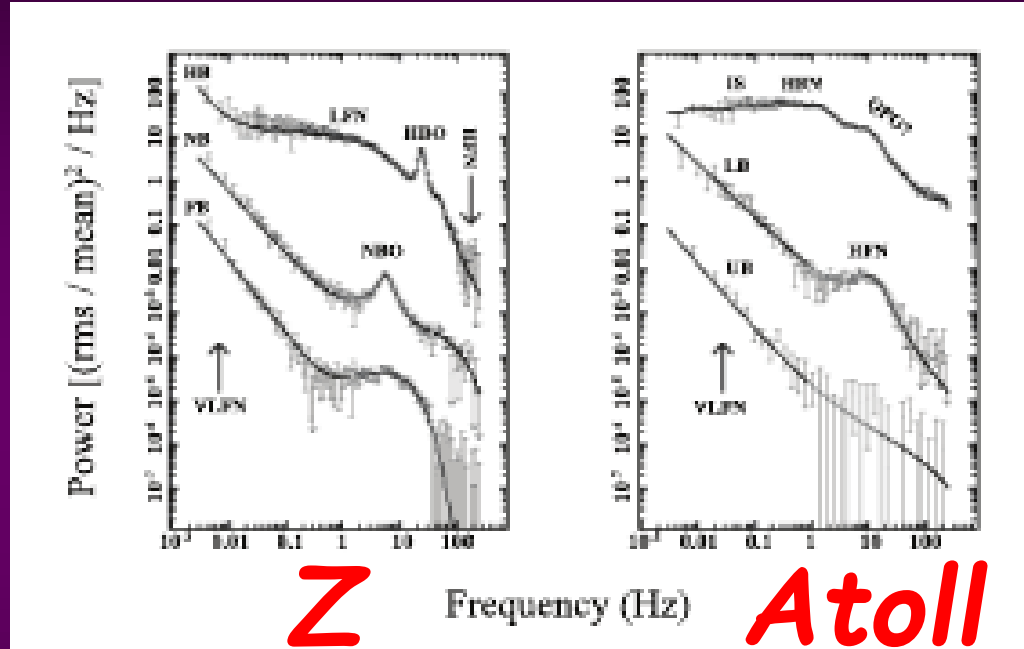
Историческое отличие atoll и Z-источников



- Типичные цветковые диаграммы для atoll- (правая панель) и Z-источников (левая панель). Для atoll источников показано **extreme island state** (EIS), island state (IS), lower left banana state (LLB) и lower banana (LB). Для Z-источников: horizontal branch (HB), normal branch (NB) и flaring branch (FB).



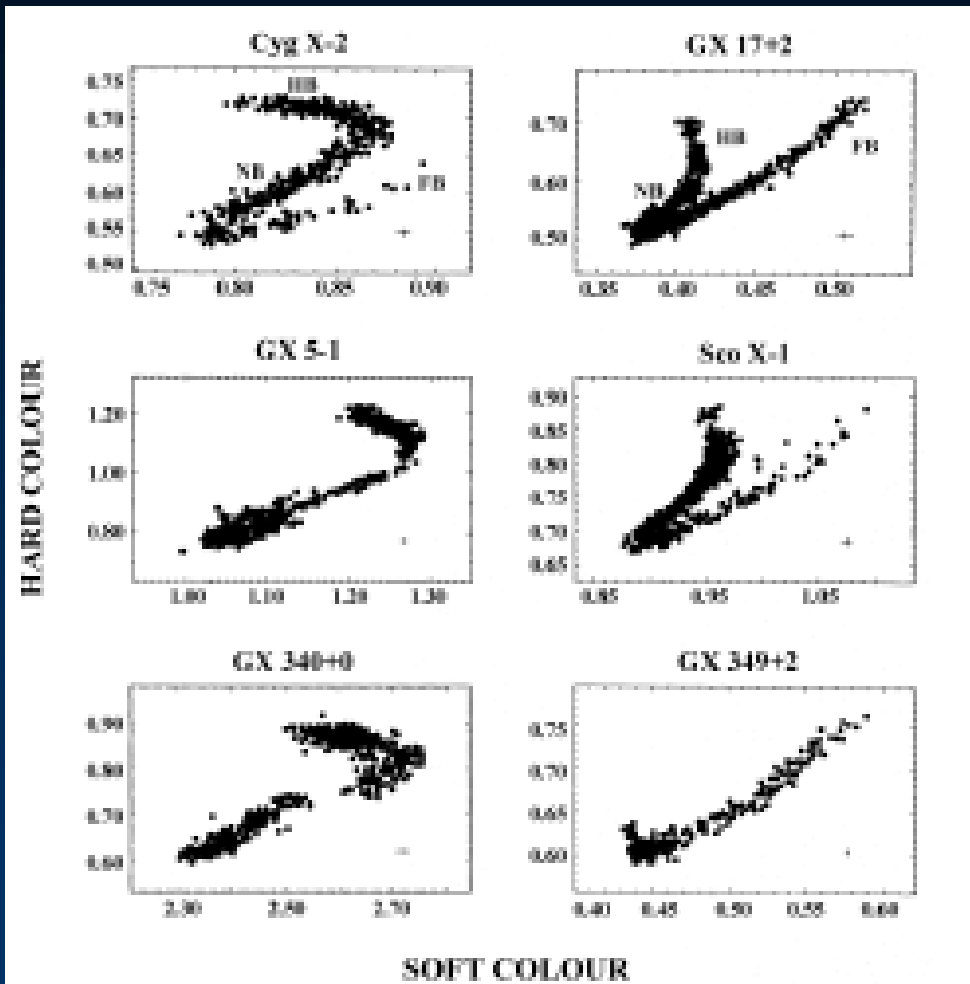
Эволюция спектра мощности для атолл- и Z-источников



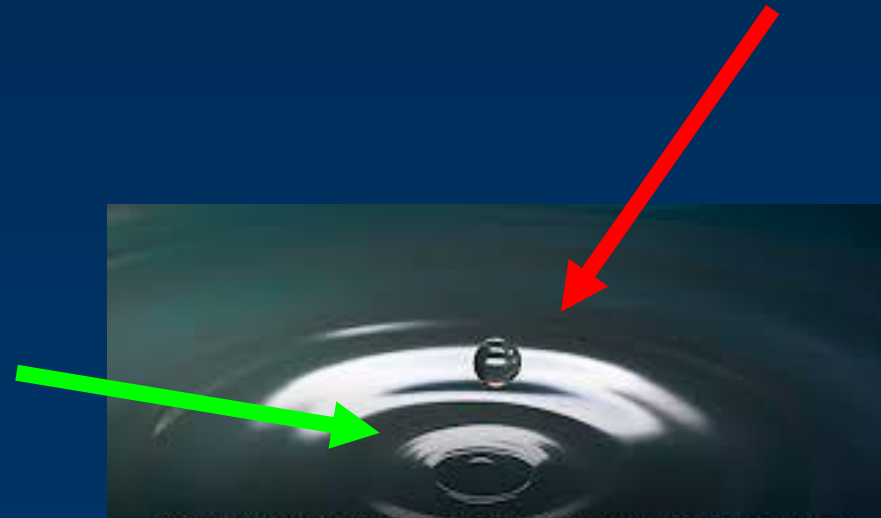
- Power spectra corresponding to spectral states of **Z-track sources** (left) and **Atoll sources** (right) revealing their characteristic features: QPO and noise components.



Z-источники делятся еще на два под-класса:

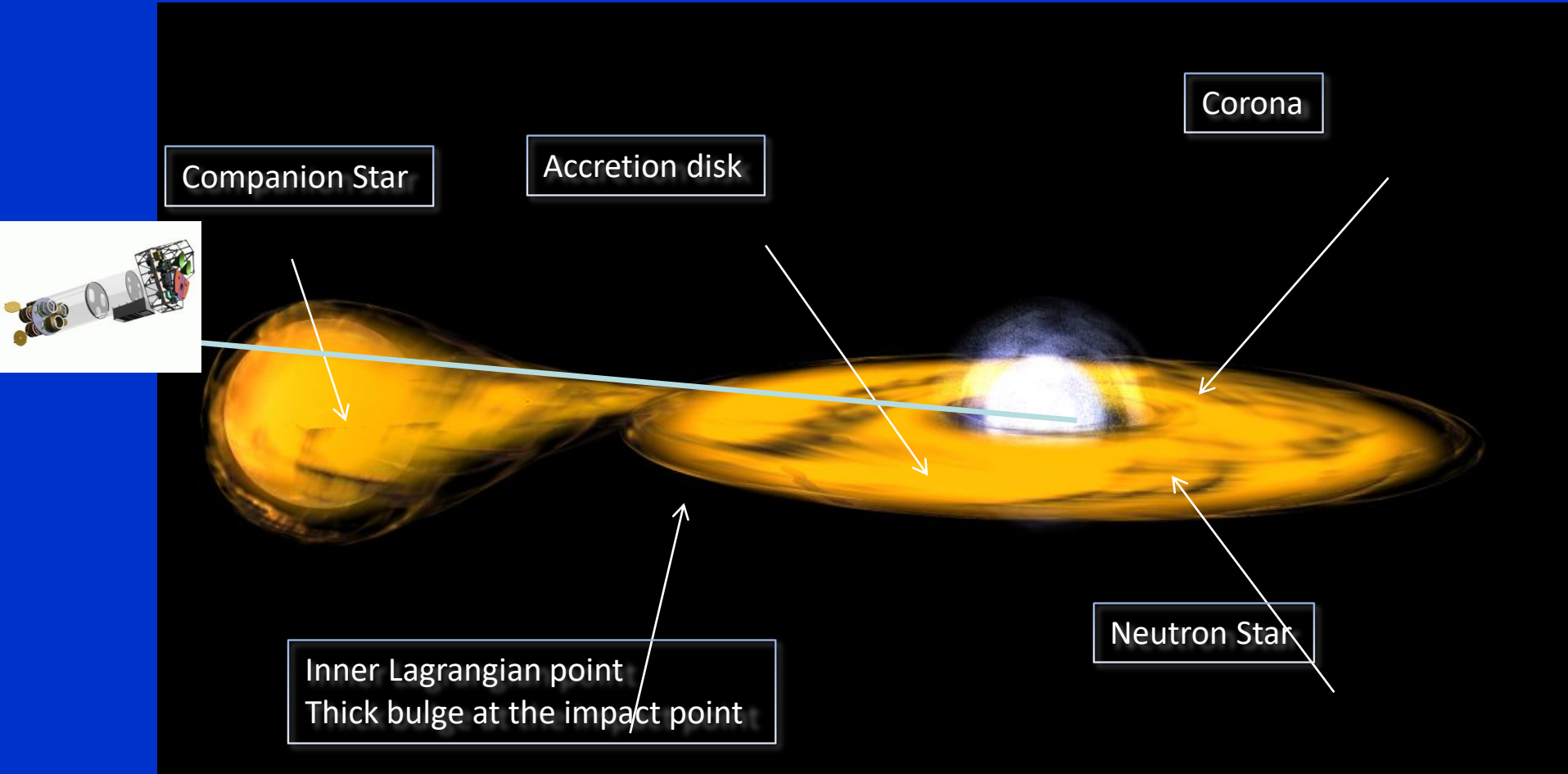


- ➔ Cygnus X-2 like (left) and
- ➔ Scorpius X-1 like (right) (Hasinger & van der Klis 1989)





High inclination LMXBs: the so-called ADC sources

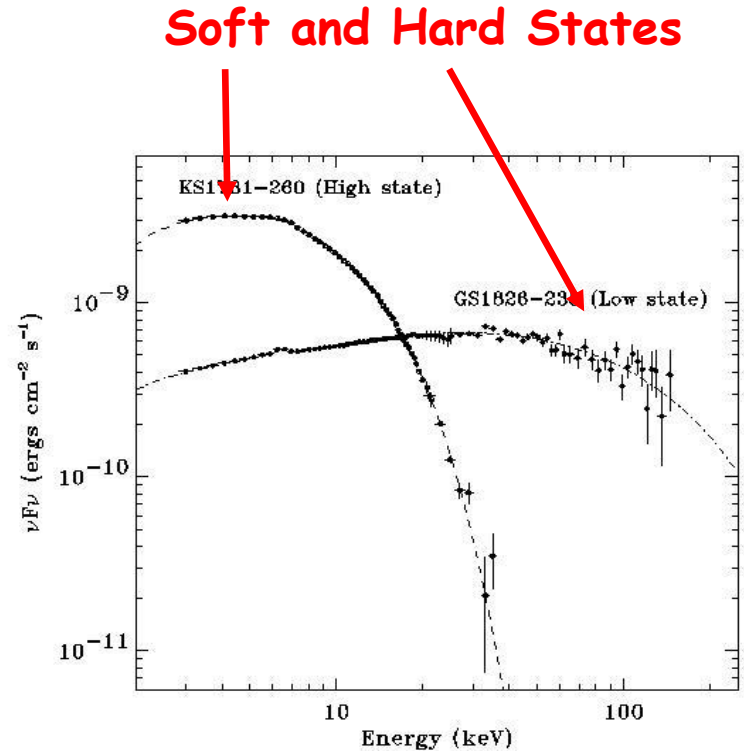


Eclipses (when present) are partial -> extended corona needed



Atoll sources: energy spectra

- ➡- Soft component (few 0.1 keV) (blackbody or disk-blackbody model)
- ➡- Power law with exponential cutoff (5-20 keV): Thermal Comptonization.
- ➡- Soft and hard states: in the hard state the cutoff shifts to higher energies (up to > 200 keV)
- ➡- Iron emission (fluorescence) line at ~6.4 - 6.7 keV
- ➡- Evidence for a reflection component





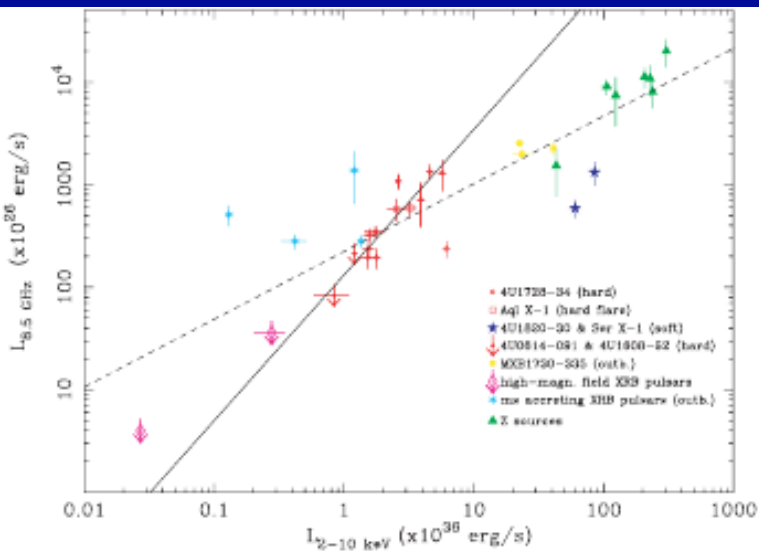
«Связь» аккреционного диска и джетов (Disc-Jet coupling)



- ➡ Диск - рентгеновское излучение
- ➡ Джеты - радиоизлучение



Корреляция радио- и рентгеновского излучения atoll-, Z-источников и аккрецирующих миллисекундных пульсаров



- Светимость в радиодиапазоне (8.5 ГГц) как функция рентгеновской светимости (2–10 кэВ) НЗ в XRBs:
- atoll-источники в жестком и мягком состояниях,
- аккрецирующие мс рентгеновские пульсары в рентгеновских вспышках, и
- Z-источники.



Подход на основе спектрального и временного анализа НЗ

- В частности, исследование зависимости фотонного индекса от темпа аккреции на основе рентгеновских спектров для источника с надежно идентифицированной нейтронной звездой.



4U 1728-34:

100% подтвержденная НЗ

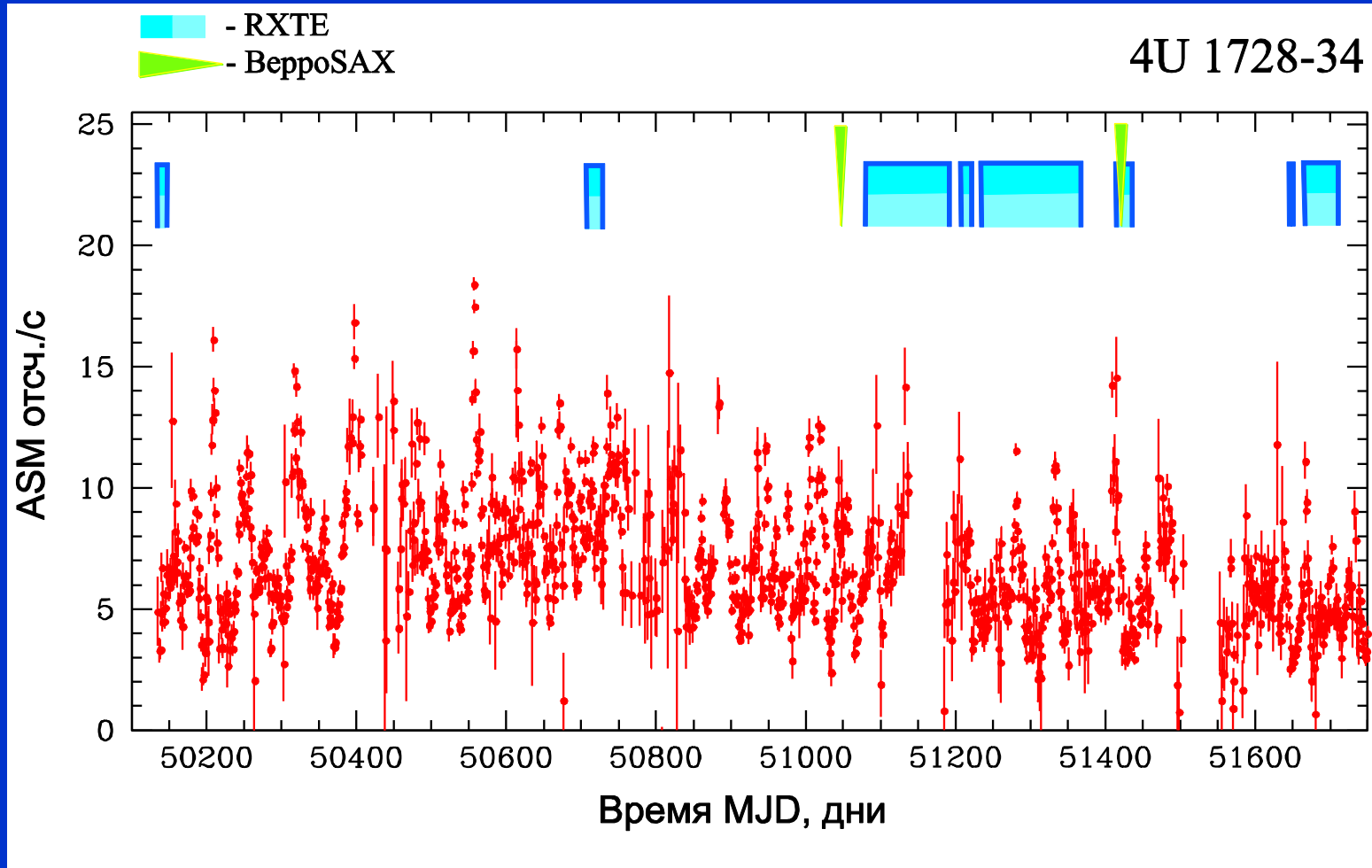
обнаружены кГц-КПО в спектре мощности –
вращение поверхности НЗ/Кеплеровского вращения
внутренних частей аккреционного диска



Рентгеновская кривая блеска

4U 1728-34

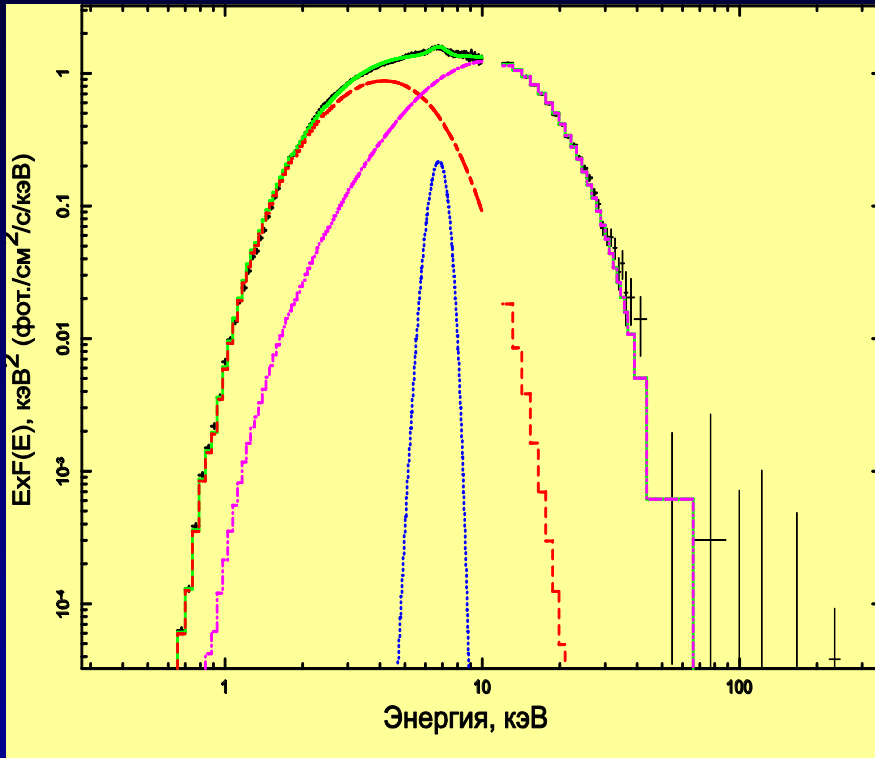
287 наблюдений
RXTE



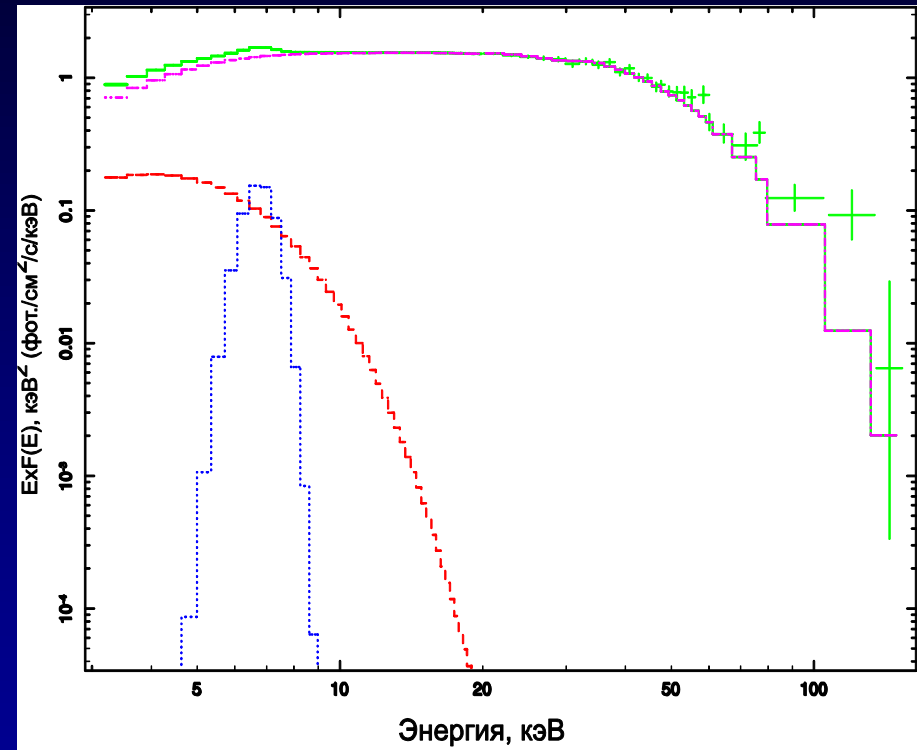


Изменение формы спектра при смене состояний в 4U 1728-34

ВерроSAX

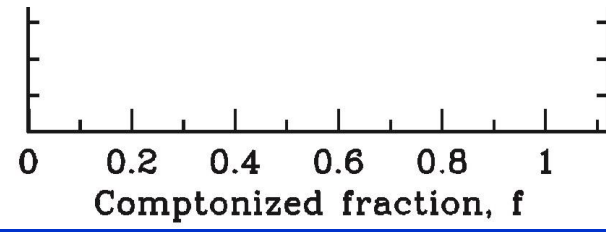
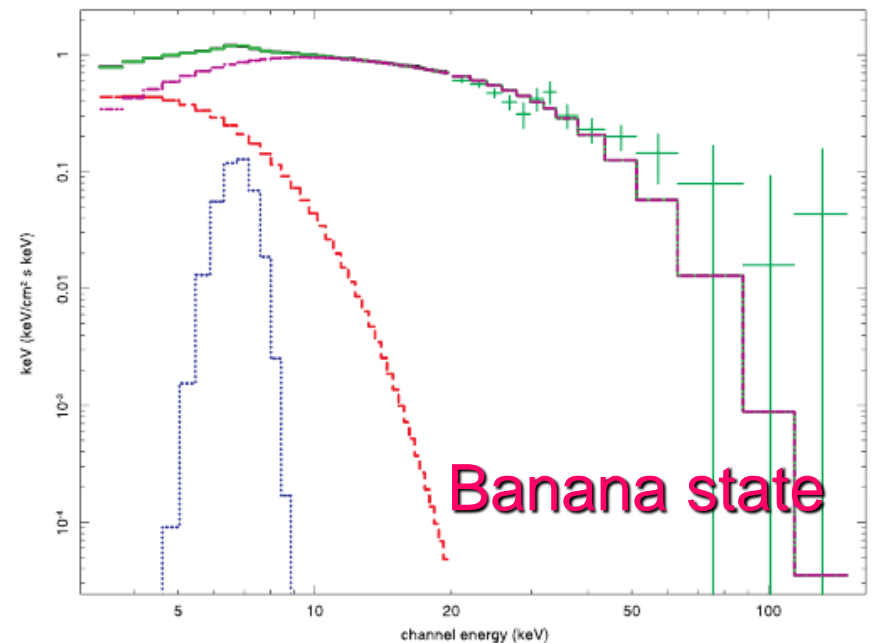
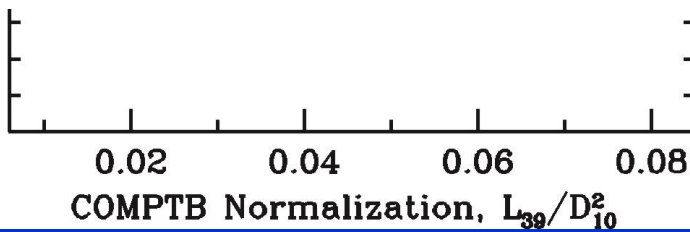
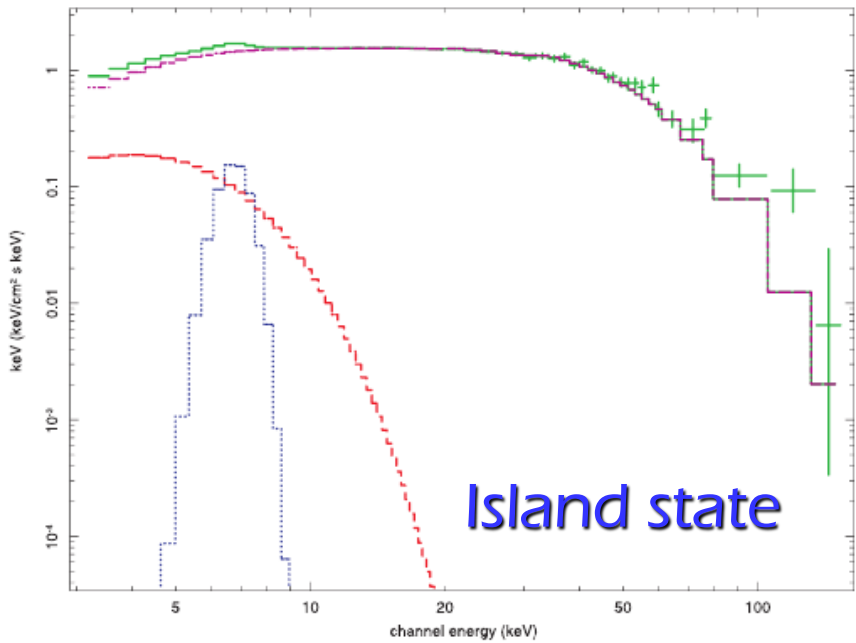


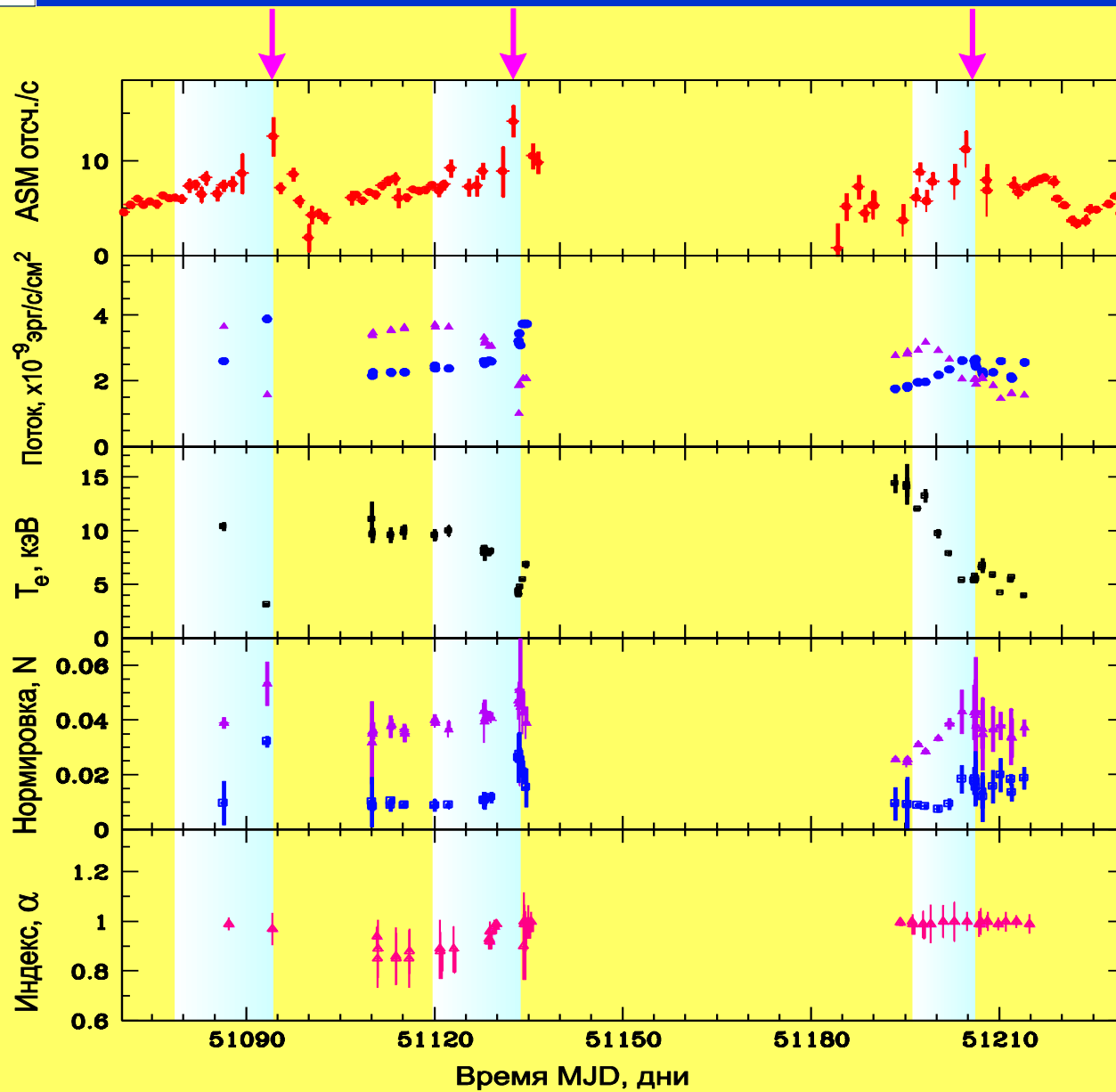
**Высокое/мягкое
состояние**



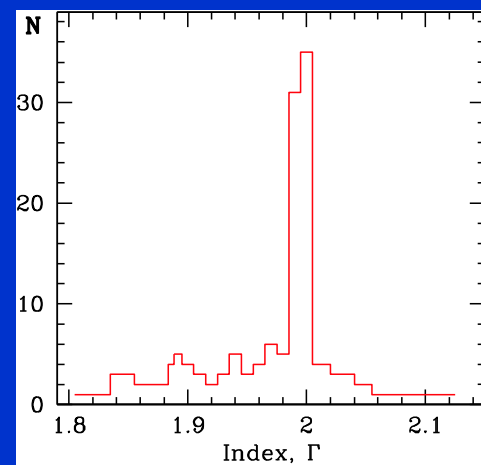
**Низкое/жесткое
состояние**

Фотонный индекс как функция RXTE спектры NS 4U 1728-34 темпа аккреции в NS 4U 1728-34





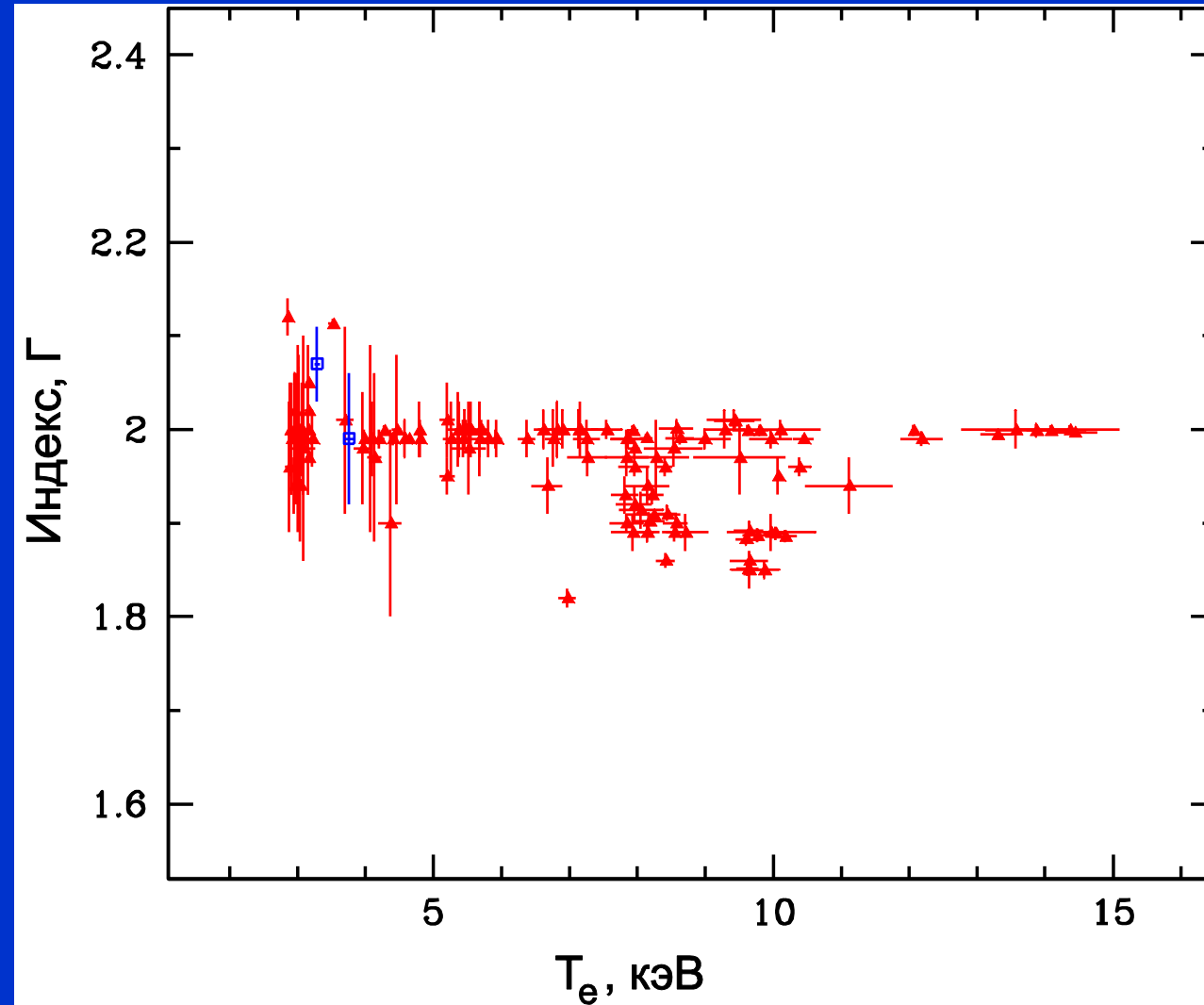
Эволюция спектральных параметров во время фаз активности 4U1728-34



Индекс, $\Gamma = \alpha + 1$



Основной результат: зависимость фотонного индекса Γ от температуры плазмы T_e



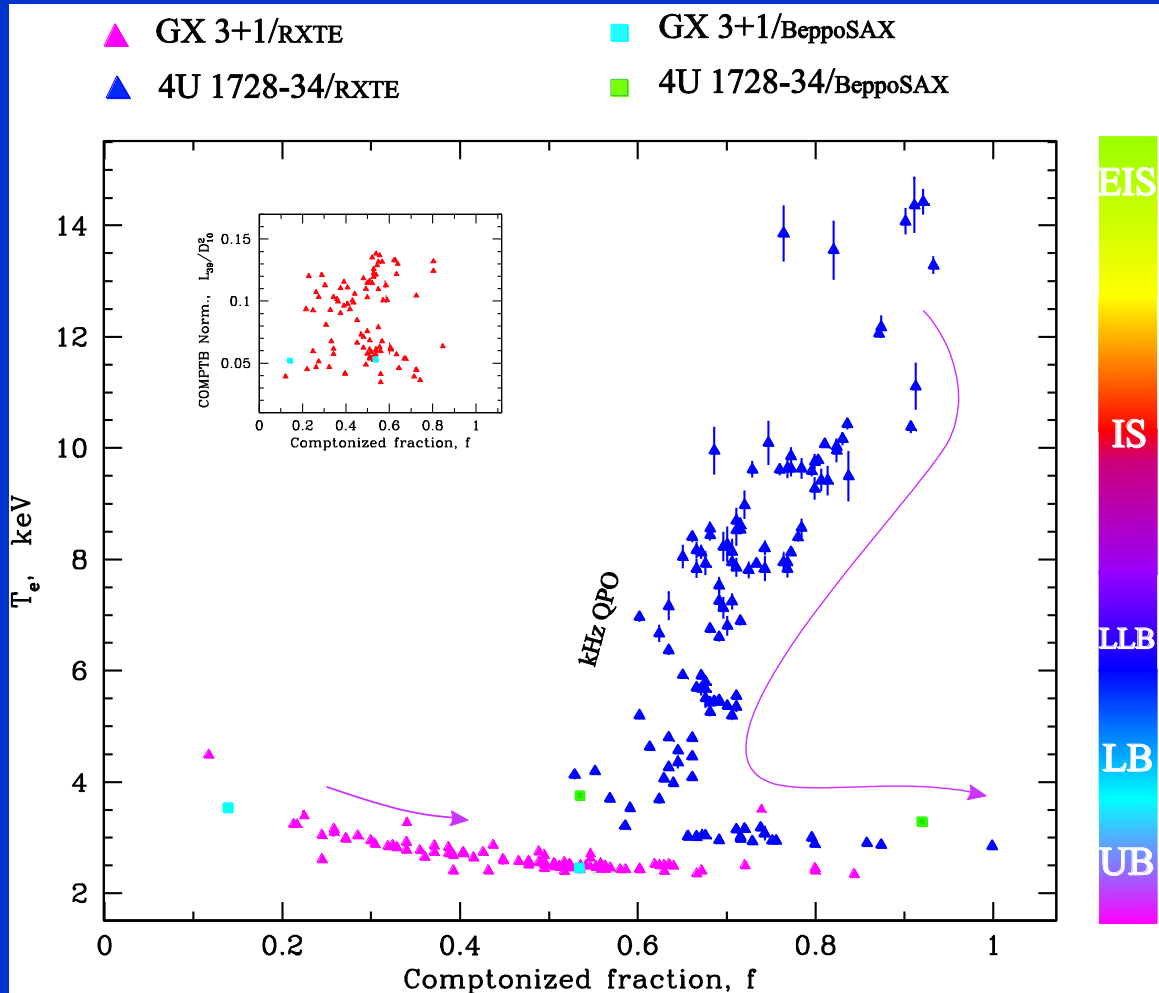
Фотонный индекс Γ показывает стабильность на уровне $\Gamma_{\text{ср}} \sim 2$ независимо от температуры плазмы и темпа аккреции в **4U 1728-34**

*Зельдович & Шакура 1969
(дипломная работа
Шакуры Н.И.)*

Сейфина & Титарчук,
2011, ApJ, 738,128

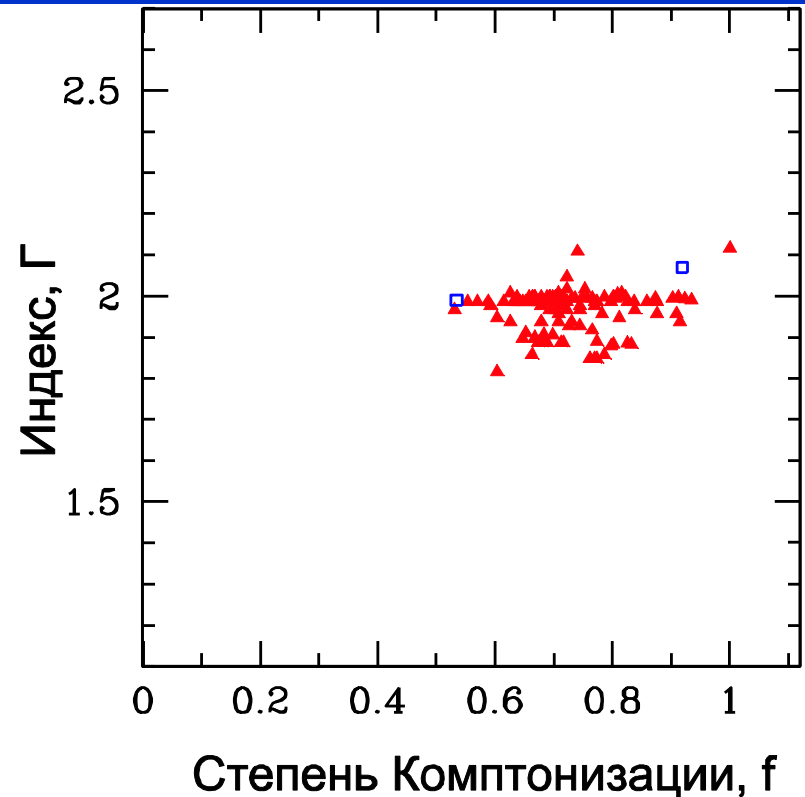
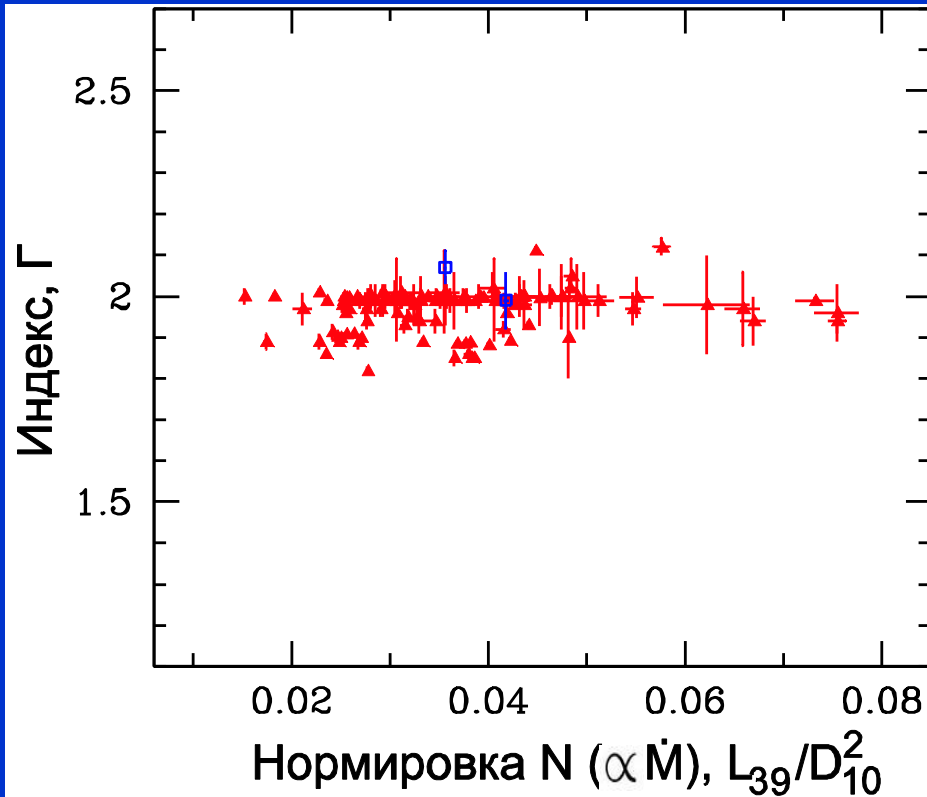


Как реагирует электронная температура на изменение степени Комptonизации?



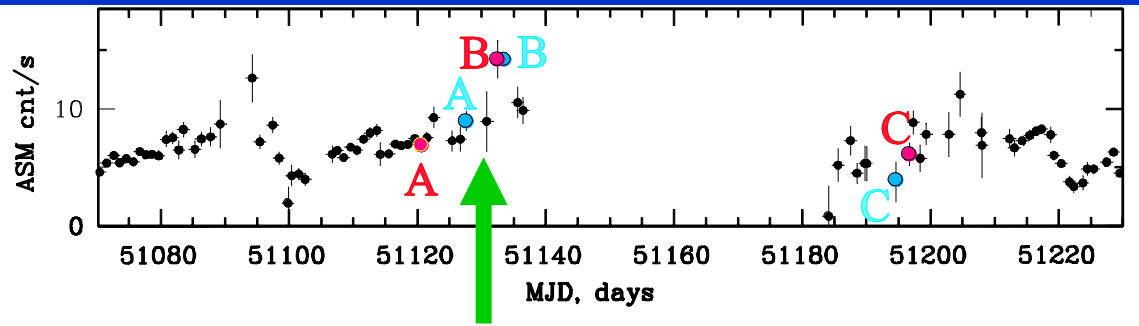


Зависимость фотонного индекса Γ от темпа аккреции в 4U 1728-34



$$\Gamma = \alpha + 1$$

Идентификация состояний

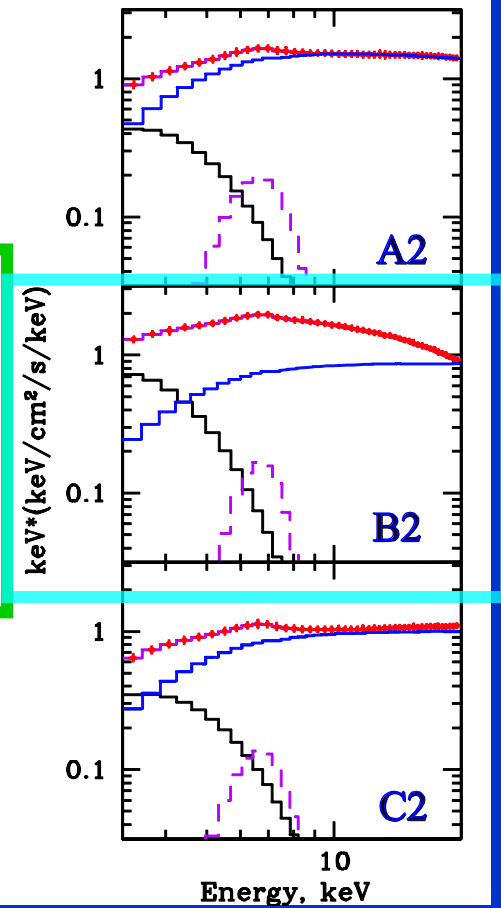
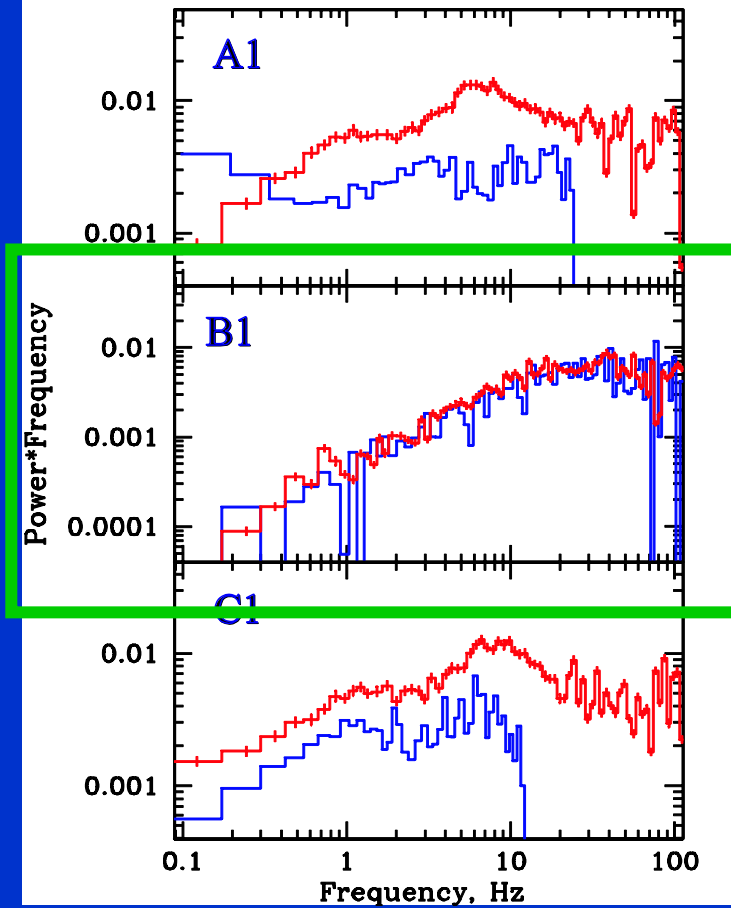


Low/hard state



high/soft state

- *Timing & spectral evolution*

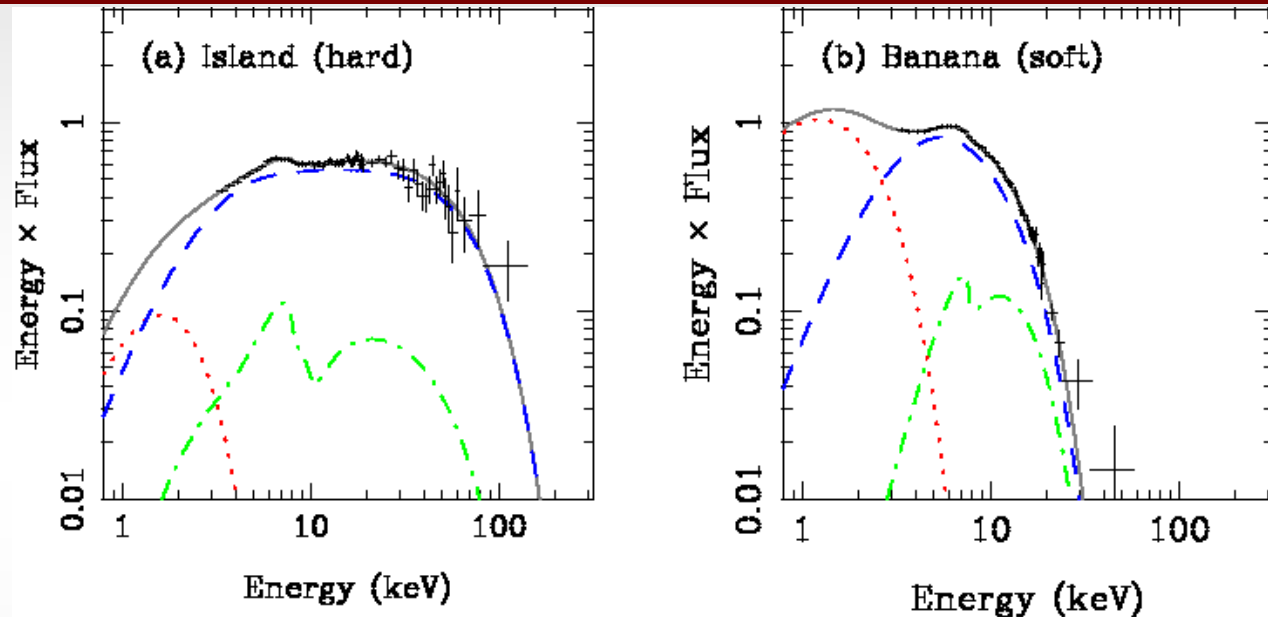




Spectra of NS LMXBs: Strong Analogies with the Spectra of BHCBs

RXTE spectra of the X-ray burster, atoll source 4U 1705-44

(From Done et al. 2007, A&ARv)



- Strong analogies with spectra of BHXBs: presence of hard/low and soft/high states.
- Possible difference in the temperatures of the Comptonizing region, because of extra cooling due to the soft emission from the NS surface?
- **Comptonized component always contributing a large fraction (up to 80%) of the energy in the spectrum.**



Основные выводы по H3

4U1728-34

- Спектральный индекс α не изменяется и остается **постоянным** ~ 1 ($\Gamma = \alpha + 1 = 2$) независимо от темпа аккреции
- Разделение излучения диска и зоны Комptonизации с температурами фотонов 0.7 кэВ и 1.3 кэВ, соответственно
- Описание HS-LS эволюции в терминах изменения kT_e (2.5 - 15 кэВ)
- Рекомендательная литература:
- **ApJ**, 2011, **789**, 57



Повторяется ли эффект стабильности спектрального индекса в других НЗ ?

- Основная задача – проверка найденной стабильности спектрального индекса независимо от темпа аккреции для источников с надежно идентифицированными нейтронными звездами, достигающих режима повышенной светимости (для *atoll*-источников).



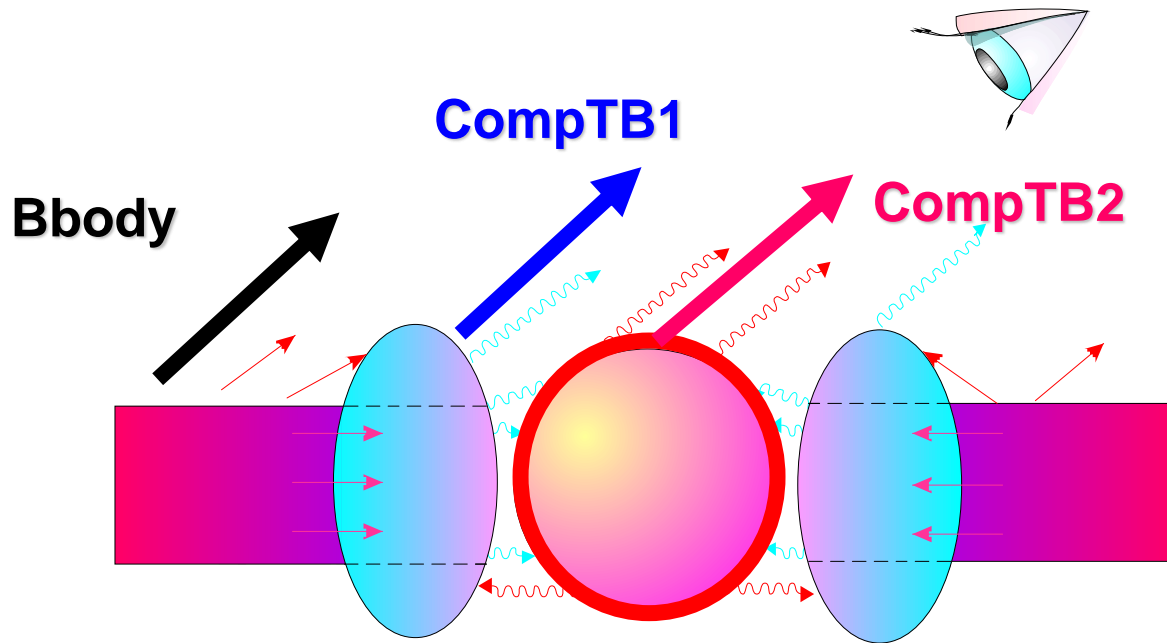
**GX 3+1 –
яркий
atoll-
ИСТОЧНИК**





Спектральная модель для H3

(в соответствии с результатами аппроксимации спектров по данным RXTE)

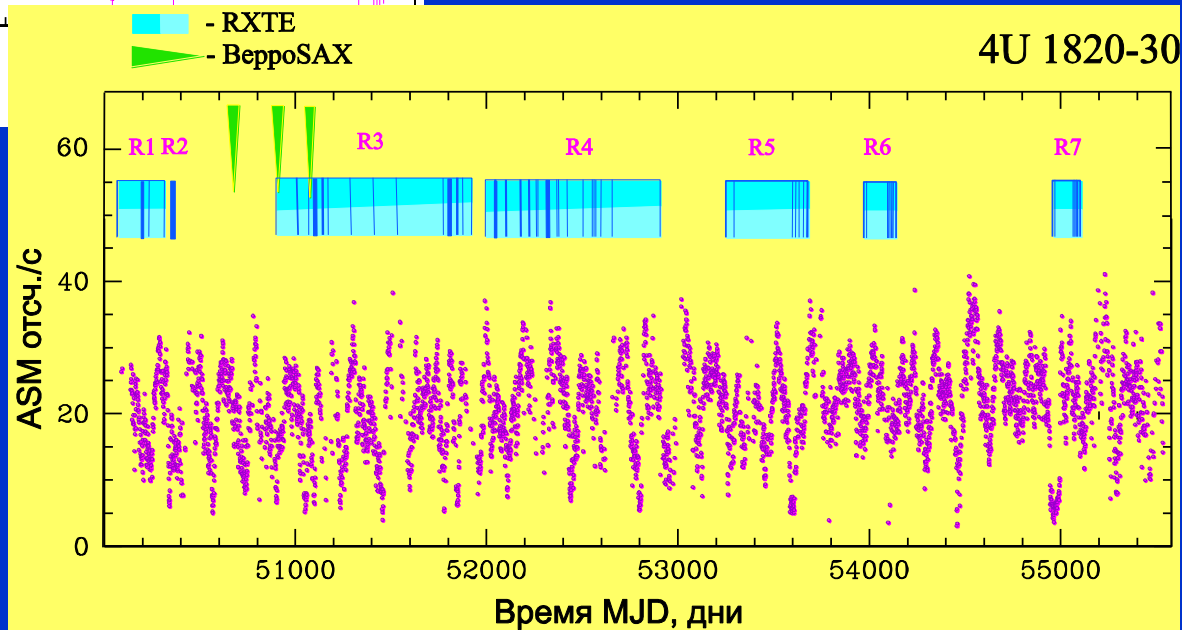
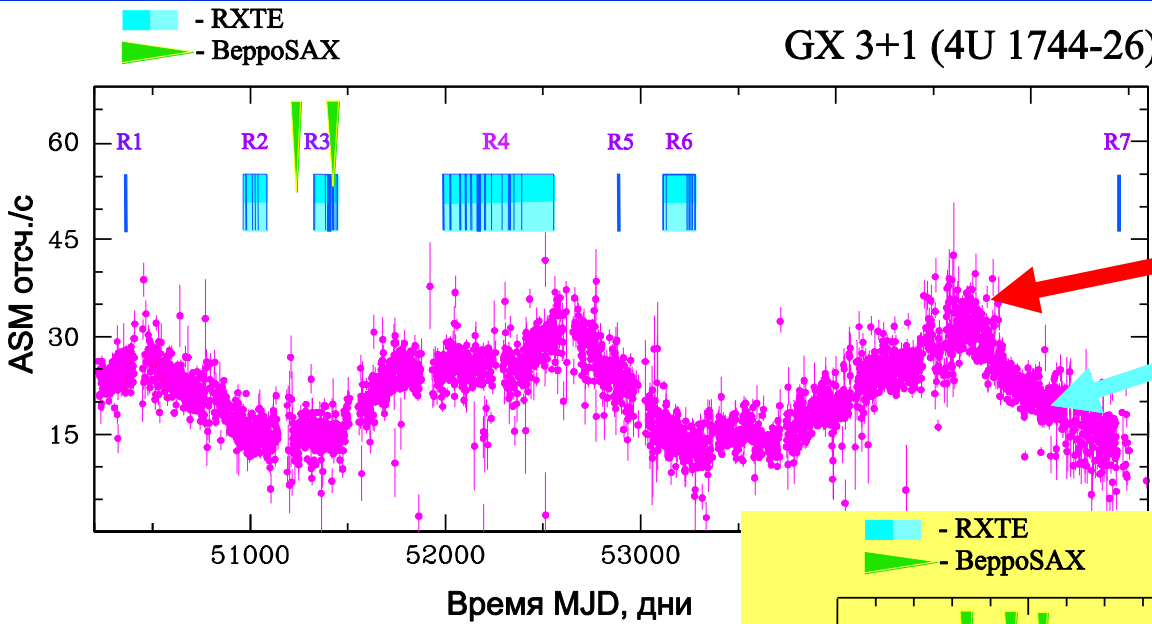


**Наличие
поверхности
(поверхность
H3)**

$$\text{wabs}^*(\text{bbody} + \text{compTB} + \text{compTB} + \text{gauss})$$



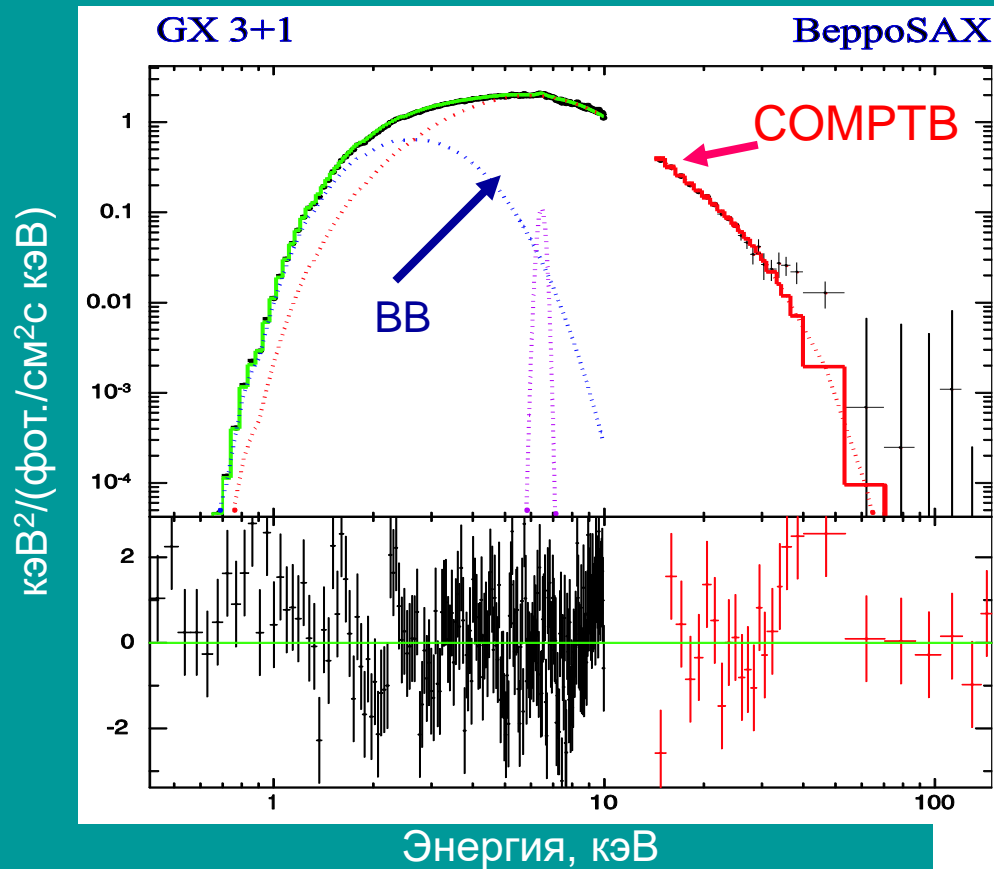
Рентгеновские кривые блеска GX 3+1 и 4U 1820-30



Титарчук, Сейфина, Фронтера,
2013, ApJ, **789**, 57



Моделирование спектра GX 3+1 (0.4-150 кэВ)



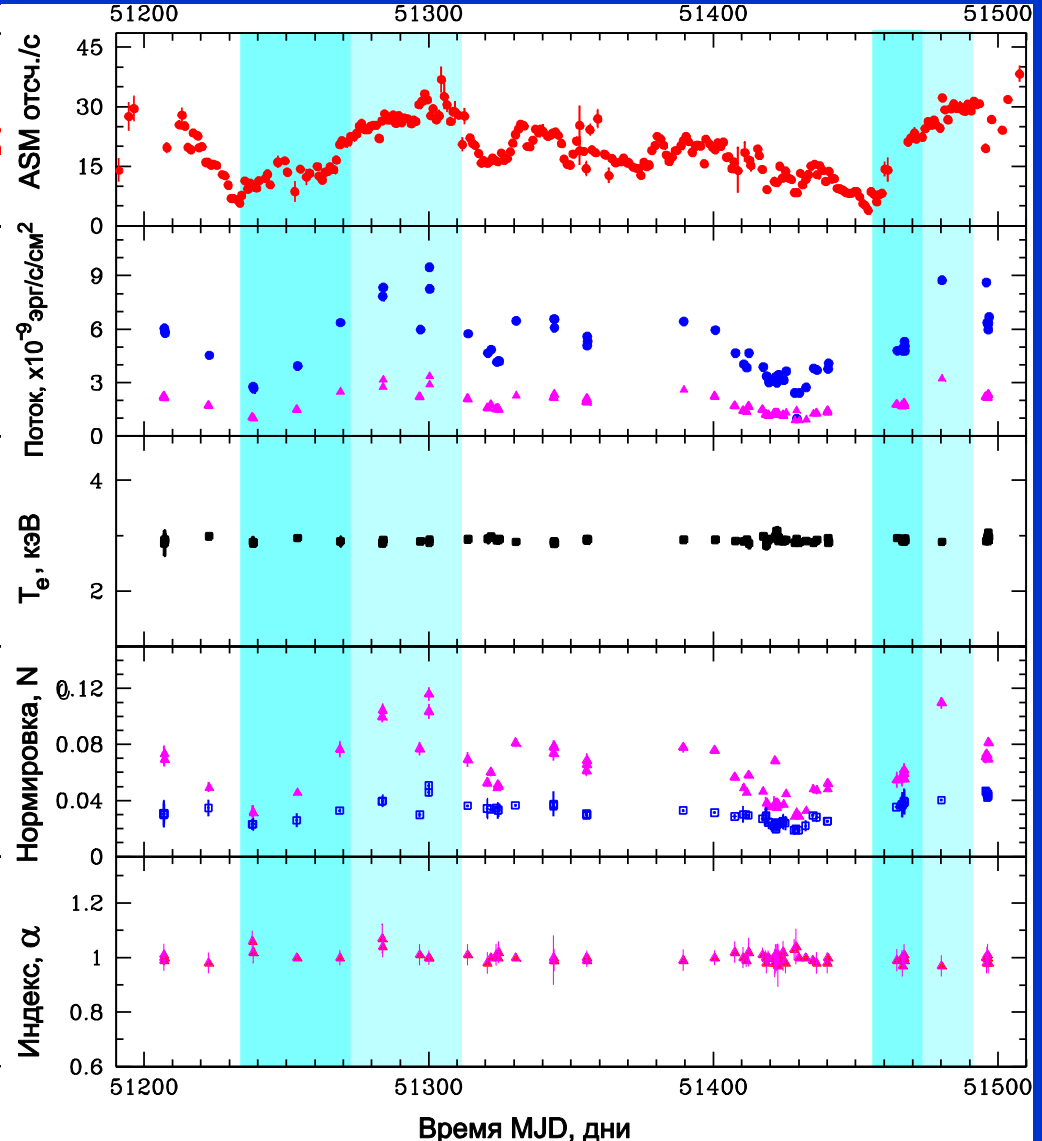
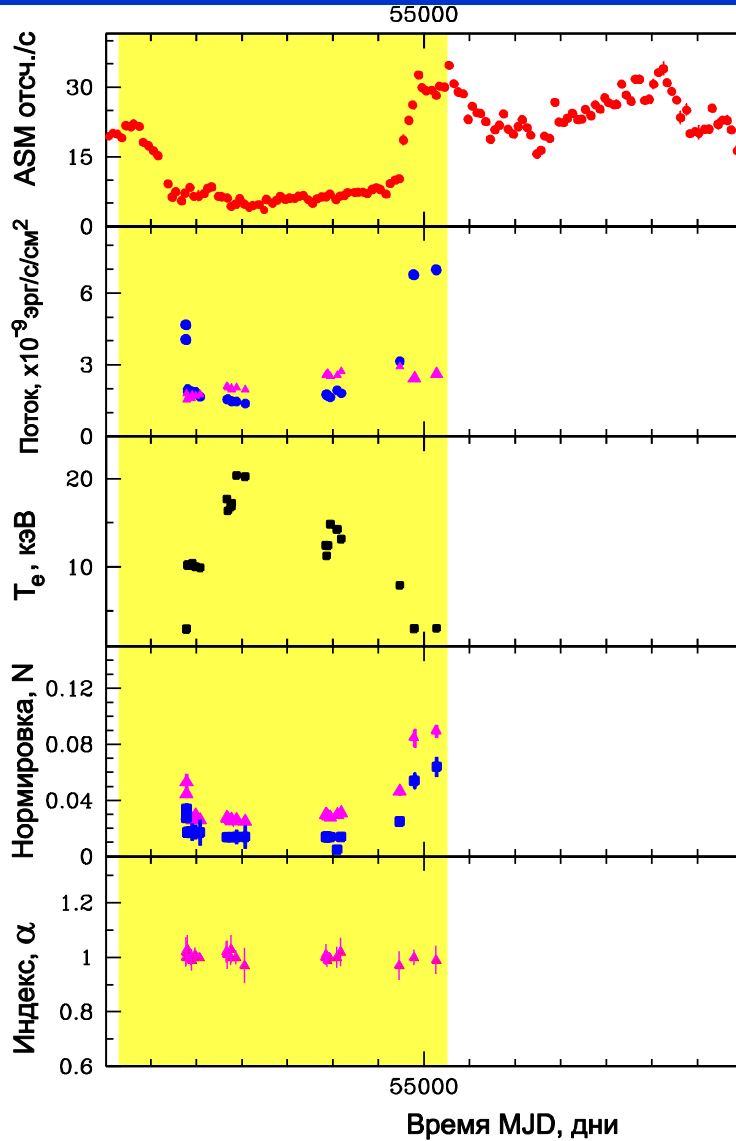
Модель	Параметр
wabs	N_H
BBODY	kT_{BB}
	N_{BB}
COMPTB	A
	kT_s
	$\log A$
	N_{COMPTB}
GAUSSIAN	E_{line}
	N_{laor}
	EW

$$\Gamma = 1.99 \pm 0.02, T_e = 3.52 \pm 0.08 \text{ кэВ},$$
$$E_{line} = 6.48 \pm 0.06 \text{ кэВ},$$
$$\chi^2 = 1.08 (451 \text{ dof})$$

wabs*(BB+COMPTB+GAUSS)



Особенности интервалов низкой и высокой светимости 4U 1820-30

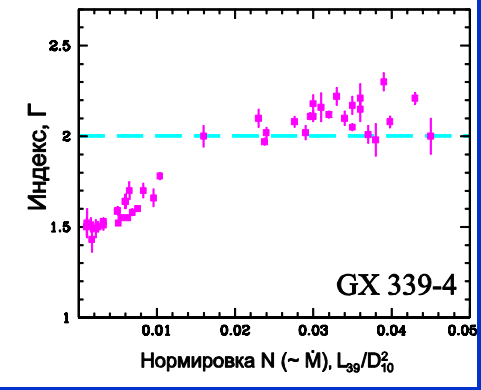
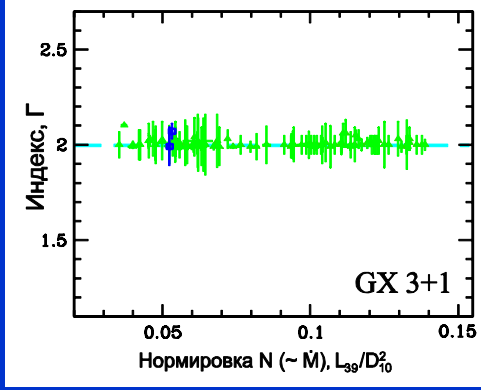
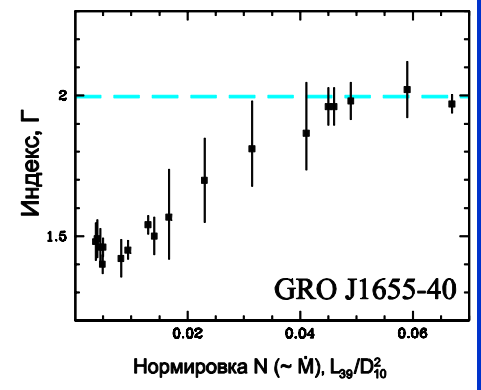
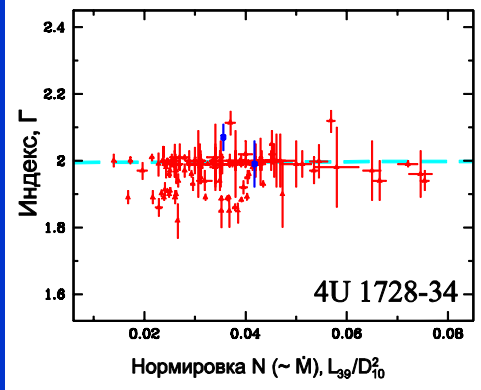
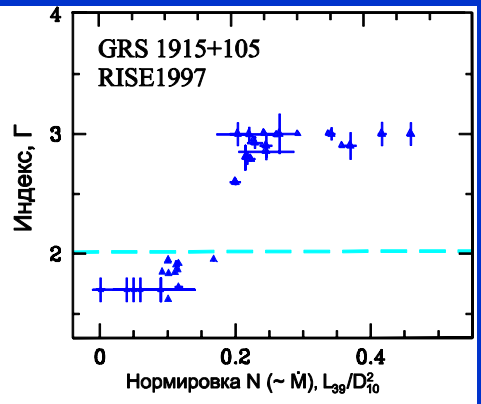
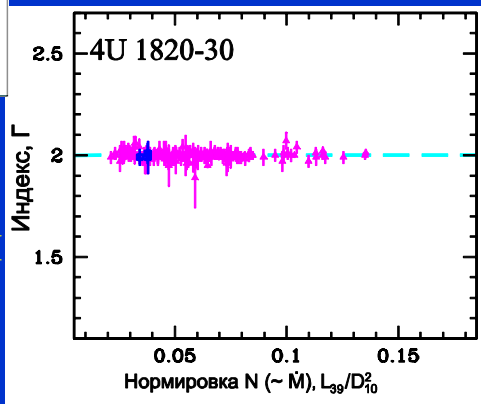




Индекс Г

Индекс Г

Индекс Г



Наблюдательное
обнаружение
постоянства
спектрального
индекса
для нейтронных
звезд:

4U 1728-34

4U1820-30

GX 3+1

Нормировка $N (\propto \dot{M})$

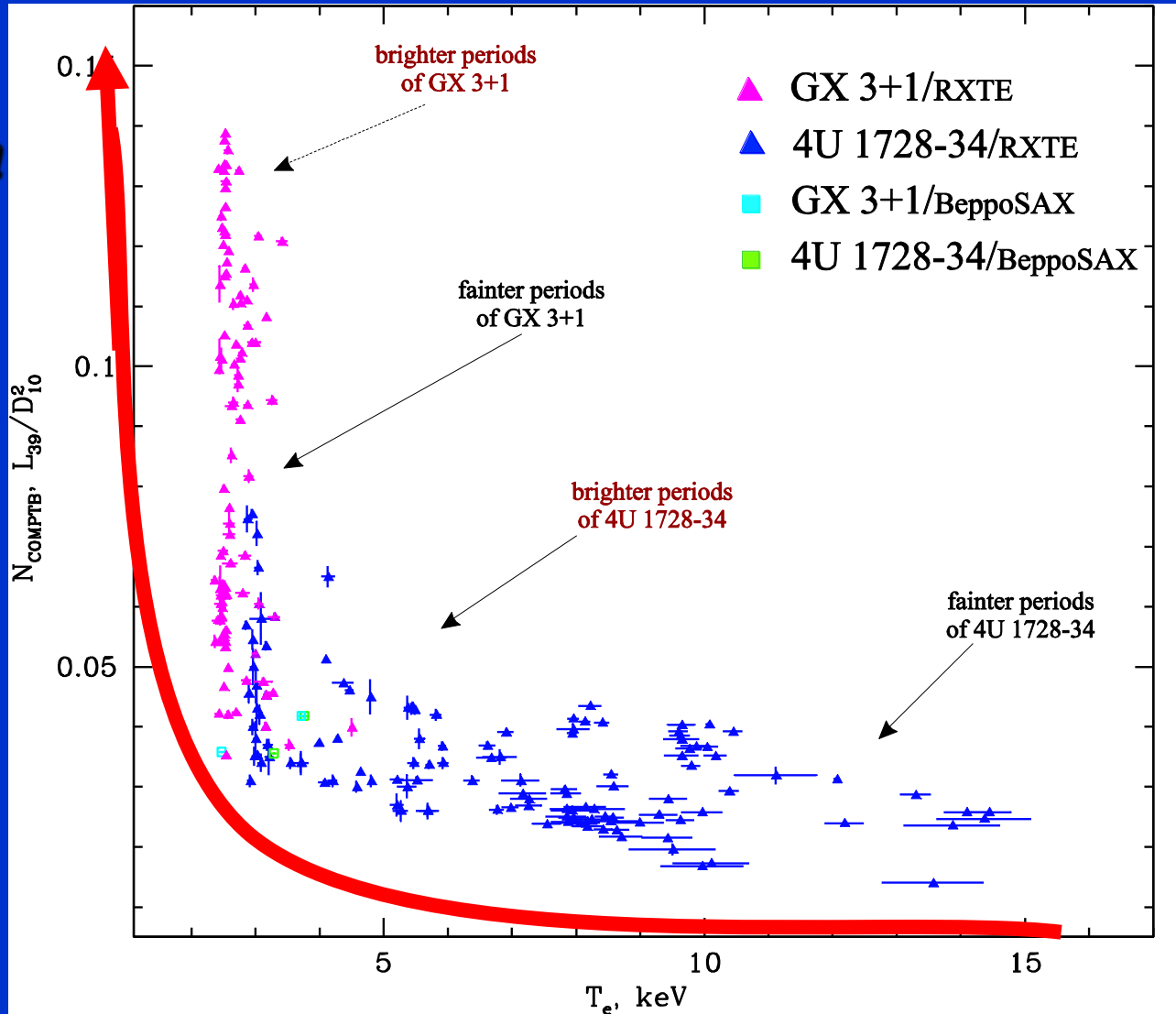
Нормировка $N (\propto \dot{M})$

Titarchuk, Seifina, &
Frontera (ApJ, 789, 57)



Soft luminosity vs kT_e

Banana state



Island state



Спектр мощности – $\Gamma(T_e)$

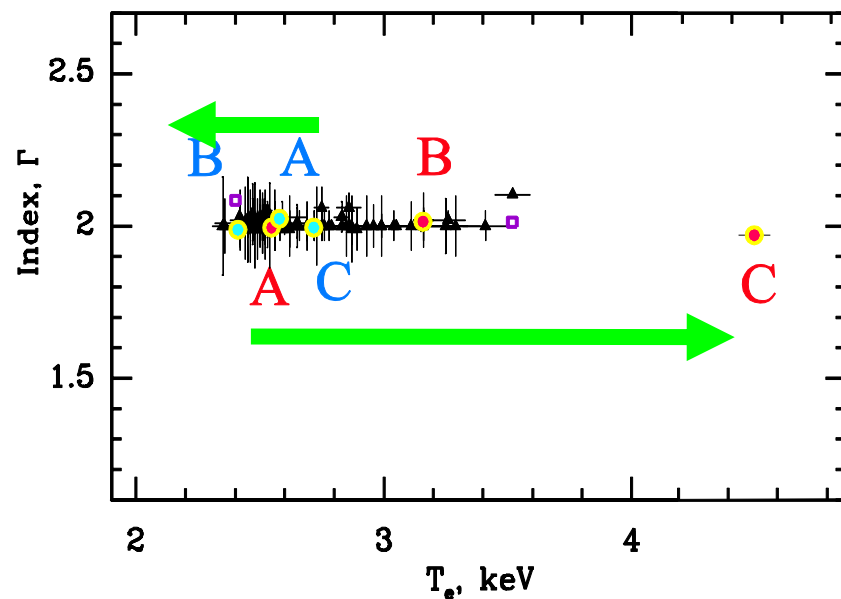
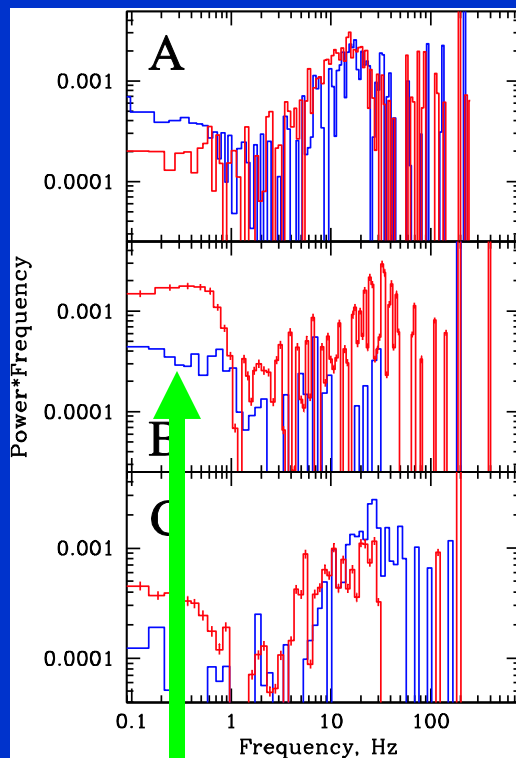
$T_e = 2.6$ кэВ



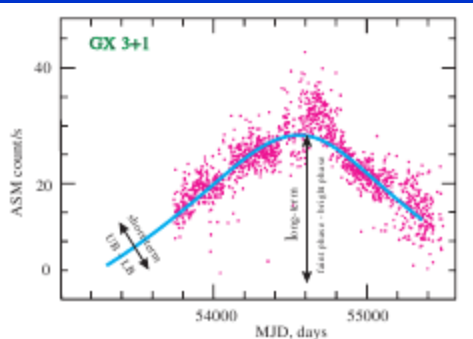
$T_e = 2.3$ кэВ



$T_e = 4.6$ кэВ



VLFN



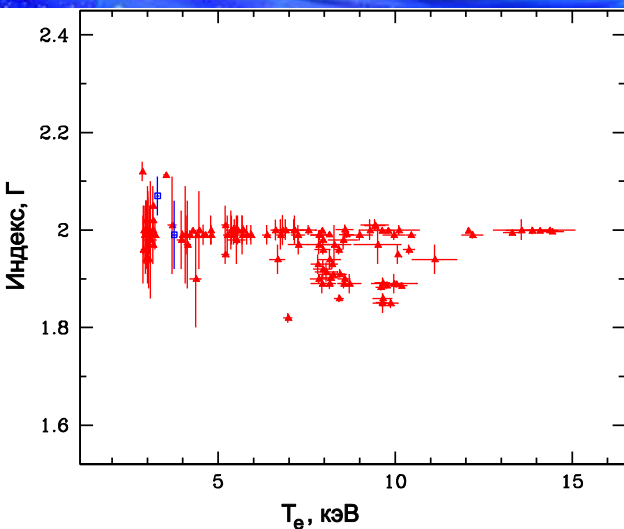
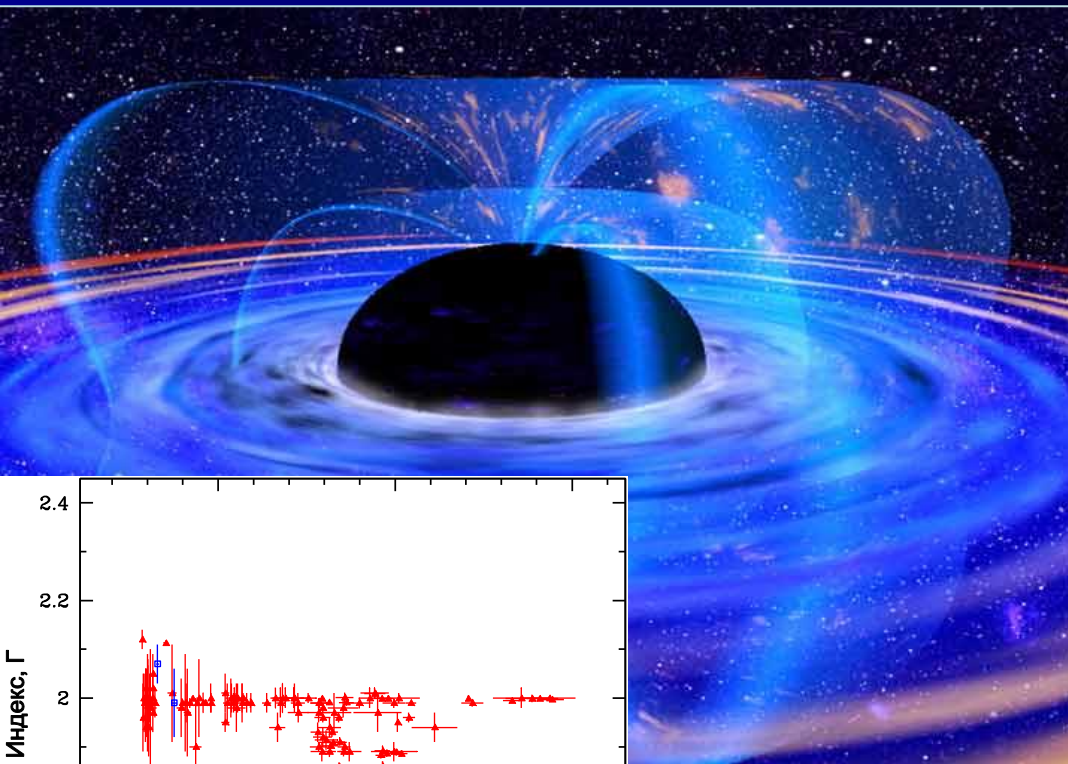
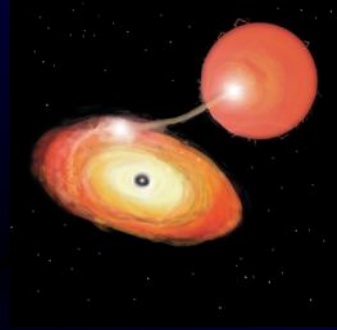


Основные выводы по H3 GX 3+1

- Спектральный индекс α не изменяется и остается **постоянным** ~ 1 ($\Gamma = \alpha + 1 = 2$) независимо от темпа аккреции
- Разделение излучения диска и зоны Комptonизации с температурами фотонов 0.7 кэВ и 1.3 кэВ, соответственно
- Описание UB-LB эволюции в терминах изменения kT_e (2.3-4.5 кэВ)
 - Рекомендательная литература:
 - **ApJ, 789, 57**



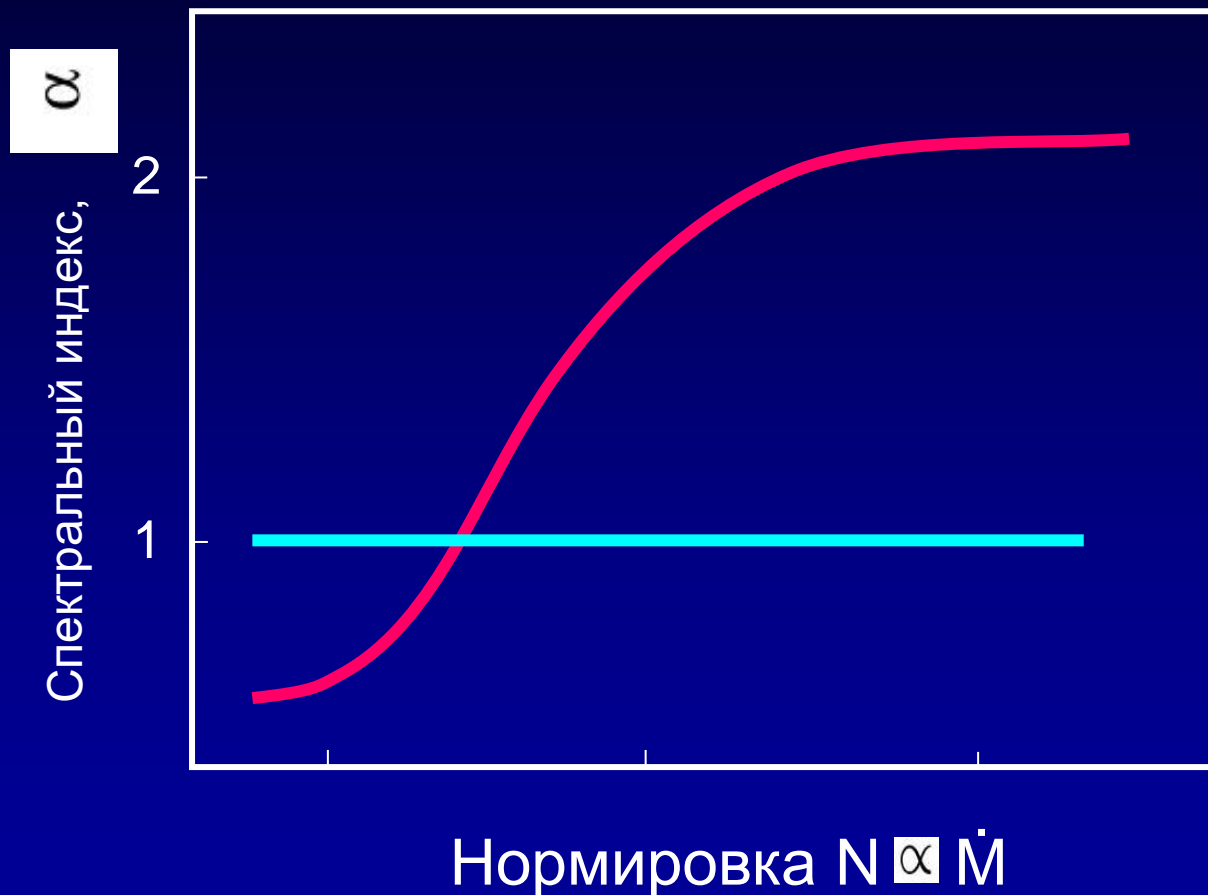
Основные результаты по H β «atoll»-типа



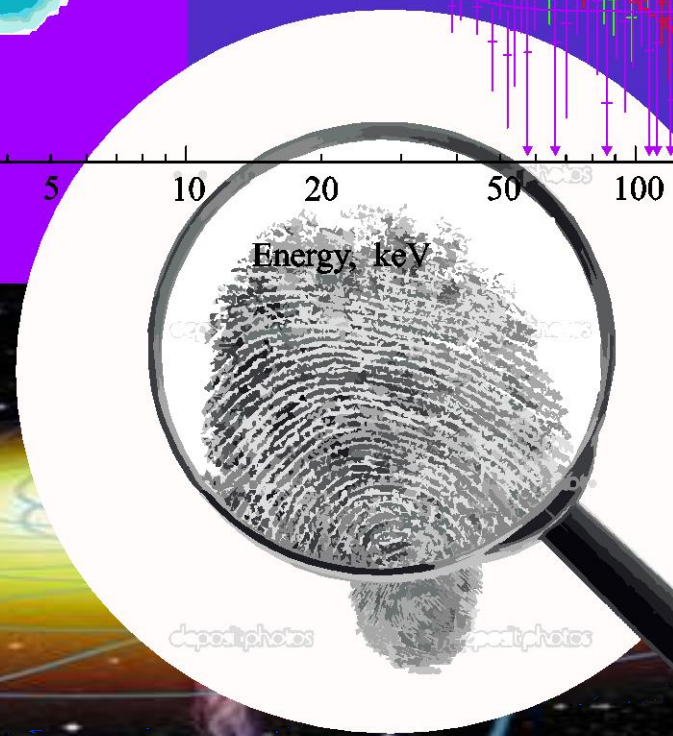
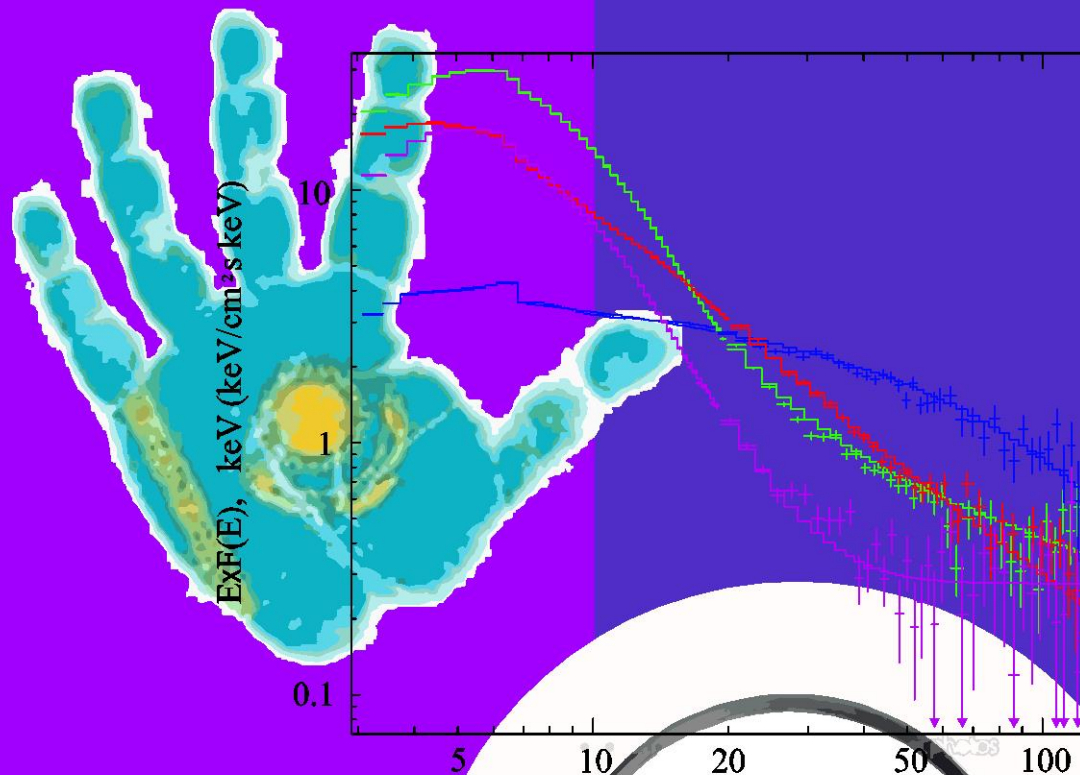
– Обнаружение
эффекта
постоянства
индекса в
спектрах H β
(*atoll*: 4U1728-34,
GX3+1, 4U1820-30)



Получено согласие наблюдений и теоретических предсказаний для ЧД (Titarchuk & Zannias, 1998; Laurent & Titarchuk, 1999; Farinelli & Titarchuk, 2011)



Недавно, эти результаты получили подтверждение группой Сюняева (Burke, Gilfanov & Sunyaev, MNRAS, astro-ph1609.095)



**Спектральные
признаки
аккрецирующих ЧД
и НЗ в
рентгеновских
двойных системах**



НЗ и вечность

- С момента зарождения Вселенной прошло уже более десятка миллиарда лет, в течение которых происходит:
 - ➔ звездная эволюция,
 - ➔ осуществляется изменение состава космического пространства,
 - ➔ одни космические объекты исчезают, а на их месте появляются другие.
- Этот процесс происходит постоянно, однако из-за огромных временных промежутков, мы в состоянии наблюдать **только один единственный кадр колоссальной и увлекательной мультисессии.**



БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



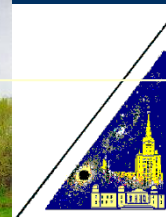


Нейтронные звезды (продолжение)

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

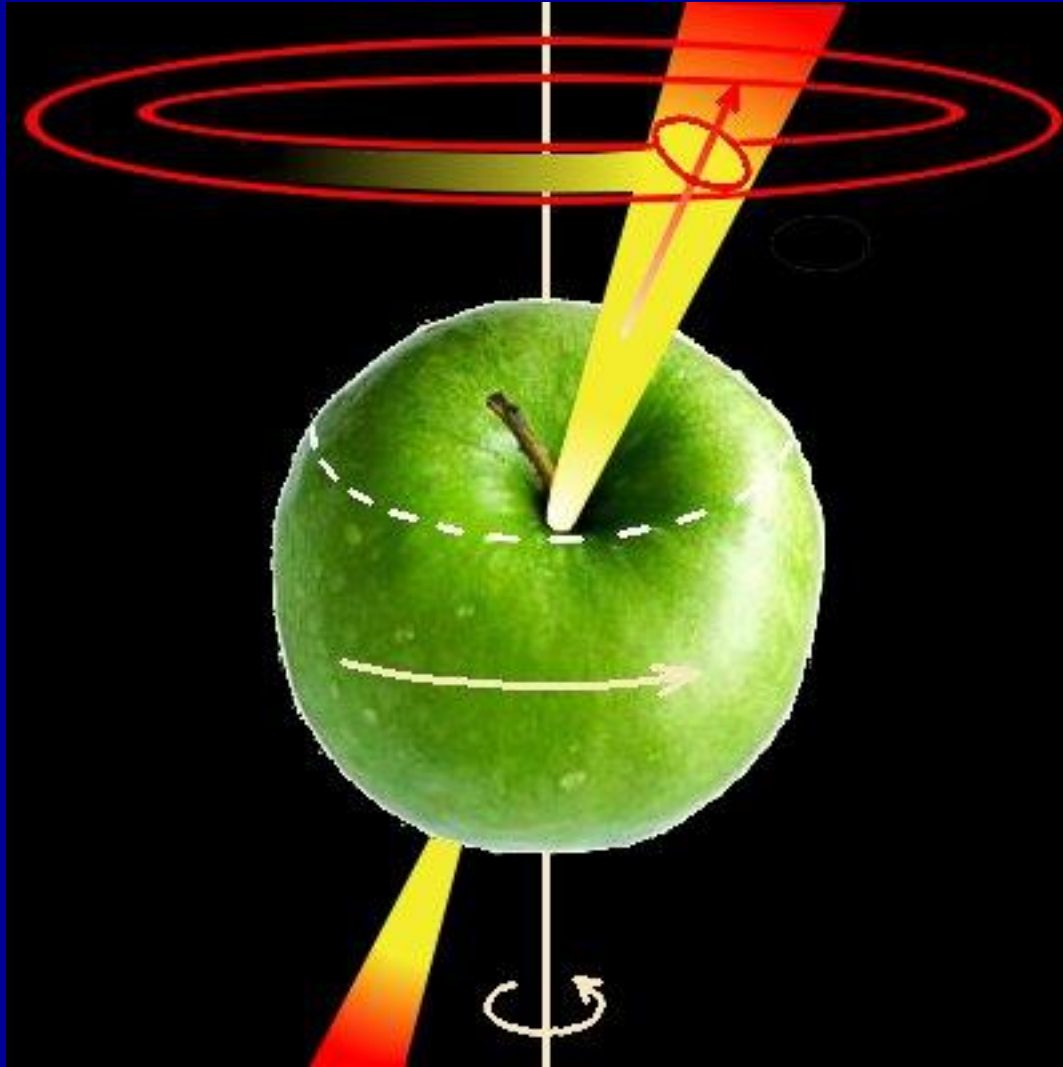
*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

БАЗИС





НЗ в Солнечной системе



- В настоящее время приближающийся к нашей планете объект ошибочно называют «звезда» (иногда «планета»?) Нибиру, которая ранее находилась между орбитами Марса и Юпитера, и в далеком прошлом была разрушена тяготением массивного объекта.
- - это необычное небесное тело «потухшая» НЗ, вещество которой выгорело в процессе эволюции обычной звезды.



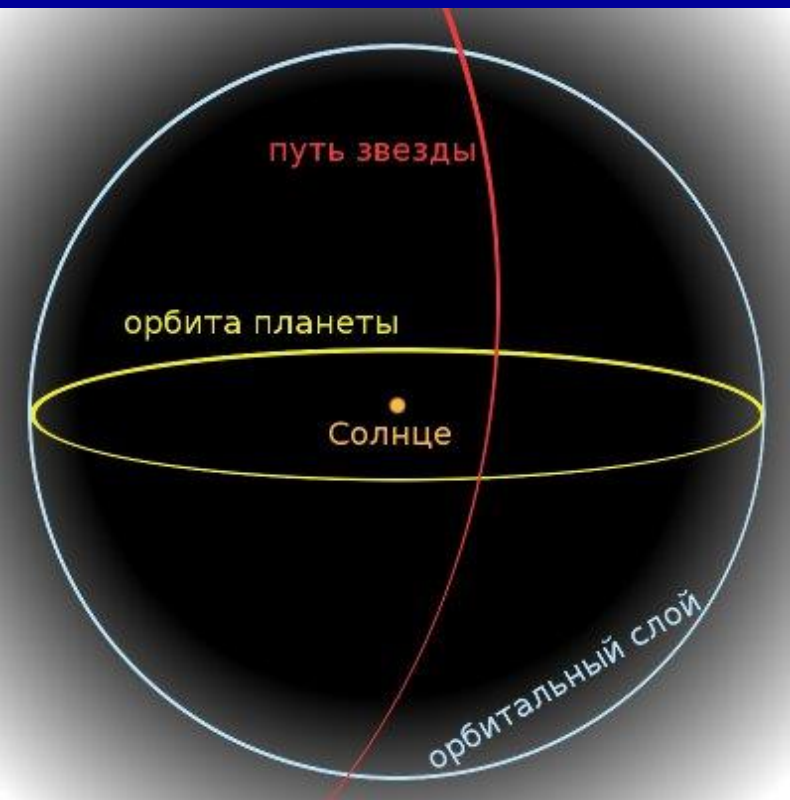
Визит нейтронной звезды, или Страсти космические:

падение астероида – уже не круто?

- Недавно канал ОРТ, видимо, хорошо простимулированный новой информацией о падении астероида, тешил народ страшилками. Одной из них было строительство ковчега для эвакуации 250.000 землян за 100 световых лет на новую землеподобную планету в связи с тем, что Землю должна была разорвать приближающаяся из космоса **нейтронная звезда**.
- *Так что будем разбираться фэйк это или не фэйк...*



Оценим насколько повлияет НЗ-странница на динамику движения тел Солнечной системы



- Сколько-нибудь заметное влияние на динамику движения тел нашей системы звезда-странница стала бы оказывать, начиная с расстояний, на котором сила притяжения к ней достигла бы, скажем, 1% от силы притяжения к Солнцу. Это достигается, когда от возмущаемого тела до звезды примерно в 12 раз дальше, чем до Солнца.
- *Это последует только в случае, если НЗ летит в «нашу сторону»*

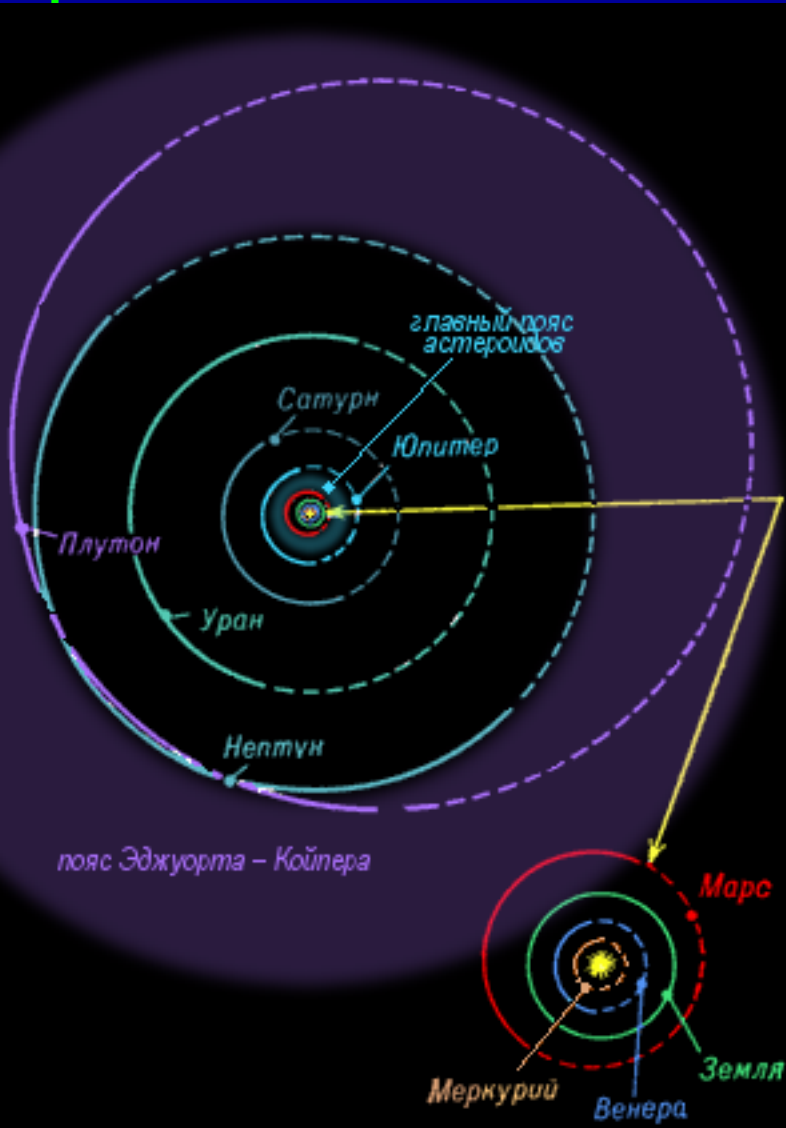


Тривиальные расчеты

- Далее все расчёты сделаны для наиболее типичной звезды: **масса – 1,5 солнечной; радиус – 10 км, скорость движения – 200 км/сек.** Вероятно, она должна быть не местной. Местные семь нейтронных звёзд, родительские взрывы которых за последние несколько миллионов лет разогнали из нашего уголка Галактики почти весь межзвёздный газ, учёным известны и признаны безопасными (не движутся в сторону Солнца).



Каждые полмиллиона лет «такая» НЗ гравитационно близко подходит к Солнцу



- При типичных скоростях нейтронных звёзд можно оценить, что каждые **500–1000 лет** такая НЗ гравитационно близко подходит к какой-то очередной обычной звезде. Однажды ею может стать и Солнце. Ориентировочно, через **каждые полмиллиона лет так и происходит**. То есть за время геологической жизни Земли такое бывало уже порядка **10.000 раз**.



Все-таки «фэйк» ...

- Вдумаемся: в одном случае из трёх миллионов! А всего за 4,5 млрд. лет жизни Солнечной системы таких встреч было порядка 10 тысяч. И ведь около половины своей жизни Солнечная система уже прожила. Нетрудно посчитать, какой шанс наша Солнечная система имеет повидать в своих внутренних покоях незваную гостью за всё (и прошлое и будущее) время своей жизни. Этот шанс равен $\sim 0,07\%$.

Z-источники



Классификация нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных системах

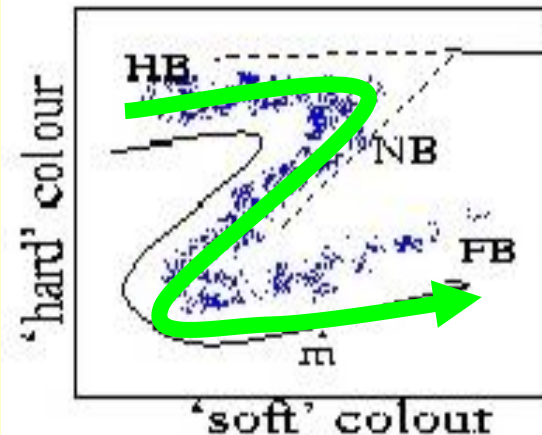
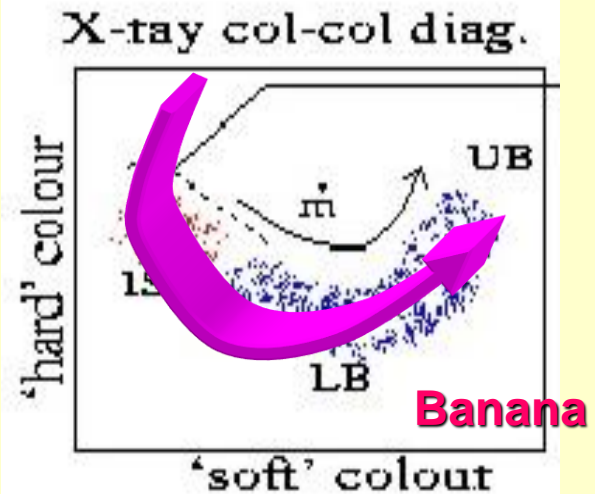
Atoll sources:

$L_x \sim 0.01-0.1 L(\text{Edd})$
type I X-ray bursts
most are transients
Hard & Soft spectral states
X-ray millisecond pulsars

Z-sources:

$L_x \sim 0.1-1.0 L(\text{Edd})$
a few X-ray bursts
all persistent
(except for XTE J1701-462,
the first transient Z source,
Homan et al. 2007, ApJ)

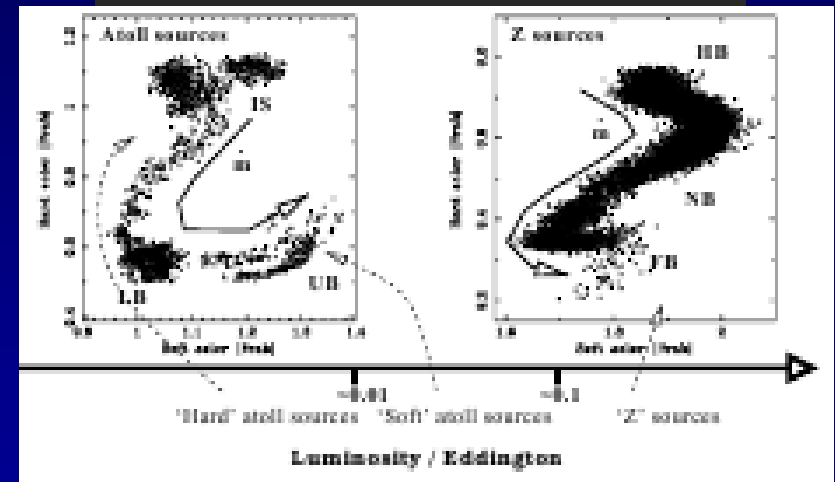
Island





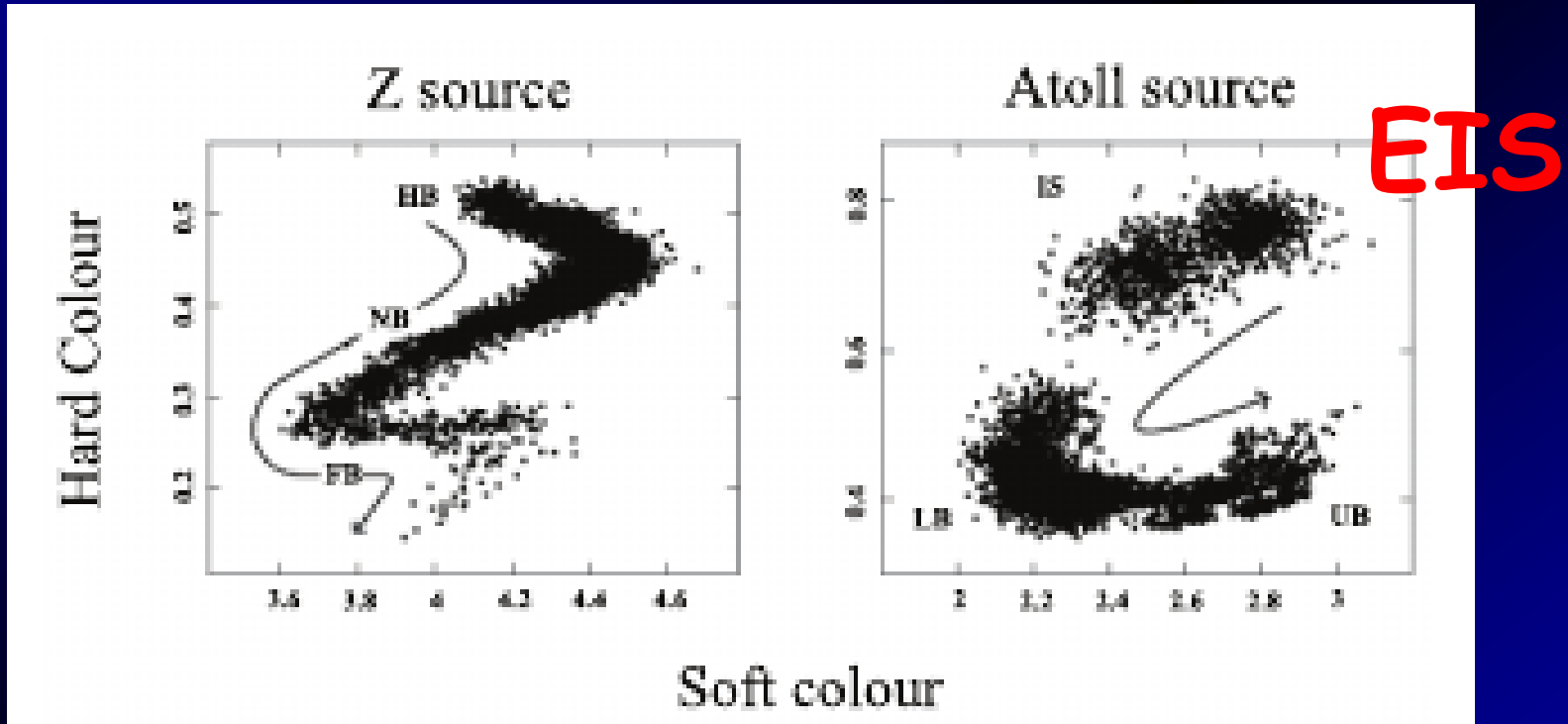
АТОЛЛ- и Z-ИСТОЧНИКИ

- Выделяют более детальную классификацию спектральных состояний
- **«atoll»-источников:**
 - *Island (IS)*,
 - *Extreme Island (EIS)*,
 - *Left Lower Banana (LLB)*,
 - *Lower Banana (LB)* и
 - *Upper Banana (UB)*
- **Z-ИСТОЧНИКОВ:**
 - **Horizontal Branch (HB)**,
 - **Normal Branch (NB)** и
 - **Flaring Branch (FB)**,
- которые отличаются уровнем средней светимости, а также спектральными и временными характеристиками





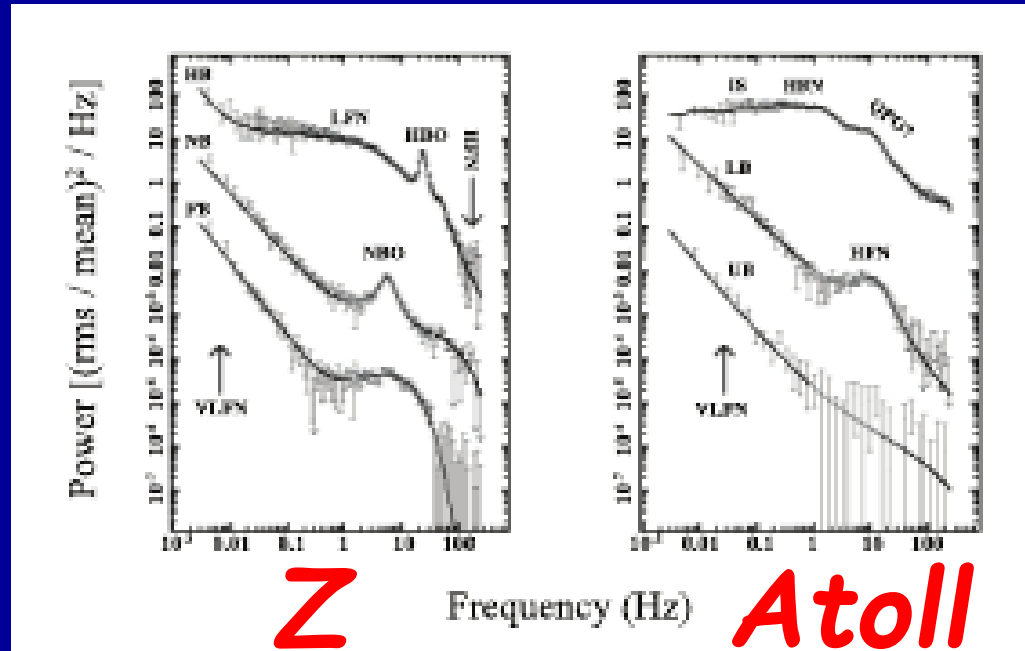
Историческое отличие atoll и Z-источников



- Типичные цветковые диаграммы для atoll- (правая панель) и Z-источников (левая панель). Для atoll источников показано **extreme island state** (EIS), island state (IS), lower left banana state (LLB) и lower banana (LB). Для Z-источников: horizontal branch (HB), normal branch (NB) и flaring branch (FB).



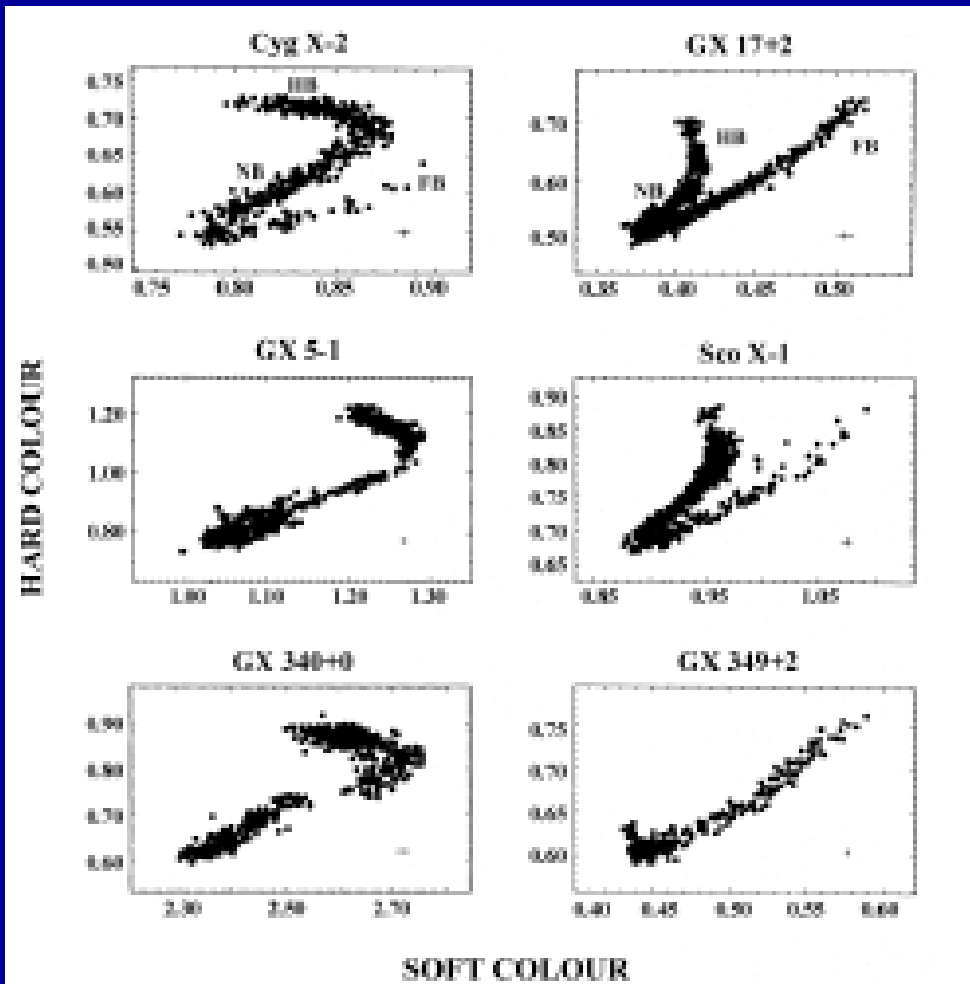
Эволюция спектра мощности для atoll- и Z-источников



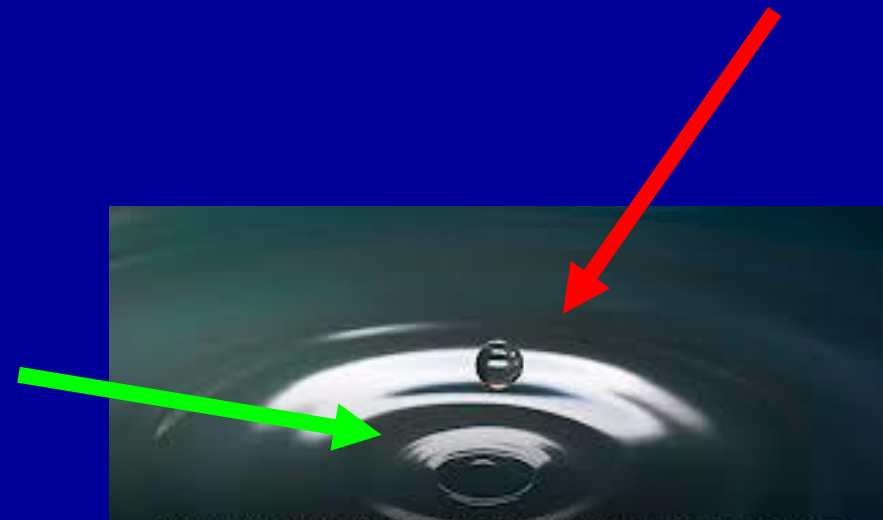
- Power spectra corresponding to spectral states of **Z-track sources (left)** and **Atoll sources (right)** revealing their characteristic features: QPO and noise components.



Z-источники делятся еще на два под-класса:



- ➔ Cygnus X-2 like (left) and
- ➔ Scorpius X-1 like (right) (Hasinger & van der Klis 1989)

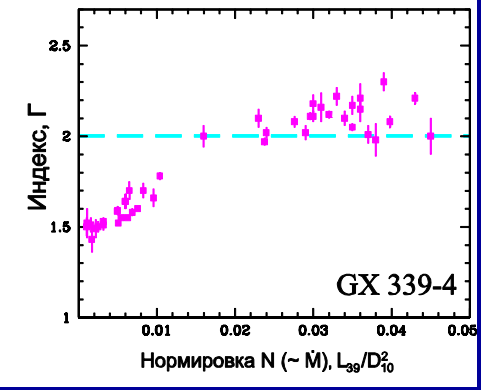
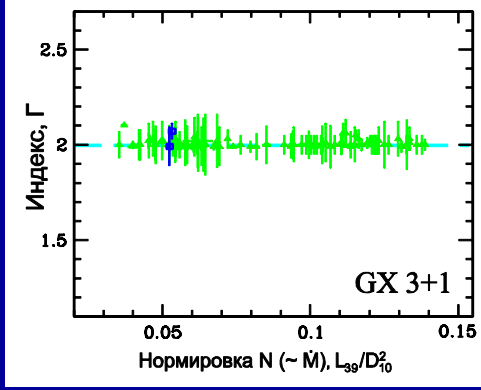
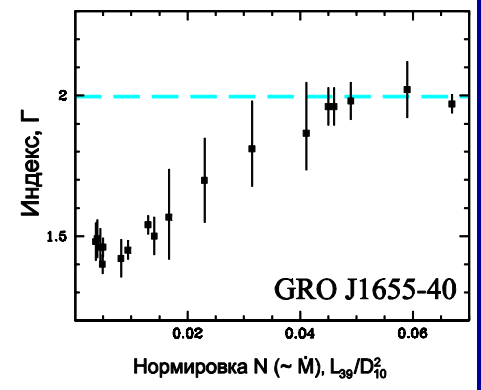
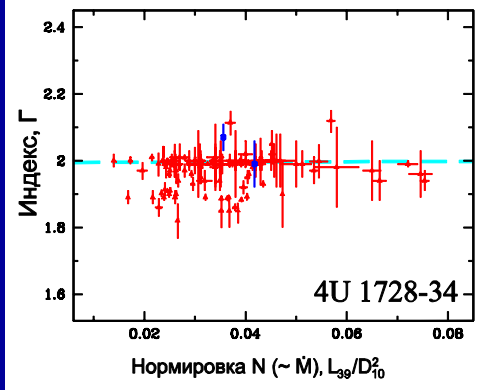
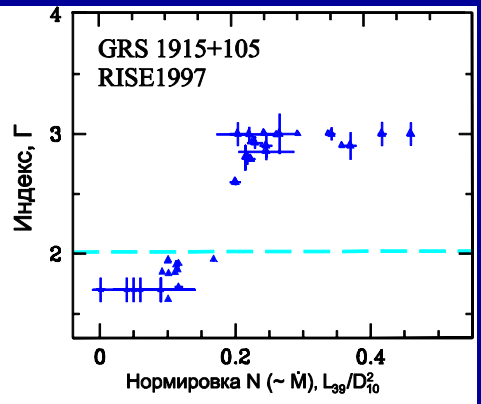
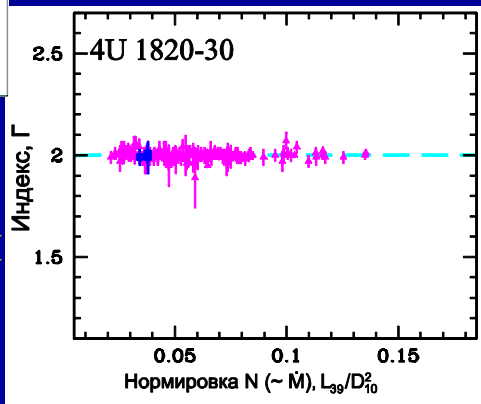




Индекс Г

Индекс Г

Индекс Г



Наблюдательное
обнаружение
постоянства
спектрального
индекса
для нейтронных
звезд:

4U 1728-34

4U1820-30

GX 3+1

Нормировка $N (\propto \dot{M})$

Нормировка $N (\propto \dot{M})$

Titarchuk, Seifina, &
Frontera (ApJ, 789, 57)

Z-источники



- Напоминает символ "Zorro" из одноименного фильма



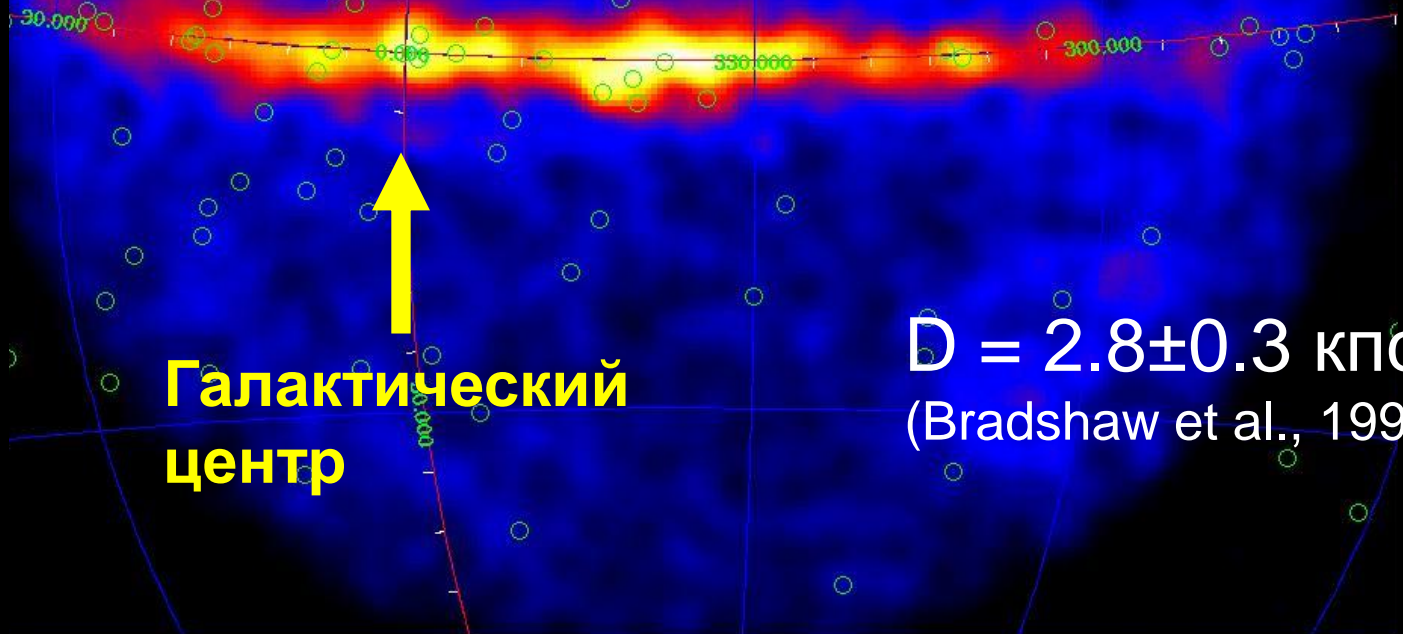
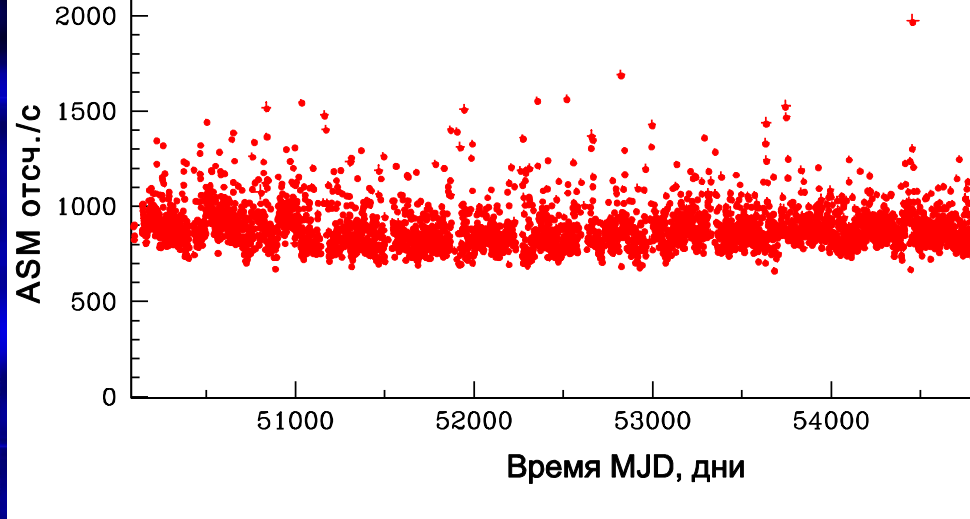
Анализ спектральных и временных свойств рентгеновского излучения **Z источников: Scorpius X-1** и **GX340+0**. Фаза повышенной жесткости спектра во время «Flaring Branch»

- Основная задача – исследование поведения индекса в зависимости от темпа аккреции для источников с надежно идентифицированными нейтронными звездами, достигающих режима около-Эддингтоновской светимости (для Z-источников).



- Расположен высоко над Галактической плоскостью: $+23^\circ$

Sco X-1



Галактический центр

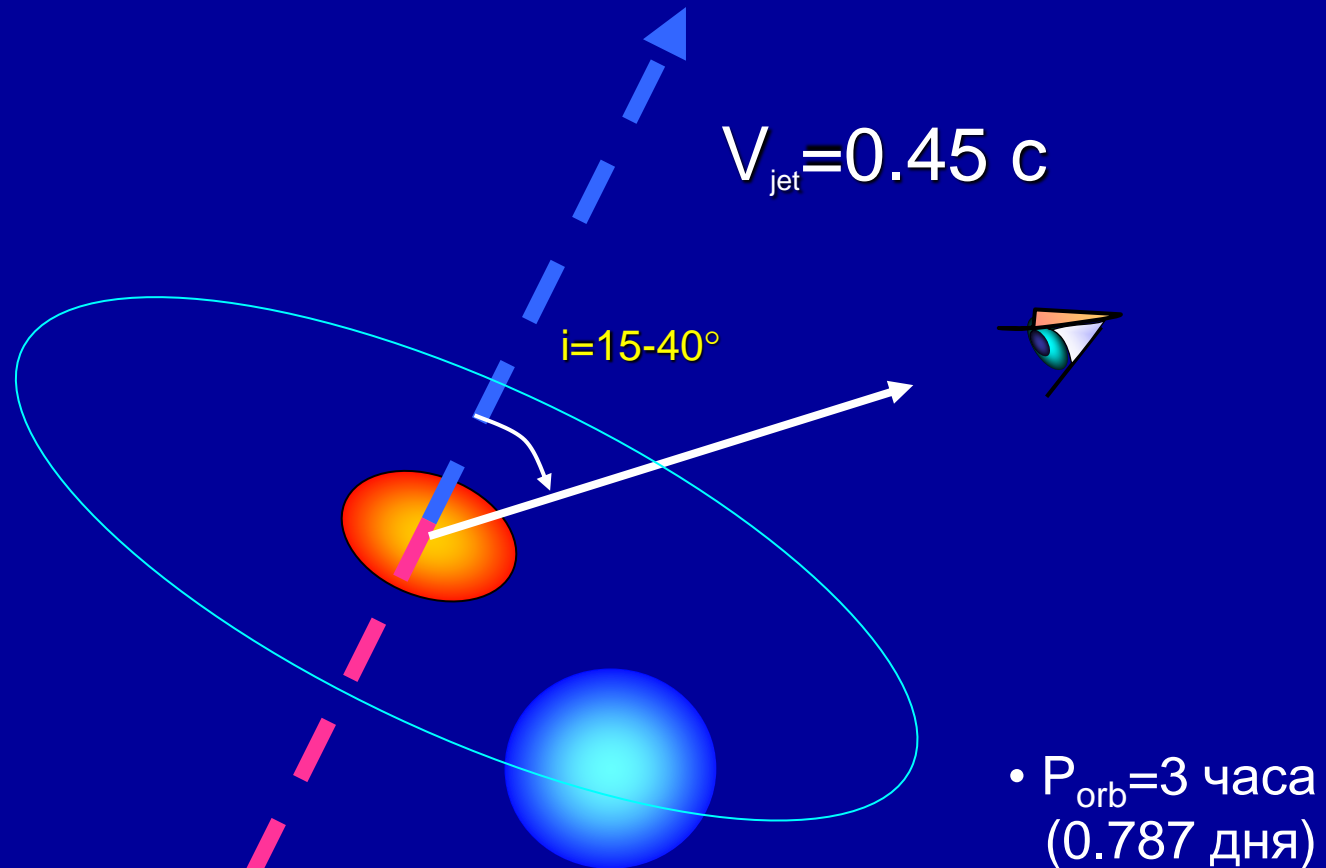
$D = 2.8 \pm 0.3$ кпс
(Bradshaw et al., 1999)





Основные параметры Sco X-1

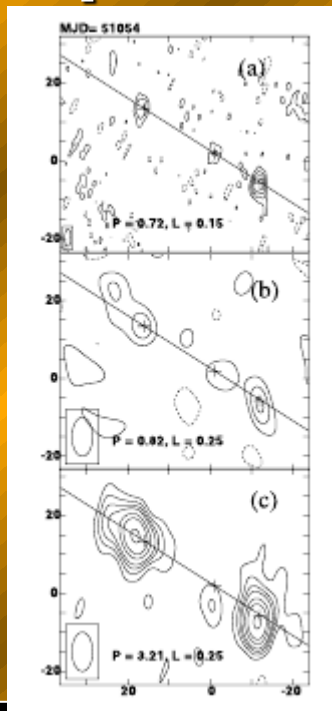
- $i=15-44^\circ$
(Crampton et al., 1976,
Fomalont et al., 2001)
- **Звезда-
компаньон –
класса M** (Steeghs
& Casares, 2002)
- $M_x=1.4 M_\odot$
- $M_v=0.4 M_\odot$
(Steeghs & Casares,
2002)



- **Яркий радиоисточник со струйными выбросами (VLBI,**
Fomalont et al. 2001)

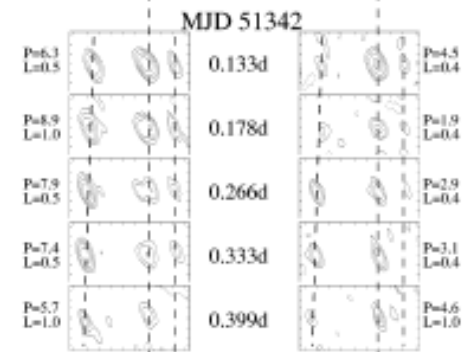
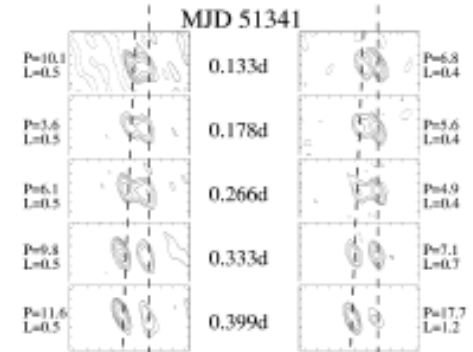
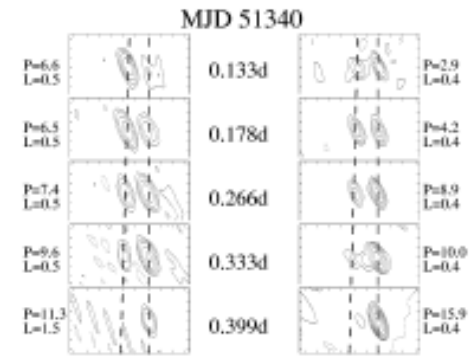
Radio band:

A series of VLBI images of Sco X-1 during the outburst in June 1999 [Fomalont et al., 2001]



•Bright radio source, and recently VLBI jets at 0.45 c (Fomalont et al 2001)

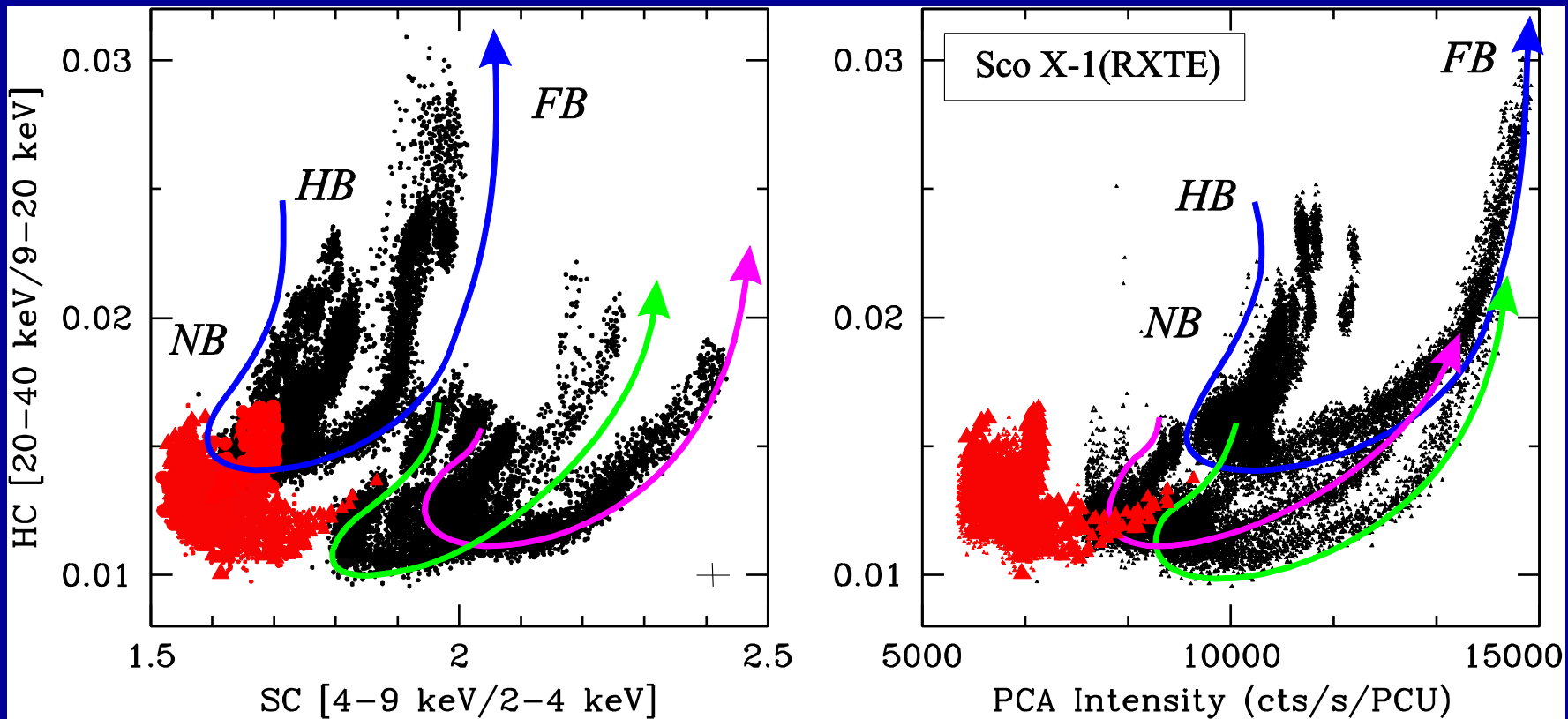
Images on 1998 August 29. (a) 4.5x1.5 mas resolution image at 5.0 GHz, (b) 10x5 mas resolution image at 5.0 GHz, and (c) 10x5 mas resolution image at 1.7 GHz



European VLBI Network images of Sco X-1 at 1.7 and 5.0 GHz with 10 x 5 mas resolution during 1999 June observation.



Диаграммы жесткости для Sco X-1



Radio/X-ray coupling vs CD

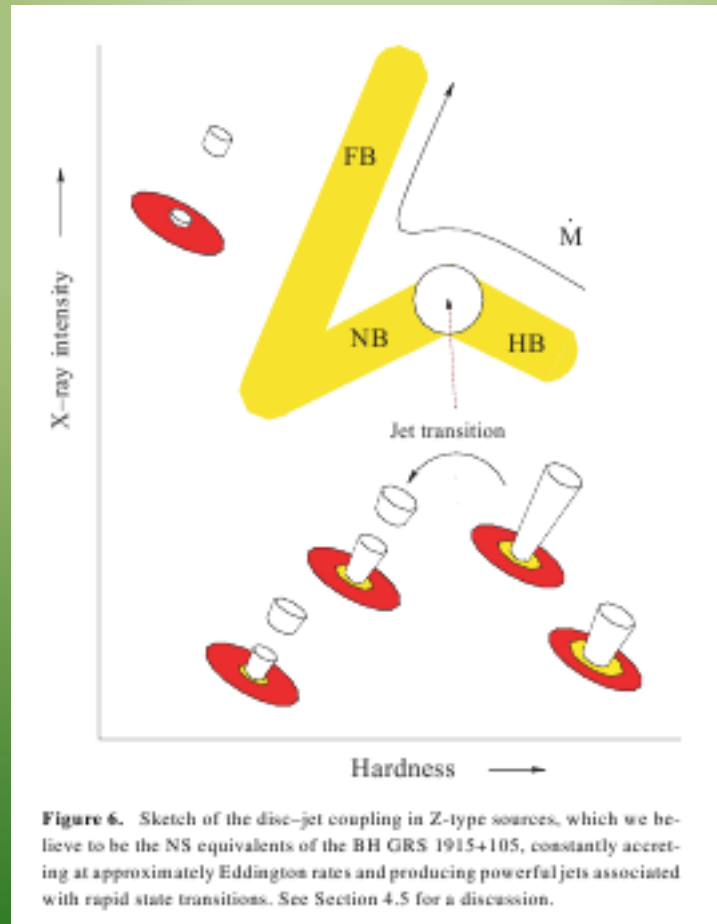
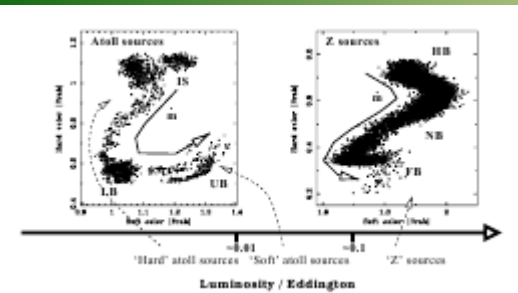
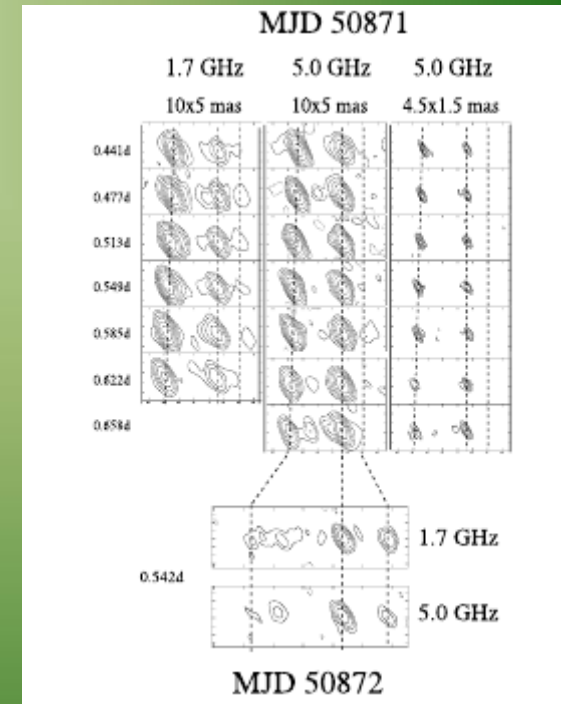
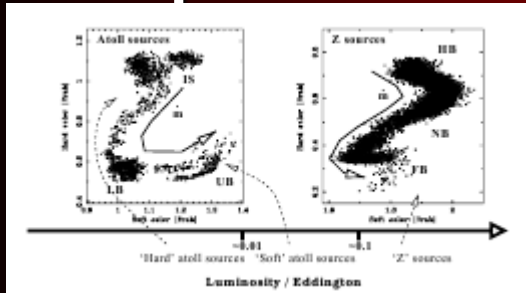


Figure 6. Sketch of the disc-jet coupling in Z-type sources, which we believe to be the NS equivalents of the BH GRS 1915+105, constantly accreting at approximately Eddington rates and producing powerful jets associated with rapid state transitions. See Section 4.5 for a discussion.



Fomalont et al., 2001

Transformation of "Canonical" spectral state diagram for Z sources for Sco X-1



Sco X-1

Horizontal
branch

Horizontal
branch

Normal
branch

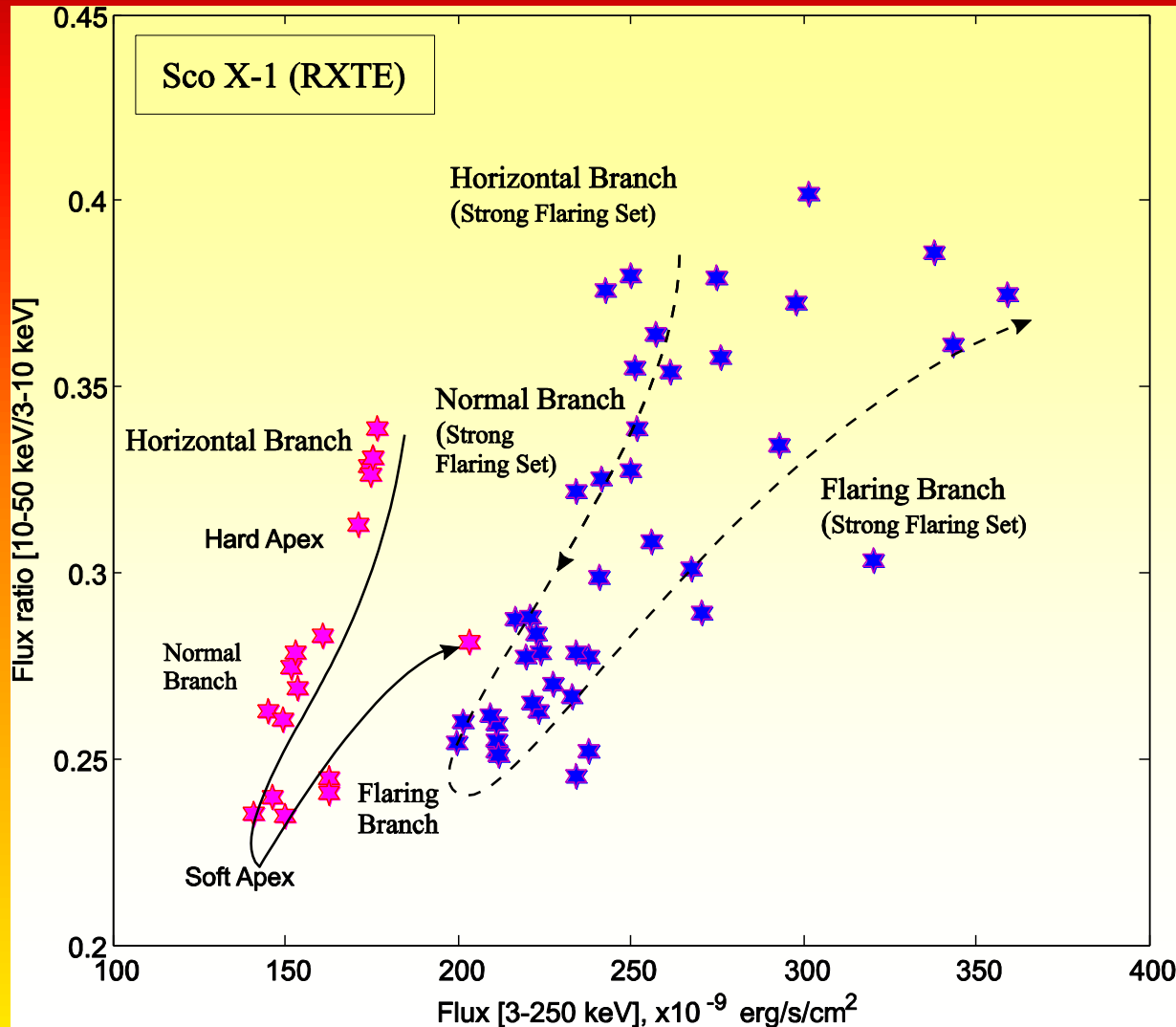
Normal
branch

Flaring
branch

Flaring
branch



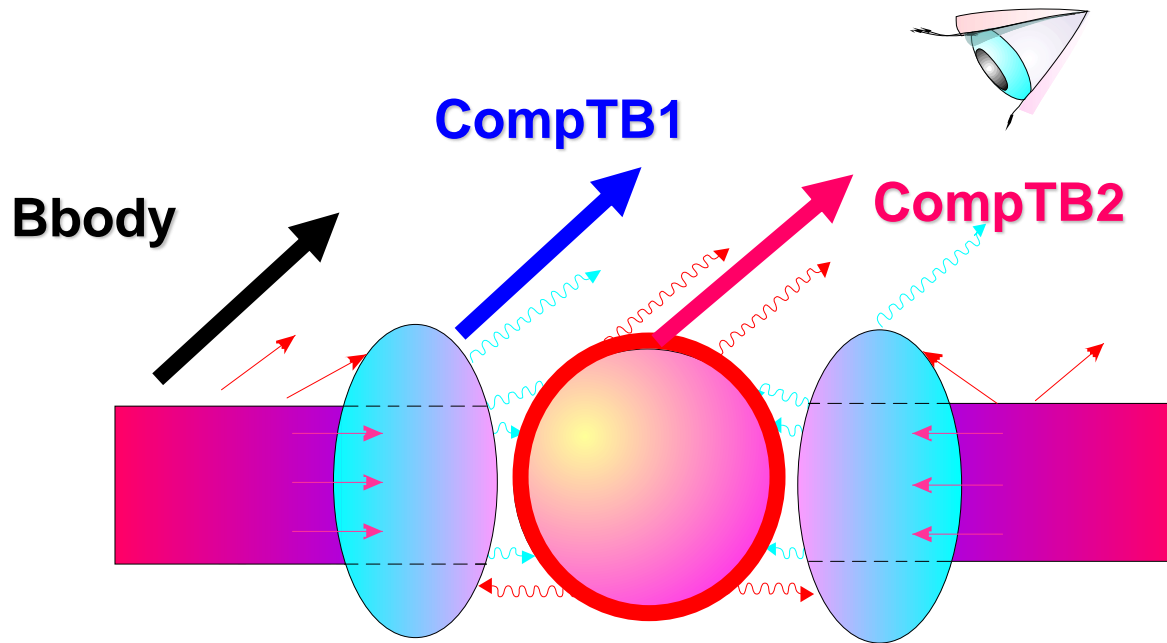
Hardness Intensity diagram of Sco X-1





Спектральная модель для H3

(в соответствии с результатами аппроксимации спектров по данным RXTE)

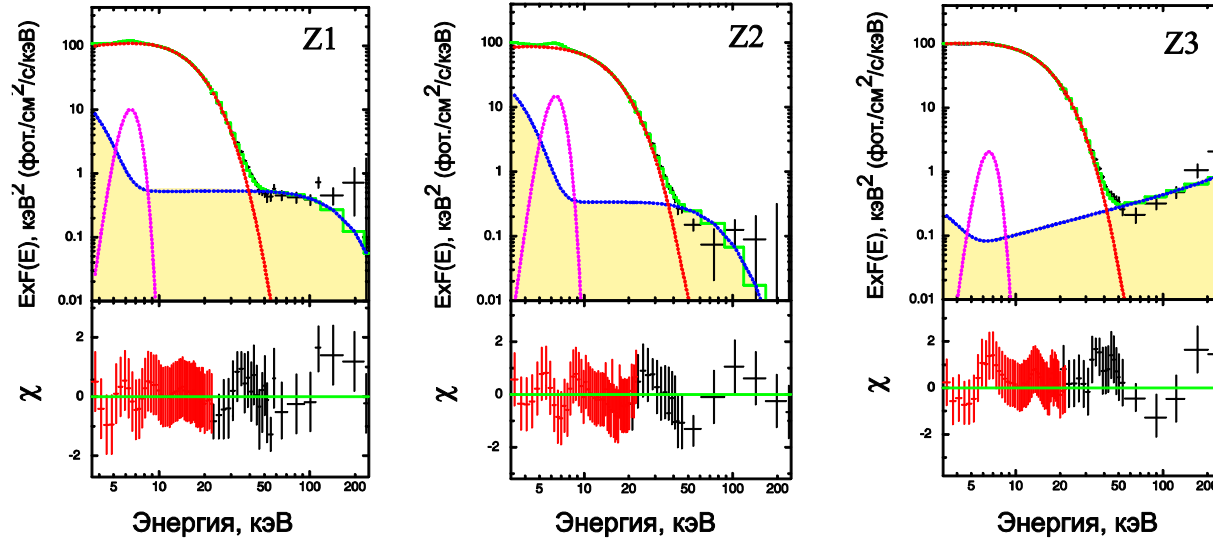


**Наличие
поверхности
(поверхность
H3)**

$$\text{wabs}^*(\text{bbody} + \text{compTB} + \text{compTB} + \text{gauss})$$



Моделирование спектра ScoX-1

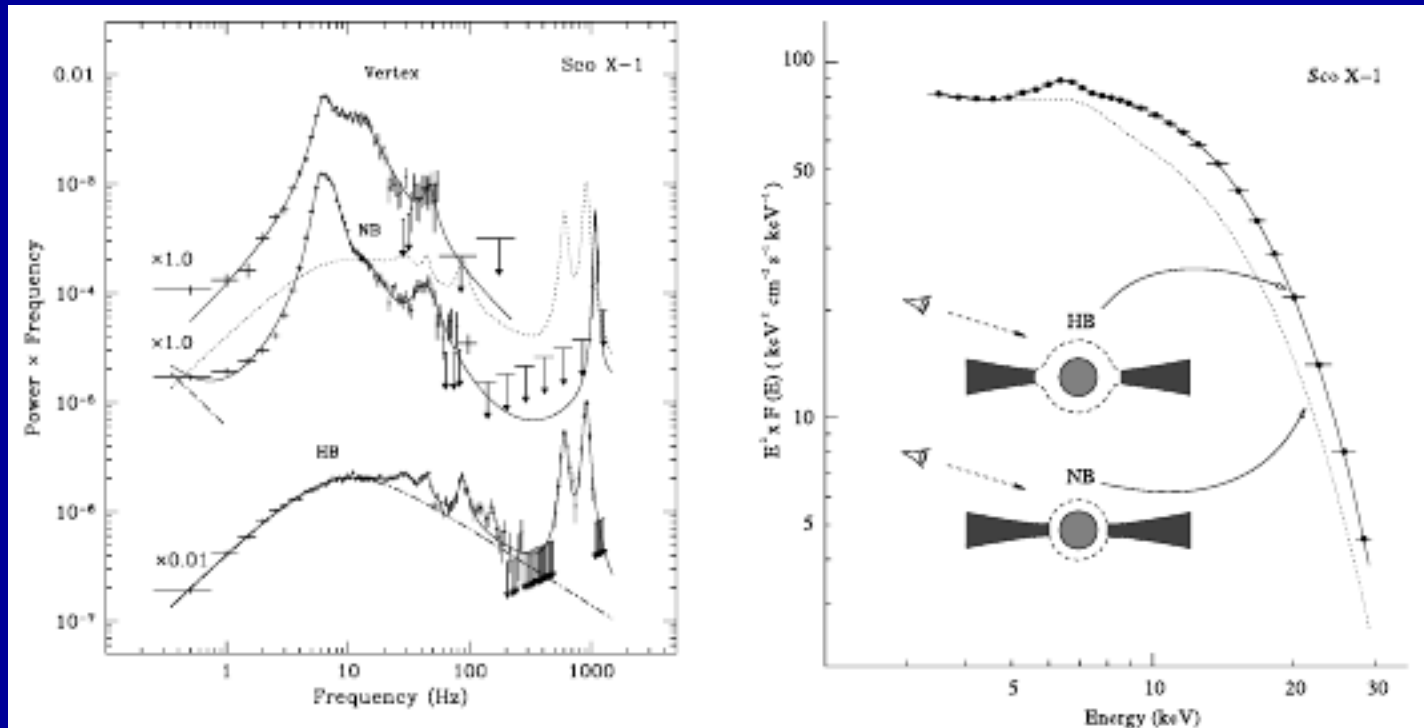


`wabs(CompTB1+CompTB2+Gauss)`

Модель	Параметр
CompTB_1	α_1
	kT_1 (3-120 кэВ)
	$\log A_1$
	N_{com1}
CompTB_2	α_2
	kT_2 (3-5 кэВ)
	$\log A_2$
	N_{com2}
GAUSSIAN	E_{line}
	σ
	N_{line}
Wabs	N_{H}



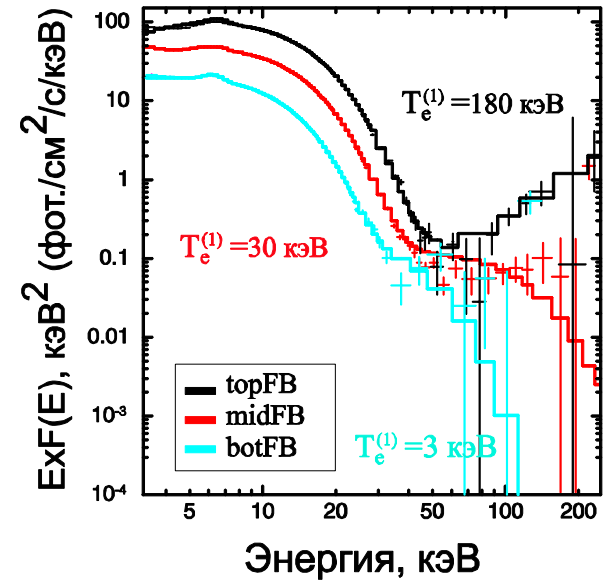
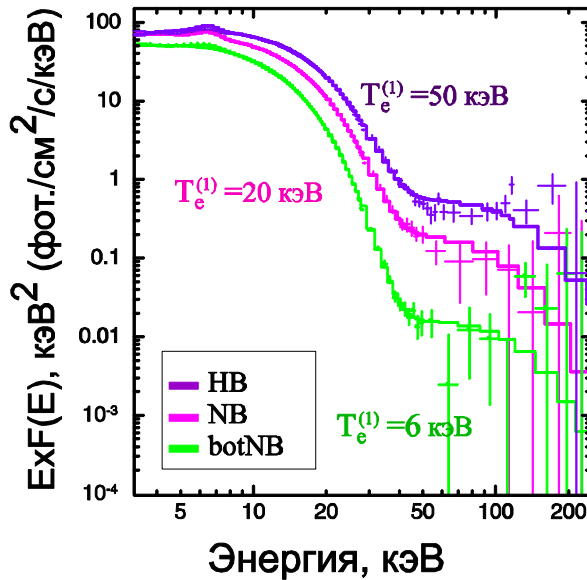
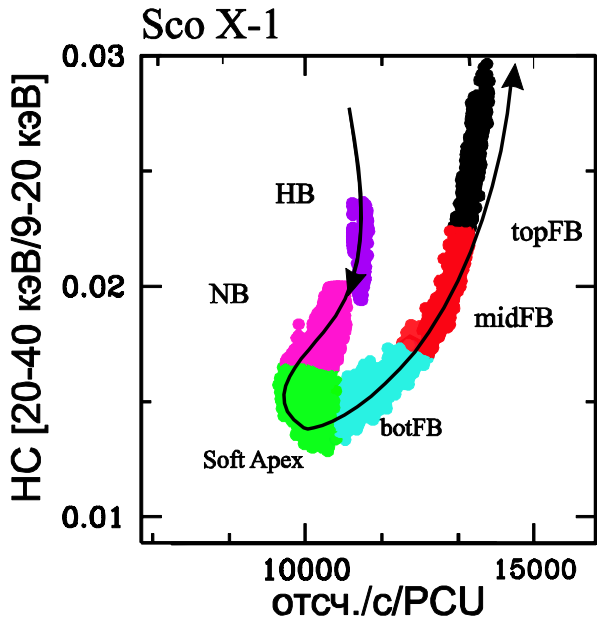
Эволюция временных и спектральных свойств Sco X-1 во время вспышек



- *Bradshaw, T & Kuznetsov, 2007, ApJ, 663, 1225*



Открытие фазы повышенной спектральной жесткости в Эддингтоновском режиме



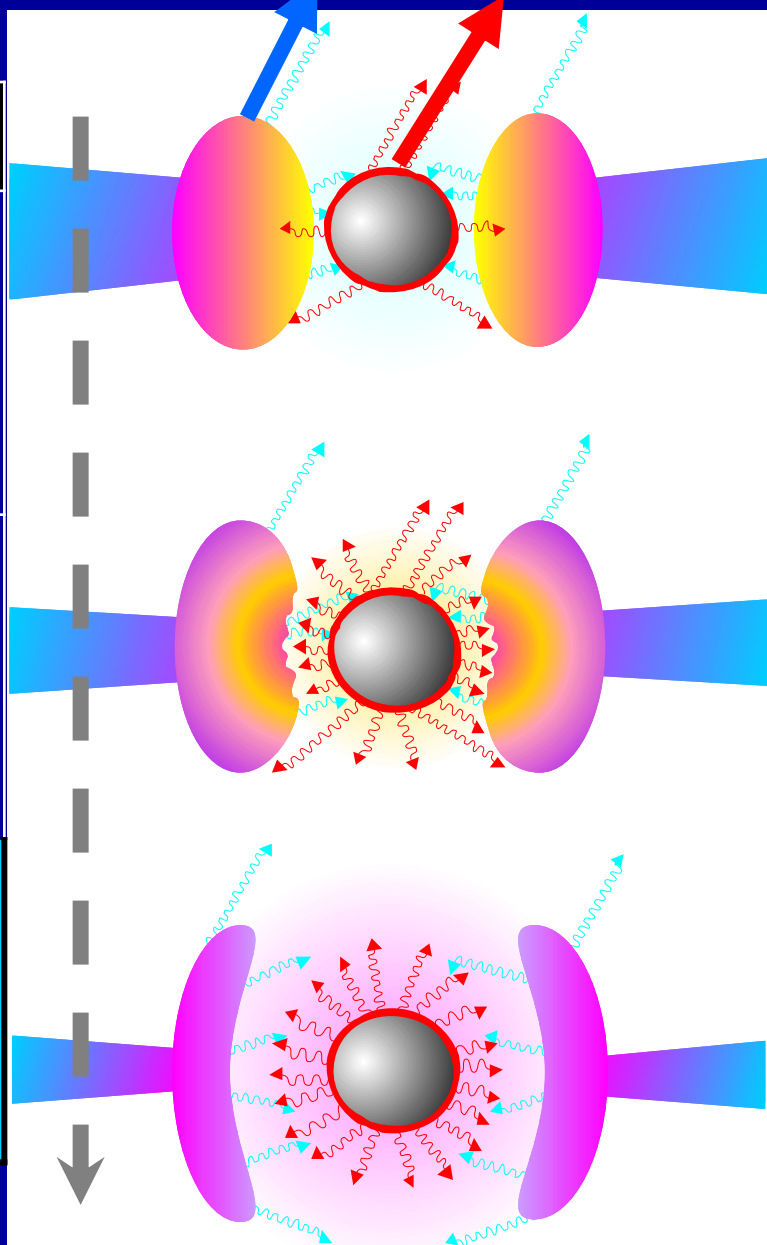


(KO):

T_{e1} (кэВ)	Γ_1
3-5	2
3-5	2
3-120	1.4-2

CompTB1

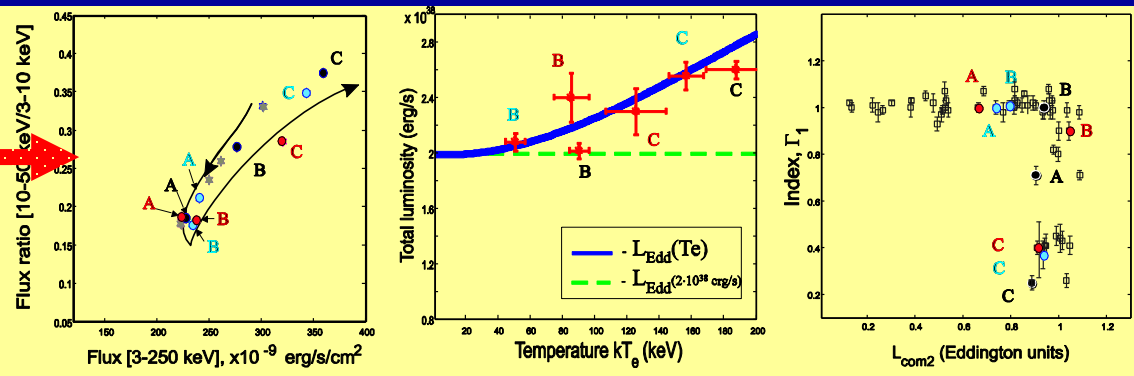
CompTB2



(H3):

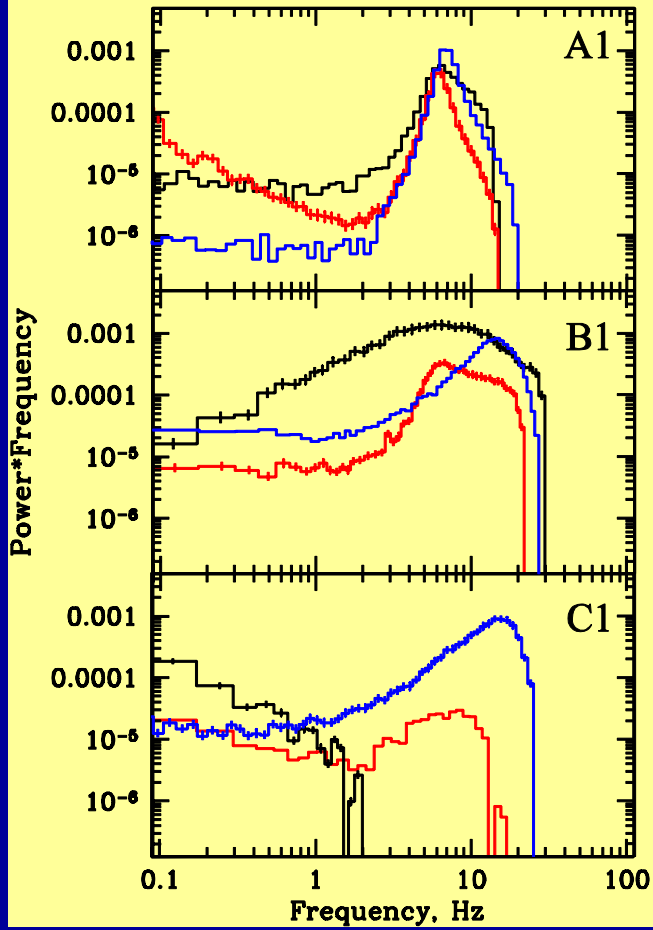
T_{e2} (кэВ)	Γ_2
3-4	2
3-4	2
3-4	2

HID

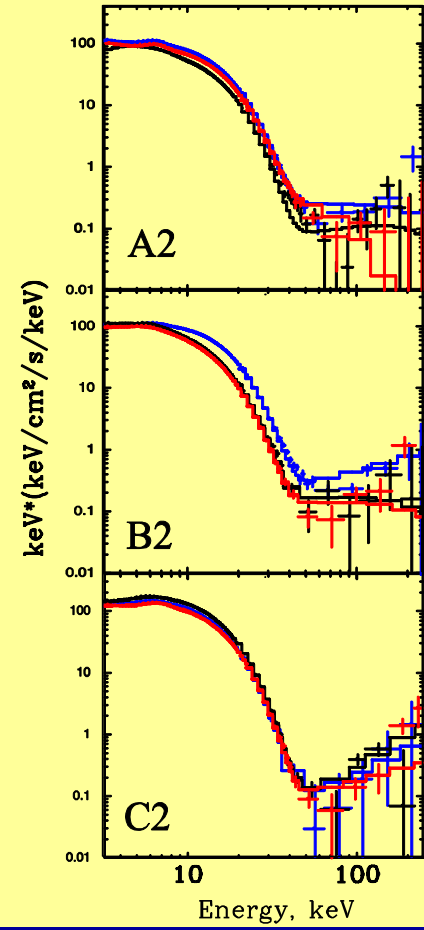


$L_{Edd}(T_e)$

Power spectra



Energy spectra





Критическая (Эддингтоновская светимость)

$$n_e = n_p$$
$$G \frac{(m_e + m_p)M}{R^2} = (\sigma_{\text{томс}}^e + \sigma_{\text{томс}}^p) \frac{L}{4\pi R^2}$$

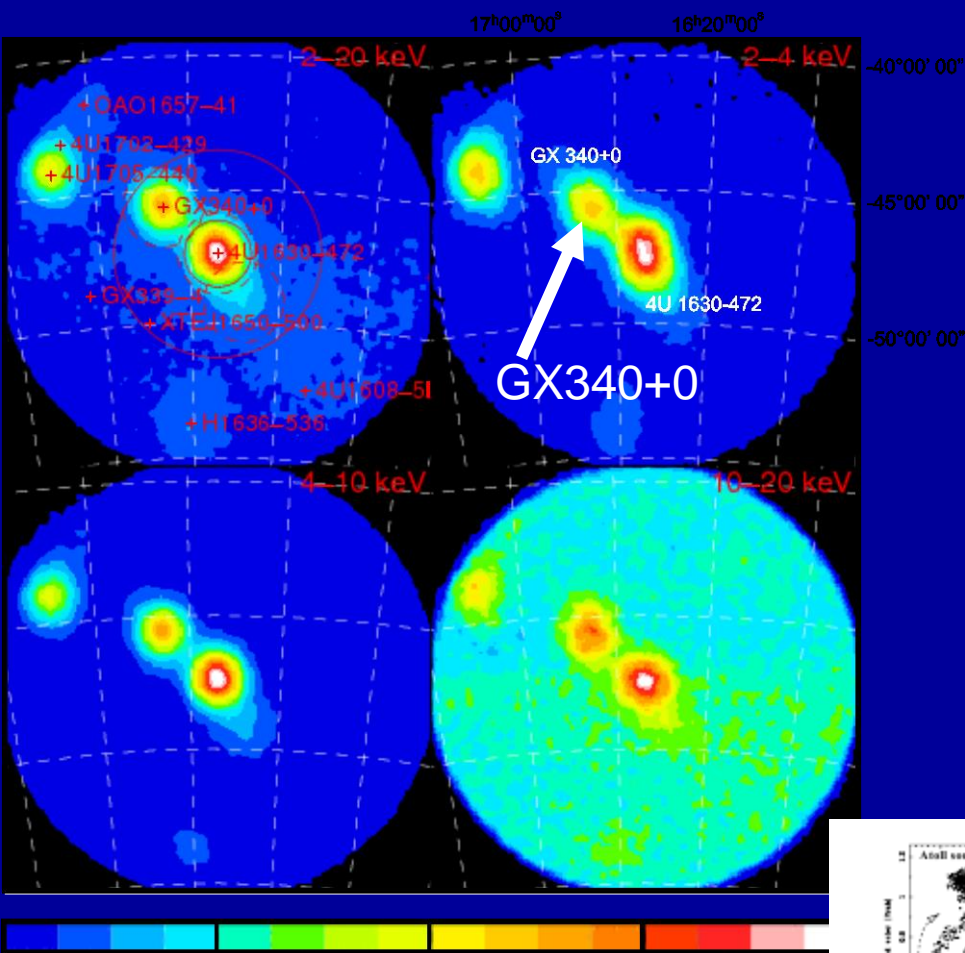
$$4\pi G m_p M = \sigma_{\text{томс}}^e L$$

$$L = 4\pi G M m_p / \sigma_{\text{томс}}^e = 1.3 \cdot 10^{38} (M/M_{\text{солн}}) \text{ эрг/с}$$

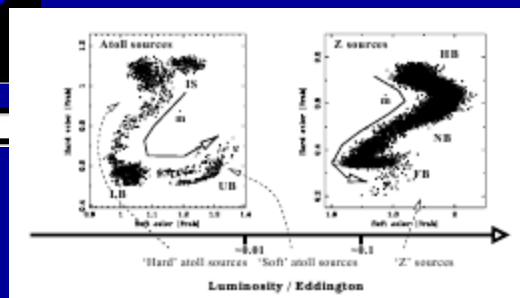
$$L = 4\pi R^2 \sigma_B T^4$$

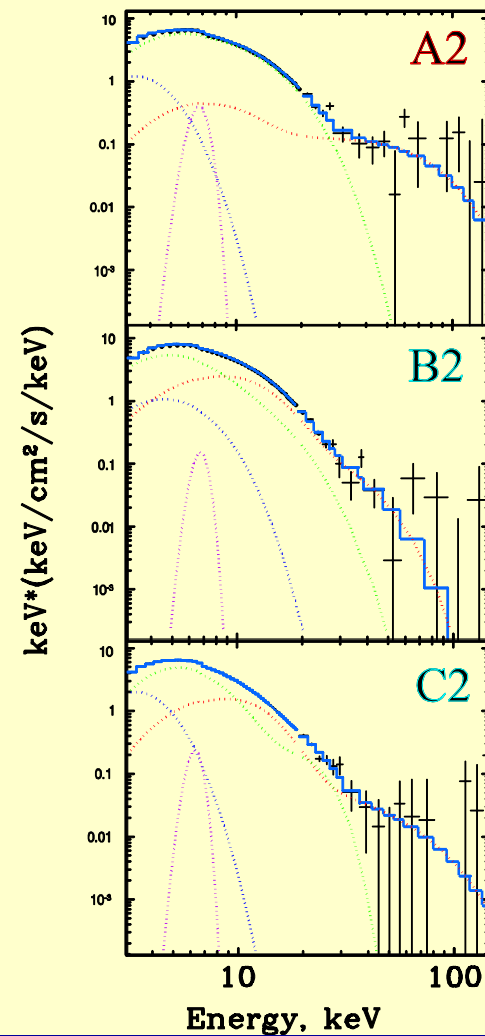
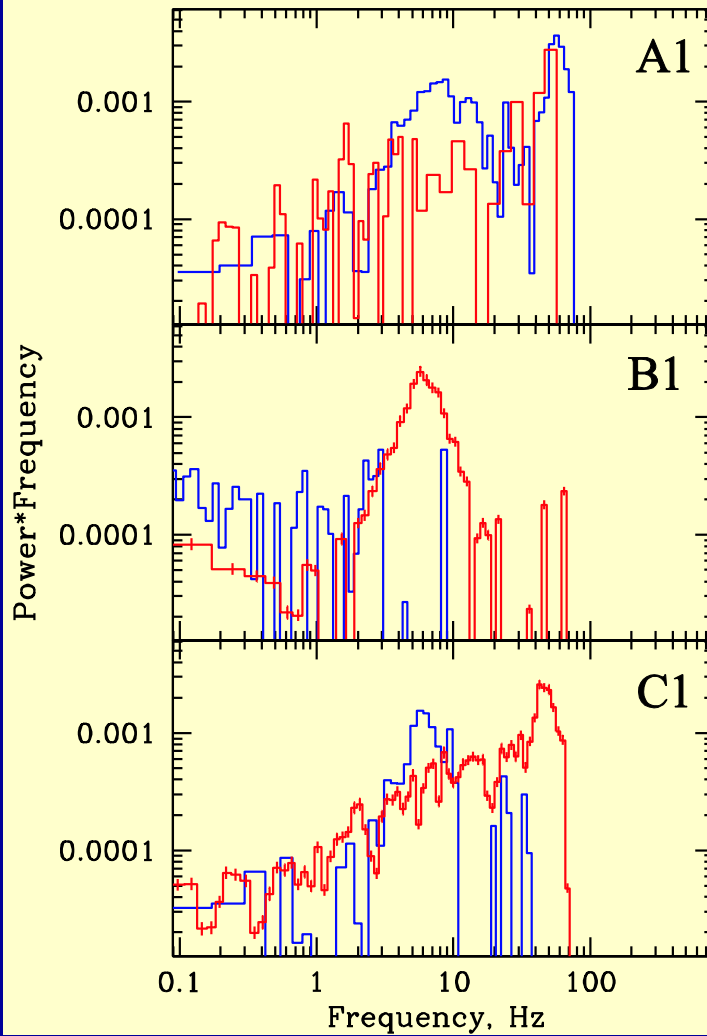
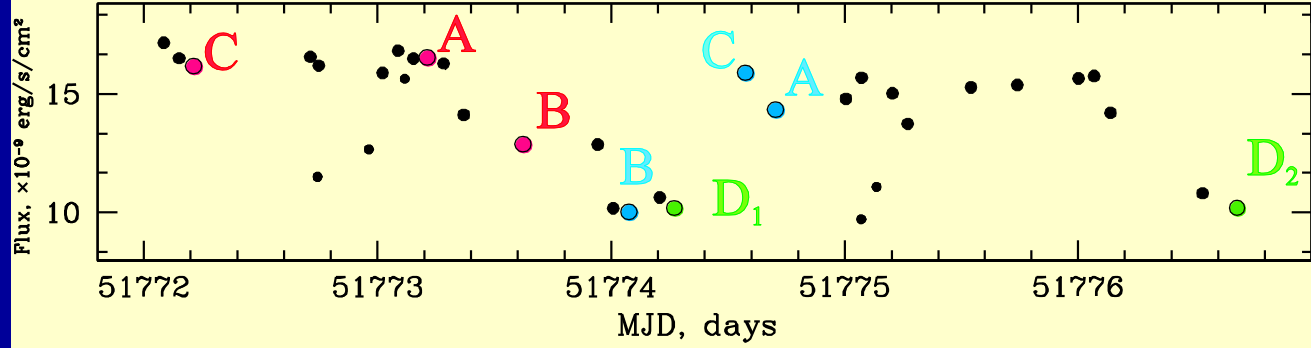


GX 340+0 – уникальный «диппинговый» Z-источник



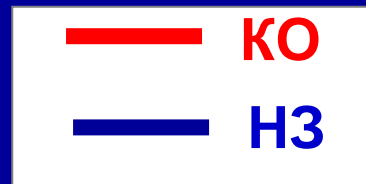
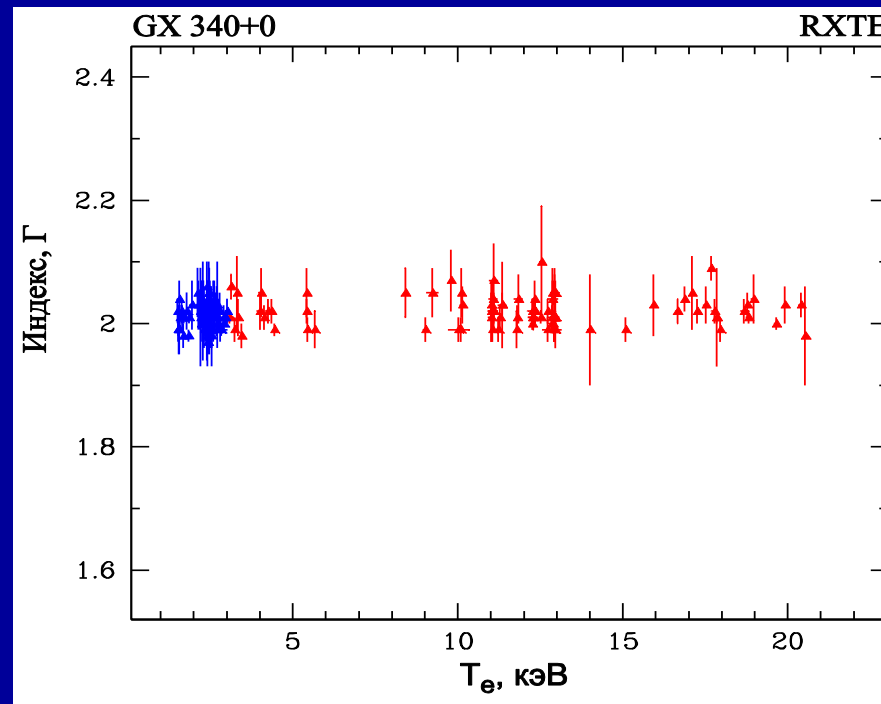
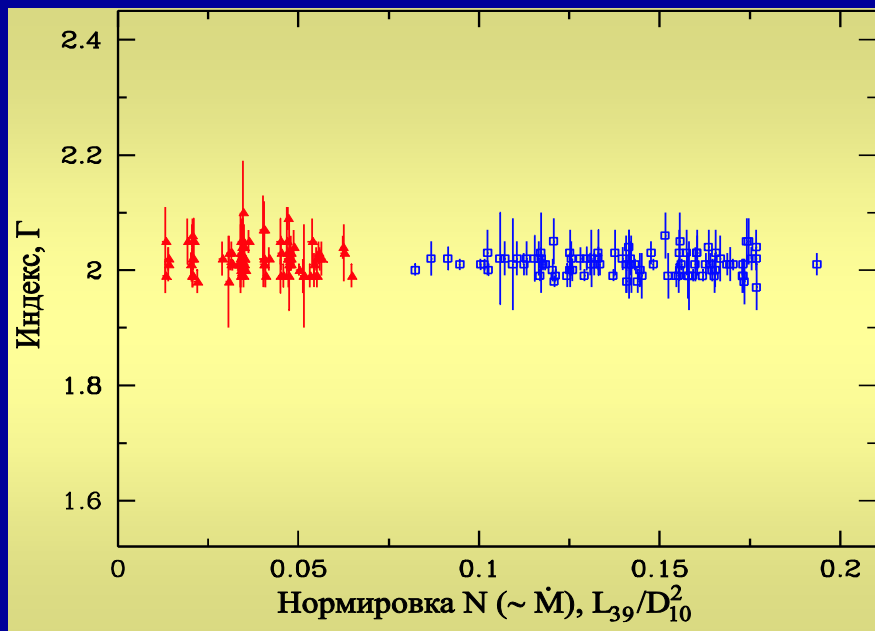
- Показывает снижение рентгеновского блеска в максимуме вспышки («*Flaring branch*»)





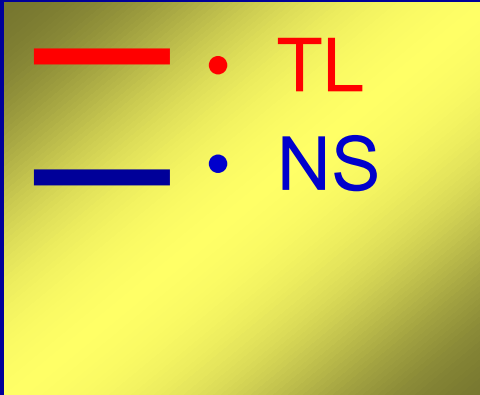
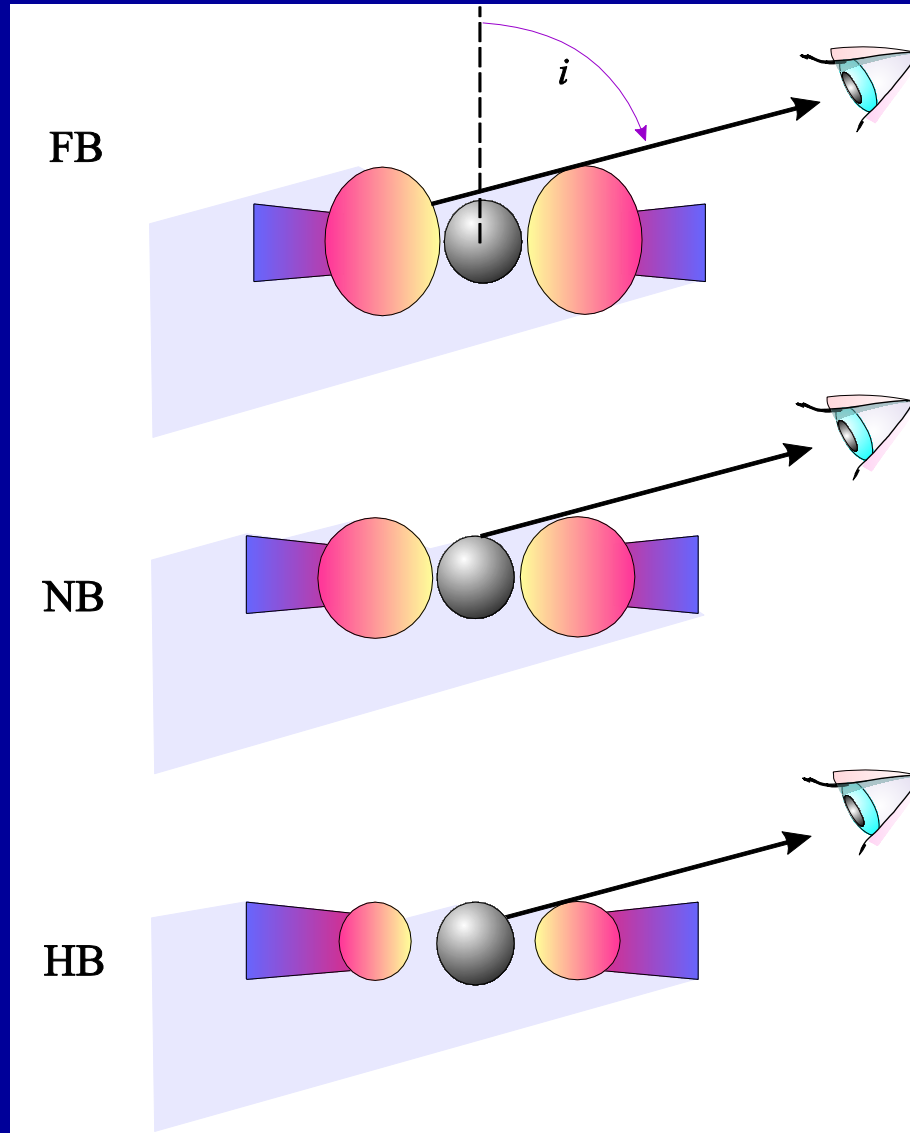
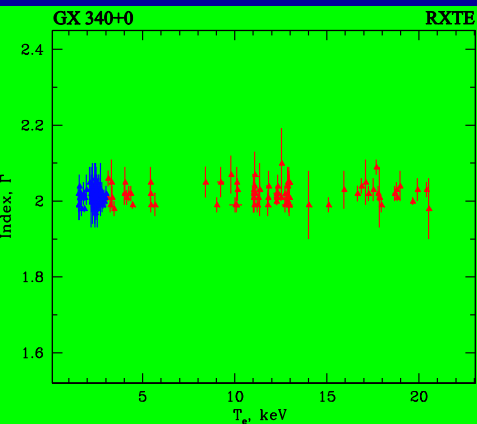
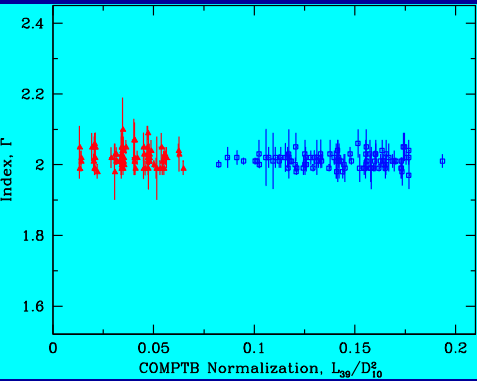


Обнаружение постоянства фотонного индекса Γ независимо от спектрального состояния в источнике с нейтронной звездой GX 340+0





Геометрический эффект в основе «дипов» во время вспышек

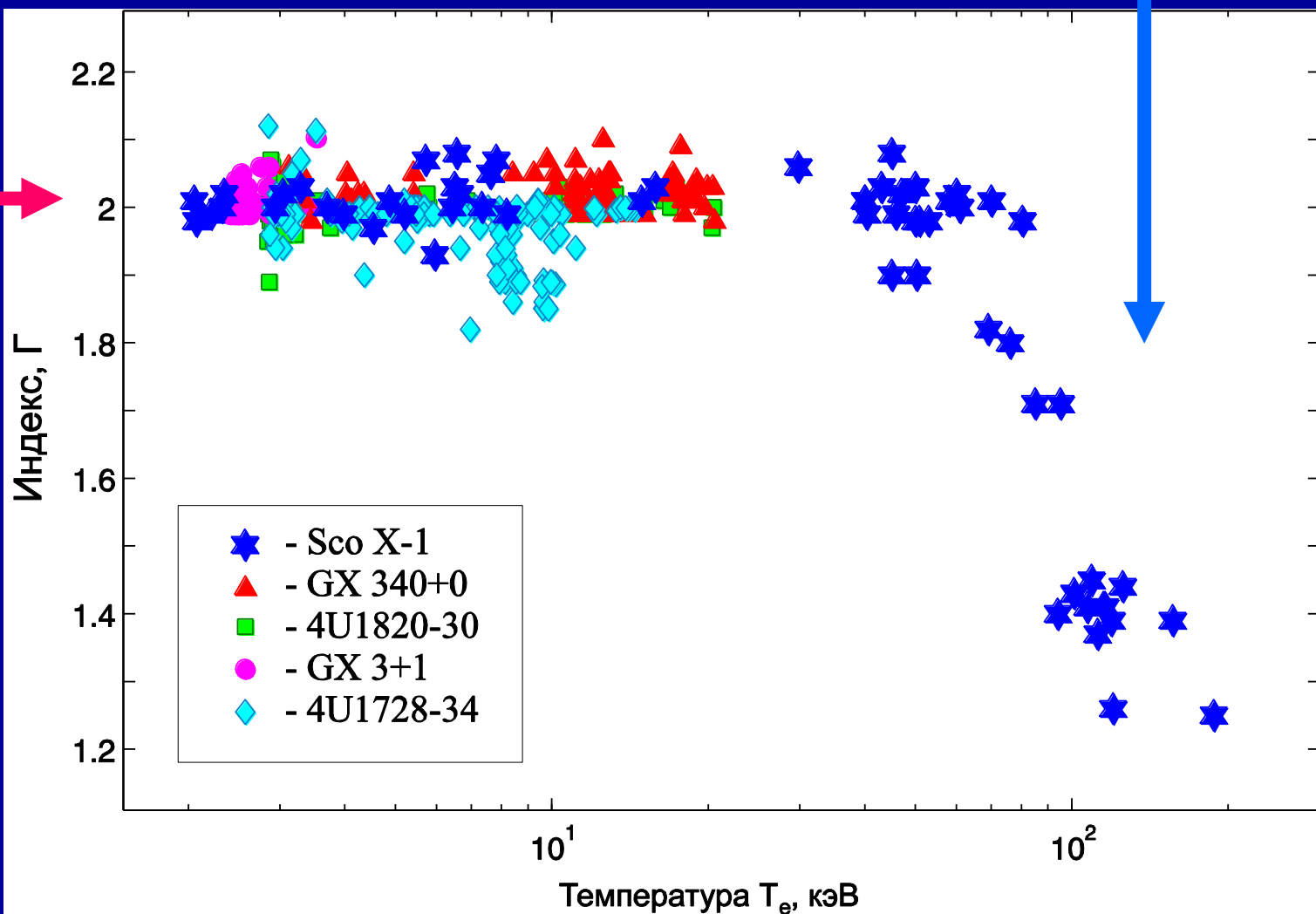




Влияние около-Эддингтоновского режима на поведение фотонного индекса Γ

(фаза снижения индекса Γ как функция T_e и \dot{M} для Sco X-1 в около-Эддингтоновском режиме)

Фаза постоянства индекса Γ - обусловлена диминированием вклада энерговыведения зоны Комptonизации переходного слоя над вкладом аккреционного диска в до-Эддингтоновском режиме





Особенности поведения нейтронных звезд в около-Эддингтоновском режиме

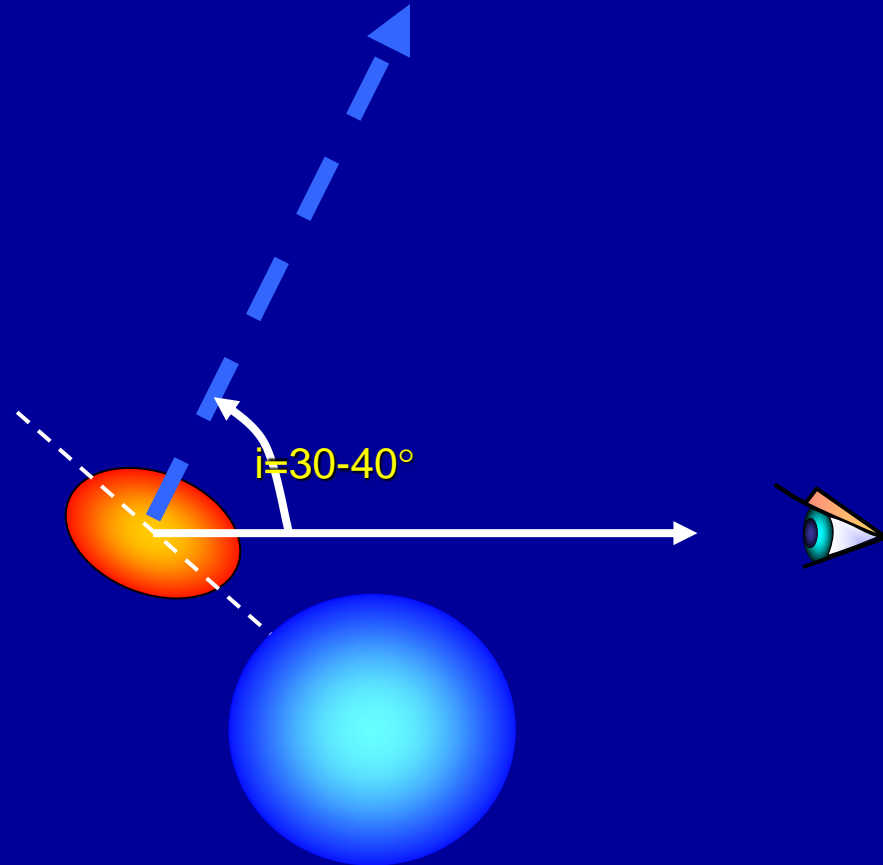
- Основная задача – исследование поведения индекса в зависимости от темпа аккреции для источников с надежно идентифицированными нейтронными звездами, достигающих режима около-Эддингтоновской светимости (для atoll-источников).
- Применение наблюдательных признаков НЗ/ЧД для идентификации природы компактных объектов





Основные параметры H3 4U 1705-44

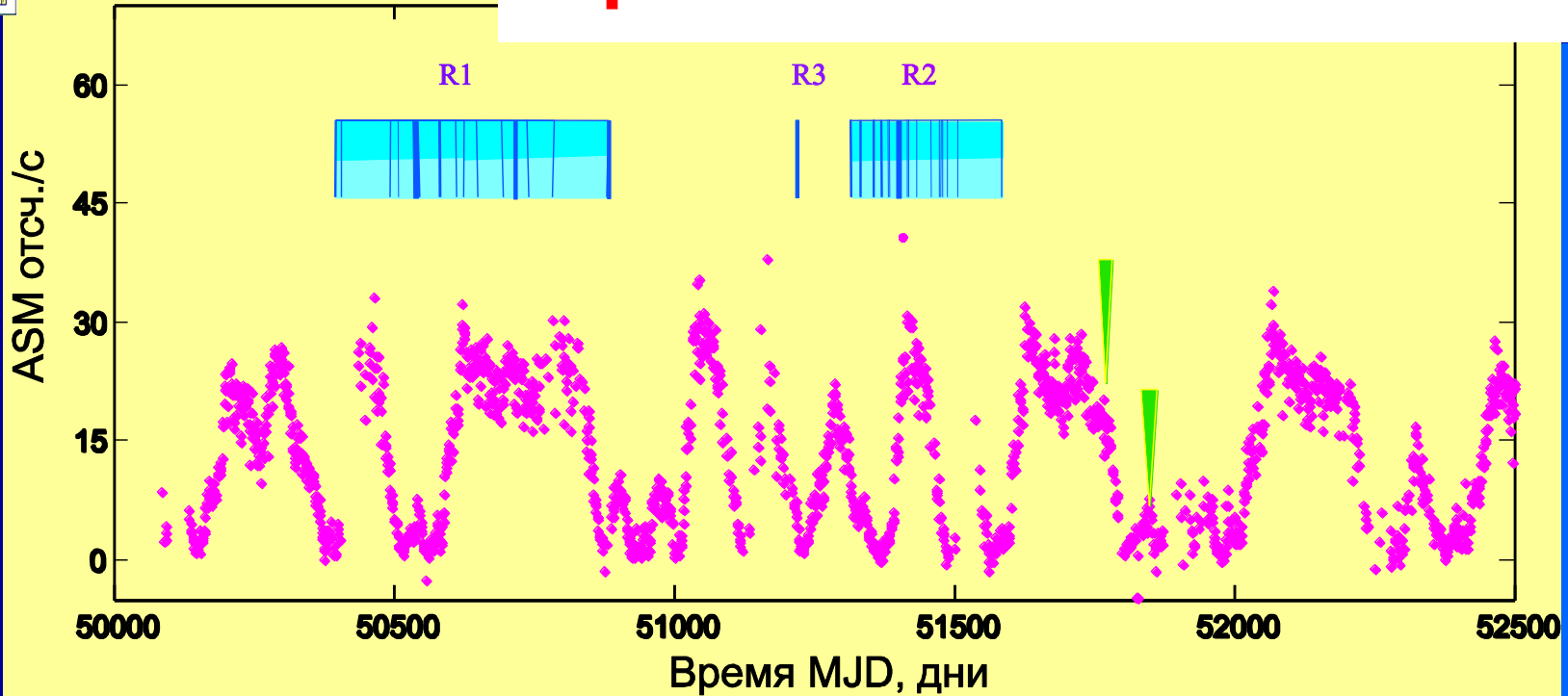
- $D=7.4\pm 0.5$ kpc
(Haberl & Titarchuk, 1995)
- Belong to **Galactic ridge** (Forman et al. 1978; Galloway et al. 2008)
- **Radio is absent** (Barret & Olive, 2002)
- $i=30-40^\circ$ (Di Salvo et al, 2009, Egron et al. 2013)
- **unclipped**





■ - RXTE
▲ - ВерроSAX

Кривая блеска 4U 1705-44

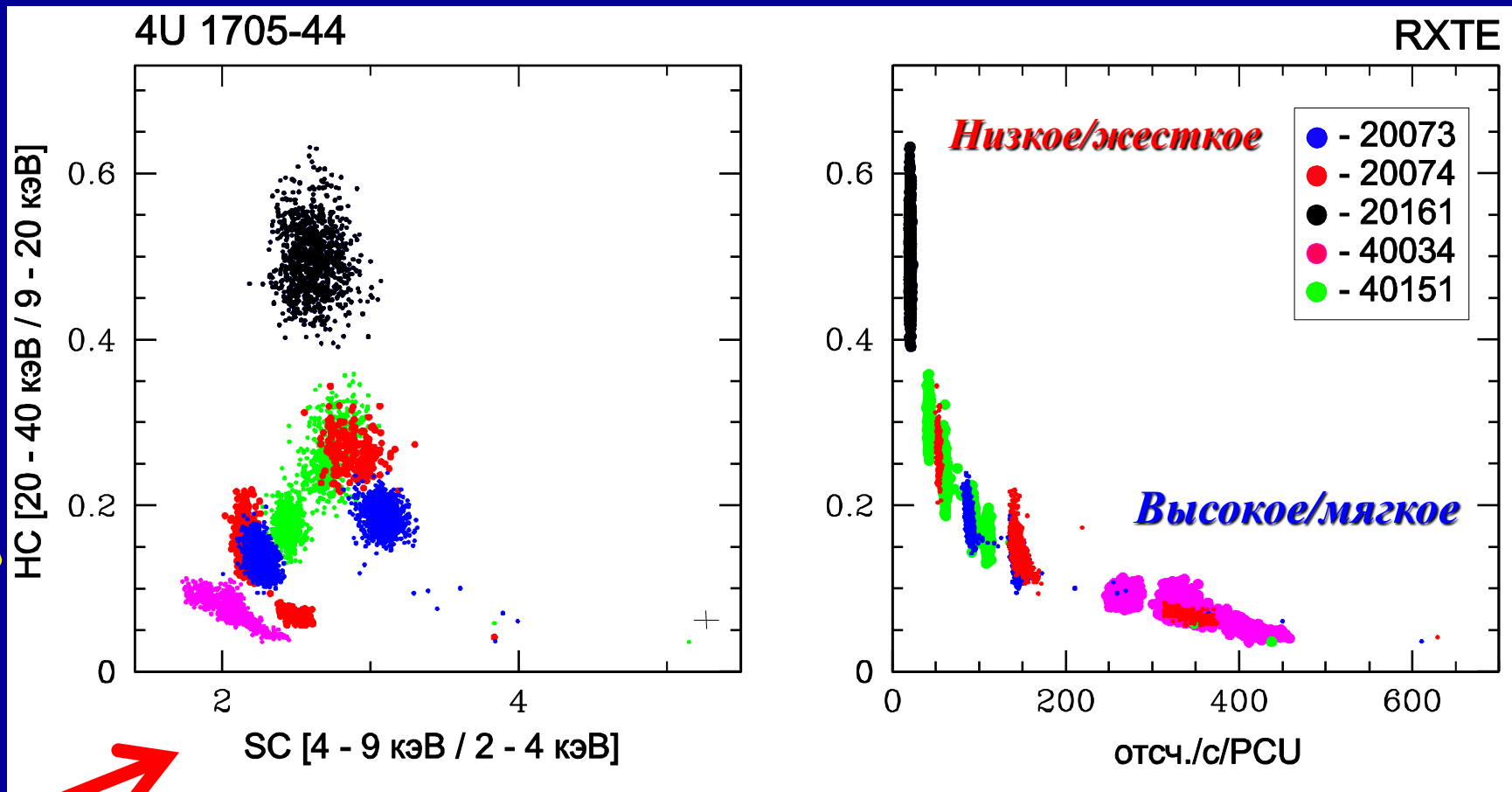


- Открыт в рентгеновских лучах со спутника EXOSAT (*Forman et al. 1978*)
- *Atoll*-источник (*Hasinger, van der Klis, 1989*)
- Показывает всплески I рода (*Langmeier et al. 1987*)
- Характерная апериодическая переменность (*Olive et al. 2003*)
- значительный “hard tail” в спектре => сочетание atoll и Z свойств
- $D=7.4\pm 0.5$ кпс (*Haberl & Titarchuk, 1995*); $i=30-40^\circ$ (*Di Salvo et al, 2009, Egron et al. 2013*) => **незатменная**



Цветовые диаграммы и диаграммы жесткости

1. Эмпирическое описание указывает на эволюцию состояний, но не дает физической интерпретации



Типичные диапазоны коэффициентов жесткости

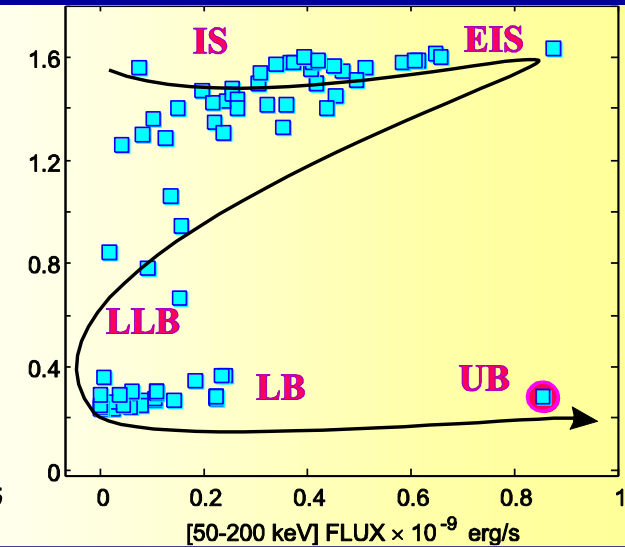
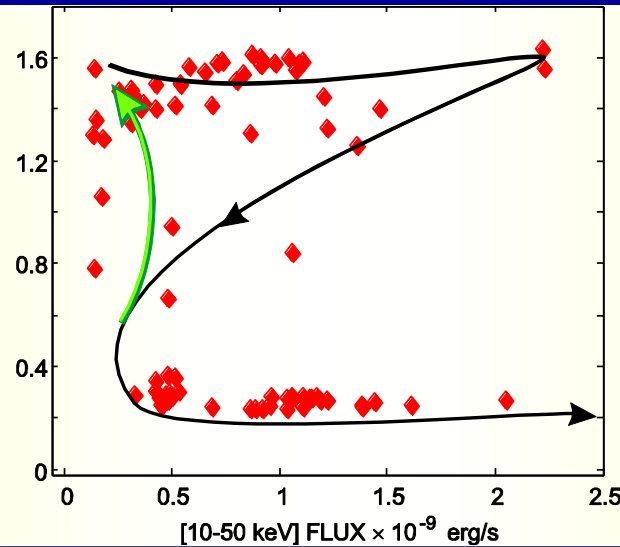
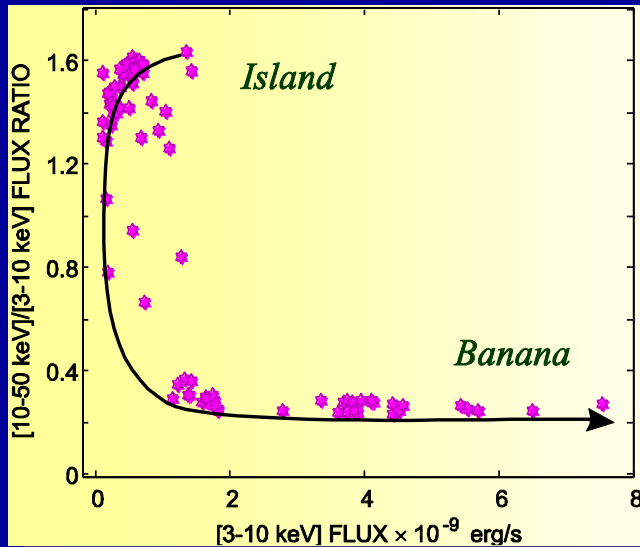


Зависимость коэффициентов жесткости от диапазона энергий

3 - 10 keV

10 - 50 keV

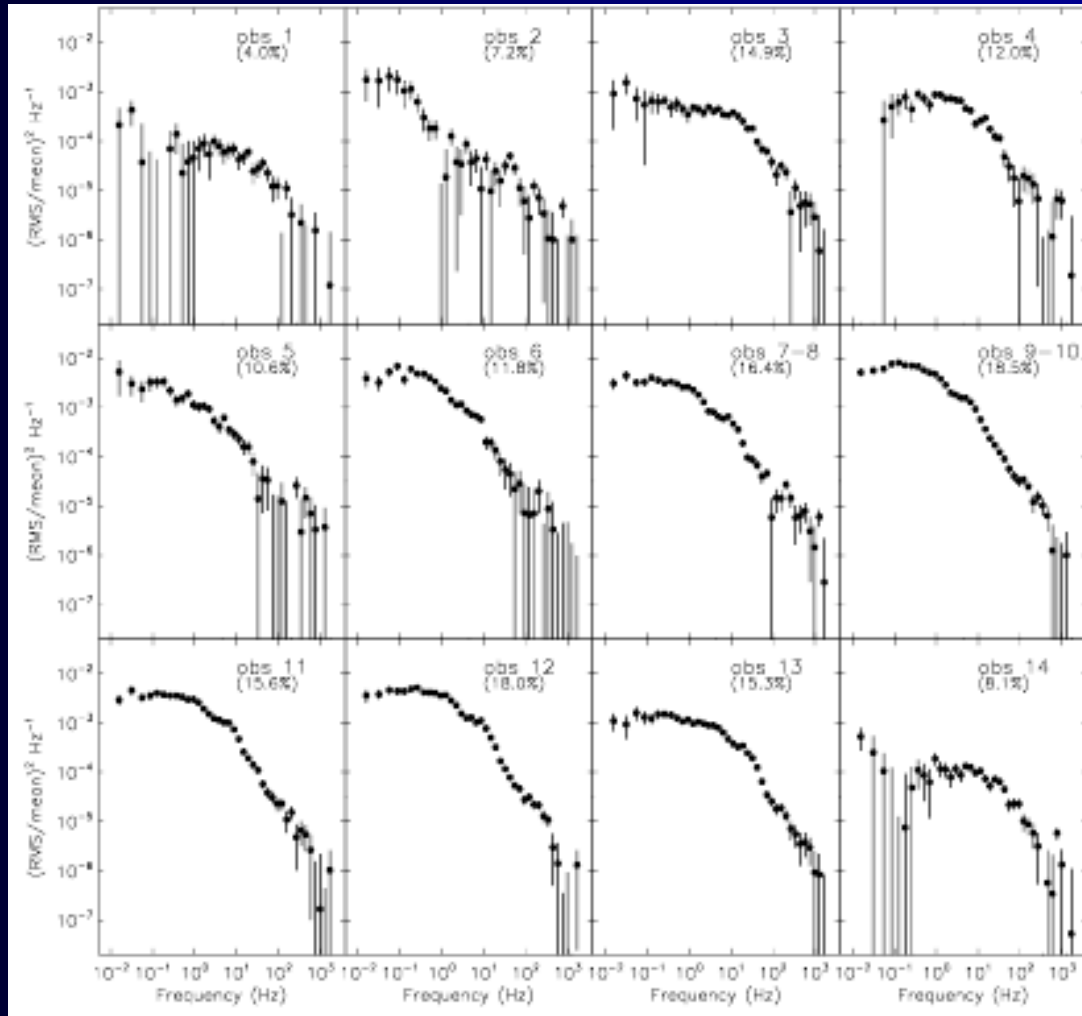
50 - 200 keV





Эволюция спектра мощности 4U 1705-44

Barret & Olive,
2002, ApJ, 578,
391





Спектральная эволюция 4U 1705-44 (RXTE)

Низкое/
жесткое



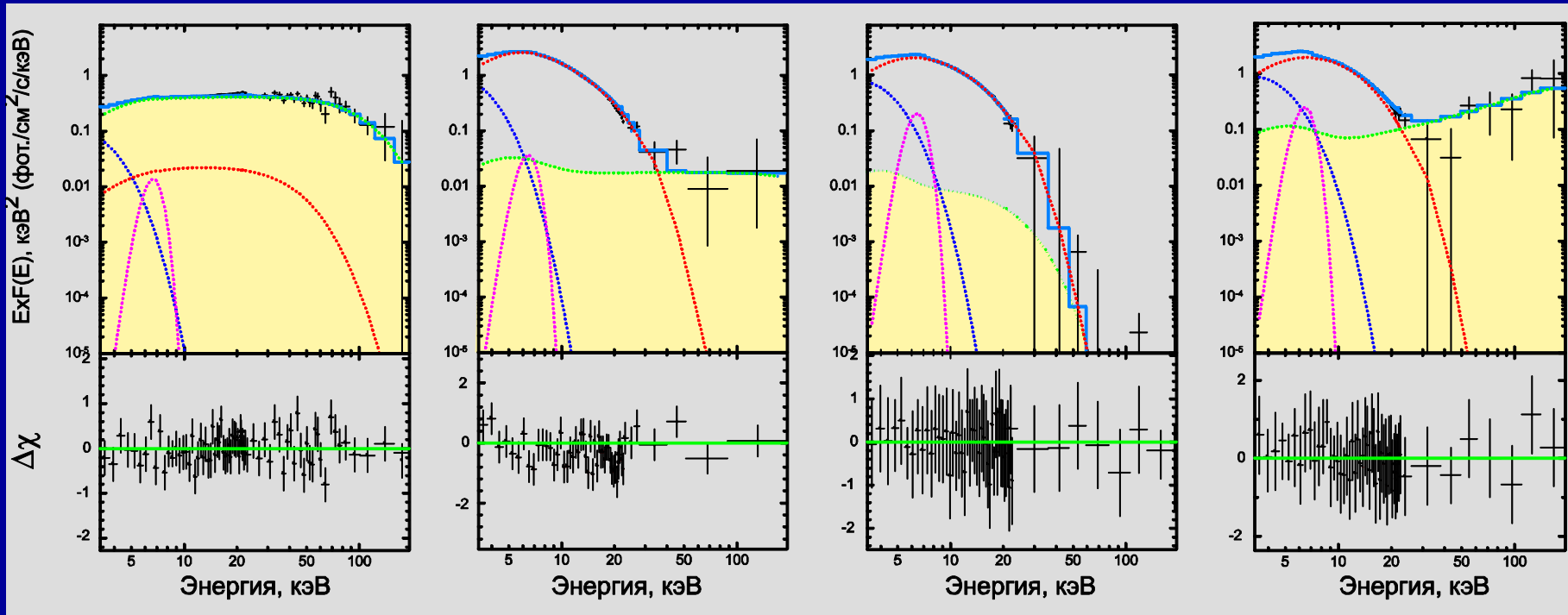
промежу-
точное



мягкое

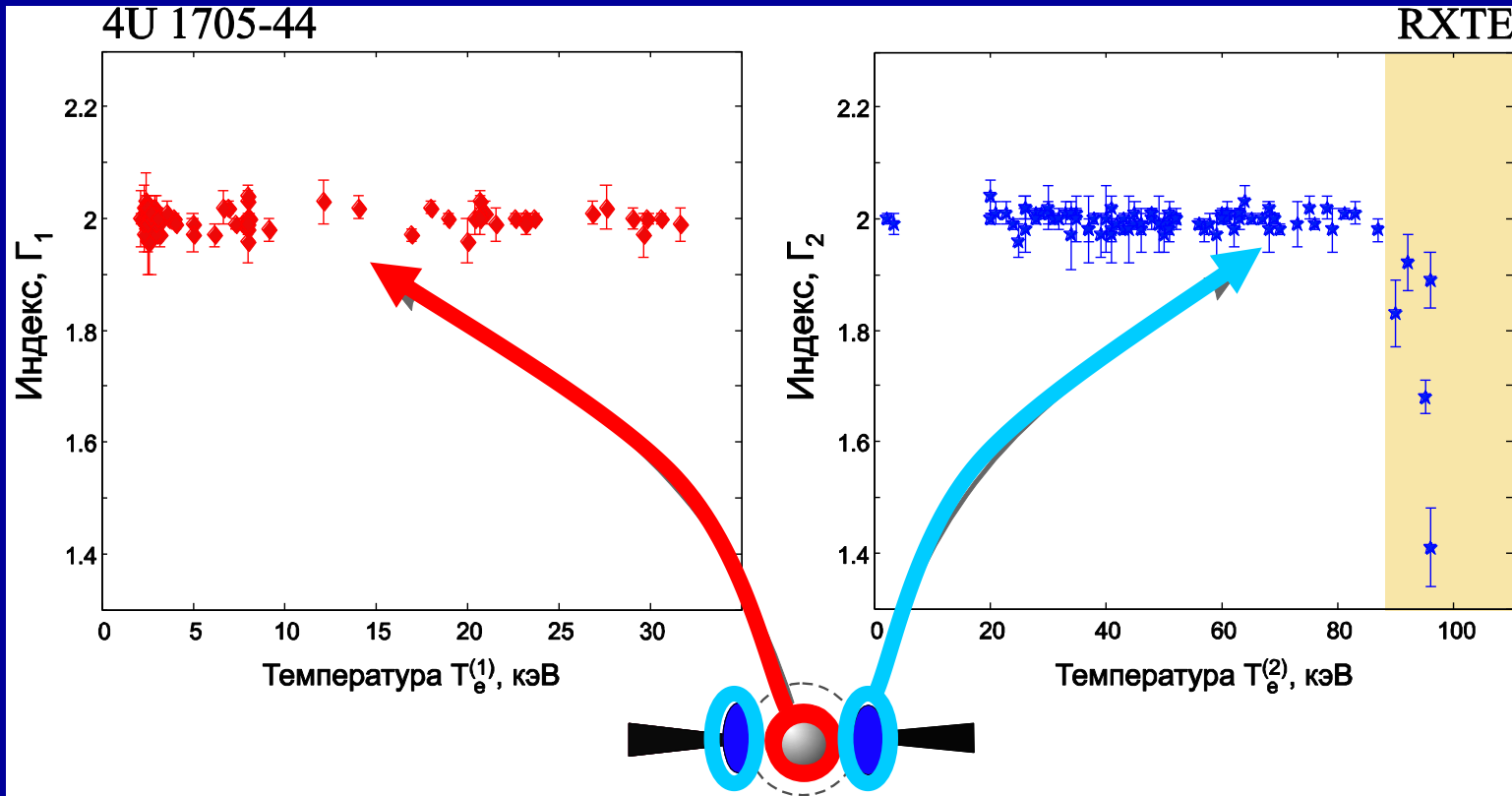


высокое/
жесткое





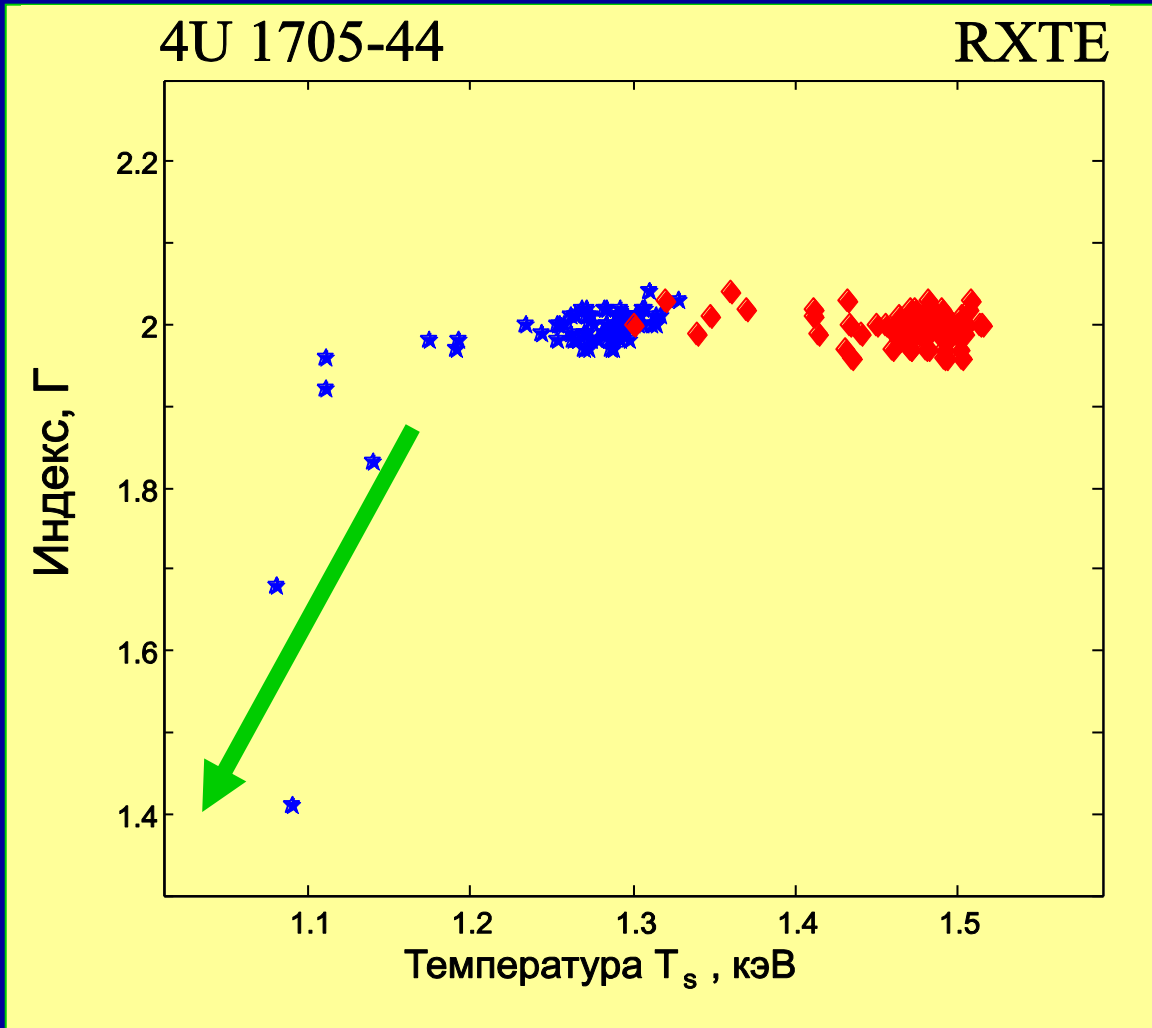
Зависимость индекса Γ от электронной температуры T_e



$$\Gamma = \alpha + 1$$



Зависимость индекса Γ от температуры «затравочных» фотонов диска T_s

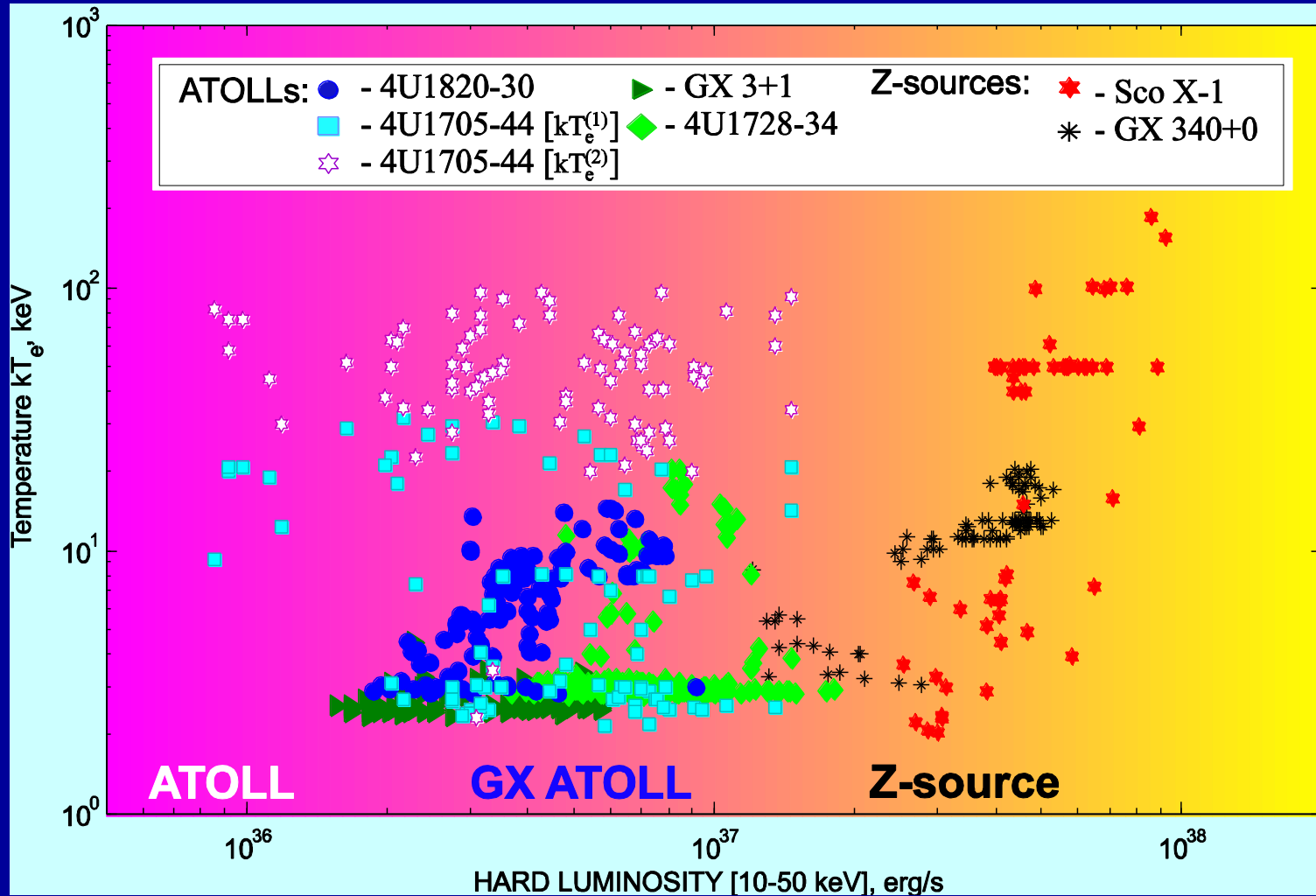


Снижение температуры «затравочных» фотонов диска при снижении Γ

Стадия расширения

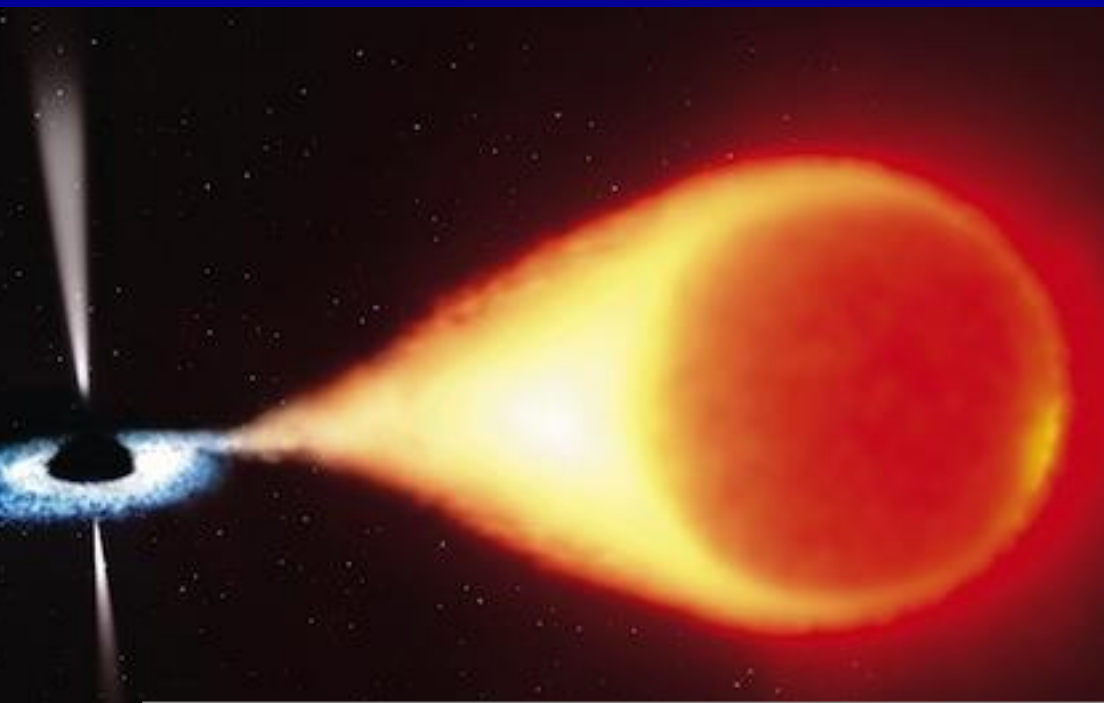
$$\Gamma = \alpha + 1$$

Как изменяется температура плазмы переходного слоя НЗ в зависимости от рентгеновской светимости источника ?





Спектральные признаки аккрецирующих ЧД и НЗ в приложении к вопросу о природе компактного объекта в 4U 1700-37



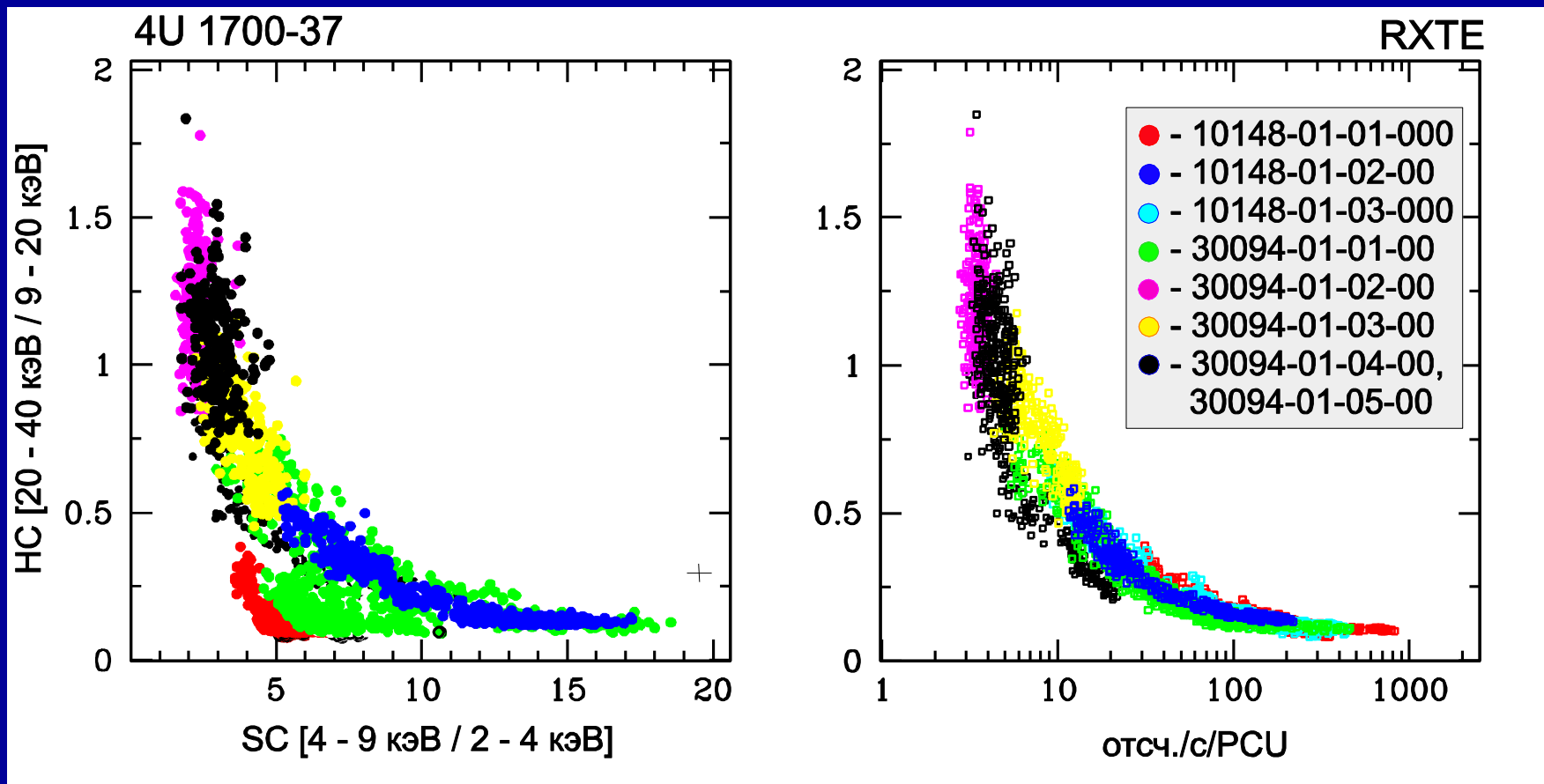
- **Динамические оценки массы компактного объекта**
- **$M_x \sim 2.1 - 2.3, \sim 2.6 M_\odot$**
- **Нет пульсаций рентгеновского излучения**
- **Нет циклотронных линий**
- **Значительное жесткое излучение => Спорная**

➤ **Основная задача – применение наблюдательных признаков НЗ/ЧД для идентификации природы КО в 4U 1700-37**

природа КО – ЧД/НЗ?



Цветовые диаграммы и диаграммы жесткости 4U 1700-37

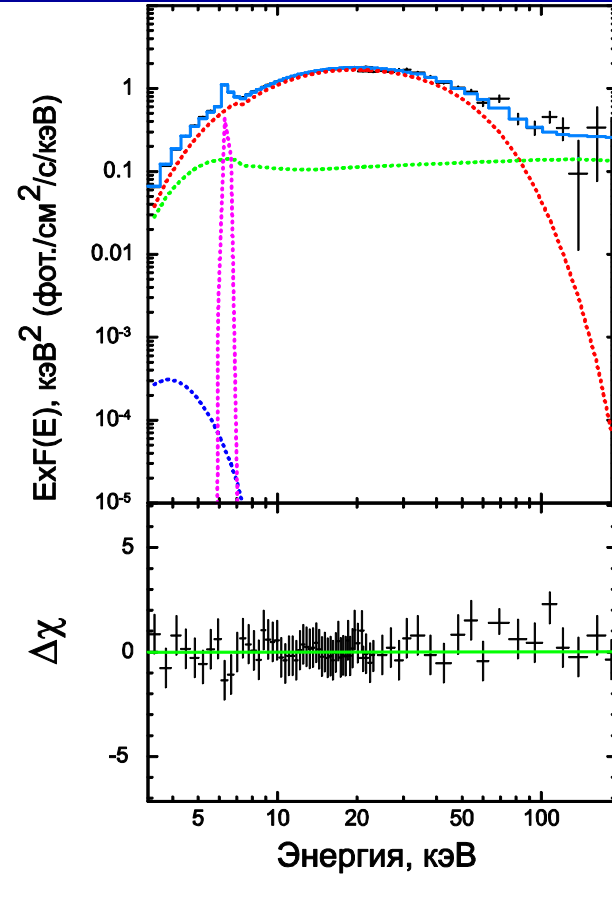
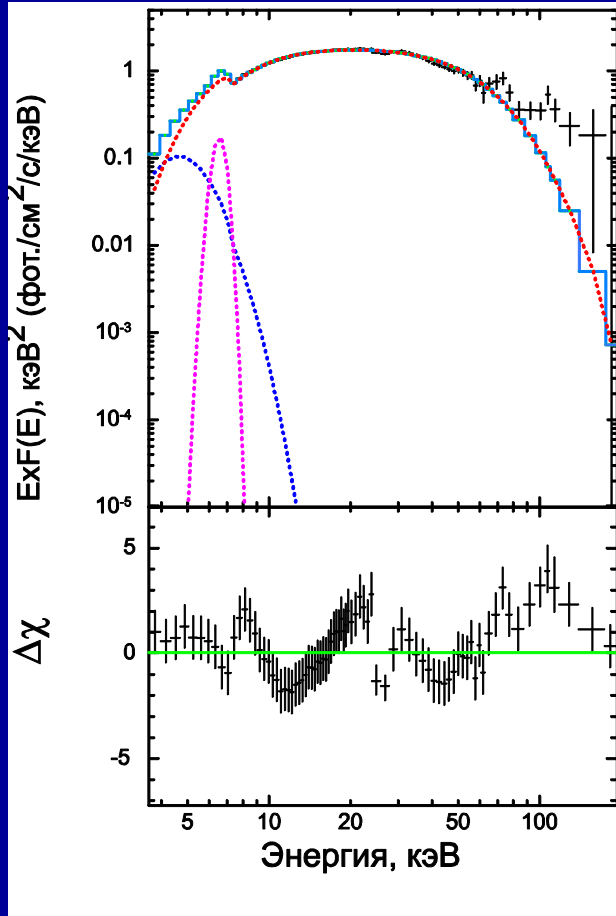




Необходимость аппроксимации ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ МОДЕЛЬЮ

phabs*(bbody+comptb+gauss)

phabs*(bbody+comptb1+comptb2+gauss)

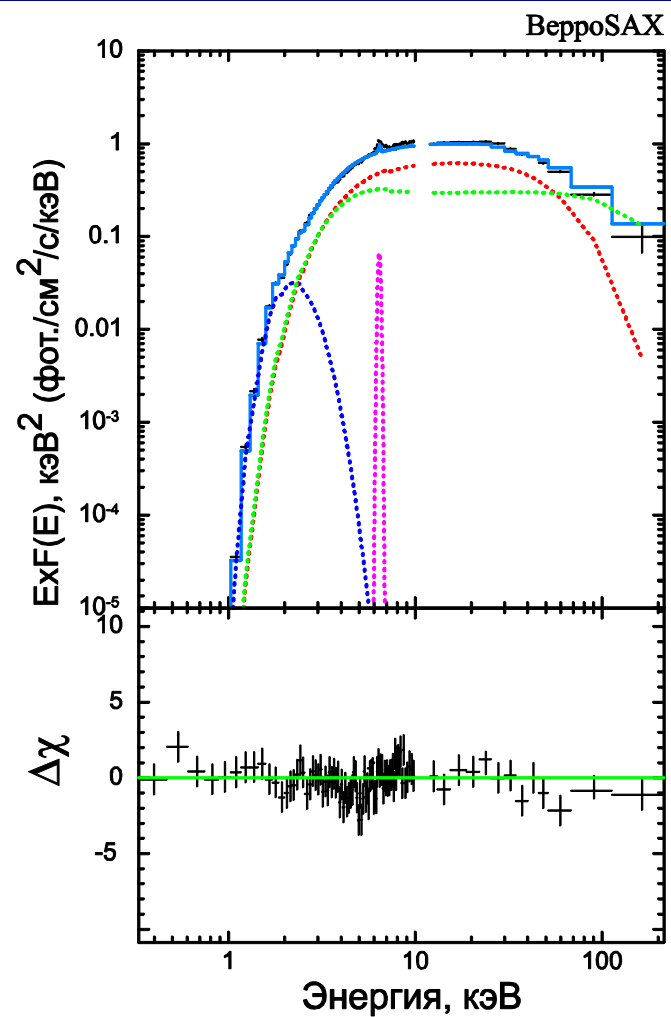
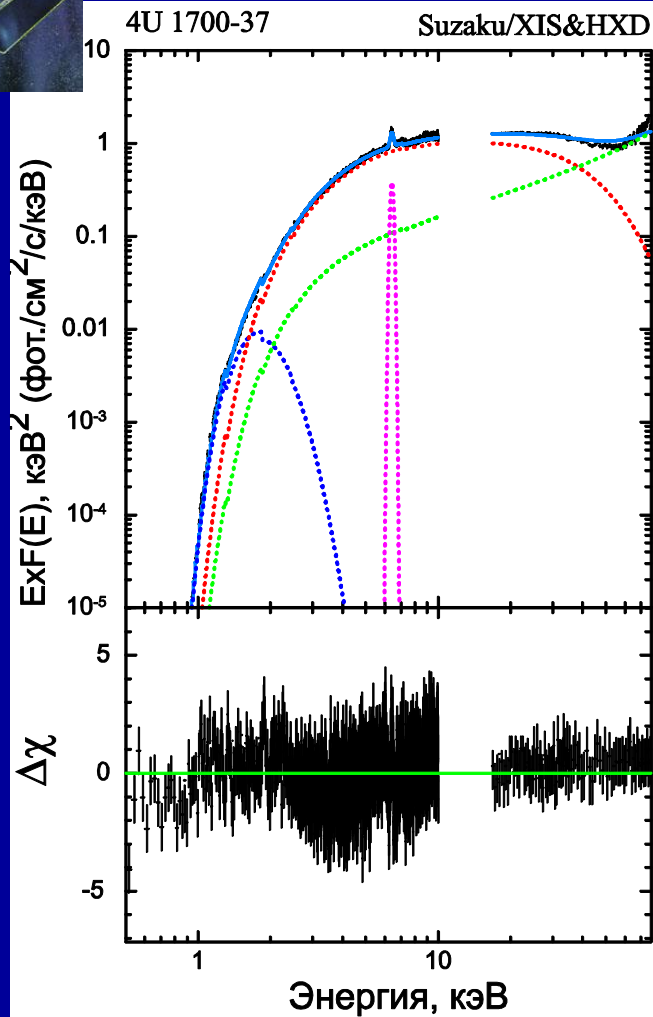
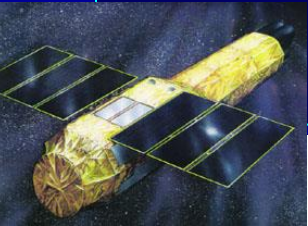


$$\chi^2_{\text{red}} = 12.3 \text{ (86 ст.св.)},$$

$$\chi^2_{\text{red}} = 1.12 \text{ (81 ст.св.)},$$



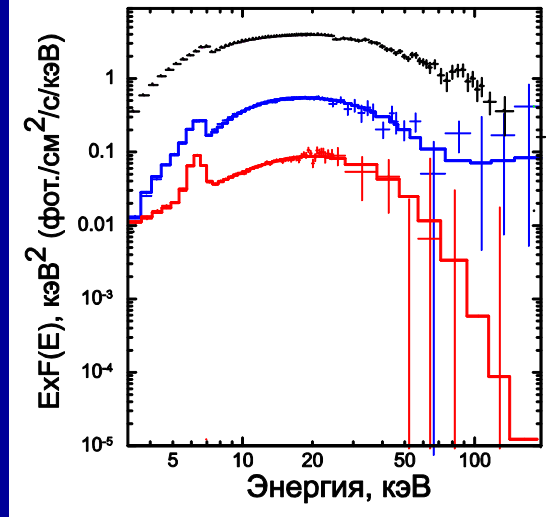
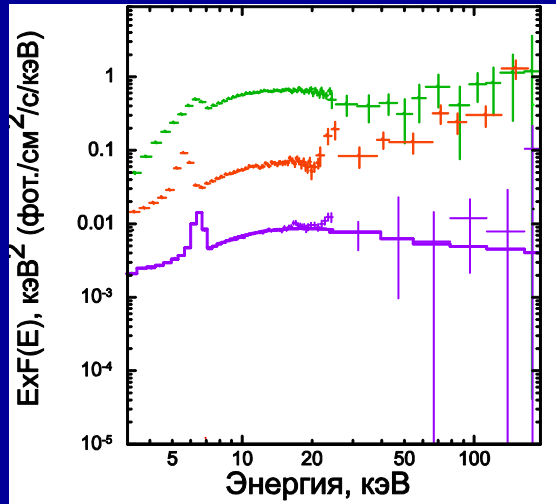
Спектральная эволюция 4U1700-37 по данным **Suzaku** и **BeppoSAX**





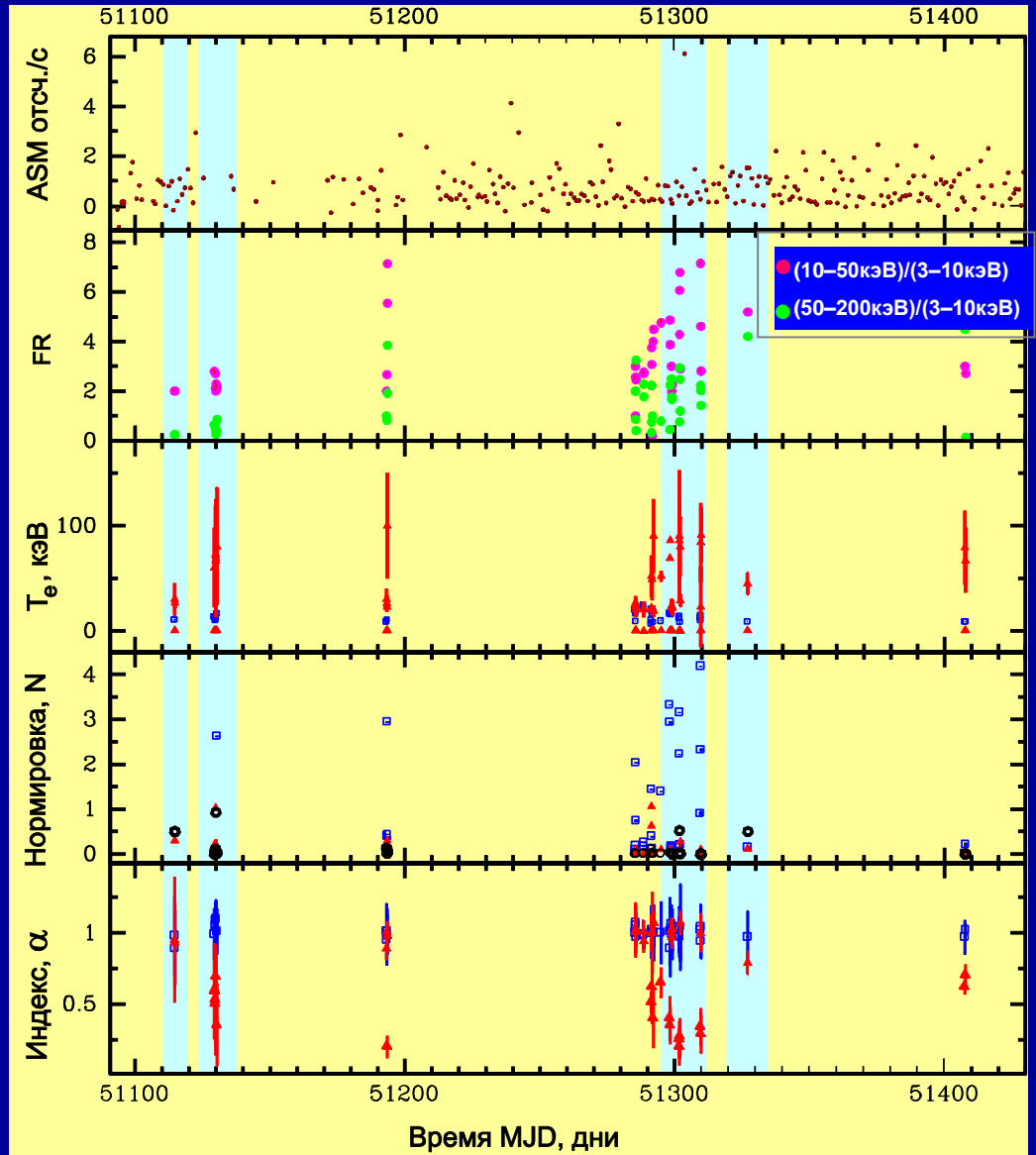
Эволюция спектральных параметров 4U 1700-37

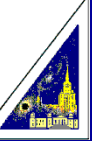
Жесткие состояния



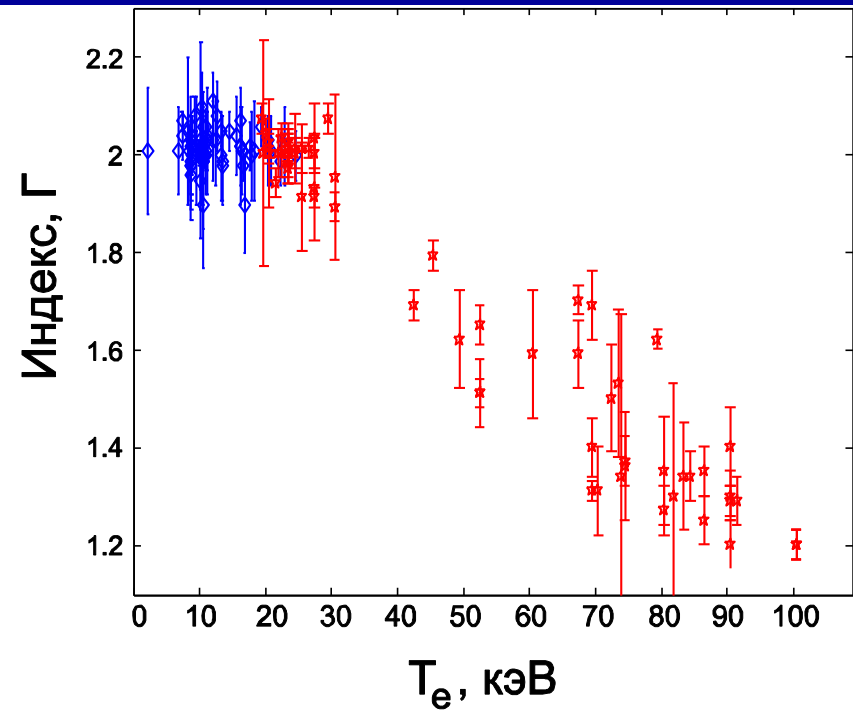
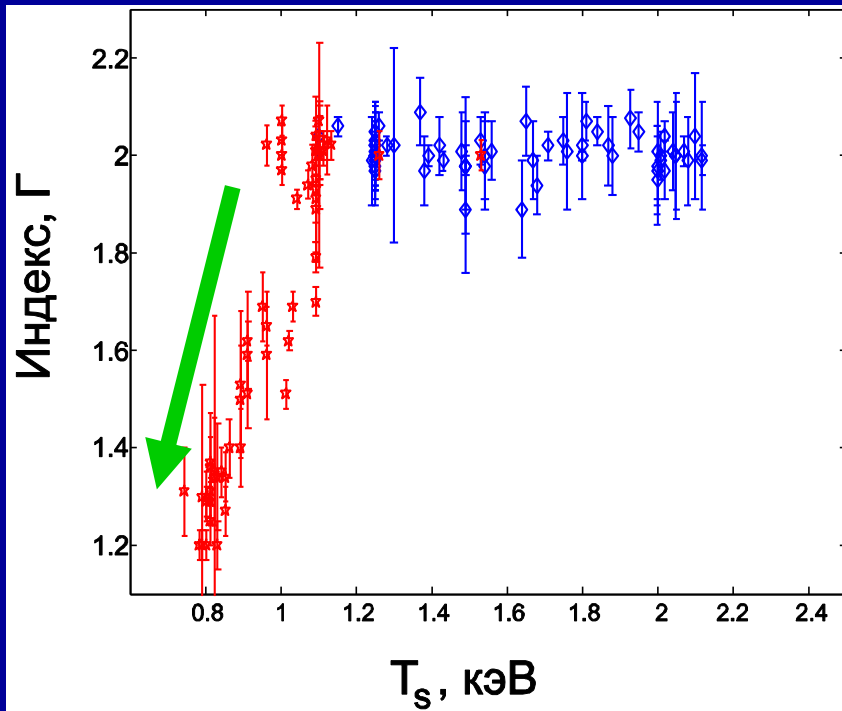
Мягкие состояния

4U 1700-37





Зависимость фотонного индекса Γ от T_s и T_e в около-Эддингтоновском режиме



$$\Gamma = \alpha + 1$$

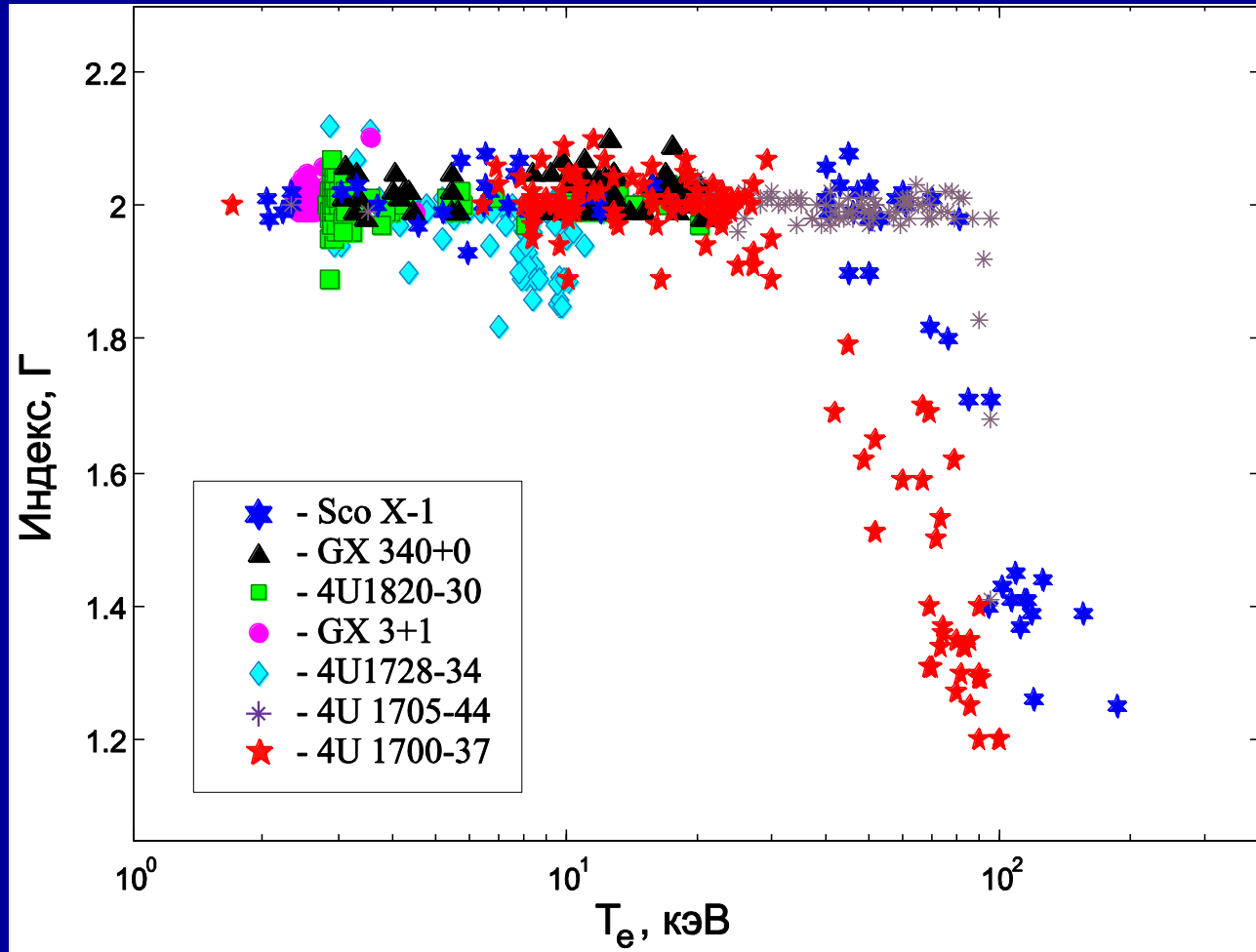
Снижение температуры T_s с уменьшением индекса Γ

Стадия расширения



Общая зависимость индекса Γ от kT_e для нейтронных звезд

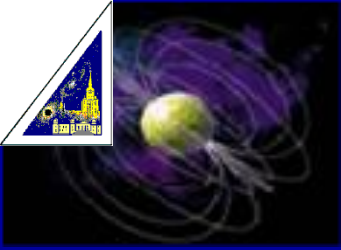
$$\Gamma = \alpha + 1$$



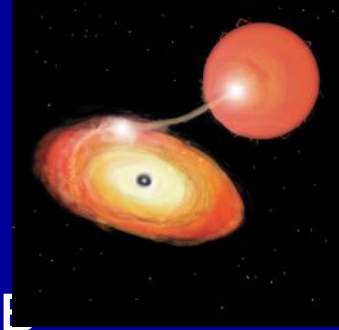
Обоснование:

(Titarchuk, Seifina & Shrader, 2014, ApJ, 789, 98)

(Seifina, Titarchuk, Shaposhnikov, 2015, ApJ, 821, 23)



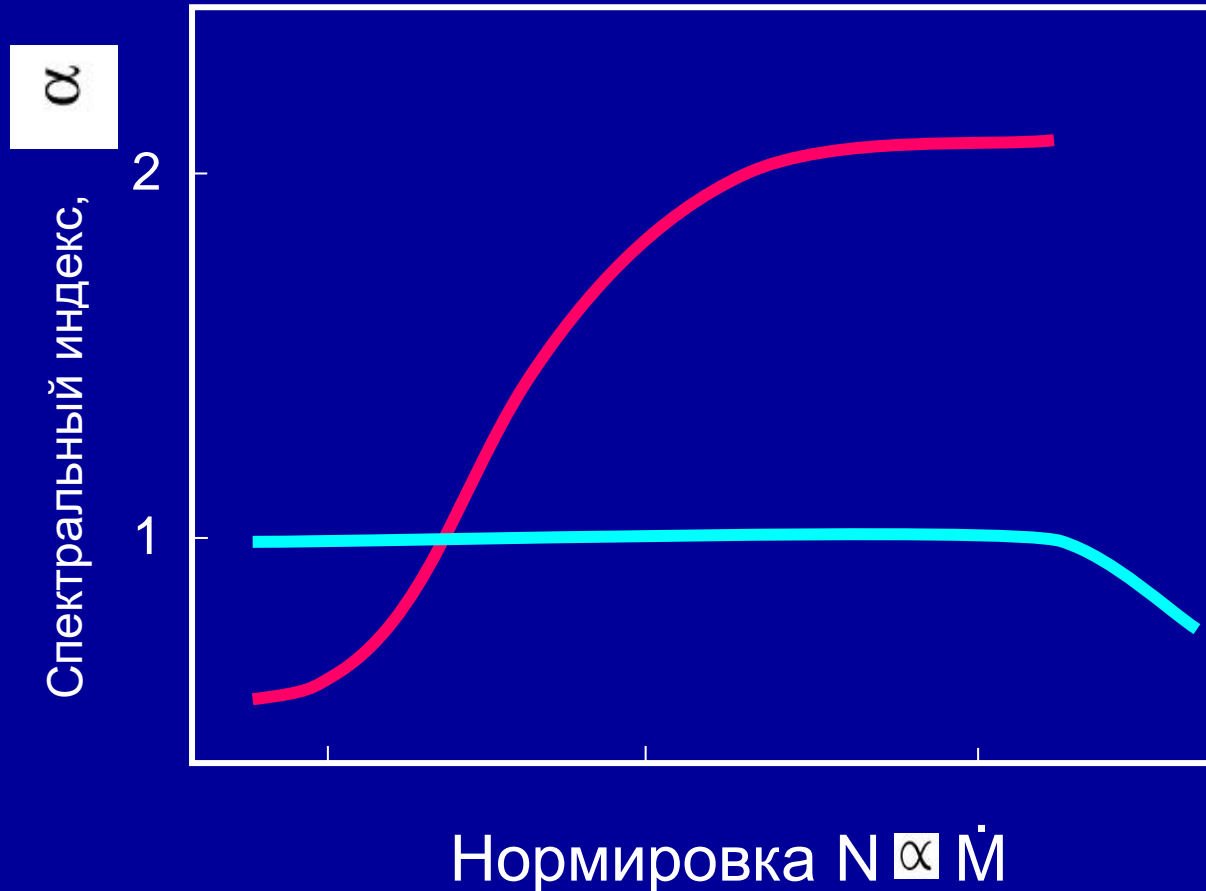
Основные результаты и новизна



- ✓ Обнаружен эффект постоянства индекса L в спектрах НЗ (*atoll*- & Z: 4U1728-34, GX3+1, 4U1820-30, GX340+0 и др.)
- ➔ Обнаружена новая (*радиационно доминированная*) фаза снижения индекса во время «высокого состояния» (L_{Edd}) *atoll* и Z-источников (Sco X-1, 4U 1705-44, 4U 1700-37),
- ✓ на основании которых сформулированы фундаментальные спектральные признаки НЗ и ЧД в аккрецирующих РДС.
- ➔ Идентифицирована природа компактного объекта в РДС 4U1700-37 с помощью разработанных критериев



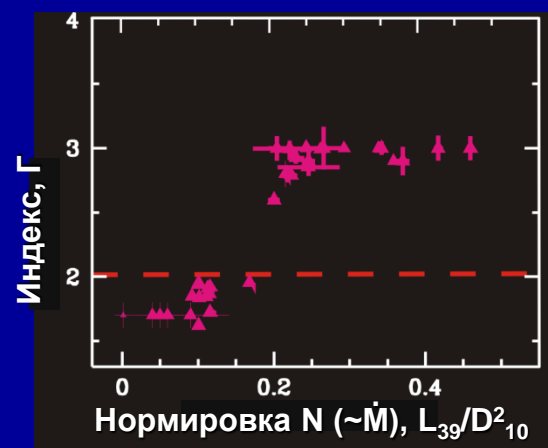
Получено согласие наблюдений и теоретических предсказаний для ЧД (Titarchuk & Zannias, 1998; Laurent & Titarchuk, 1999; Farinelli & Titarchuk, 2011)



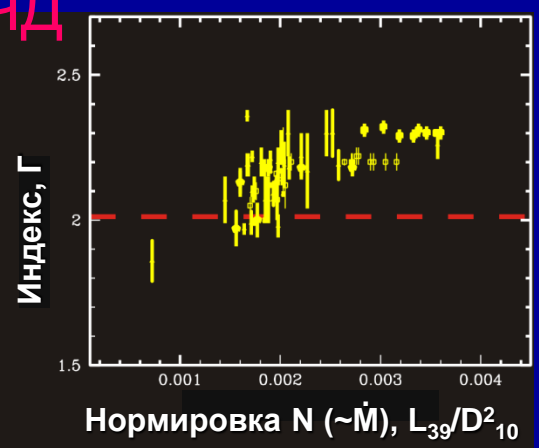
Недавно, эти результаты получили подтверждение группой Сюняева (Burke, Gilfanov & Sunyaev, MNRAS, astro-ph1609.095)



GRS 1915+105

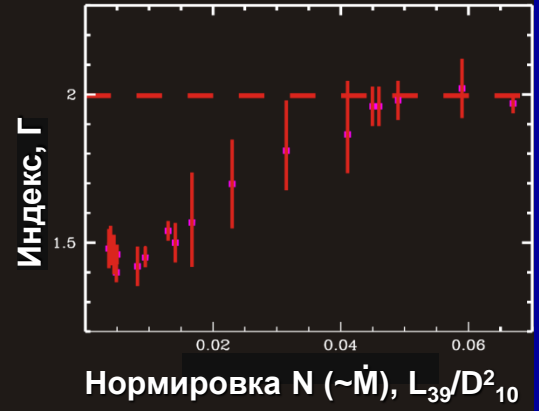
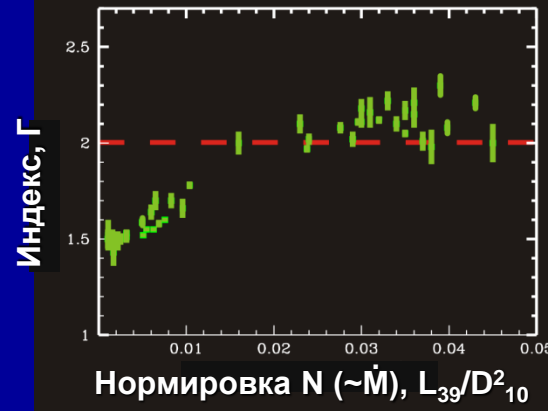


ЧД



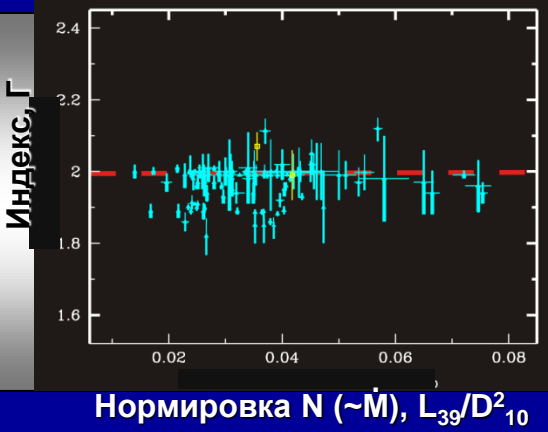
4U 1630

GX 339-4

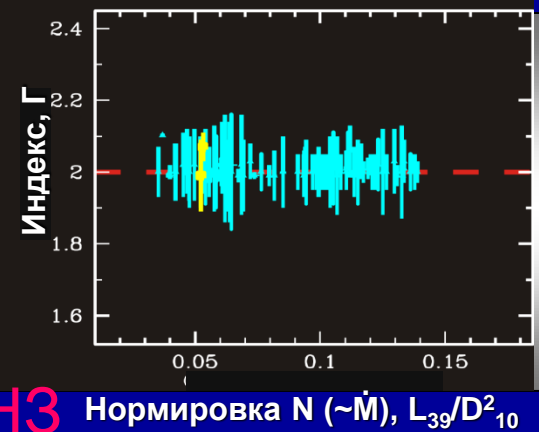


GRO J1655-40

4U 1728-34



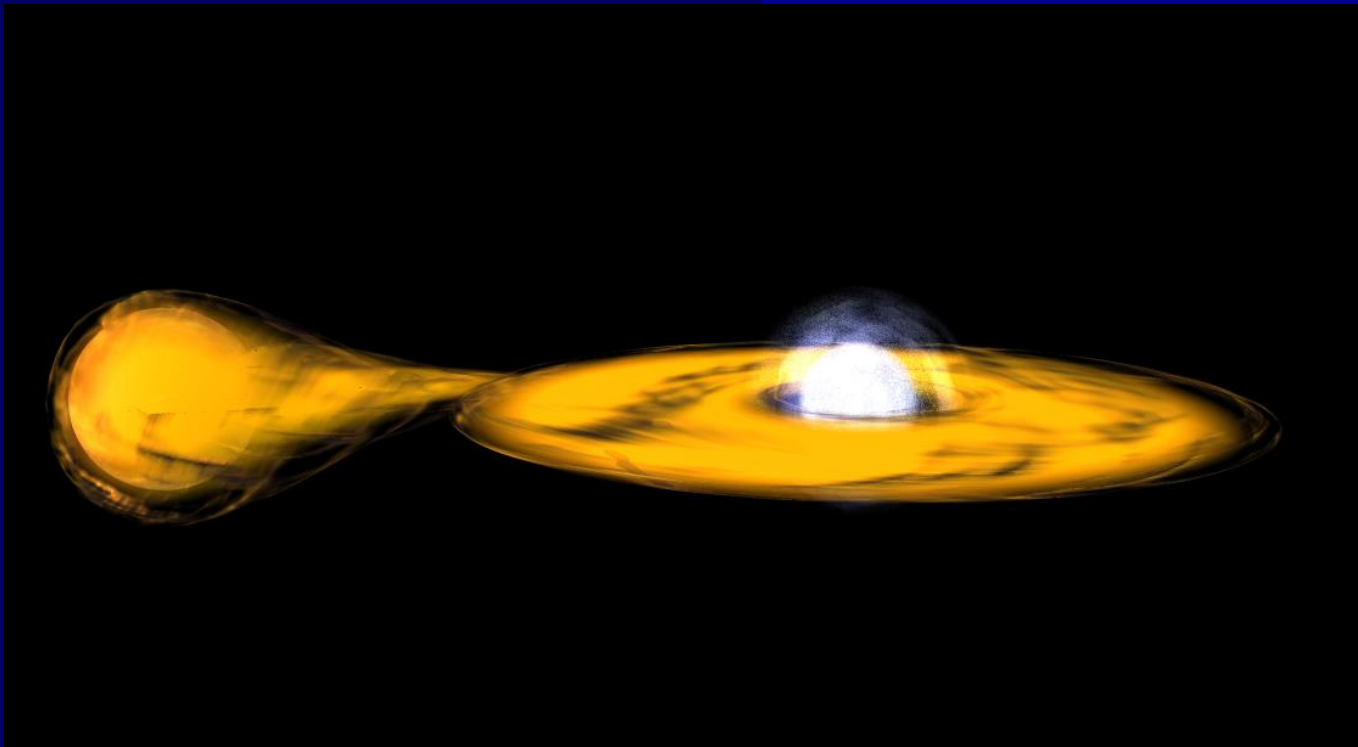
НЗ



GX 3+1



Теоретическое обоснование полученных результатов:





I. Зависимость спектрального индекса α от электронной температуры T_e для НЗ. Теория лучистого переноса

- Соотношение между количеством энергии на единицу площади поверхности короны Q_{cor} , плотностью излучения $\varepsilon(\tau)$ и T_e

$$Q_{\text{cor}}/\tau_0 = 20.2\varepsilon(\tau)T_e,$$

Рассмотрим среднюю величину плотности энергии $\langle\varepsilon(\tau)\rangle$

$$\langle\varepsilon(\tau)\rangle = \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} \varepsilon(\tau) d\tau = \frac{Q_{\text{tot}}}{c} (2 + \tau_0)$$

Используя эти два уравнения, получим

$$\frac{kT_e\tau_0(2 + \tau_0)}{m_e c^2} = \frac{0.25}{1 + Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}}}$$



II. Зависимость спектрального индекса α от электронной температуры T_e для НЗ. Теория лучистого переноса

- Спектральный индекс α определяется как

$$\alpha = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{\beta}{\Theta}},$$

[Titarchuk & Lyubarskij, 1995, ApJ, 450, 876]

Где

$$\Theta \equiv kT_e/m_e c^2$$

и

$$\beta_{\text{diff}} = \frac{1}{\tau_0(2 + \tau_0)}.$$

Используя эти четыре уравнения, получим

$$\alpha_{\text{diff}} \approx -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \frac{1 + Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}}}{0.25}}.$$



Постоянство спектрального индекса около 1 – есть спектральный признак $H\beta$

*Наблюдательная переменность α определяется
только переменностью $Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}}$!*

[Farinelli & Titarchuk, 2011, A&A, 525, 102]:

если $Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}} \ll 1$:

$$\alpha \approx 1 + O(Q_{\text{disk}}/Q_{\text{cor}})$$

*Т.е., когда энергосвечение в диске много меньше
энергосвечения в переходном слое*

- Актуальные задачи, связанные с НЗ





- «Объединение» a тоll- и Z-источников
- Аккреция на Кеплеровский диск (по *Shakura & Sunyaev 1973*)
- Задача о подстройке Кеплеровского движения вещества в диске к суб-Кеплеровскому вращению центрального объекта
- Вертикальные колебания диска
- Условие запуска ветра
- Формирование эмиссионных линий в оттекающем ветре
 - Случаи сходящегося и расходящегося ветрового потока

Унифицированная модель atoll- и Z-ИСТОЧНИКОВ

The nature of the Island and Banana States in Atoll sources and a Unified Model for Low Mass X-ray Binaries

M. J. Church¹, A. Gibiec² and M. Bałucińska-Church¹

¹ School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK

² Astronomical Observatory, Jagiellonian University, ul. Orle 171, 30-244 Cracow, Poland.

MNRAS, 2012, 438, 278

ABSTRACT

Based on the results of two spectral surveys of the Atoll sources using broadband data from *RXTE* and from *BeppoSAX* we propose an explanation of the Island and Banana states and of the detailed relation between Atoll and Z-track sources and of the states within each type. This constitutes a unified model for Low Mass X-ray Binaries in general. We find a dramatic transition at a luminosity of $1 - 2 \times 10^{37} \text{ erg s}^{-1}$ above which the high energy cut-off E_{CO} of the Comptonized emission in all sources is low at a few keV so the spectrum does not extend to high energies. There is thermal equilibrium between the neutron star at $\sim 2 \text{ keV}$ and the Comptonizing accretion disk corona (ADC) resulting in a low value of E_{CO} , and this cuts off the spectrum of the Banana state of Atoll sources and of all states of the Z-track sources. Below this critical luminosity, E_{CO} increases strongly towards 100 keV causing the hardness of the island state and thermal equilibrium is lost, the ADC becoming much hotter than the neutron star. The neutron star cannot produce temperatures greater than 2 keV so there must be a coronal heating mechanism presently not well determined. The results suggest a unified



Наблюдения: RXTE и ВерроSAX

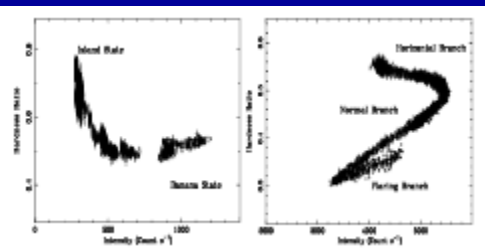
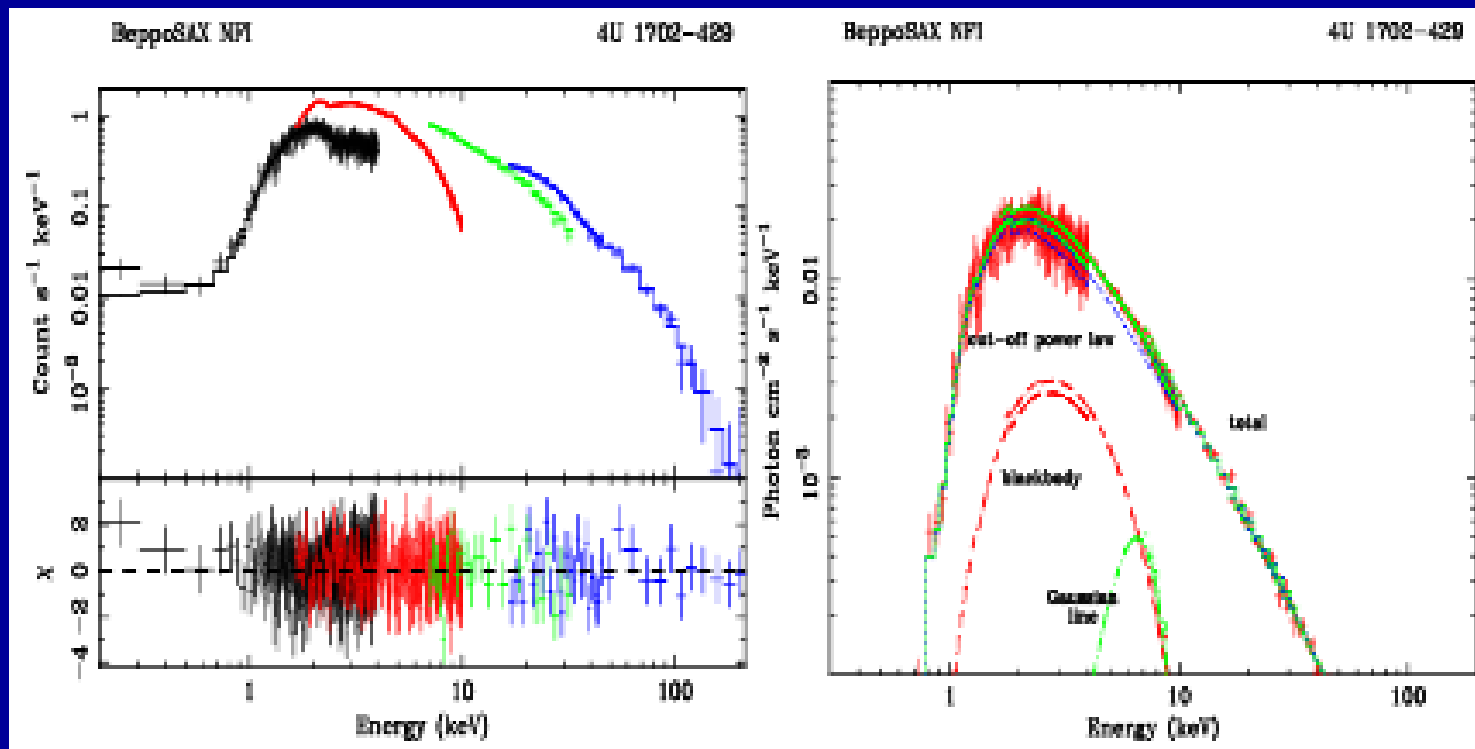
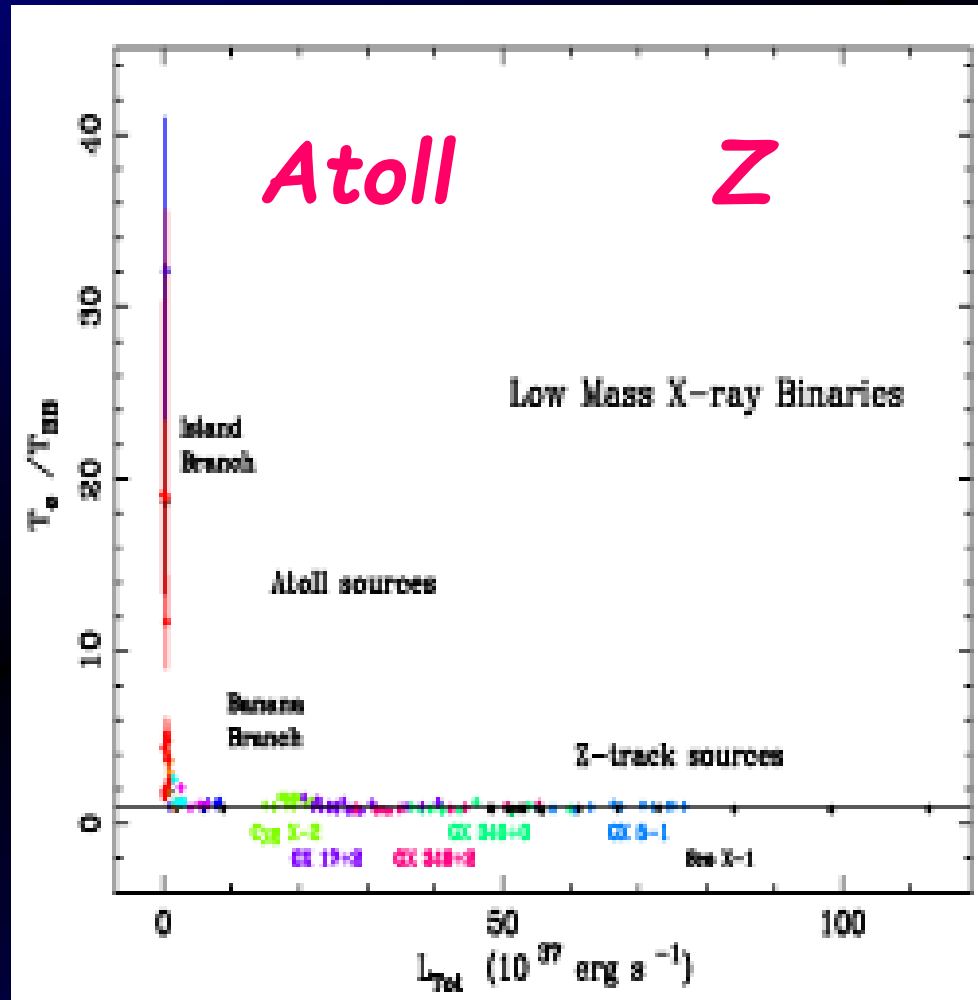
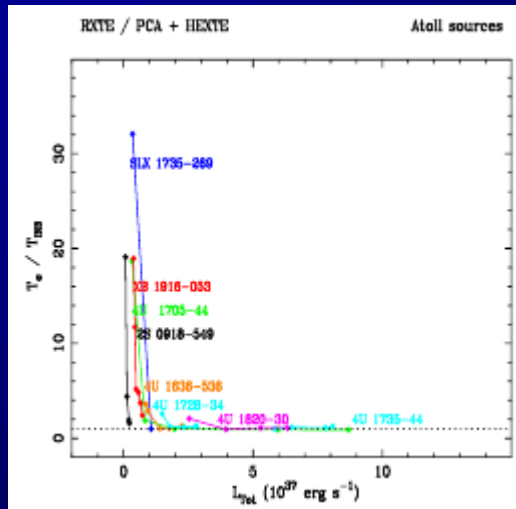


Table 1. The Rossi-XTE Observations.

source	obsid	date	span (kssec)	exposure (kssec)
4U 1916-053	P10109	1996 May 14 - 23	785	122
4U 1820-30	P20075	1997 Mar 21 - 28	5865	46
4U 1728-34	P20083	1997 Sep 19 - Oct 1	1071	170
SLX 1735-269	P80138	2003 Sep 18 - Oct 6	1559	18
2S 0918-549	P90416	2004 Jun 18 - 29	1025	76
4U 1735-44	P91025	2006 Oct 28 - Nov 1	348	24
4U 1636-536	P91024	2007 Jan 1 - 15	1280	213
4U 1705-44	P93060	2007 Sep 3 - Nov 19	6686	216

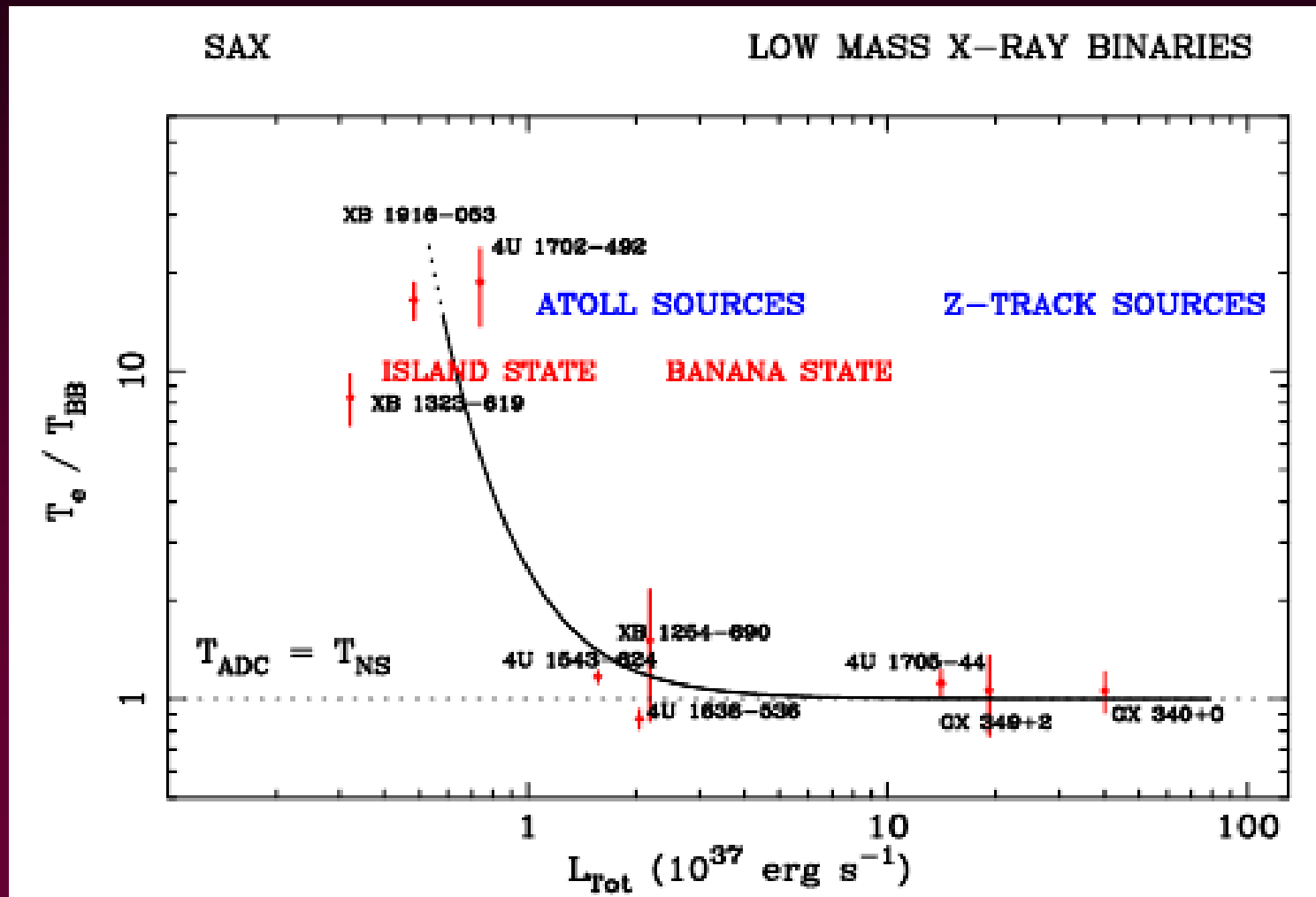


Попытка создания унифицированной модели в терминах T_e/T_{bb} и L_{tot}



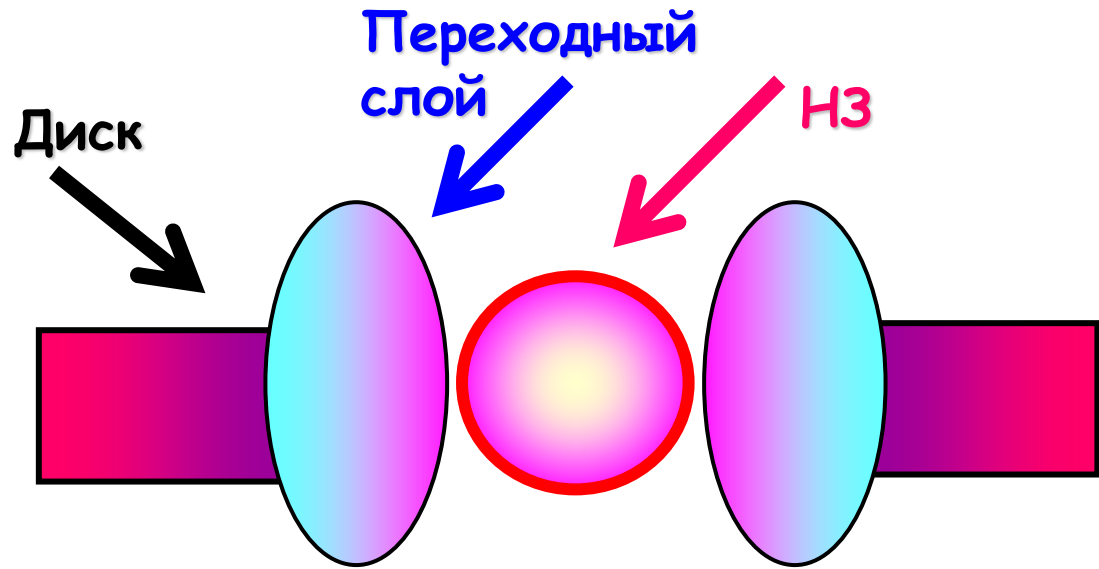
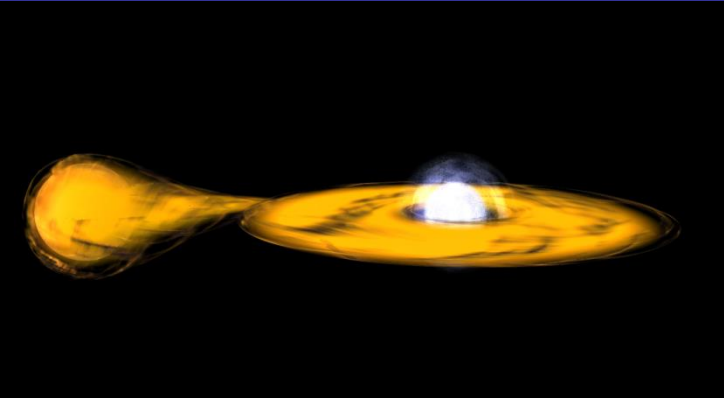
С нарастанием
рентгеновской
светимости
температуры HZ
 T_e/T_{bb} стремятся
к 1

Отличие и сходство atoll- и Z-источников (логарифмический масштаб)





Аккреция на Кеплеровский диск (по *Shakura & Sunyaev 1973, SS73*)



Новое по сравнению
с SS73: ↓

ПС – область, ограниченная между поверхностью НЗ (или последней устойчивой орбитой в случае ЧД) и «внешним» радиусом диска, где Кеплеровский диск гладко подстраивается к внутреннему до-Кеплеровскому диску



Постановка задачи

- В Кеплеровском диске вещество вращается с угловой скоростью

$$\omega_K = \left(\frac{GM}{R^3} \right)^{1/2}$$

где M – масса центрального компактного объекта. Радиальный перенос углового момента в диске осуществляется посредством сил вязкого трения между радиальными слоями аккреционного диска

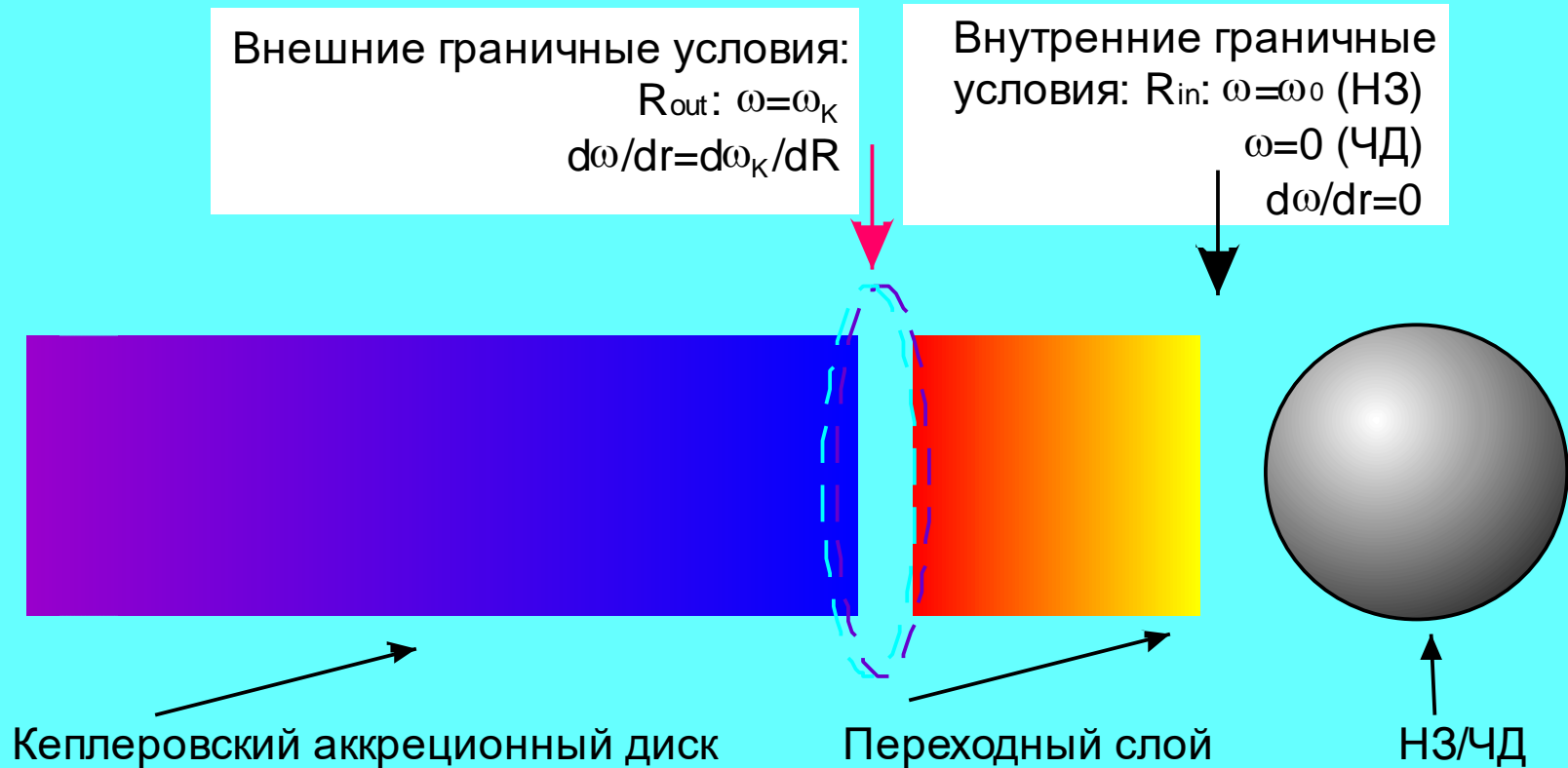
$$M \frac{d}{dR} (\omega R^2) = 2\pi \frac{d}{dR} (W_{r\varphi} R^2) \quad (1)$$

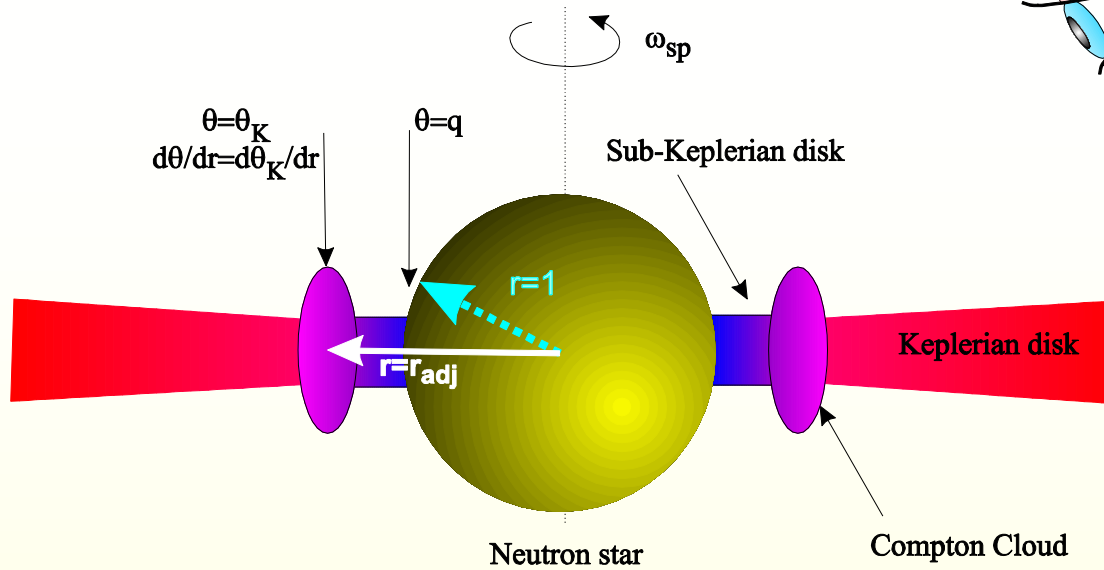
Где \dot{M} – темп аккреции, вязких напряжений

$$W_{r\varphi} = -2\eta H R \frac{d\omega}{dR}, \quad \text{– компонента тензора}$$

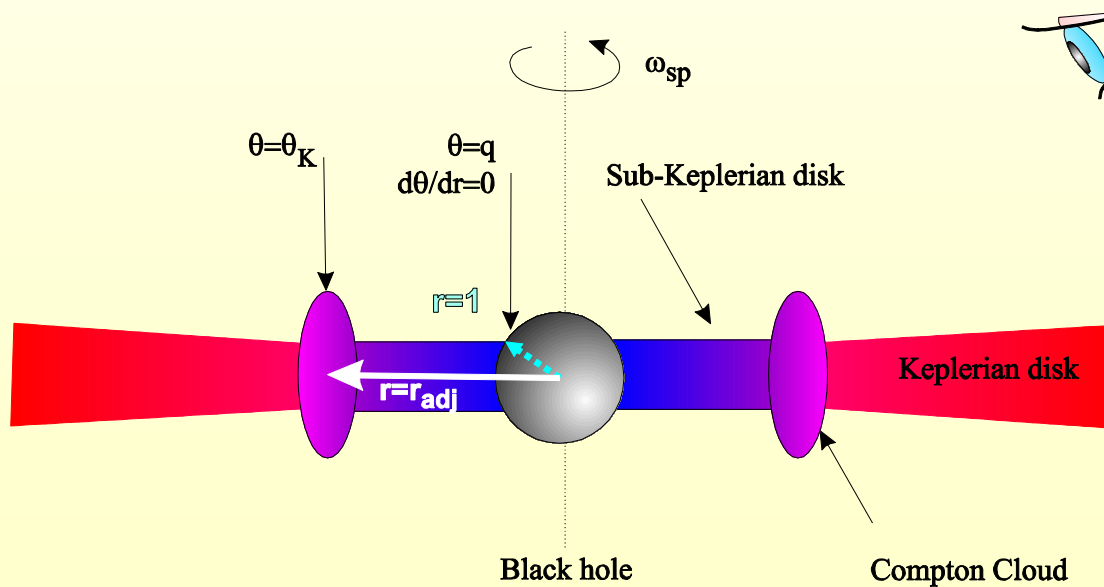


Задача о подстройке Кеплеровского движения вещества в диске к суб-Кеплеровскому вращению центрального объекта



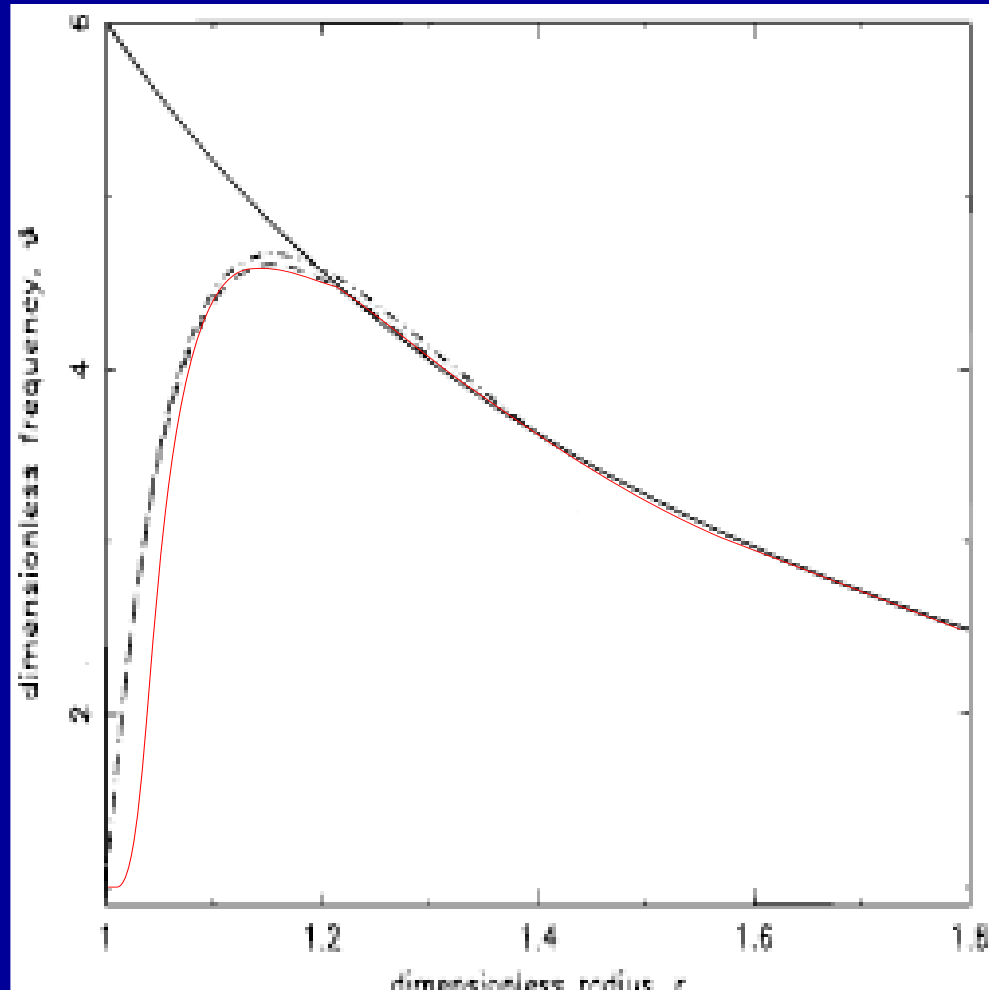


Отличие
граничных
условий
для
НЗ и ЧД





Решение задачи о подстройке с учетом гр. условия $W_{r\varphi}=0$ (случай ЧД)



Решение уравнения (1) для геометрически толстого аккреционного диска

- Перепишем уравнение (1) используя параметр γ

$$\frac{d}{dR}(\omega R^2) = -\frac{d}{dR}\left(\gamma^{-1} R^3 \frac{d\omega}{dR}\right)$$

$$\gamma = \frac{\dot{M}}{4\pi\eta H}$$

$$\gamma = \frac{4\pi\rho V_r R H}{4\pi\rho v_t l_r H} = \frac{V_r R}{v_t l_r}$$

- Ранее в SS73 введен параметр α

$$\alpha = \frac{v_t l_r}{a_s H}$$

- где a_s – скорость звука. Предположим, что

$V_r \approx a_s$ и $H \approx R$ в переходном слое, тогда $\alpha \approx \gamma^{-1}$.

- (α – турбулентное число Рейнольдса).

$$\gamma \frac{d}{dR}(\omega R^2) = -\frac{d}{dR}\left(R^3 \frac{d\omega}{dR}\right)$$

(2)



Общее решение ищется в виде

$$\omega(R) = \hat{\omega} + \omega_s = C_1 R^{-2} + C_2 R^{-\gamma}. \quad (3)$$

- Константы C_1 и C_2 определяются из граничных условий

$$C_1(r_{out}) = \frac{6r_{out}^{1/2}/m - qr_{out}^{-\gamma+2}}{1 - r_{out}^{-\gamma+2}},$$

$$C_2(r_{out}) = \frac{q - 6r_{out}^{1/2}/m}{1 - r_{out}^{-\gamma+2}}$$

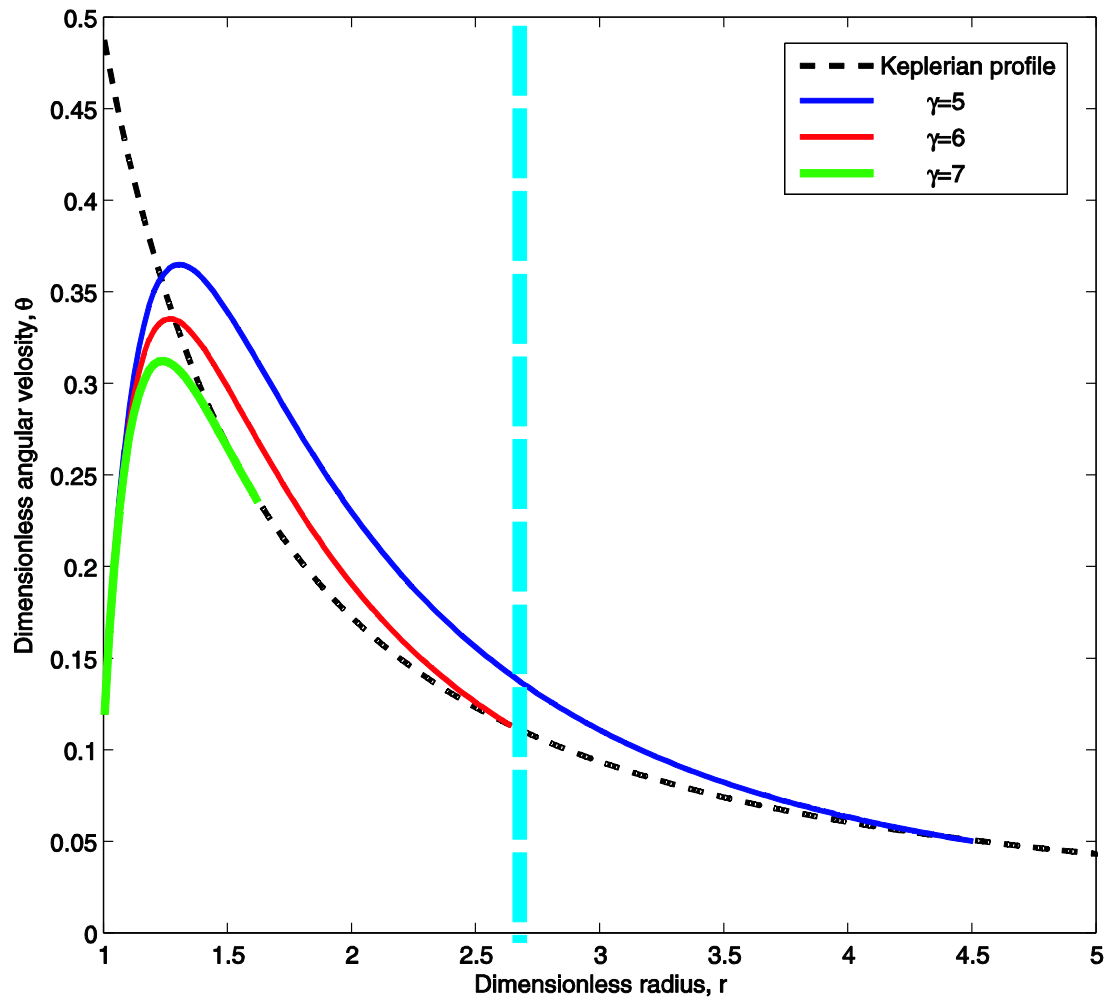
- Подставляем их в (3) и $\omega(R)$ в (2)

$$2C_1(r_{out})r_{out}^{-1/2} + \gamma C_2(r_{out})r_{out}^{-\gamma+3/2} = \frac{9}{m}$$

- И решаем (2) графически



Случай НЗ





Вертикальные колебания диска

- Небольшое вертикальное смещение газового слоя от положения равновесия приводит к возникновению «восстанавливающей» силы и силы светового давления

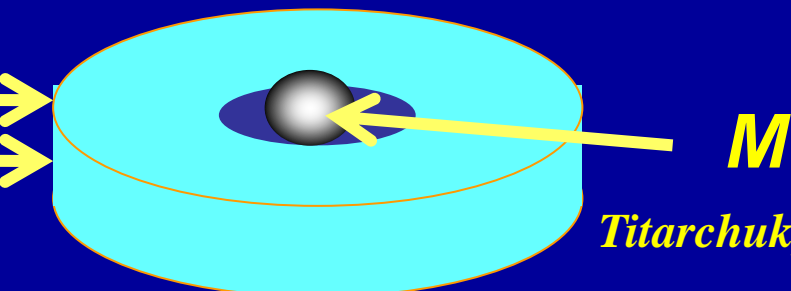
$$f_{gr} \approx -m_p GMh/R^2$$

- где

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

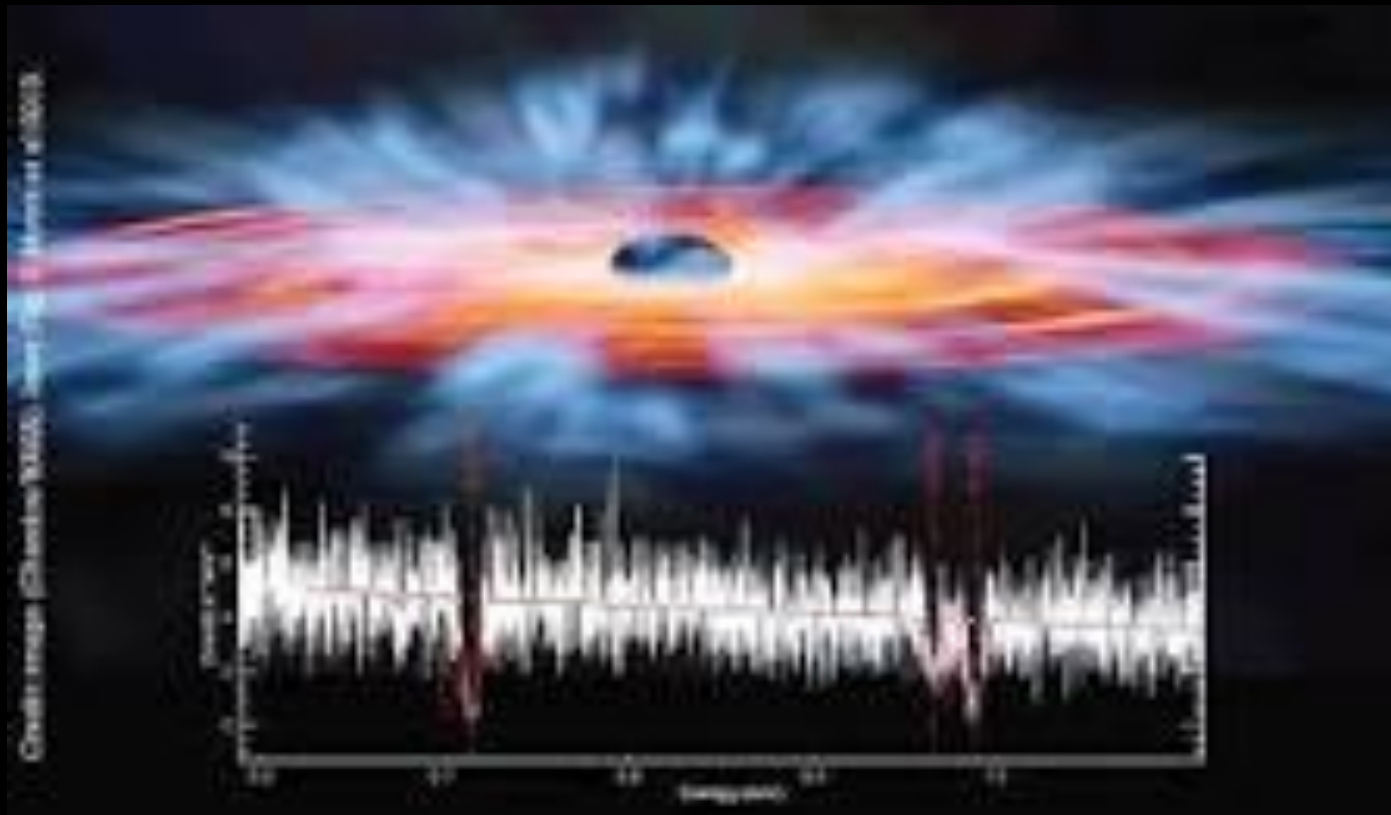
$$|f_r| \lesssim (4/3)\ell[GMH_d/R^2](\dot{h}/c)$$

Тогда вертикальные колебания газового слоя



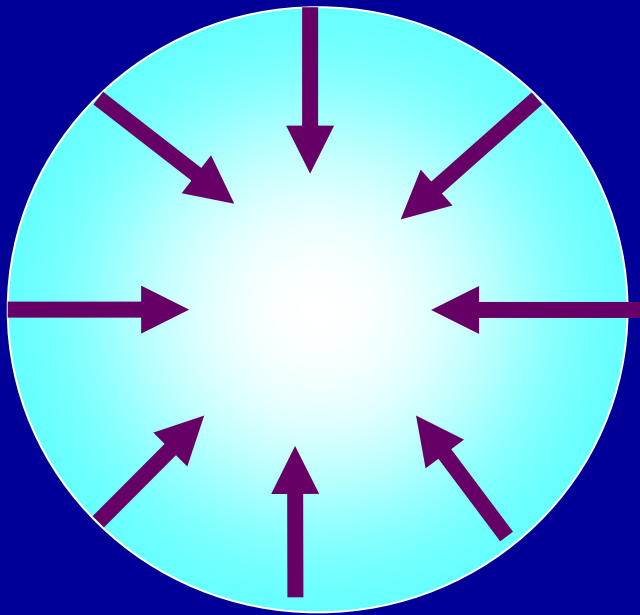
$$m_p \ddot{h} = f_{gr} - |f_r|$$

Какой механизм запускает ветер диска ?

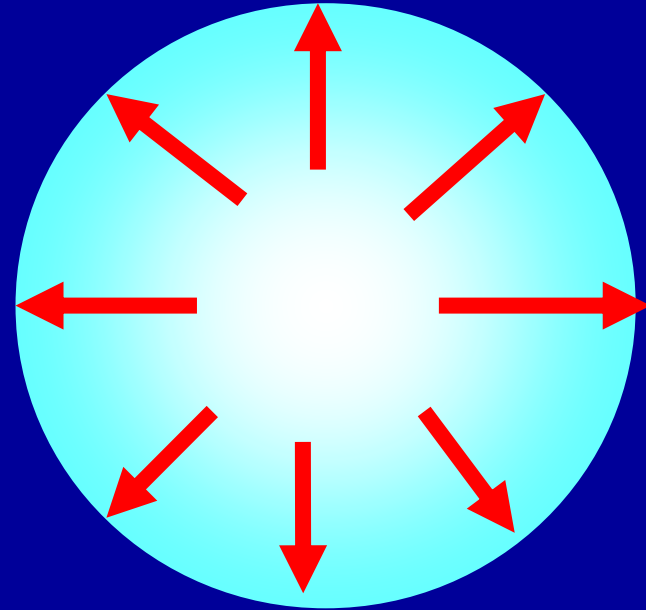




Что удерживает звезду в стабильном состоянии ?



Сила гравитации
сжимает звезду
к ее центру

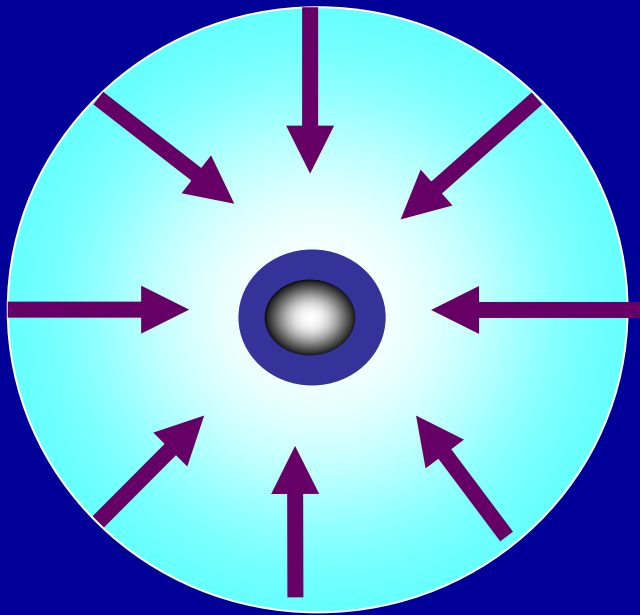


*Горение H , He , $O_2 \rightarrow$
давление излучения –
распирает звезду
+газовое давление*

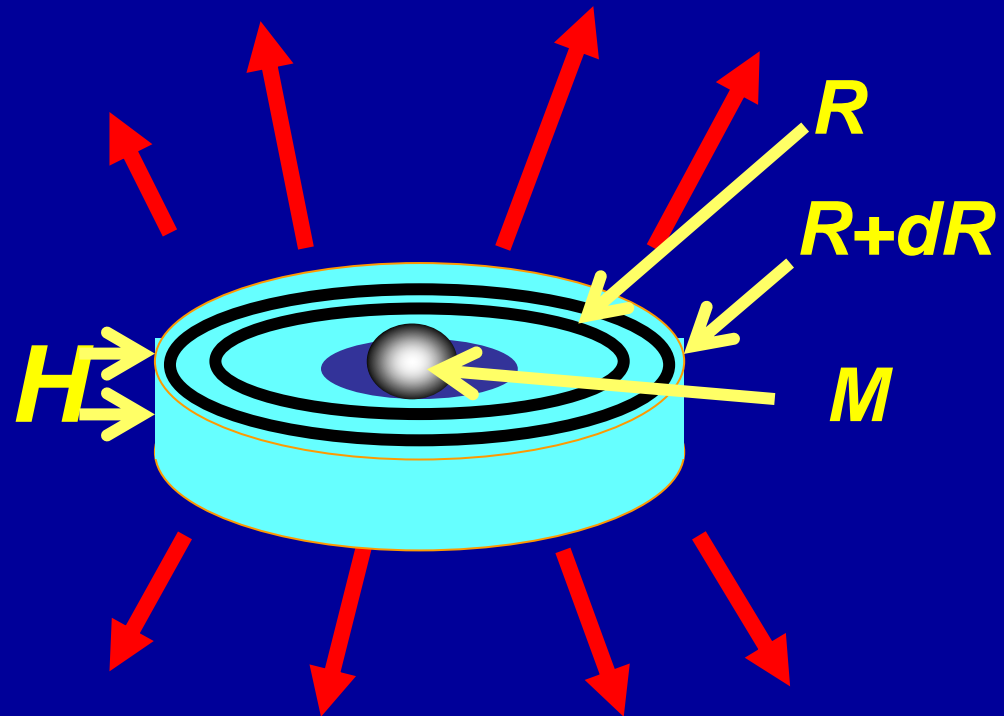


Какой механизм запускает ветер

?



Сила гравитации
центрального
объекта
удерживает
вещество диска



*давление излучения
диска выталкивает
ветер*



Критический режим аккреции

$$\dot{M} = \dot{M}_{cr}$$

APPENDIX E

THE EDDINGTON LUMINOSITY LIMIT IN THE DISK AND MASS OUTFLOW IN THE WIND

The critical \dot{M}_d^{crit} to launch the wind at a given disk radius R is determined by an equality of the radiation pressure and gravitational force in a given annulus between R and $R + dR$, namely,

$$\frac{\sigma(R)Q_d^{crit}(R)}{c} = m_p \left(\frac{H}{R} \right) \frac{GM}{R^2}. \quad (E1)$$

Here

$$Q_d^{crit}(R) = \frac{3}{8\pi} \frac{GM\dot{M}_d^{crit}}{R^3} \left[1 - (R_s/R)^{1/2} \right] \quad (E2)$$

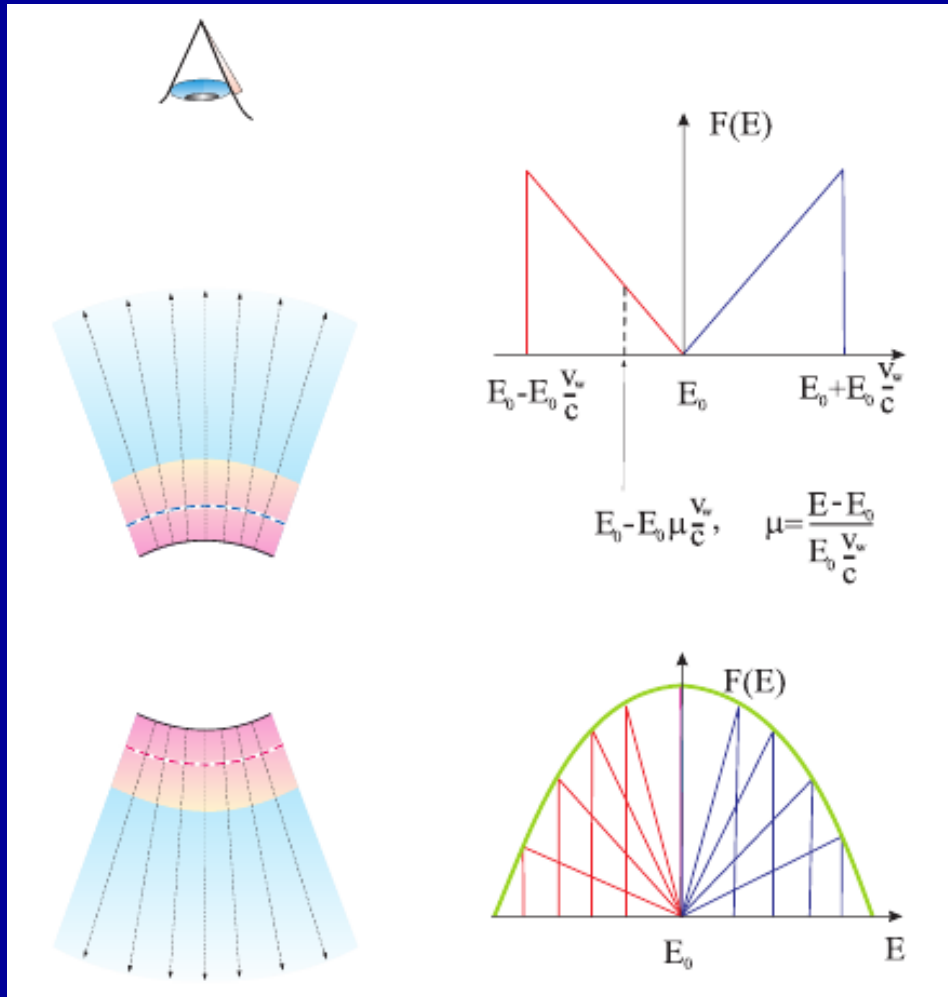
is the disk luminosity per square centimeter in the annulus between R and $R + dR$ (see SS73); R_s is the central object radius, which is 3 Schwarzschild radii for a BH and the NS radius for an NS; $\sigma(R)$ is an effective plasma cross section that equals the electron Thomson cross-section σ_T if the disk plasma is fully ionized, otherwise $\sigma(R) > \sigma_T$ (see, e.g., Proga 2005); H is a geometrical half-thickness of the disk; M is the mass of the central object, the BH or NS mass for the BH and NS cases, respectively.

Thus, we obtain using equations (E1) and (E2) that

$$\dot{M}_d^{crit}(R) = \frac{8\pi}{3} R \left(\frac{H}{R} \right) \frac{m_p c}{\sigma(R)} \frac{1}{\left[1 - (R_s/R)^{1/2} \right]}. \quad (E3)$$



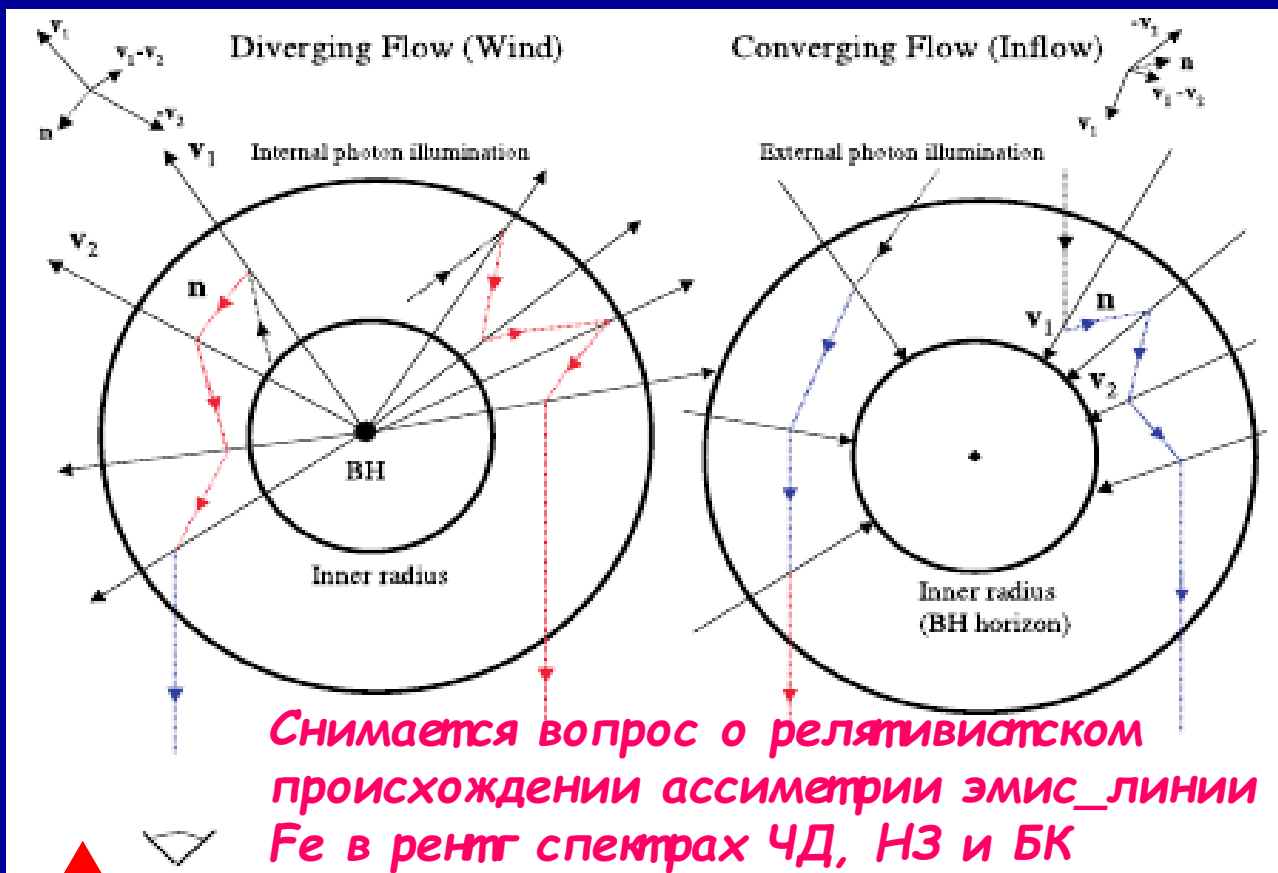
Формирование эмиссионных линий в оттекающем ветре



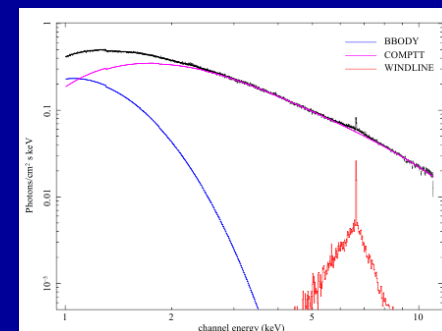
- Spherical wind geometry and wind line profiles of direct component



Случаи сходящегося и расходящегося ветрового потока



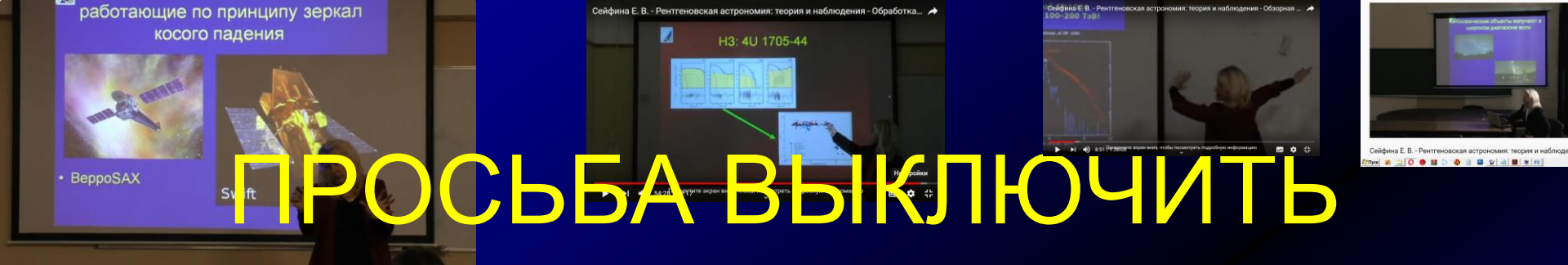
- Schematic diagram showing wind geometry.





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

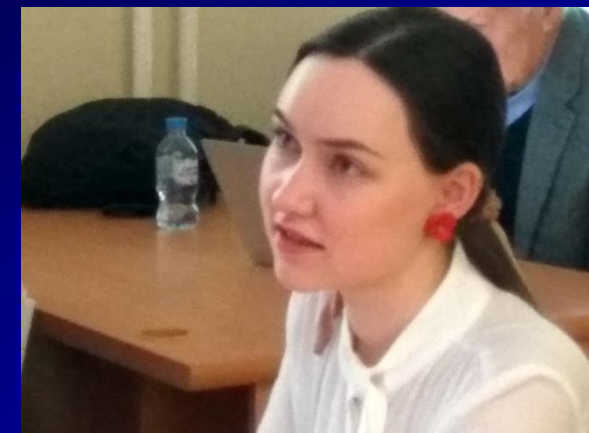
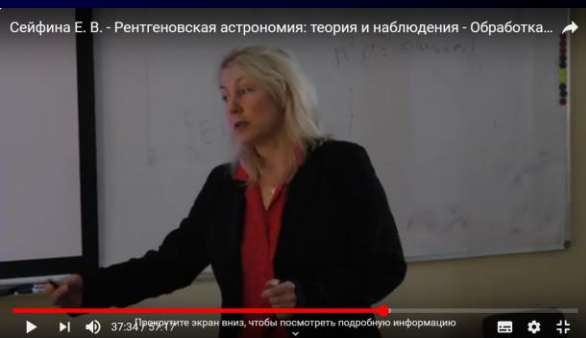




ПРОСЬБА ВЫКЛЮЧИТЬ МОБИЛЬНЫЕ ТЕЛЕФОНЫ.



ИДЕТ ВИДЕОСЪЕМКА




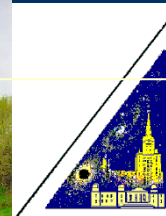


ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ МАСС

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

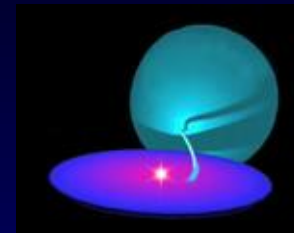
Б  З И С





Разные типы черных дыр

- ЧД звездных масс ($5-10 M_{\odot}$)
- Сверхмассивные ЧД ($10^5-9 M_{\odot}$)



- ЧД промежуточных масс ($100-10^4 M_{\odot}$)
- Первоначальные ЧД

Как возникла идея о существовании ЧД промежуточной массы ?

Колберт и Мушотский (*ApJ*, 519, 89, 1999)

THE NATURE OF ACCRETING BLACK HOLES IN NEARBY GALAXY NUCLEI

EDWARD J. M. COLBERT¹ AND RICHARD F. MUSHOTZKY

Laboratory for High Energy Astrophysics, Code 662, NASA/GSFC, Greenbelt, MD 20771

Received 1998 October 6; accepted 1999 February 2

ABSTRACT

We have found compact X-ray sources in the center of 21 (54%) of 39 nearby face-on spiral and elliptical galaxies with available *ROSAT* HRI data. *ROSAT* X-ray luminosities (0.2–2.4 keV) of these compact X-ray sources are $\sim 10^{37}$ – 10^{40} ergs s⁻¹ (with a mean of 3×10^{39} ergs s⁻¹). The mean displacement between the location of the compact X-ray source and the optical photometric center of the galaxy is ~ 390 pc. The fact that compact nuclear sources were found in nearly all (five of six) galaxies with previous evidence for a black hole or an active galactic nucleus (AGN) indicates that at least some of the X-ray sources are accreting supermassive black holes. *ASCA* spectra of six of the 21 galaxies show the presence of a hard component with relatively steep ($\Gamma \approx 2.5$) spectral slope. A multicolor disk blackbody model fits the data from the spiral galaxies well, suggesting that the X-ray object in these galaxies may be similar to a black hole candidate in its soft (high) state. *ASCA* data from the elliptical galaxies indicate that hot ($kT \approx 0.7$ keV) gas dominates the emission.

The fact that (for both spiral and elliptical galaxies) the spectral slope is steeper than in normal type 1 AGNs and that relatively low absorbing columns ($N_{\text{H}} \approx 10^{21}$ cm⁻²) were found to the power-law component indicates that these objects are somehow geometrically and/or physically different from AGNs in normal active galaxies. The X-ray sources in the spiral and elliptical galaxies may be black hole X-ray binaries, low-luminosity AGNs, or possibly young X-ray luminous supernovae. Assuming the sources in the spiral galaxies are accreting black holes in their soft state, we estimate black hole masses $\sim 10^2$ – $10^4 M_{\odot}$.

Subject headings: galaxies: active — X-rays: galaxies

ЧД промежуточных масс: теория

· Why do we need IMBHs?

➔ To explain existence of luminous quasars at high redshifts ($z \sim 6$) when the Universe was less 1 Gyr

➔ There is **no** BHs between $100 M_{\text{sun}}$ and $500k - 900k M_{\text{sun}}$

➔ How they were formed?

➔ **Two main ideas:**

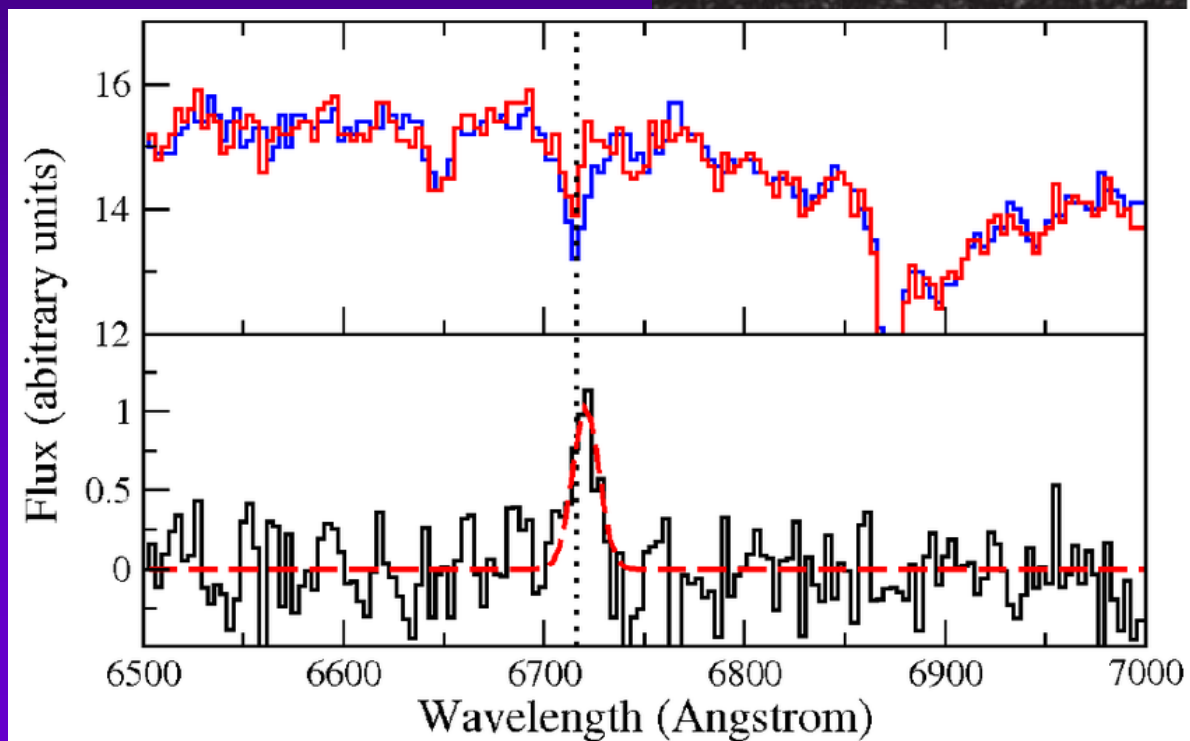
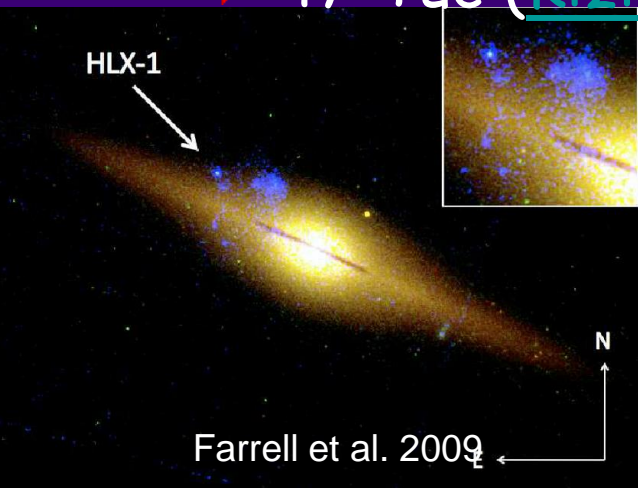
➔ Stellar mass BH seeds from **Population III** stars

➔ Direct collapse of massive gas clouds in the **early Universe**

ЧД промежуточных масс: наблюдения

- Known candidates:

- ◆ ESO 243-49 HLX-1 (but King14)
- ◆ RGG118 (but only 4 X-ray photons); J1605+17
- ◆ 47 Tuc ([Kiziltan17](#) but Brock14, Zocchi17)

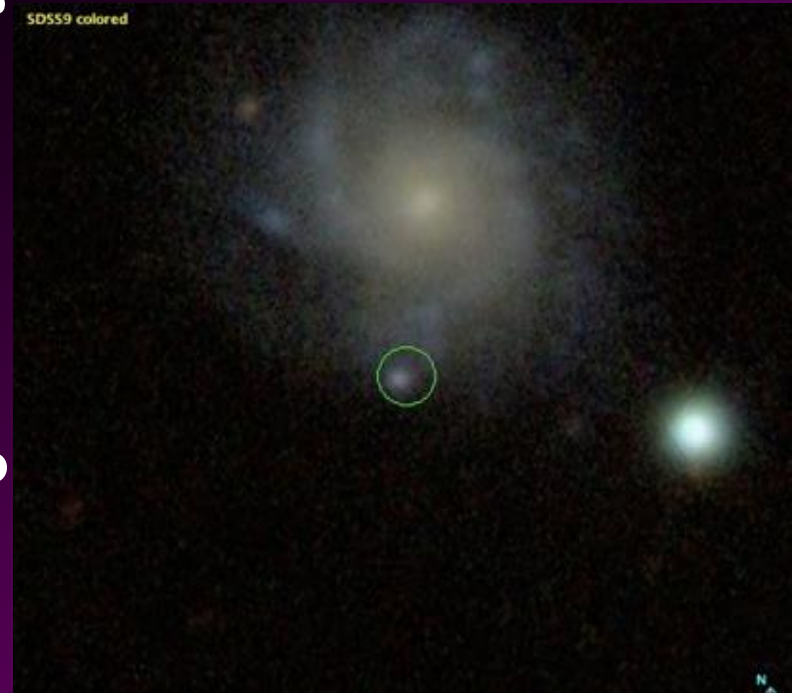


Как искать ЧД промежуточных масс: HLX Search

- [Zolotukhin et al. \(2016\)](#):
 - ➔ 98 HLX candidates with $L_x > 10^{41}$ erg/s from off-nuclear cross-match of SDSS spectral sample and *XMM-Newton* catalog
 - ➔ Background contamination < 80%
 - ➔ HLX population does exist
- A spectral follow-up campaign with Keck/Palomar (with D. Stern and M. Heida) – no positive identifications so far

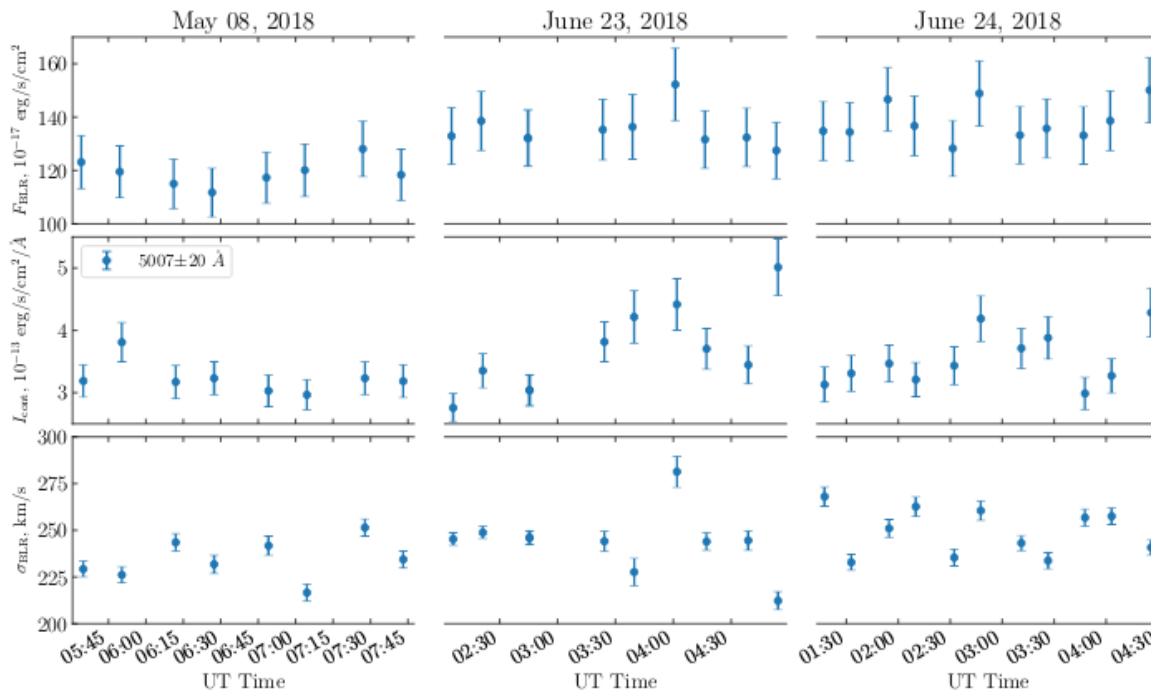
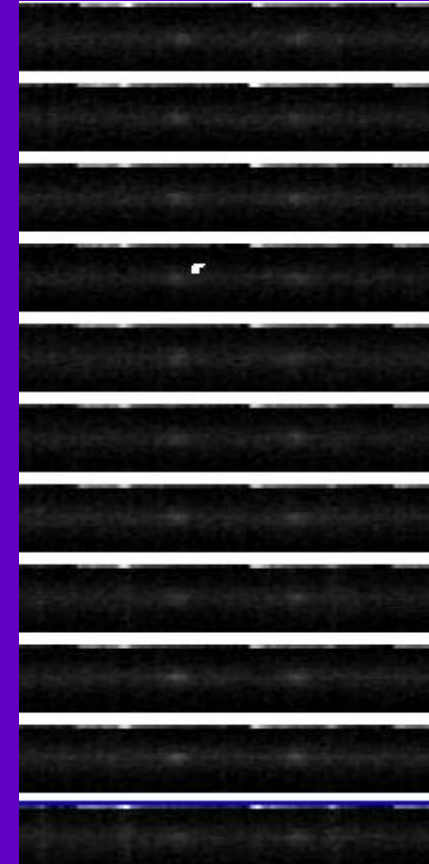
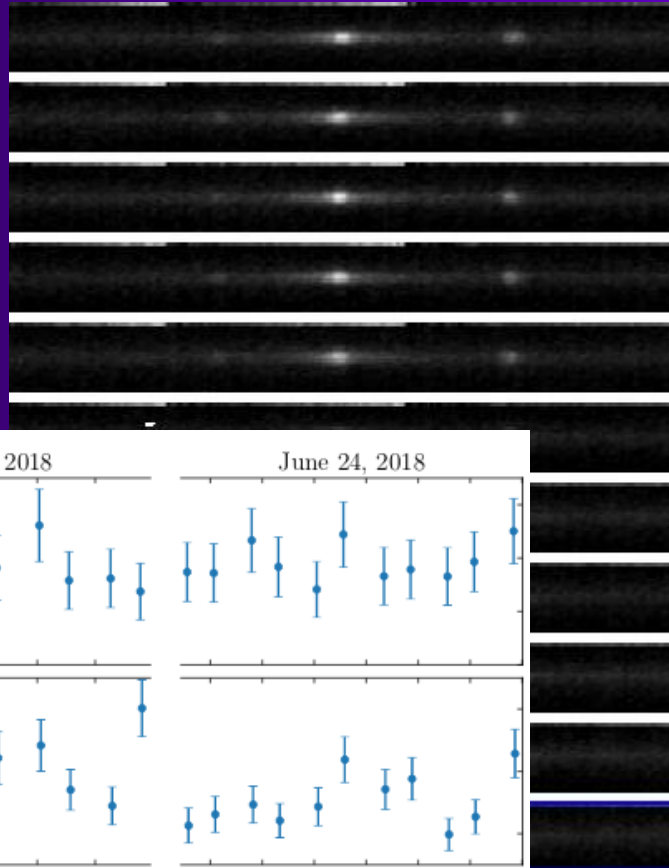


SDSS9 colored



Метод реверберационного картирования – Reverberation mapping

- Основная идея –
измерить
запаздывание
сигнала между
broad line region and
continuum



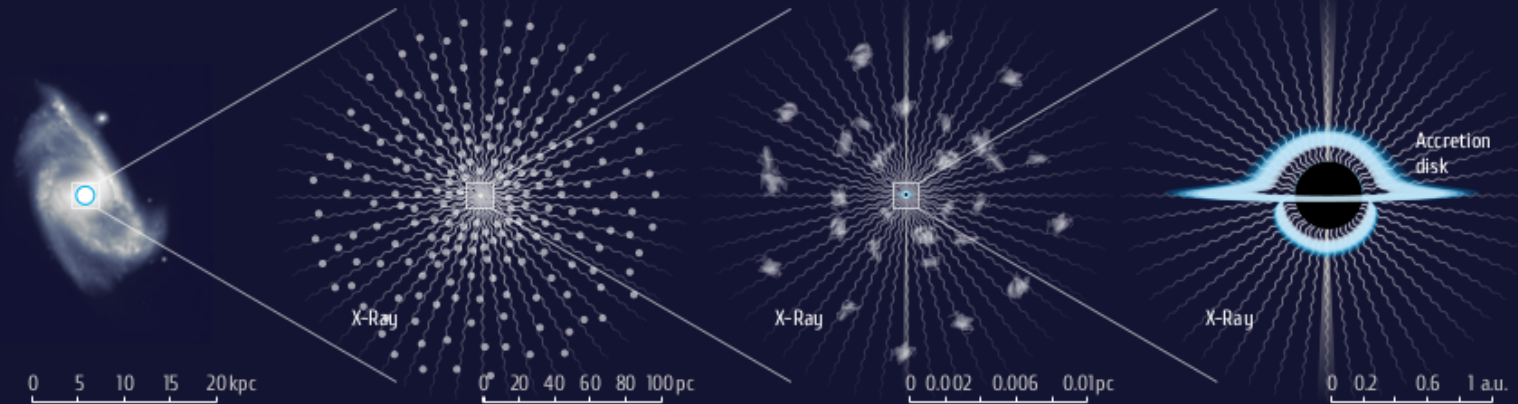
Как искать ЧД промежуточных масс: Broad Line Region

Galaxy with an AGN

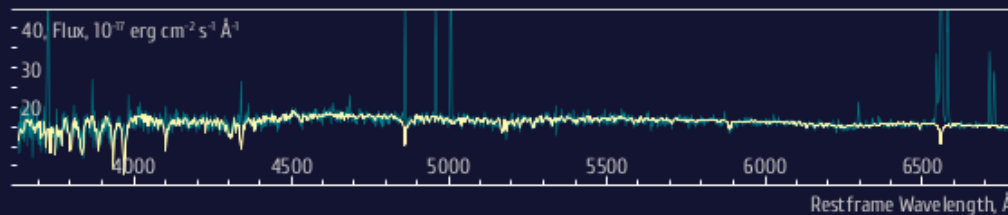
NLR – narrow line region

BLR – broad line region

Black hole

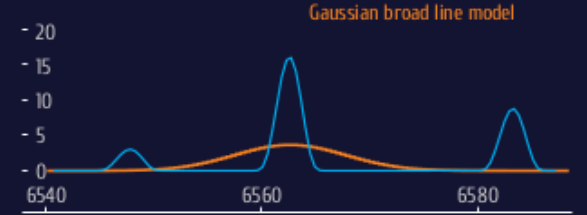


An optical spectrum of the galaxy centre and the galaxy starlight model

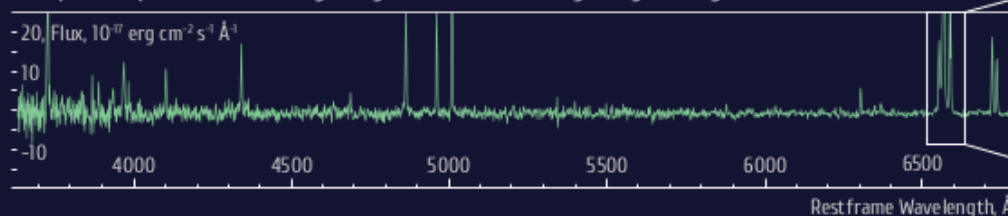


$H\alpha$ + [NII] emission lines

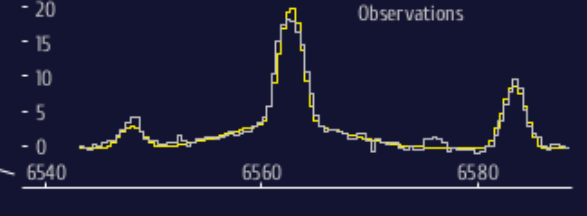
Nonparametric narrow line model
Gaussian broad line model



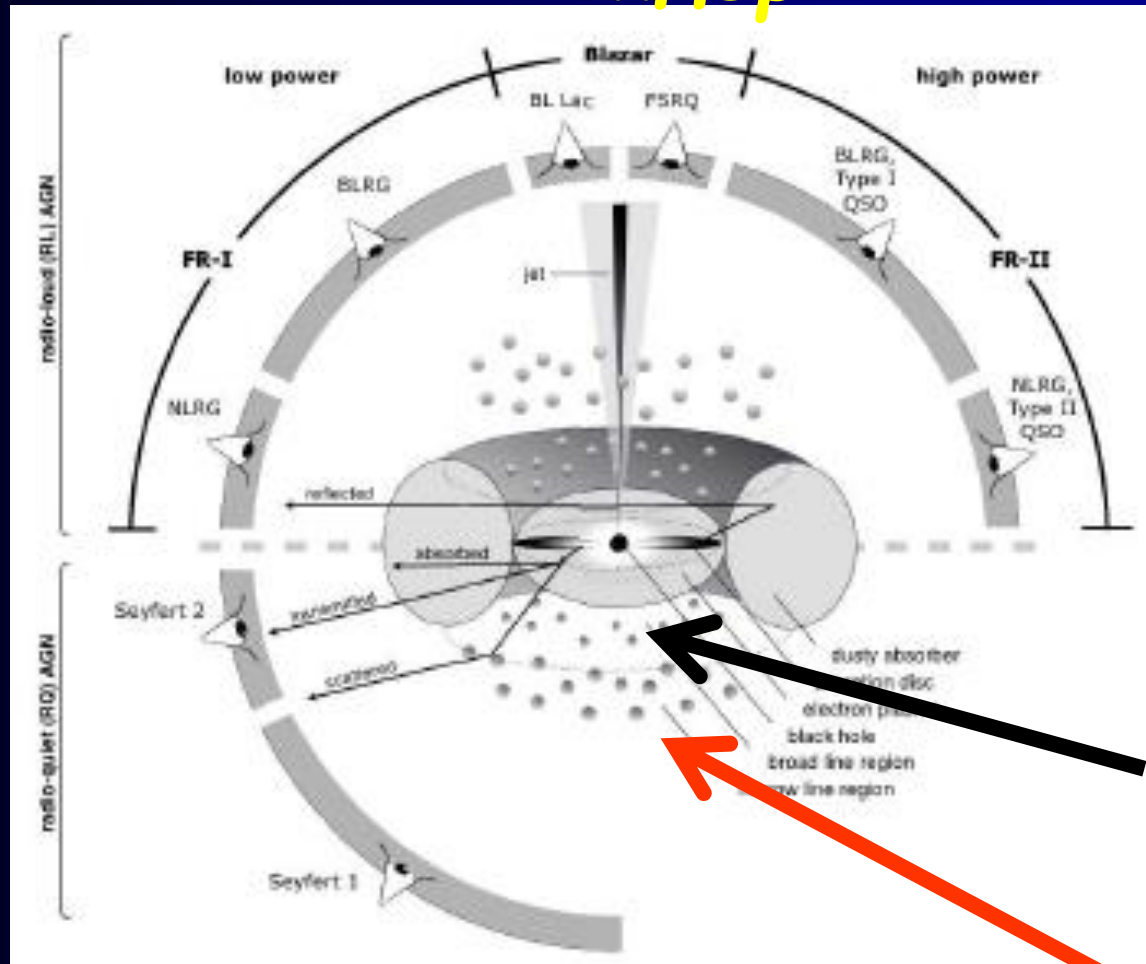
An optical spectrum of the galaxy centre with the galaxy starlight model subtracted



Narrow + Broad line model
Observations



Классификация активных галактических ядер

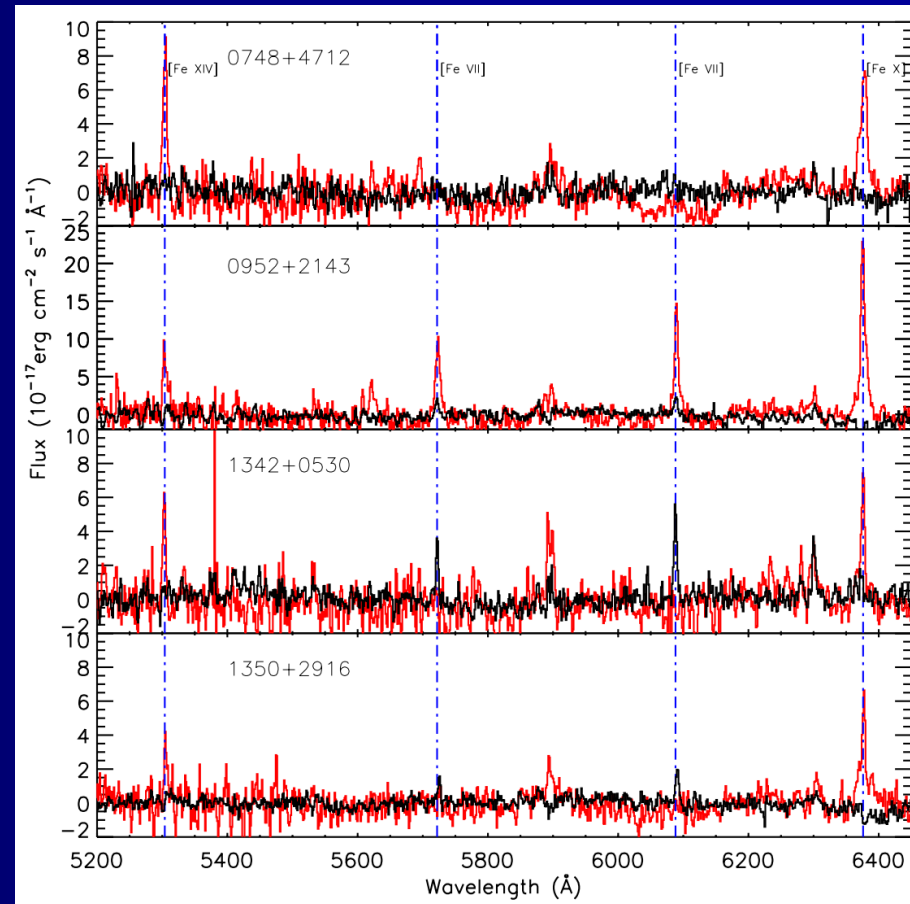


Broad line region

Narrow line region

By-product: Tidal Disruption Events

- High-ionization narrow lines that vary on timescales of years are unique features of the light echo of TDEs
- Hence watch for:
- Strong coronal lines, e.g. [Fe VII]
- Variability (multi-epoch)
- One of our sources is a confirmed TDE
- steady BLR in 15 years: IMBH (150k)
- 1st TDE by a BH $< 10^6 M_{\odot}$



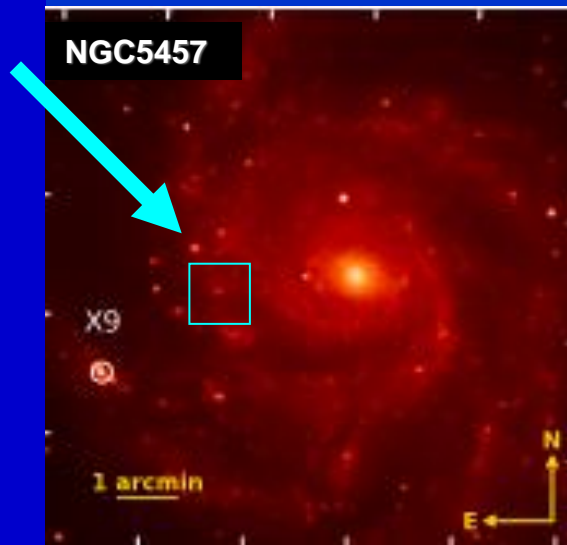
MMT vs SDSS (Yang13)



Черные дыры промежуточной массы

- Основная задача – применение признаков ЧД (найденных в Галактических источниках) к спектрам **внегалактических источников**.
- Определением массы ЧД в этих источниках.

M101 ULX-1

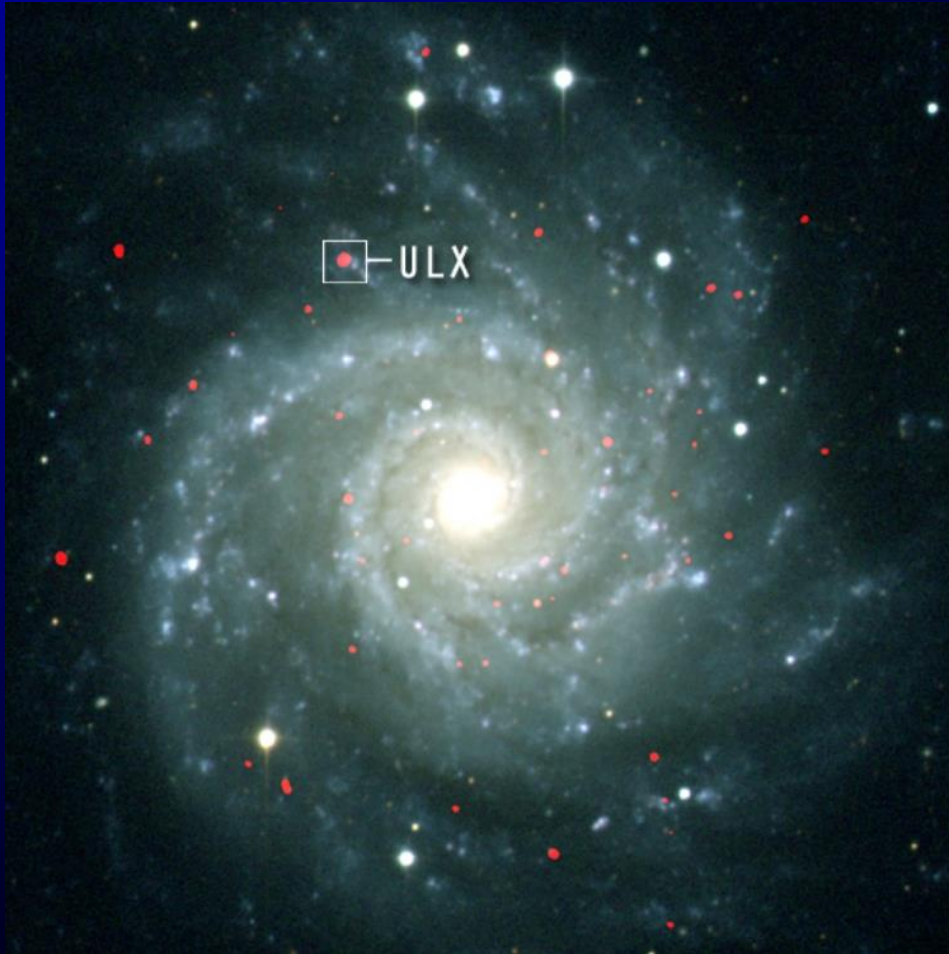


ESO 243-49 HLX-1





Ультраяркие рентгеновские источники (ULX)

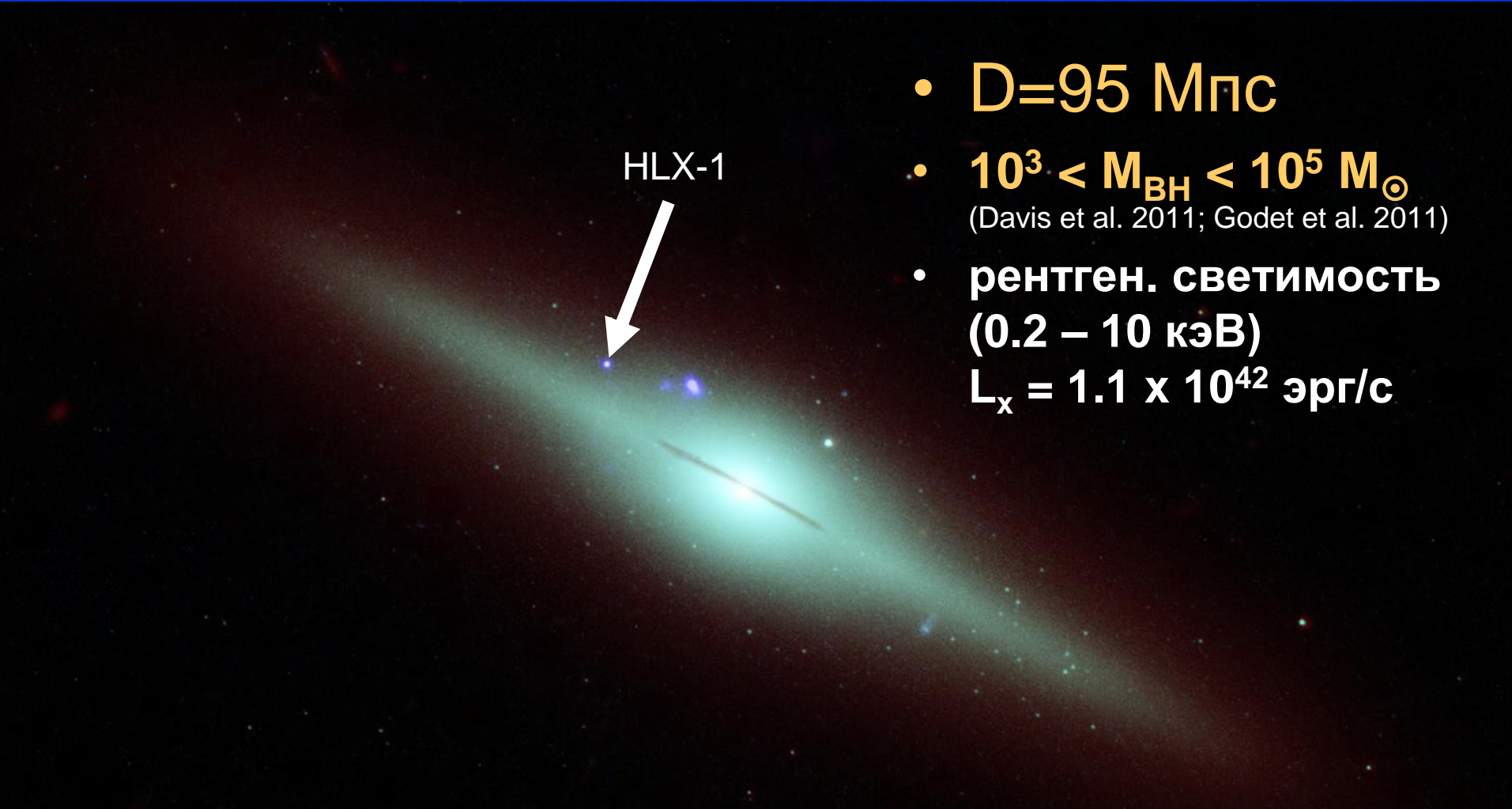


К ним относят рентгеновские источники с потоком, соответствующим изотропной светимости, превышающей Эддингтоновский предел для 10 масс Солнца.

Их природа до сих пор остается неясной. Возможны два сценария: черные дыры звездных масс ($<100 M_{\odot}$), излучающие в Эддингтоновском/ или сверх-Эддингтоновском режимах и «черные дыры промежуточных масс» ($>100 M_{\odot}$), излучающие в суб-Эддингтоновском режиме.



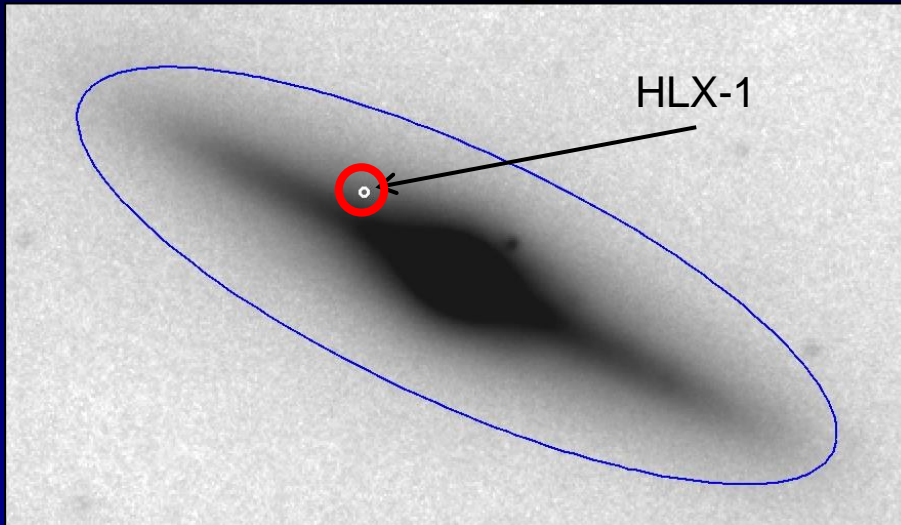
Вспышки ESO 243-47 HLX-1: сравнение с галактическими маломассивными транзиентами



- $D=95$ Мпс
- $10^3 < M_{\text{BH}} < 10^5 M_{\odot}$
(Davis et al. 2011; Godet et al. 2011)
- **рентген. светимость**
(0.2 – 10 кэВ)
 $L_x = 1.1 \times 10^{42}$ эрг/с

Изображение в оптике (HST, Farrell et al. 2011)

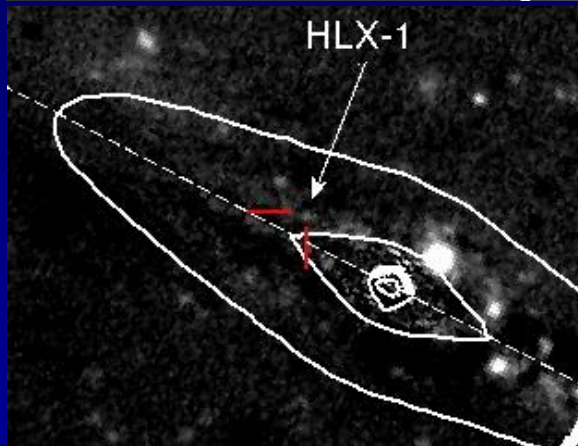
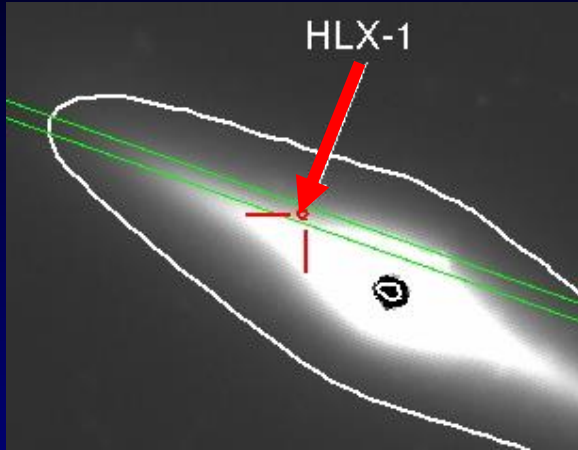
Открытие ESO 243-49 HLX-1, как ярчайшего ультраяркого источника



Изображение галактики ESO 243-49 в ИК (VLT) с указанием положения HLX-1 (Farrell et al., 2009, *Nature*, 460, 73)

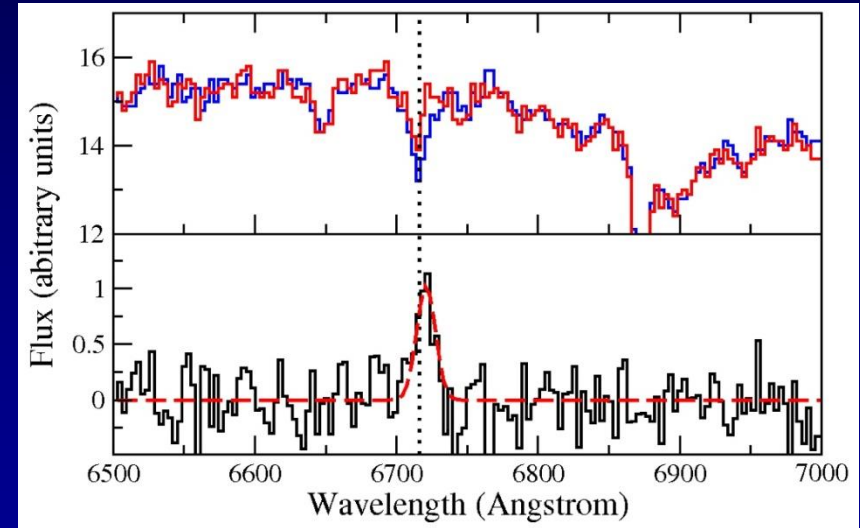
- HLX-1 проецировался на спиральную галактику ESO 243-49, видимую с ребра (Farrell et al. 2009)
- На расстоянии до этой галактики ~ 95 Мпс, рентген. светимость (0.2 – 10 кэВ)
 $L_x = 1.1 \times 10^{42}$ эрг/с
- Долгопериодическая переменность сопровождается **сменой спектральных состояний** (Godet et al. 2009)

Подтверждена принадлежность HLX-1 к галактике ESO 243-49 – по красному смещению



- **Слабый оптический источник ($R \sim 24$ mag)** зарегистрирован в положении, указанном *Chandra* (Soria et al. 2010)

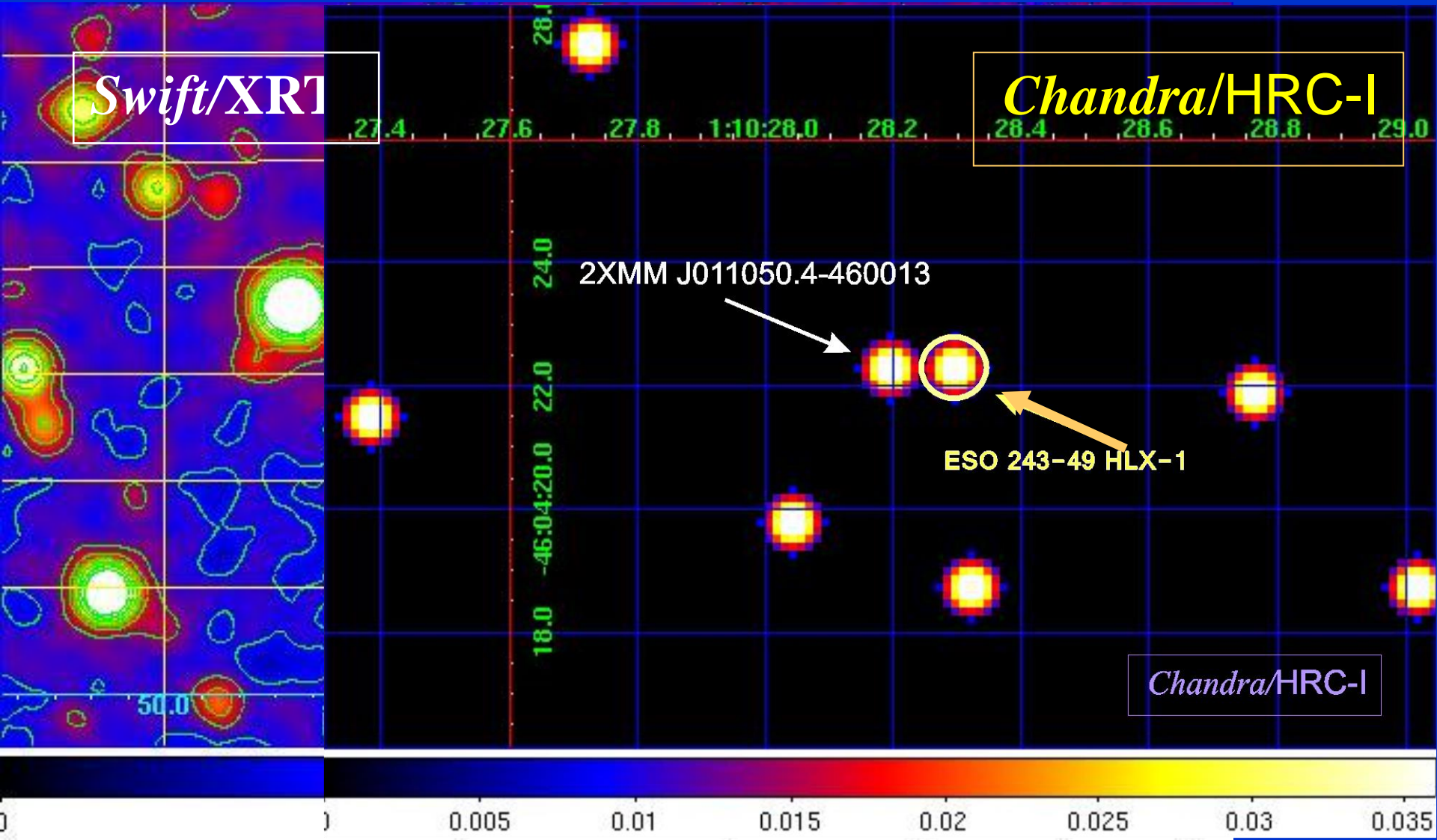
Спектр FORS2, красный = HLX-1, синий = фон, черный = вычитание фона



Изображение ESO 243-49 на VLT до (сверху) и после (снизу) вычитания диффузионного фона галактики.

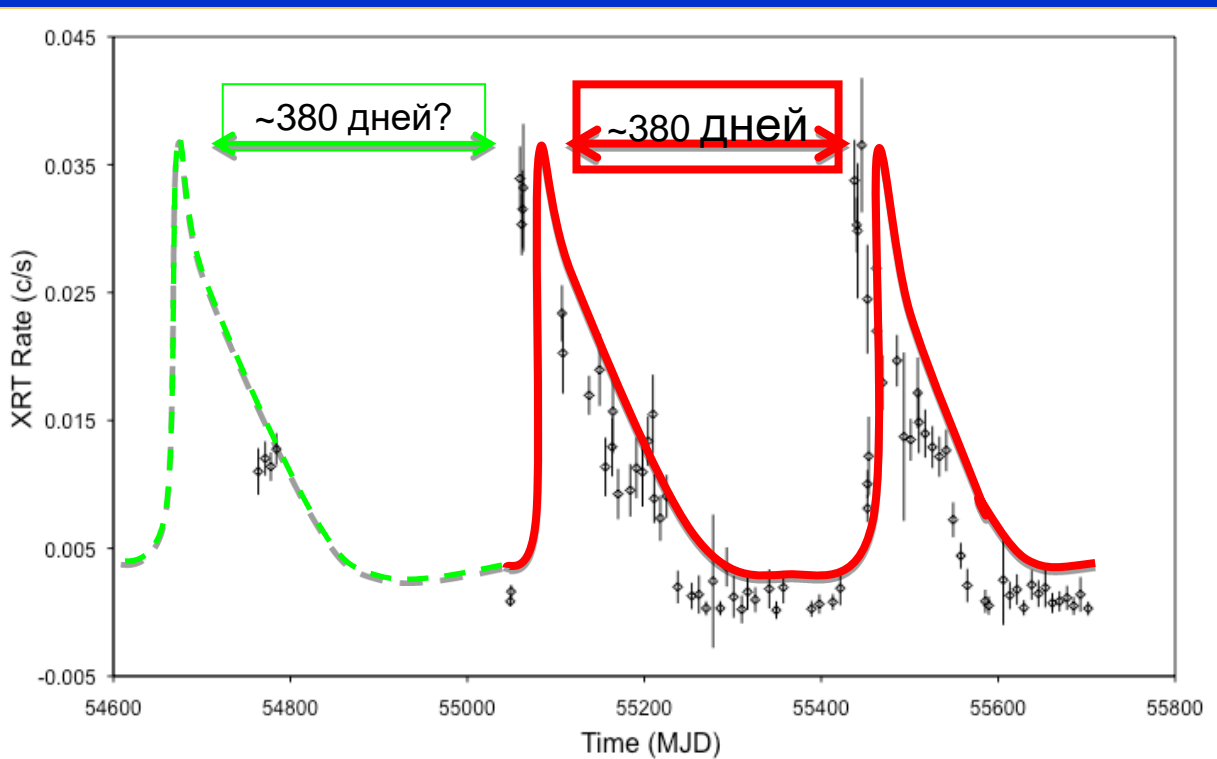
- **Спектроскоп VLT детектировал линии излучения $H\alpha$ с красным смещением, согласующимся с галактикой ESO 243-49** (Wiersema et al. 2010)

Детектирование ESO 342-49 HLX-1 в рентгене



Рентгеновская переменность ESO 243-49 HLX-1

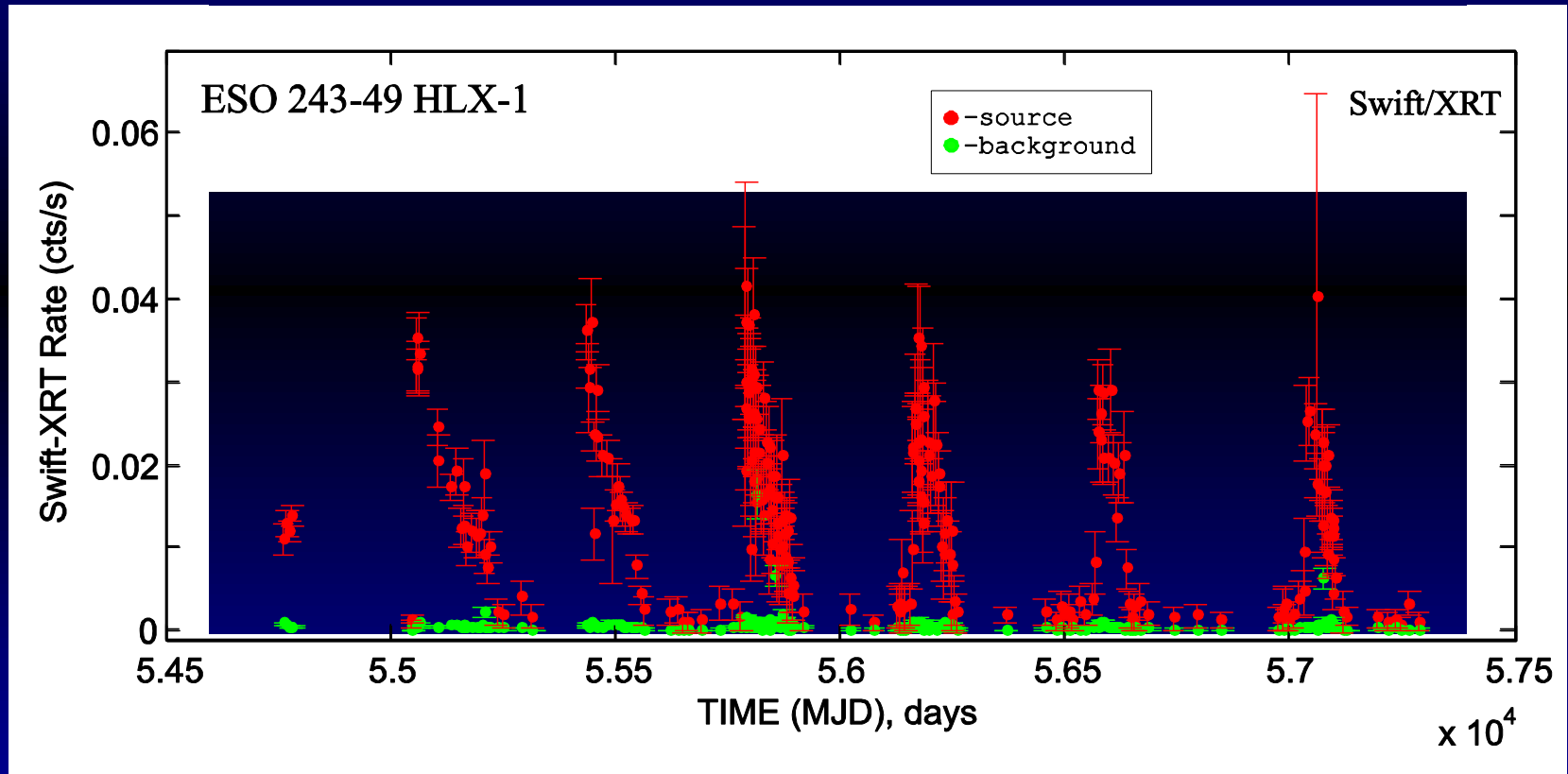
Swift/XRT:



- **Характерный профиль вспышки на кривой блеска:**
 - ~ быстрое нарастание + экспоненциальный спад
- **Аналогично галактическим маломассивным транзиентам**

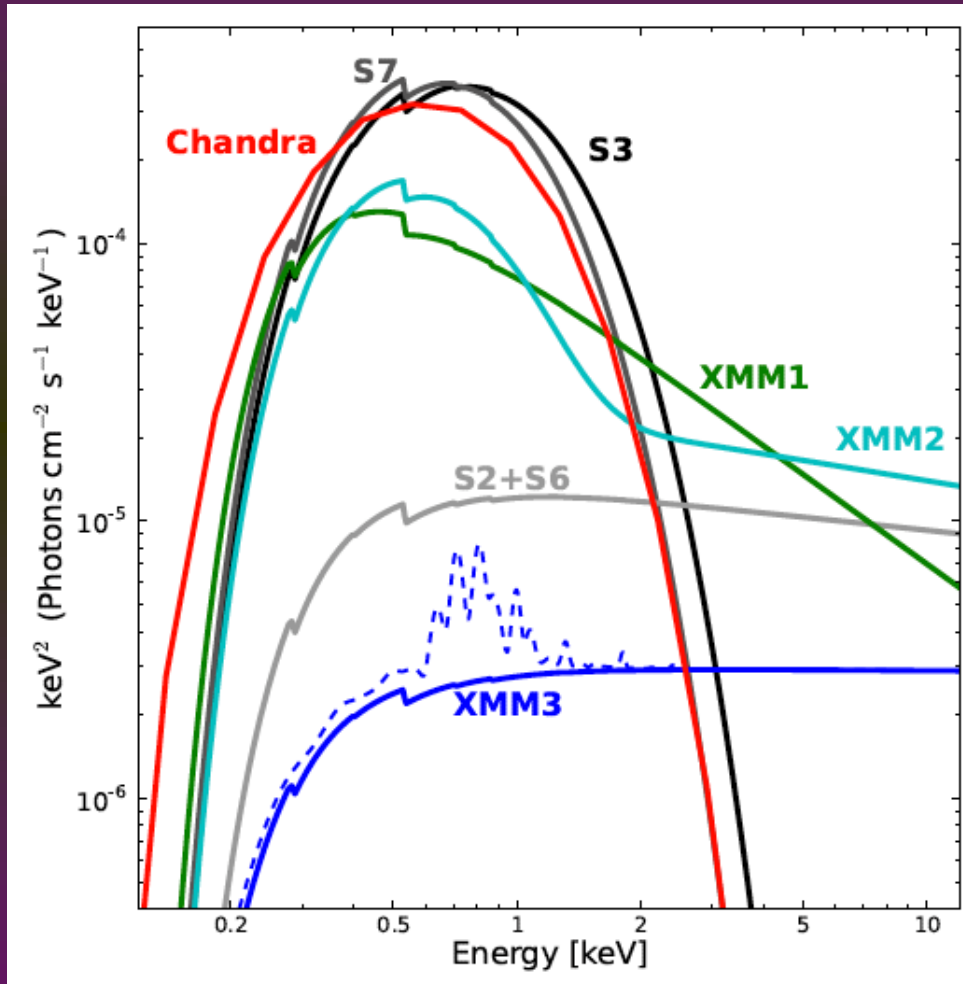
Рентгеновская переменность ESO 243-49 HLX-1

Swift/XRT



- Наблюдается значительная переменность ~ 50 раз
 - Вспышки длятся в среднем пол года

Переходы между спектральными состояниями в HLX-1



- В HLX-1 наблюдаются переходы между состояниями **high/soft**, **soft intermediate** и **low/hard**

- Температура изменяется по закону $L_{\text{disc}} \sim T^4$ (Shakura & Sunyaev, 1973), согласуется с геометрически тонким оптически толстым диском

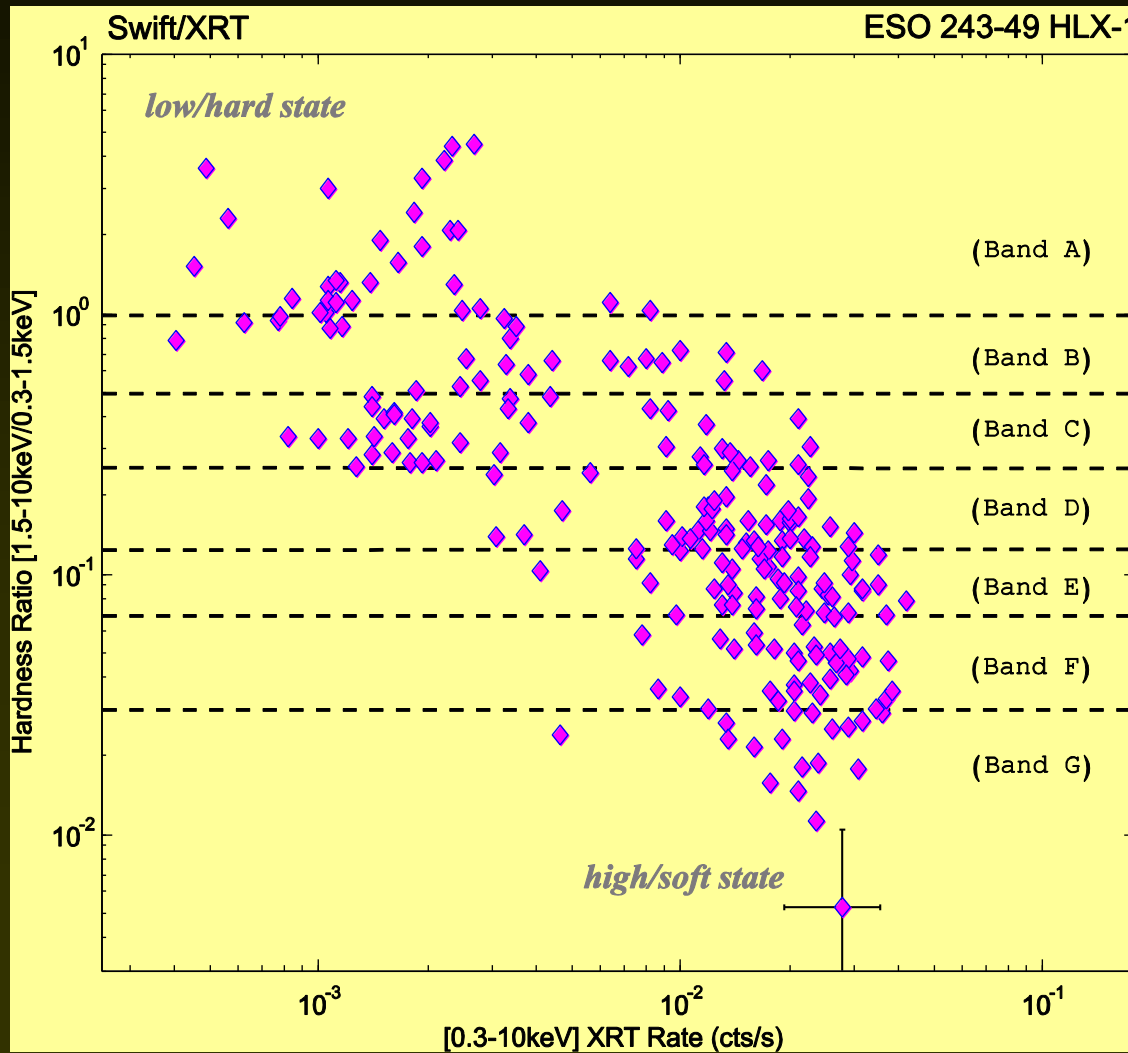
- Масса ЧД по оценкам «фундаментальной плоскости»:

$$\sim 10^3 < M_{\text{BH}} < 10^5 M_{\odot}$$

(Davis et al. 2011; Godet et al. 2011)

Диаграмма жесткости

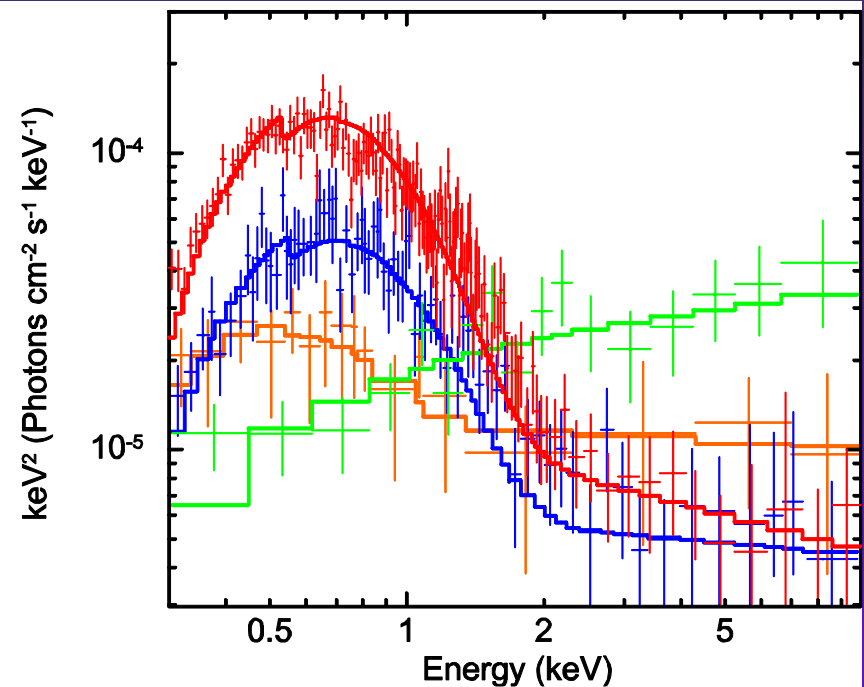
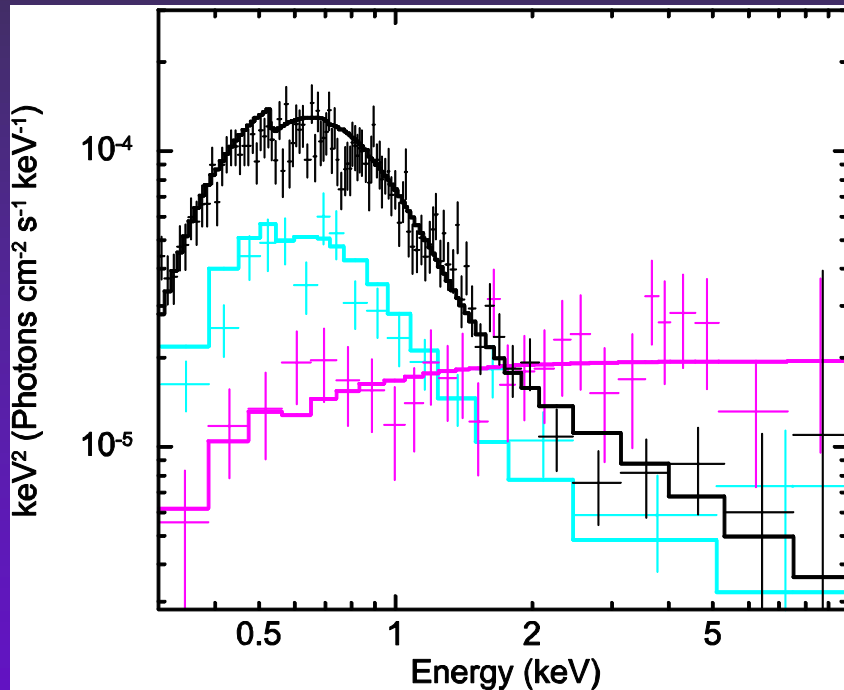
ESO 243-49 HLX-1



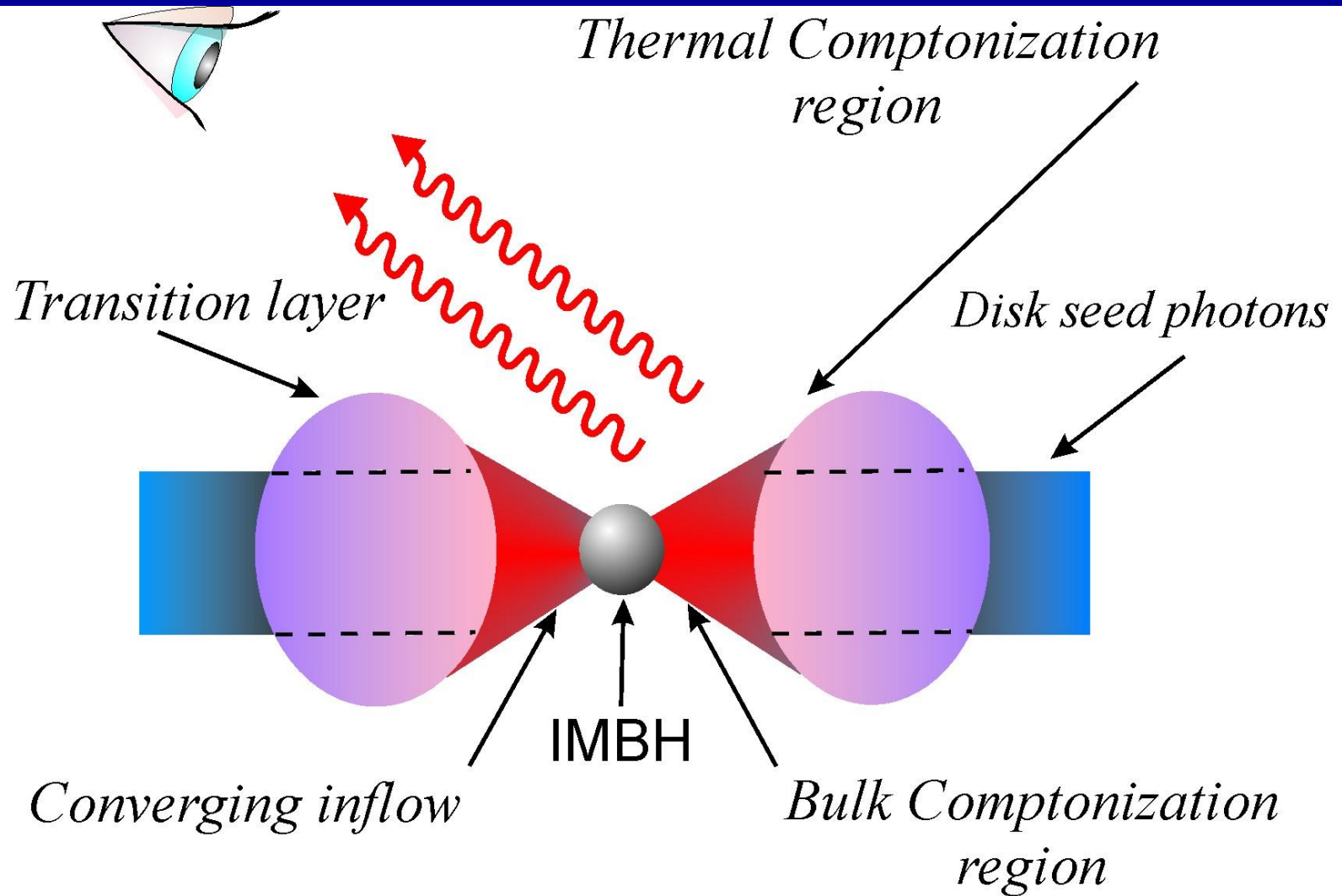
Диапазон	HR
A	>1
B	0.5-1
C	0.25-0.6
D	0.13-0.25
E	0.07-0.13
F	0.03-0.07
G	<0.03

Эволюция формы спектра ESO 243-49 HLX-1

Swift X-ray Telescope (XRT)

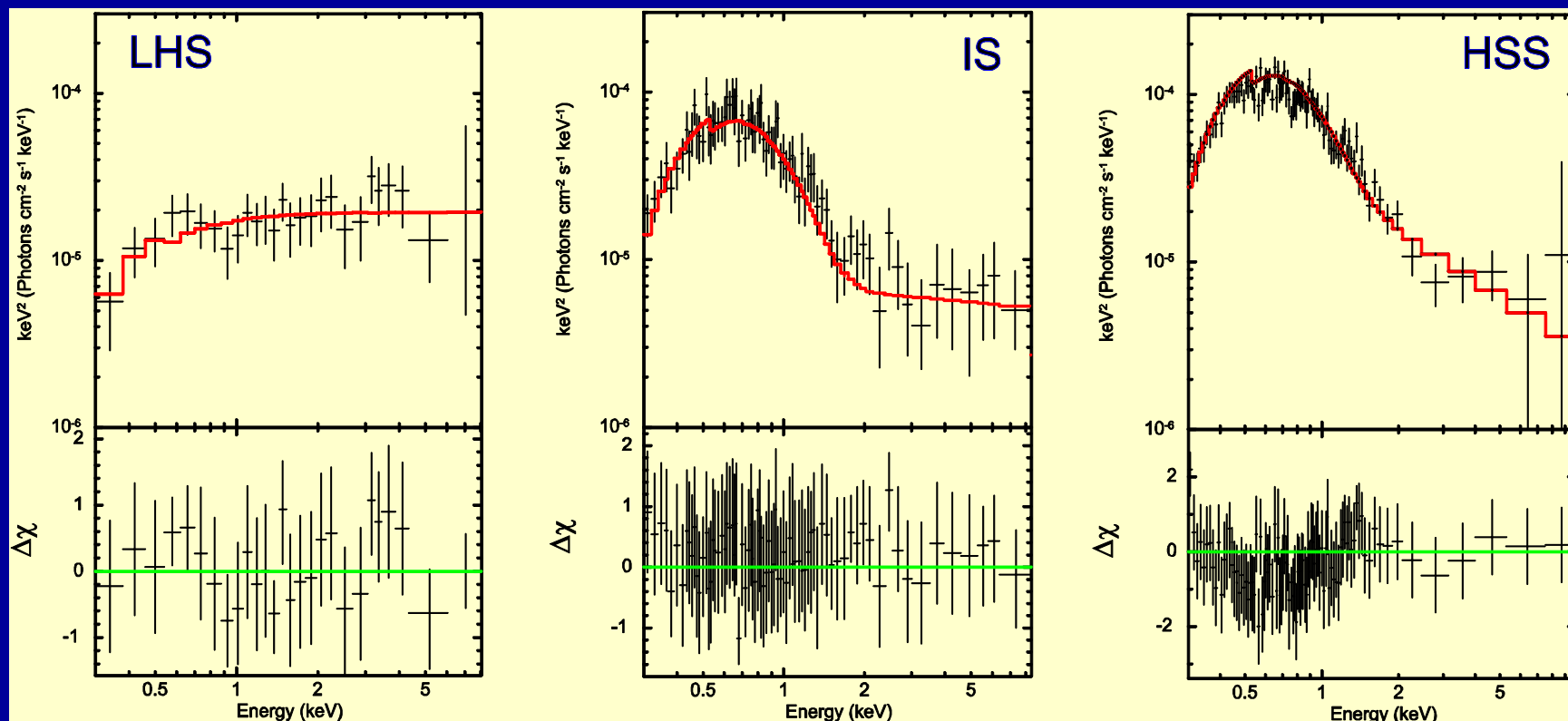


Обобщенная спектральная модель



Аппроксимация спектра ESO 243-49 HLX-1 в Комптонизационной модели

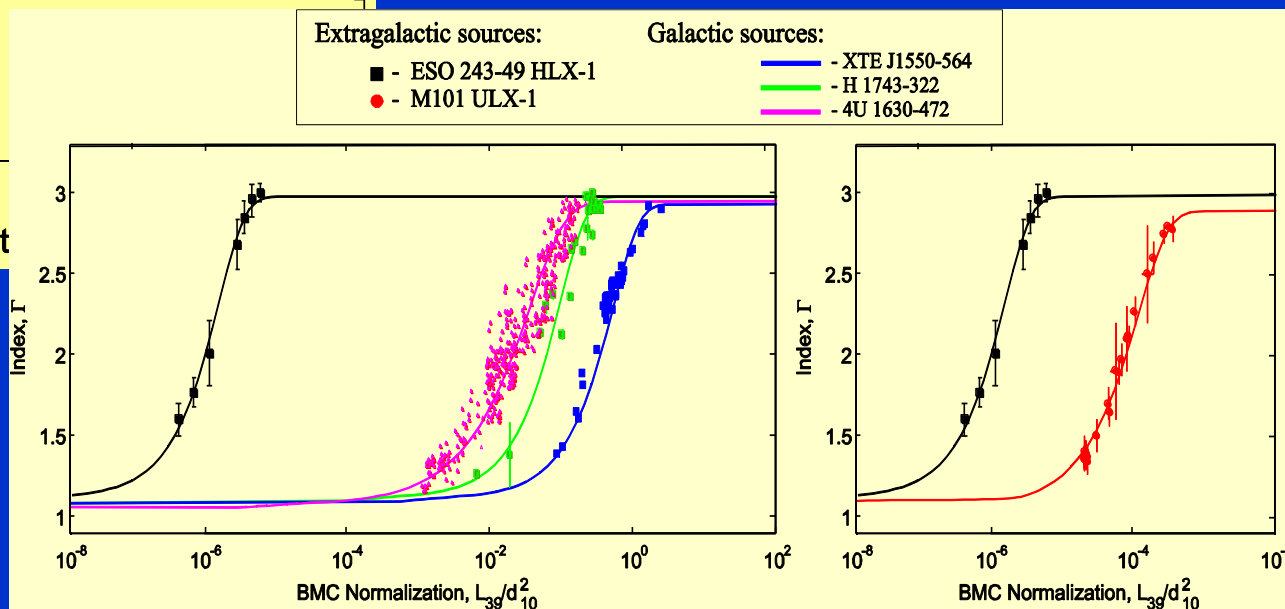
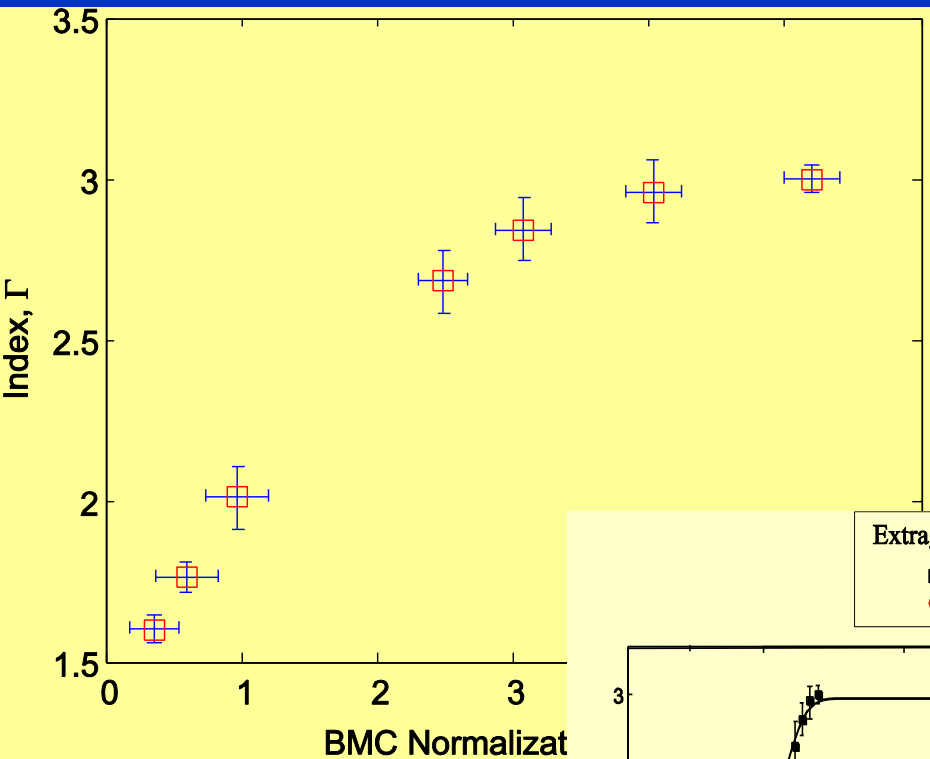
LHS \longrightarrow IS \longrightarrow HSS



Насыщение индекса в ESO 243-49 HLX-1

Скапирование с
Галактическими
системами

$$M_{\text{BH}} \sim 7 \times 10^4 M_{\odot}$$



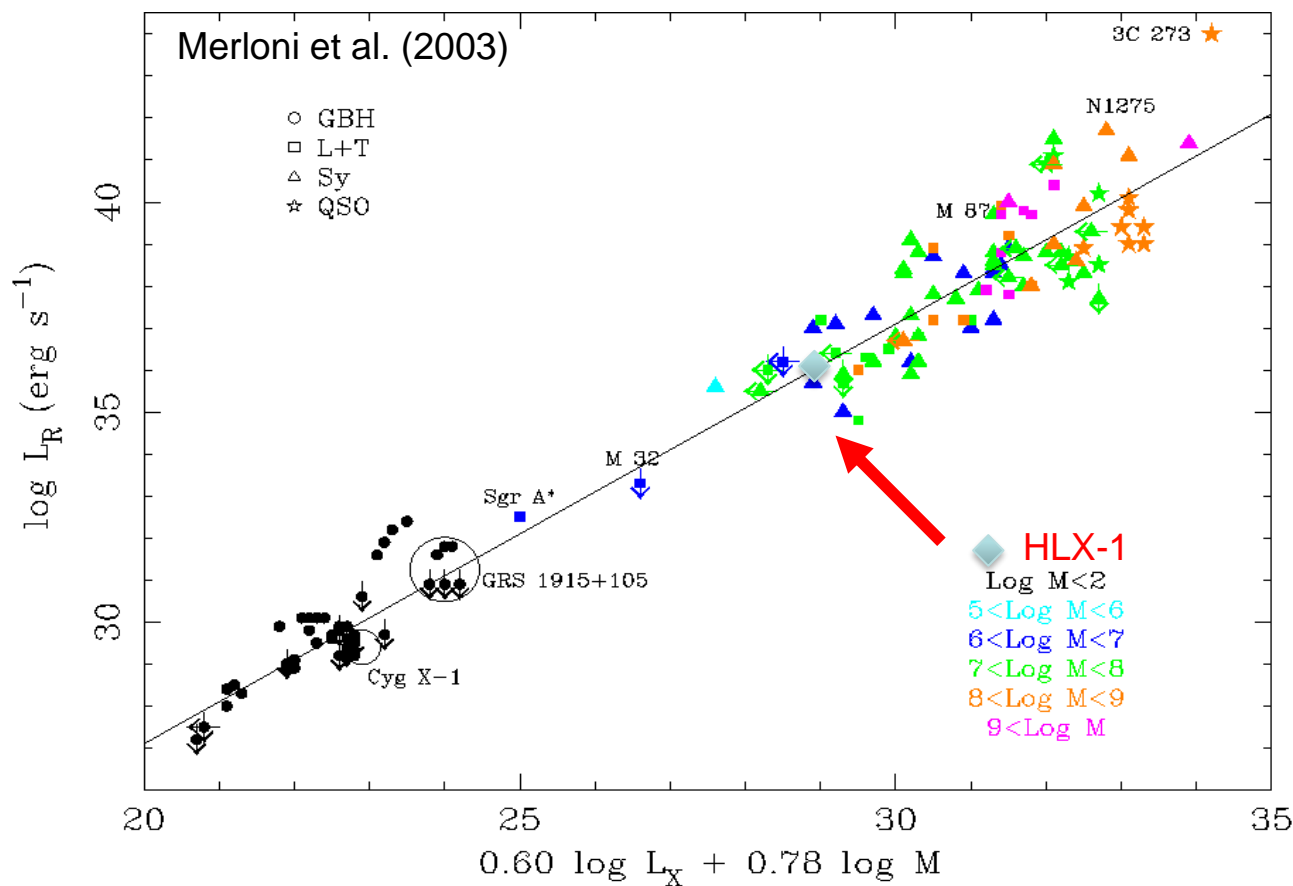
XTE J 1550-564

H1743-322

4U1630-47

M101 ULX-1

Фундаментальная плоскость для ЧД



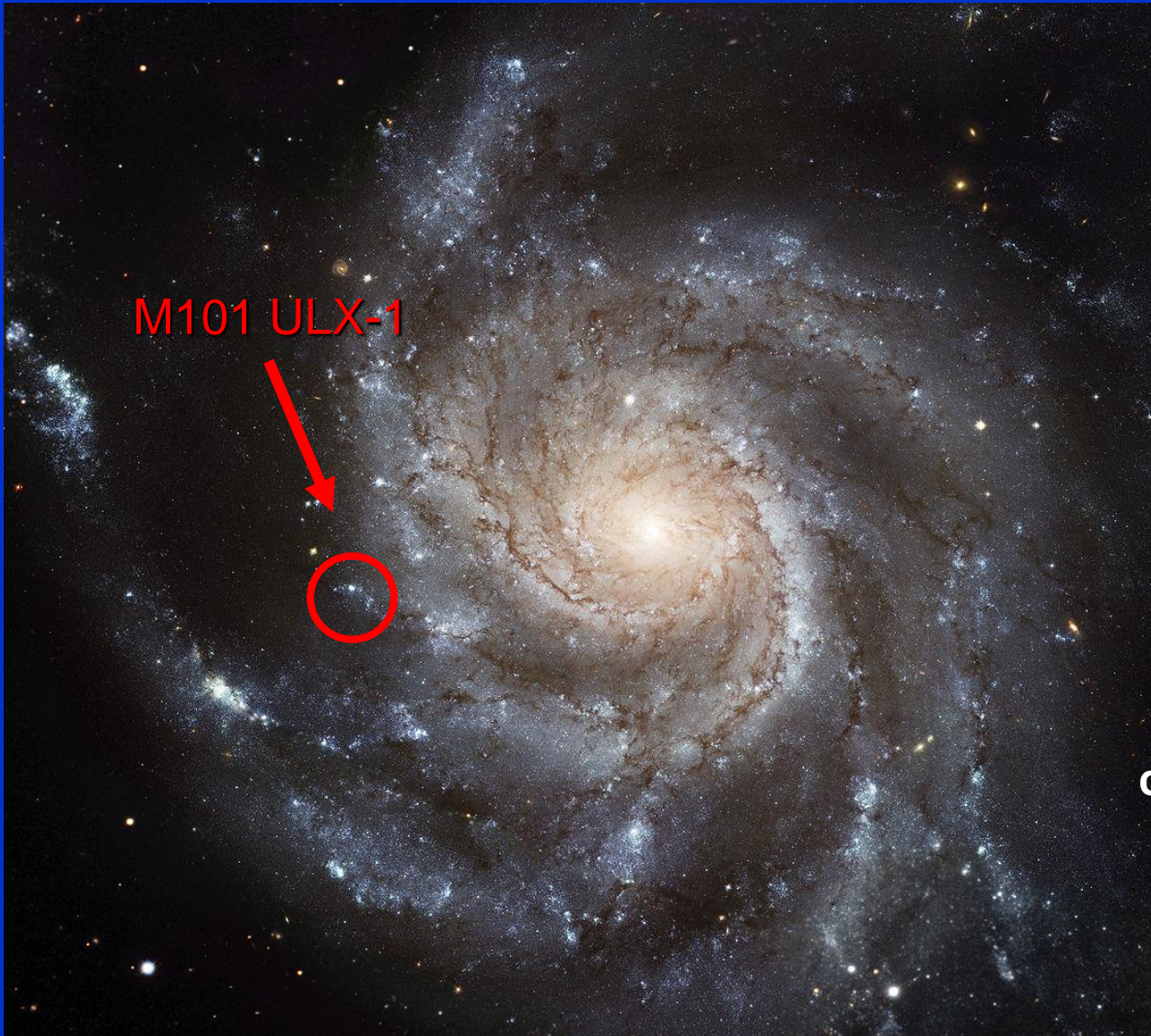
Сопоставление радио и рентгеновского излучения методом Т.Н.

“фундаментальной плоскости” дает подобную оценку для HLX-1:

$M_{\text{ВН}} \sim 10^4 M_{\odot}$,



М101 ULX-1 расположен в рукаве спиральной Галактики Водоворот (NGC 5457 = М 101) в созвездии Б. Медведица



➤ **$D=6.4\pm0.5$ Мпс**
(Shappee & Stanek, 2011)

7.2 ± 0.4 Мпс
(Kelson et al. 1996)

➤ **$M_{\text{ВН}} \sim 5 - 1000 M_{\odot}$**
(Liu et al. 2013)

➤ Обладает очень мягким рентгеновским спектром ($T_s < 100$ эВ), что указывает на большую $M_{\text{ВН}}$



Изображение области созвездия Б.Медведица [0.3 - 10 кэВ]

Swift/XRT

338 кс

02:50.0 14:03:00.0 10.0 20.0 30.0 40.0 50.0 04:00.0

54:19:00.018:00.0 17:00.0 16:00.0
23:00.0 22:00.0 21:00.0

M101 HII

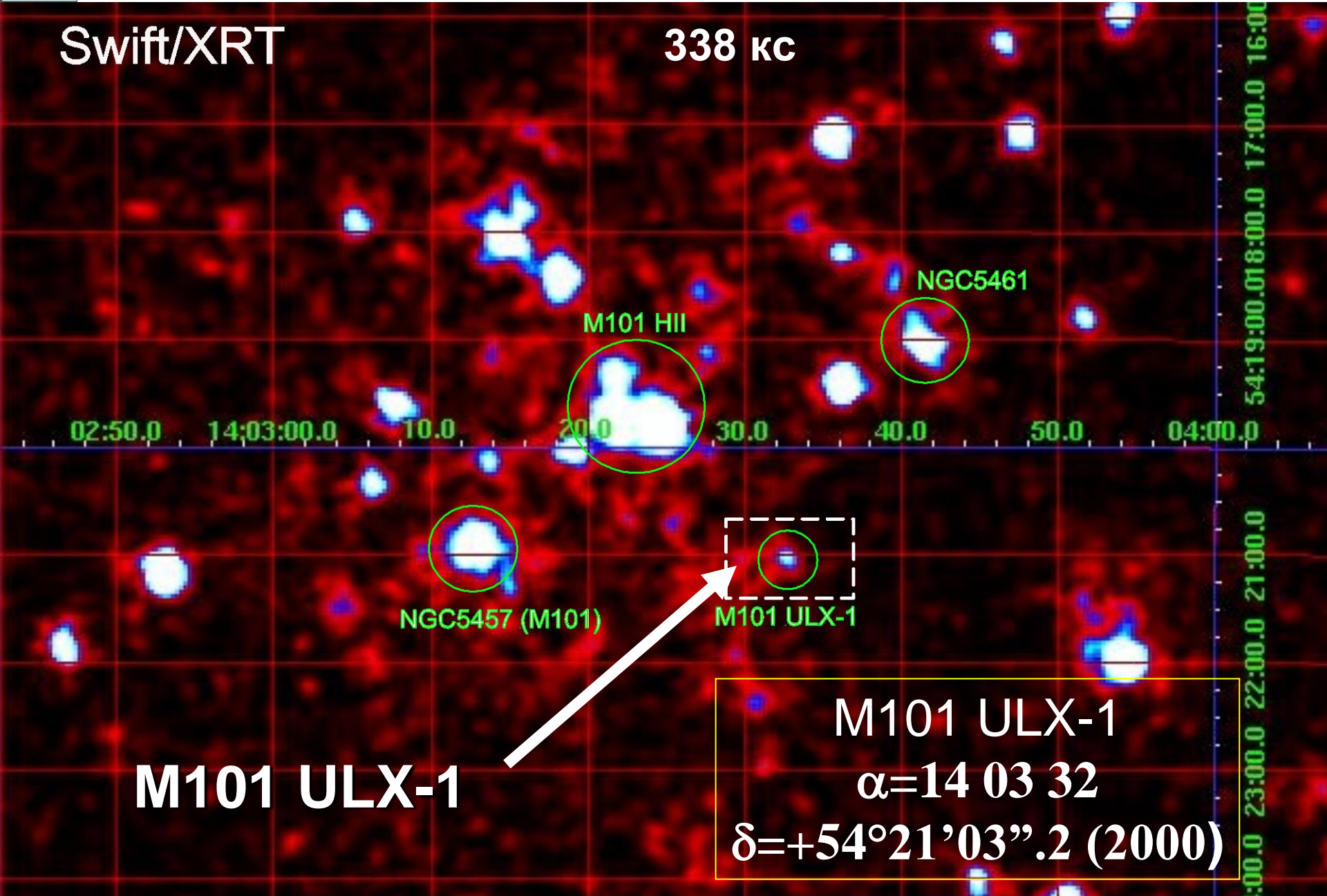
NGC5461

NGC5457 (M101)

M101 ULX-1

M101 ULX-1

M101 ULX-1
 $\alpha=14\ 03\ 32$
 $\delta=+54^{\circ}21'03''.2$ (2000)





Chandra/ACIS-S [0.3 - 10 keV], 90 ks

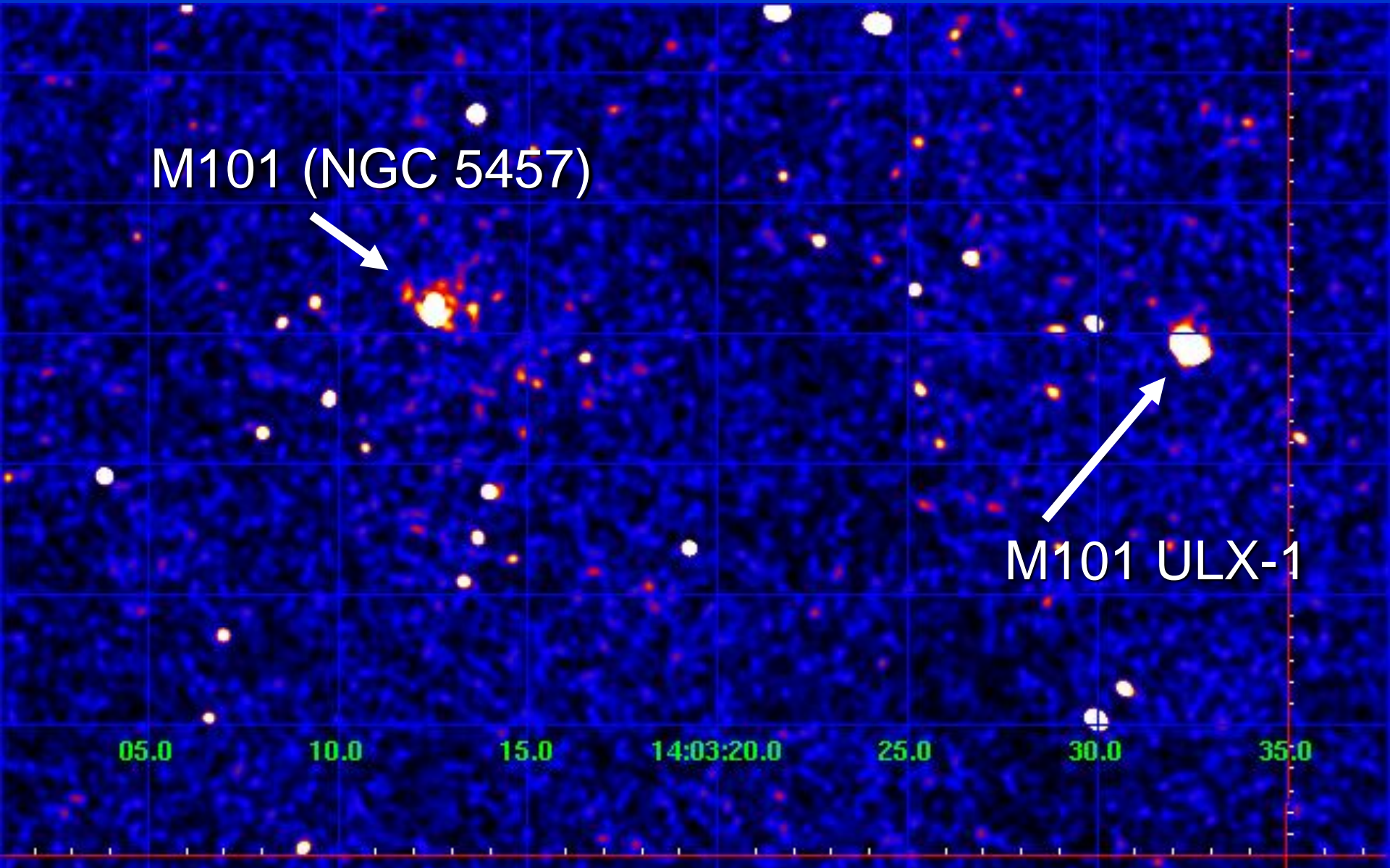
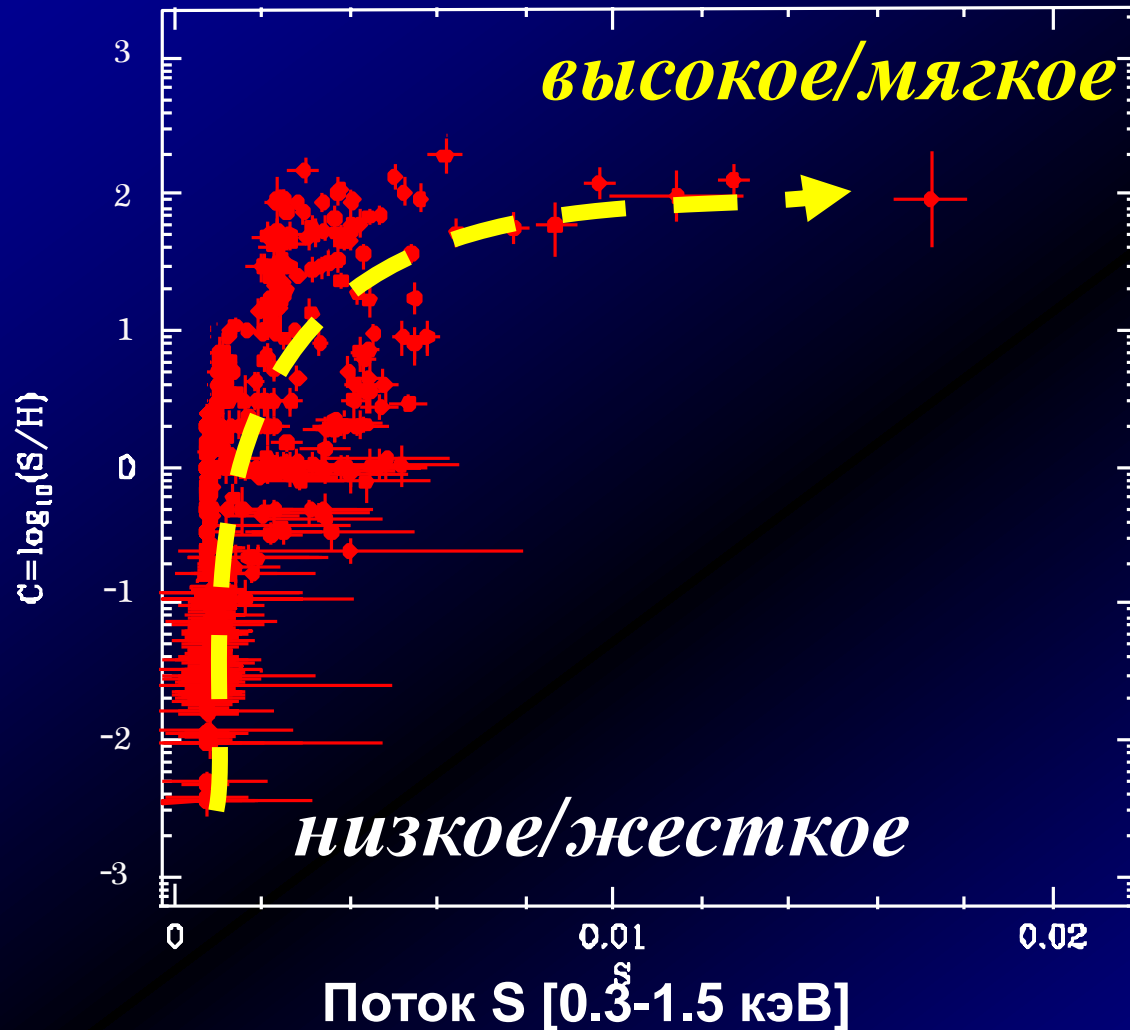




Диаграмма жесткости M101 ULX-1



Сразу видны
два режима:

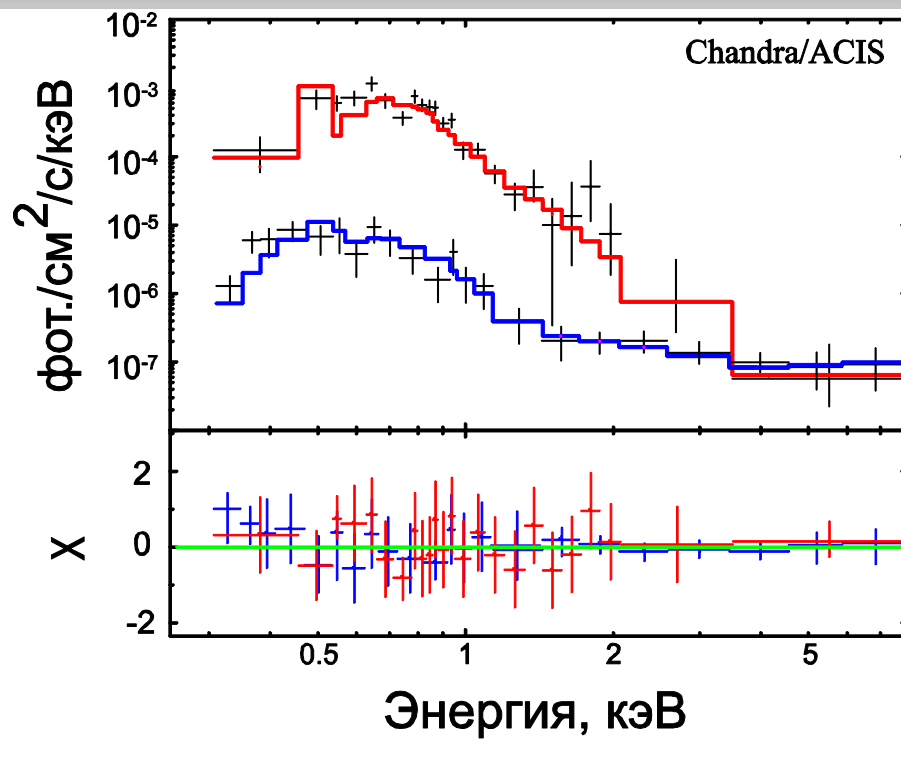
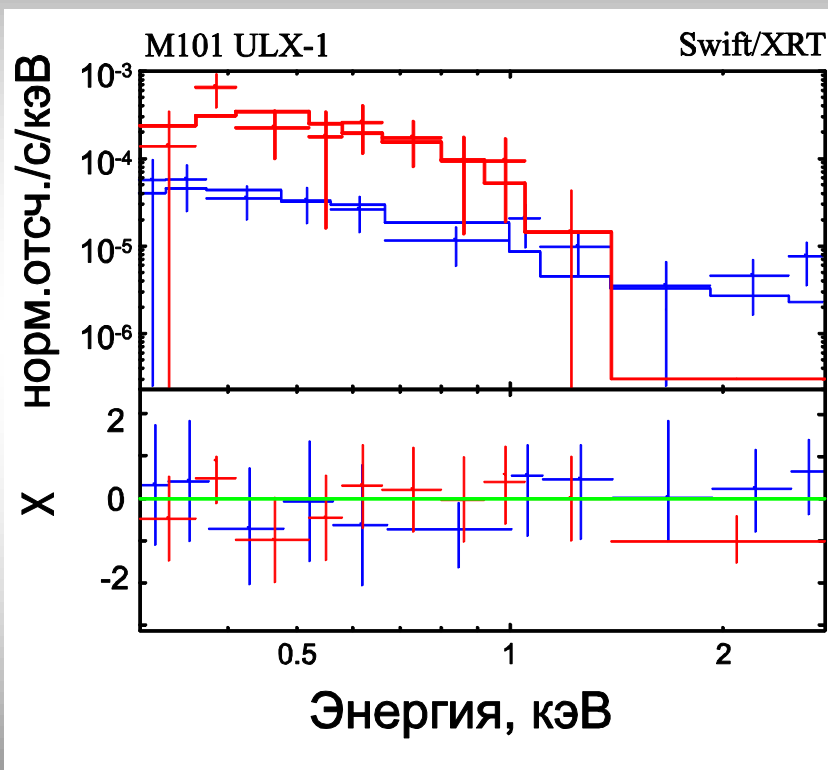
- ✓ С **высоким** потоком и **низкой жесткостью** и
- ✓ С **низким** потоком и **высокой жесткостью**



Рентгеновские спектры ULX-1 [0.3 - 7 кэВ]

Swift/XRT

Chandra/ACIS-S

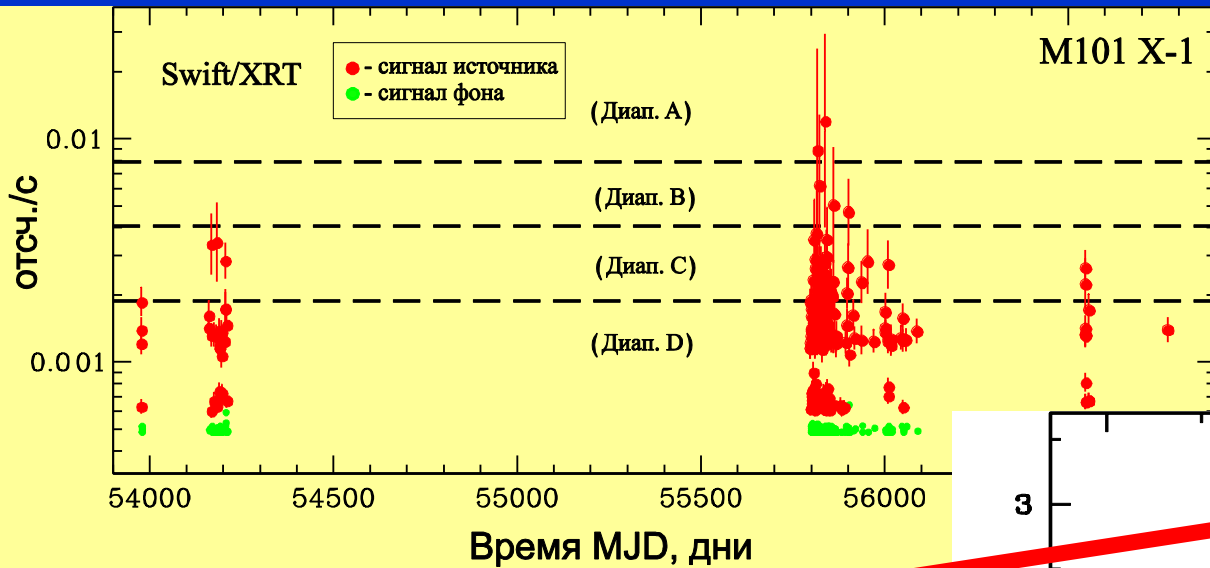


— Низкое/жесткое,

— Высокое/мягкое состояние



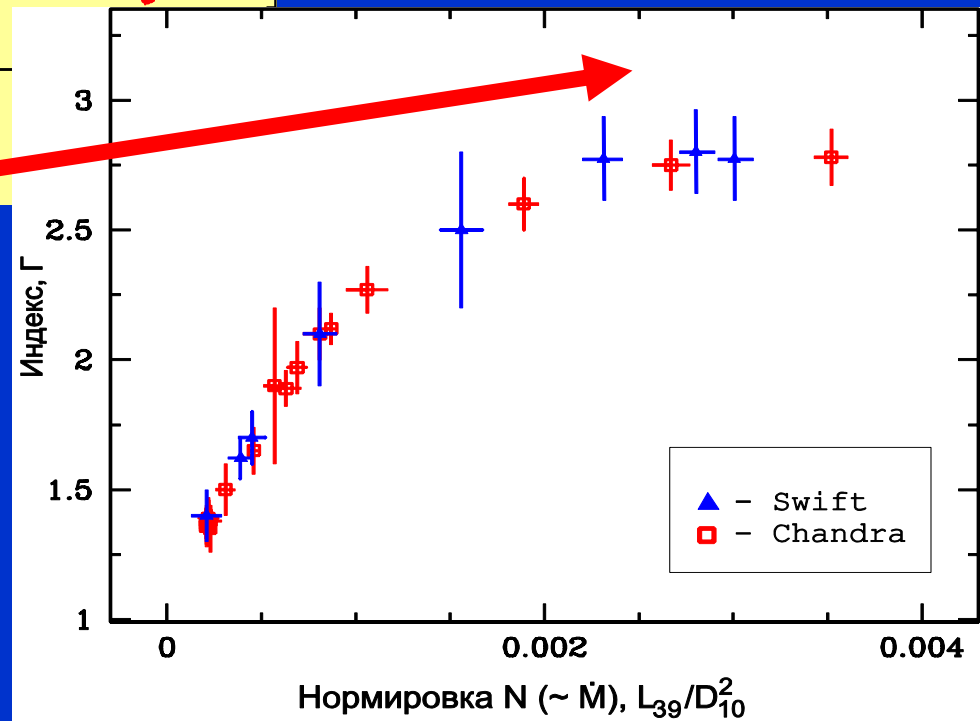
Обоснование наличия черной дыры «промежуточной массы» в M101 ULX-1



197 наблюдений
(*Swift*)

21 наблюдение
(*Chandra*)

Идентификация
черной дыры
в M101 ULX-1





Оценка массы черной дыры в M101 ULX-1

Внегалактический источник: Галактические источники:

● - M101 ULX-1

— - XTE J1550-564

— - H 1743-322

— - 4U 1630-472

$M_{\text{BH}} \sim 30\,000 - 40\,000 M_{\odot}$

Индекс, Γ

2.5
2.0
1.5
1.0

10^{-8} 10^{-6} 10^{-4} 10^{-2} 10^0 10^2

Нормировка N ($\sim \dot{M}$), L_{39}/D_{10}^2

\Rightarrow ЧД промежуточной массы

\Rightarrow универсальность признаков

\Rightarrow Результат слияния галактик

Три типа эволюции дв. систем

«звезда ГП-IMBH» (Тутуков, АЖ, 2019, 96, N6)

- Зависит от **начального расстояния** звезды от ЧДПМ:
 - ☞ **1 - разрушение звезды** (для маломассивных звезд ГП)
 - ☞ **2 - HLX** (для массивных звезд ГП, которые в начальный момент находятся дальше от ЧДПМ, чем при I типе эволюции: массивная звезда в ходе эволюционного расширения заполняет свою полость Роша, после чего наступает этап интенсивного обмена веществом; на этой фазе эволюции система звезда-ЧДПМ может проявлять себя, как HLX, когда ее рентгеновская светимость L_x в течение достаточно длительного времени превышает 10^{41} эрг/с)
 - ☞ **3 - ~HLX** (для массивных звезд ГП, находящихся в начальный момент еще дальше от ЧДПМ, чем при II типе, а также для проэволюционировавших к начальному моменту массивных звезд: консервативный обмен массой при интенсивном звездном ветре приводит к тому, что звезда удаляется от ЧДПМ, вообще не заполняя свою полость Роша.

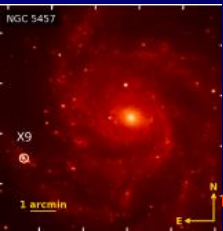
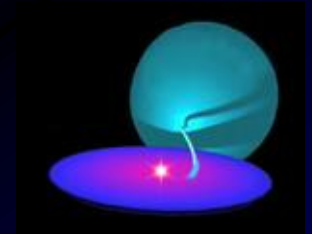
Происхождение ЧДПМ

- объясняется различными причинами:
- **1** - очень массивные ЧД звездных масс (на ранних стадиях эволюции галактик, при малых z , массы звезд могут достигать $100-1000 M_{\odot}$, из них формируются ЧД с массами $100-200 M_{\odot}$, далее их масса может увеличиваться за счет аккреции вещества).
- **2** - ЧДПМ могут быть продуктами слияния звездных ЧД, которые в результате приливного торможения в звездном поле плотных шаровых скоплений (либо карликовых галактик) концентрируются к центральным областям этих звездных систем.
- **3** - СМЧД и ЧДПМ являются изначальными (primordial) объектами, формирующимися на ранних стадиях эволюции Вселенной.



Разные типы черных дыр

- ЧД звездных масс ($5-10 M_{\odot}$)
- Сверхмассивные ЧД ($10^5-9 M_{\odot}$)



- ЧД промежуточных масс ($100-10^4 M_{\odot}$)
- Первоначальные ЧД





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

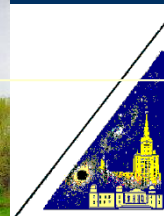


ЧД промежуточной массы (продолжение). БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

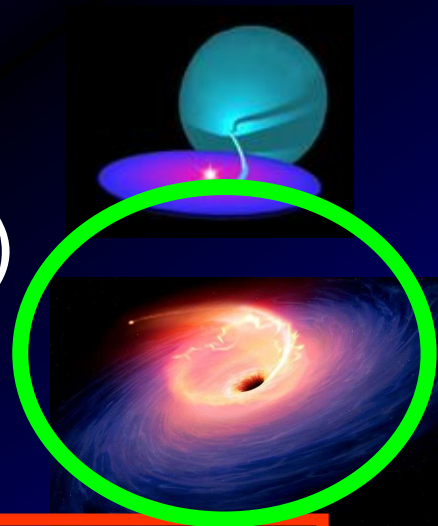
БАЗИС





Разные типы черных дыр

- ЧД звездных масс ($5-10 M_{\odot}$)
- Сверхмассивные ЧД ($10^5-9 M_{\odot}$)



- ЧД промежуточных масс ($100-10^4 M_{\odot}$)
- Первоначальные ЧД



«Хаббл» помог найти неуловимую черную дыру промежуточной массы

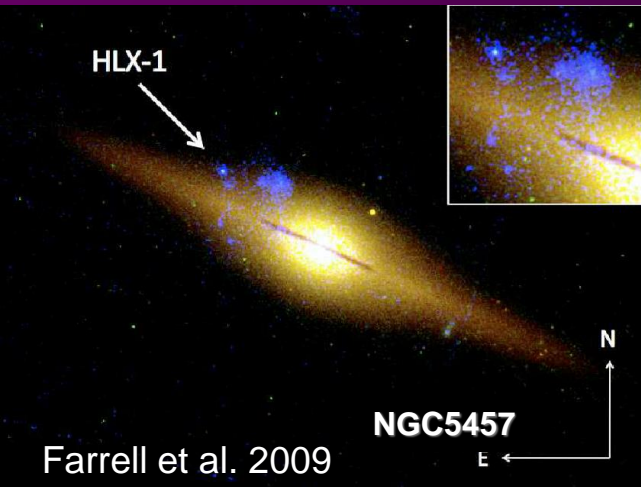
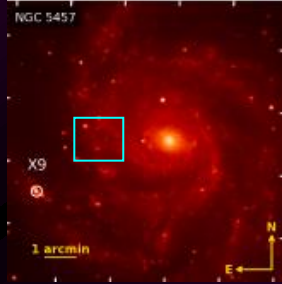


*Lin et al., ApJ Letters, 892:L25
(5pp), 2020 April 1*

- Астрономы при помощи трех космических телескопов (**Hubble, XMM-Newton, Chandra**) нашли один из лучших кандидатов в черные дыры промежуточной массы на сегодняшний день. Обнаружить объект удалось во время события приливного разрушения небольшой звезды, которое привело к вспышке рентгеновского излучения



Проблема обнаружения ЧД промежуточной массы



- Существуют убедительные доказательства как существования ЧД звездных масс (до $10 M_{\odot}$), образующихся при смерти массивных звезд, так и сверхмассивных черных дыр (от 10^6 до $10^{10} M_{\odot}$), располагающихся в центрах многих массивных галактик. Не так давно было **предсказано** существование **промежуточных ЧД**, масса которых лежит в диапазоне от 10 до $10^5 M_{\odot}$, однако обнаружение их - крайне трудная задача.

- Кандидаты в такие объекты обнаруживались в карликовых галактиках, шаровых скоплениях, гипермощных рентгеновских источниках, однако подтвердить наличие в них ЧД сложно из-за отсутствия общепринятого достоверного метода для определения их массы.

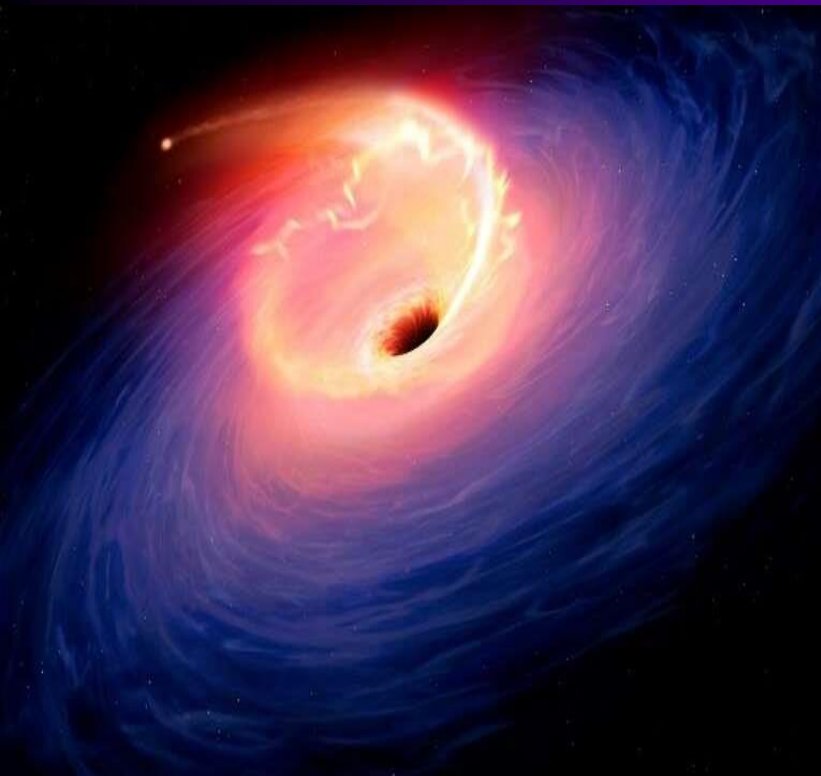
- **Приливное разрушение звезд черными дырами - новый кандидат в ЧД промежуточной массы**



Baldassare et al. 2015



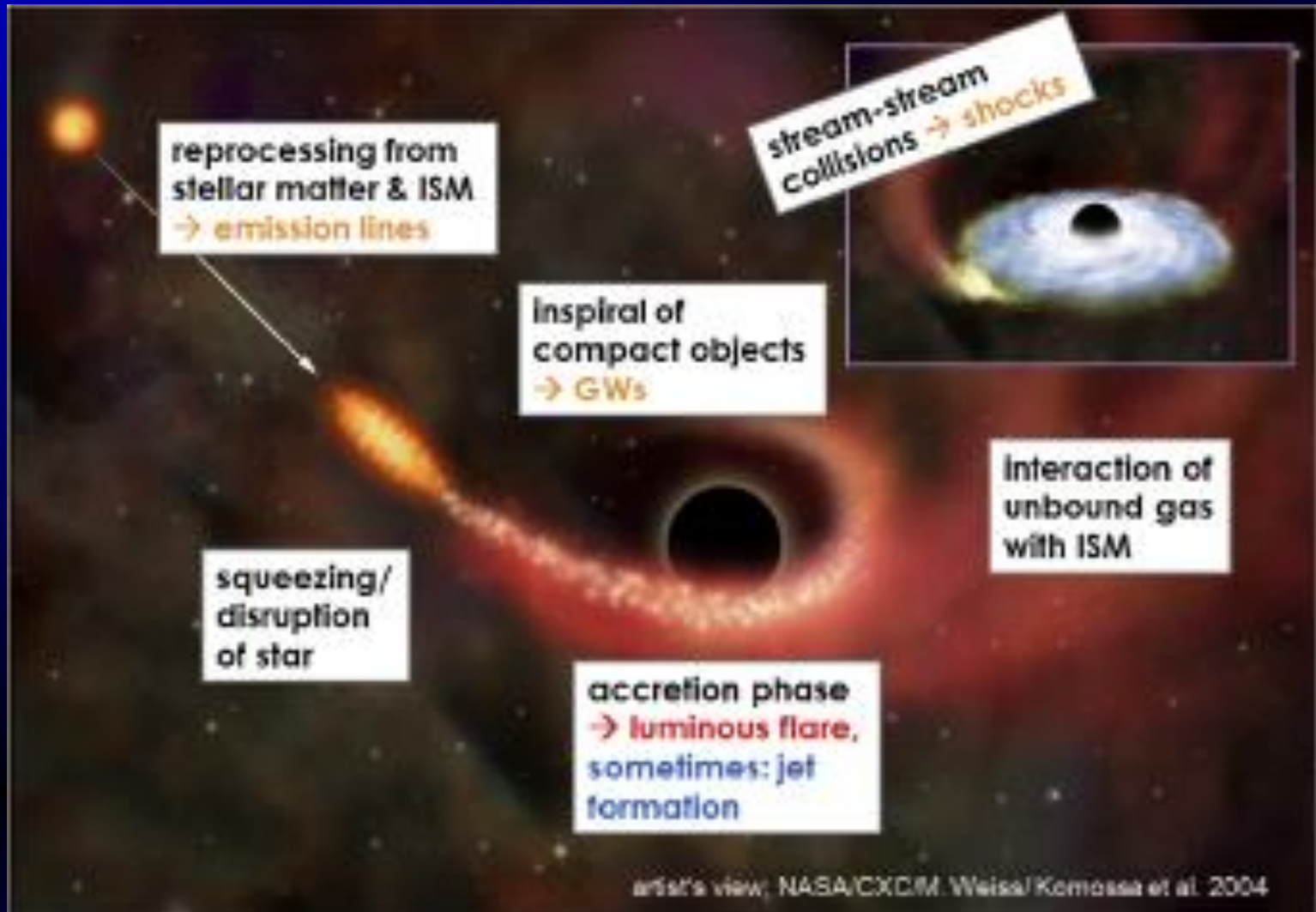
Приливное разрушение звезд черными дарами - эффективный способ изучения таких ЧД

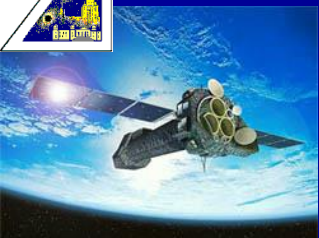


- Приливное разрушение звезды сверхмассивной ЧД и последующее падение обломков разрушенной звезды на ЧД предлагает прямой способ изучения внутренних областей галактик, в остальное время находящихся в спокойном состоянии.



Сценарий приливного разрушения звезд ЧД (в случае полного разрушения звезды) ?





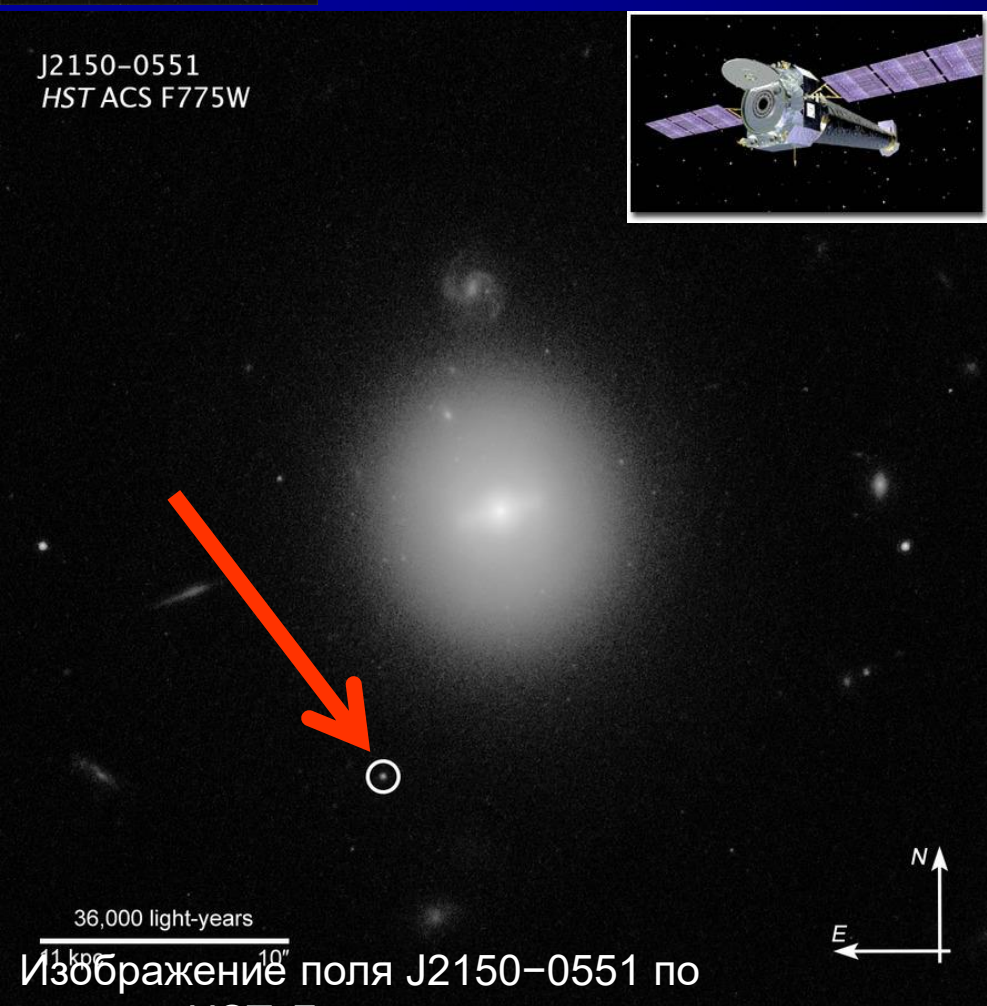
Рентгеновский источник 3XMM J215022.4-055108



J2150-0551
HST ACS F775W



- Группа астрономов во главе с Даченгом Лином опубликовала результаты анализа данных наблюдений телескопов «Хаббл», «Чандра» и XMM-Newton за рентгеновским источником **3XMM J215022.4-055108**, который находится в массивном звездном скоплении на окраине крупной линзовидной галактики **Gal1**.

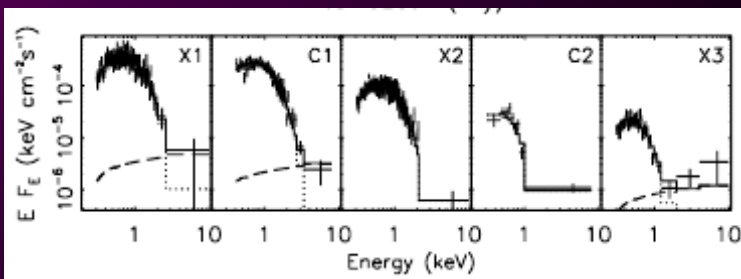
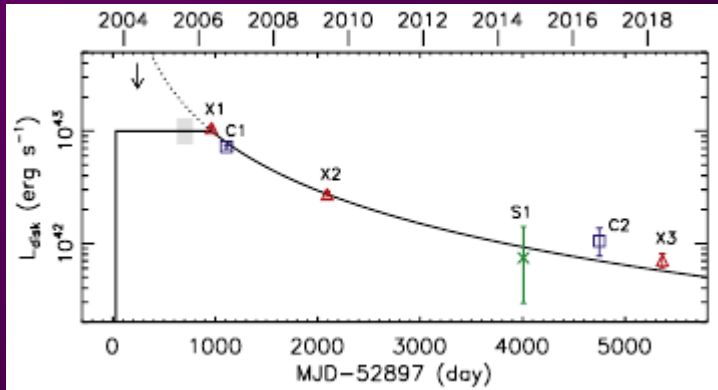


Изображение поля J2150-0551 по данным HST. Белый кружок размером of 1.2"x1.2" центрирован на источник

Lin et al., ApJ Letters, 892:L25 (5pp), 2020 April 1



ЧД промежуточной массы или остывающая НЗ?



Расстояние - 247 Мпс. Источник был замечен в 2006 г. из-за всплеска мягкого рентгеновского излучения, который продолжался около десяти лет.

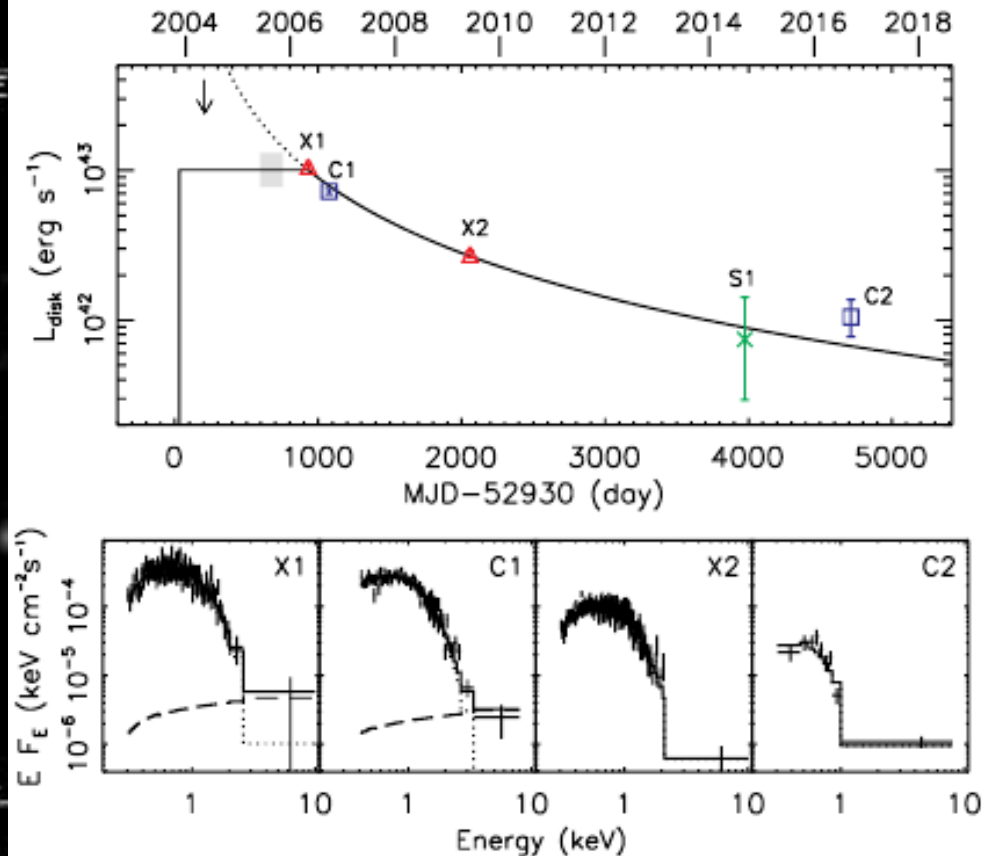
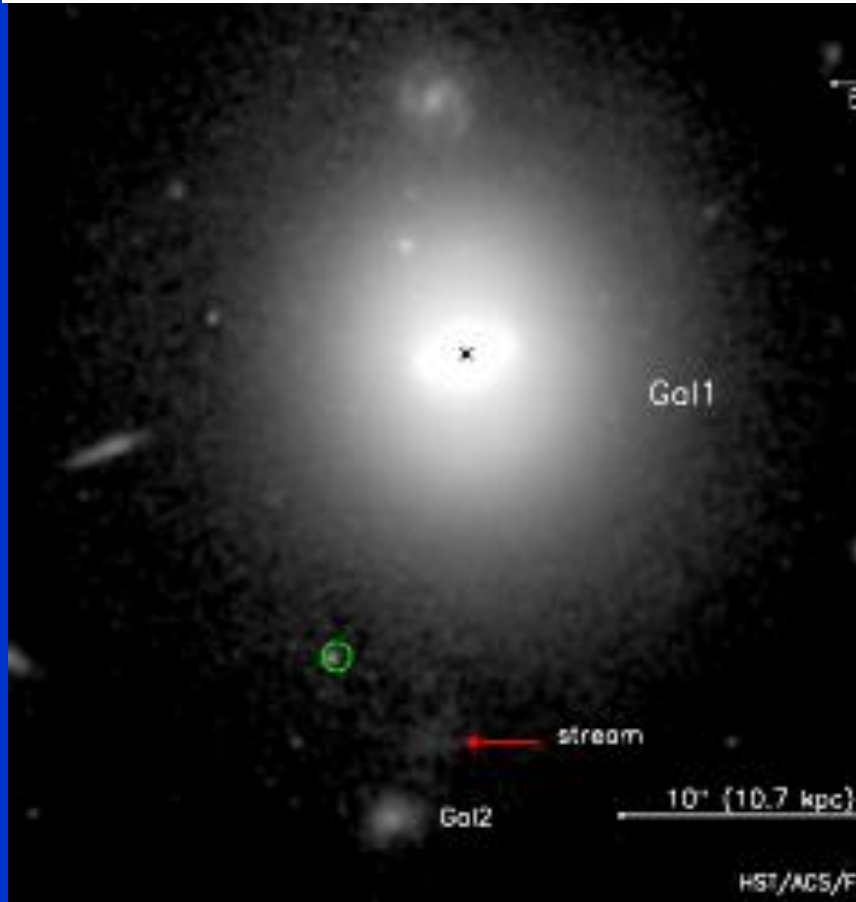
Это явление можно объяснить приливным разрушением звезды ЧД промежуточной массы, однако также рассматривалась версия остывающей НЗ, расположенной в Млечном Пути.

Благодаря «Хаббл» удалось исключить эту версию, ЗХММ J215022.4–055108 действительно находится в звездном скоплении, которое может быть ядром разрушенной карликовой галактики.

A luminous X-ray outburst from an intermediate-mass black hole in a massive star cluster

Dacheng Lin¹, Jay Strader², Eleazar R. Carrasco³, Dany Page⁴, Aaron J. Romanowsky^{5,6}, Jeroen Homan^{7,8}, Jimmy A. Irwin⁹, Ronald A. Remillard¹⁰, Olivier Godet¹¹, Natalie A. Webb¹¹, Holger Baumgardt¹², Rudy Wijnands¹³, Didier Barret¹¹, Pierre-Alain Duc¹⁴, Jean P. Brodie⁶, Stephen D. J. Gwyn¹⁵

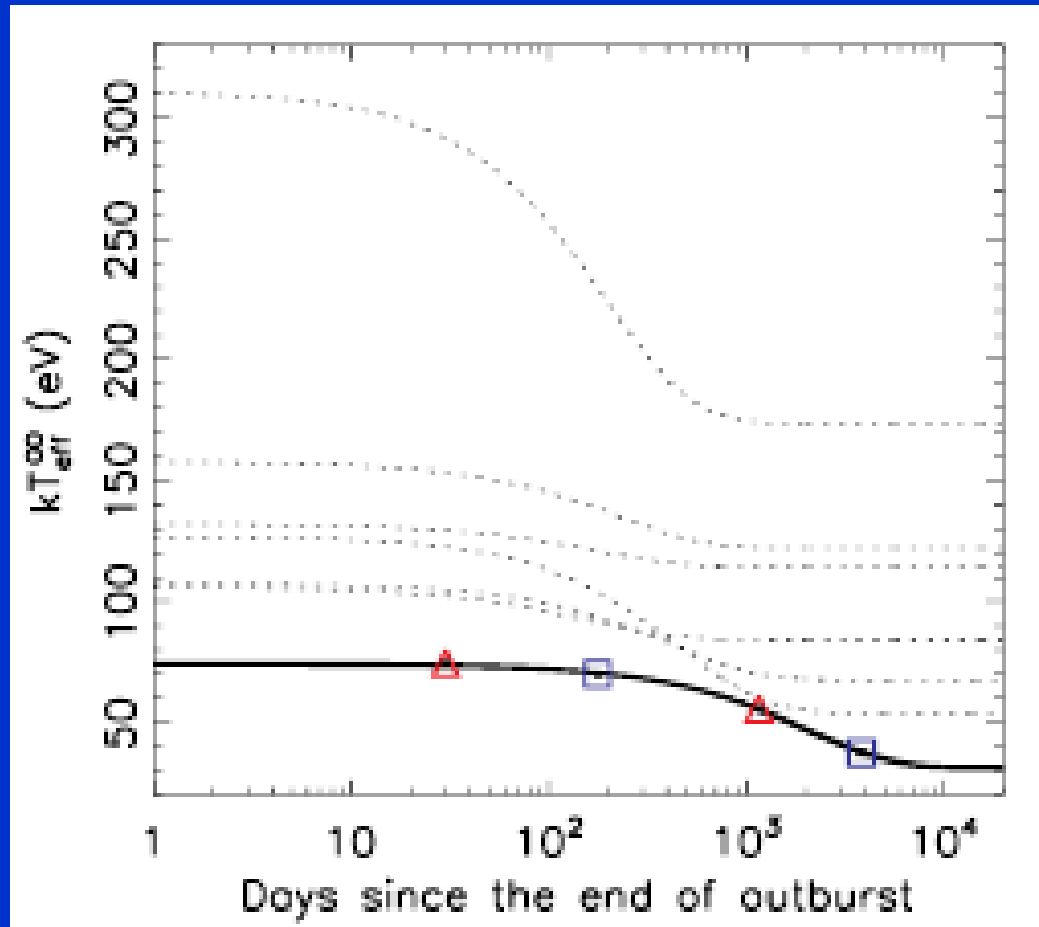
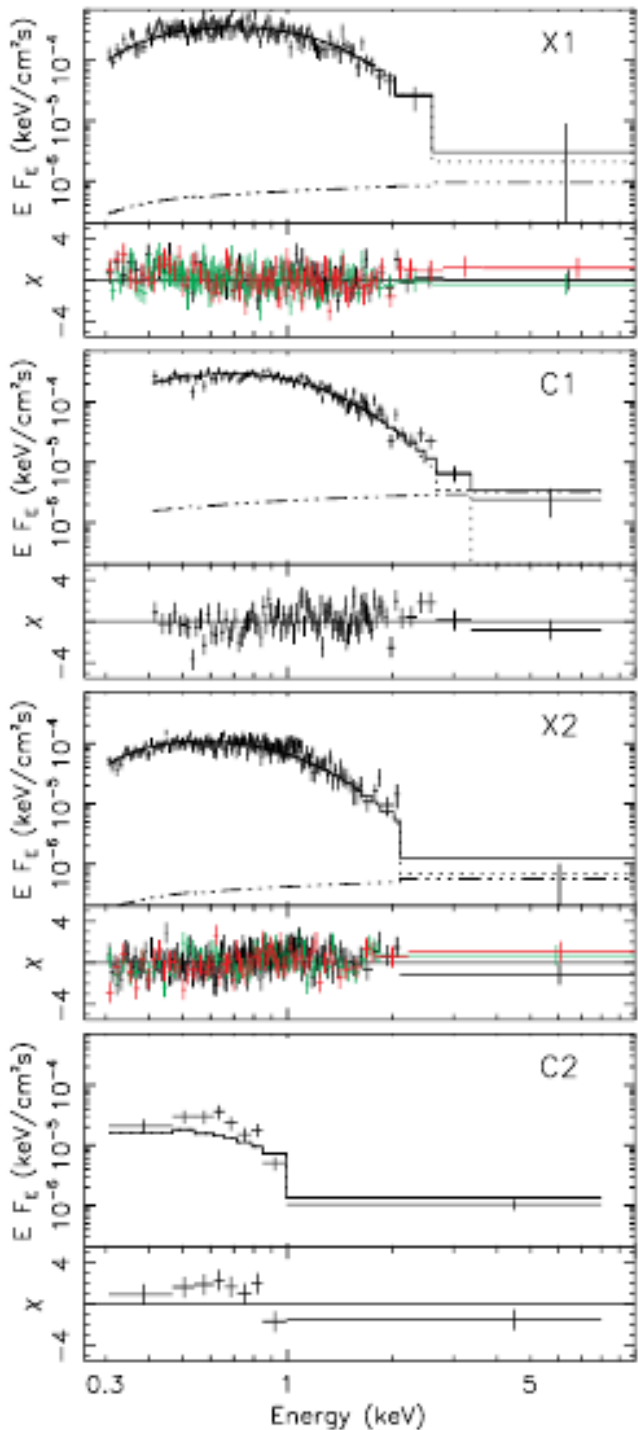
TDE



The HST/ACS F775W imaging around the field of J2150-0551

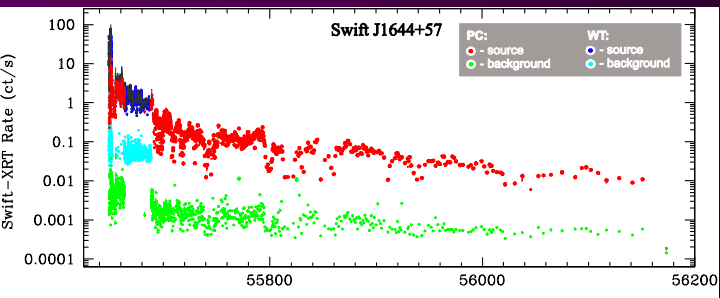
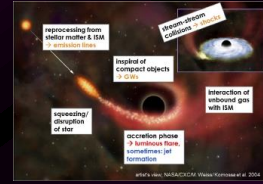
Lin et al., Nature Astronomy, 2:656L (5pp), 2018 June 1

Evolution of the effective temperature based on the nsatmos fits to the X-ray spectra of **J2150-0551**, assuming a NS of mass $1.4 M_{\odot}$ and radius 10 km.





Частичное разрушение звезды сверхмассивной черной дырой: действительно ли кривая блеска пропорциональна $t^{-9/4}$?



■ **Coughlin Eric & Nixon (2019)**

представили модель для эволюции обломков **частично** разрушенной приливом звезды во время TDE,

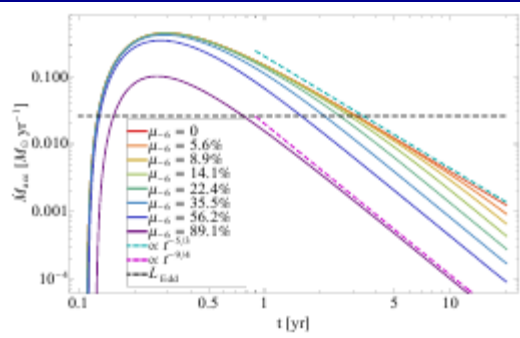
- в которой звездное ядро испытывает первоначальное приливное сближение и продолжает оказывать гравитационное влияние на расширяющийся поток обломков, сорванных приливом со звезды.

Coughlin Eric R., Nixon C. J. Astrophysical Journal Letters, 2019, 883, L17



Когда кривая блеска пропорциональна

$t^{-5/3}$, а когда $t^{-9/4}$?



➔ сделано предположение, что скорость аккреции на черную дыру на поздней стадии TDE либо уменьшается как $t^{-5/3}$, если звезда полностью разрушена, либо как $t^{-9/4}$, если остается ядро звезды.

➔ предыдущие исследования не обнаруживали этот результат из-за предположения о кеплеровских орбитах обломков звезды, которые не применимы в случае, когда выживающее ядро звезды создает зависящий от времени гравитационный потенциал.

Coughlin Eric R., Nixon C. J. Astrophysical Journal Letters, 2019, 883, L17



Модель чернотельного излучения

XSPEC: bbody model

6.2.4 bbody, zbody: blackbody

A blackbody spectrum.

$$A(E) = \frac{K \times 8.0525 E^2 dE}{(kT)^4 \left[\exp\left(\frac{E}{kT}\right) - 1 \right]}$$

where

par1 = kT

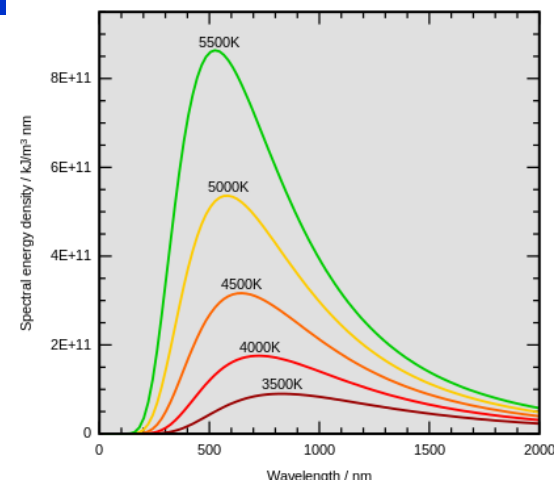
temperature keV

← *Color temperature*

norm = K

$\frac{L_{29}}{D_{10}^2}$, where L_{29} is the source luminosity in units of $10^{39} \text{ ergs}^{-1}$,

D_{10} is the distance to the source in units of 10 kpc



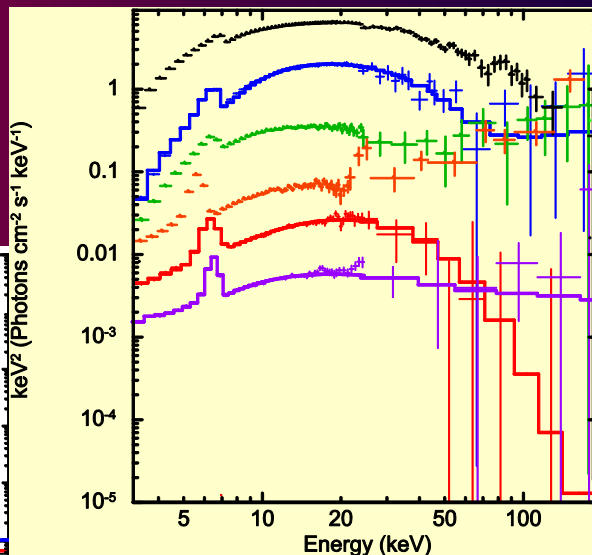
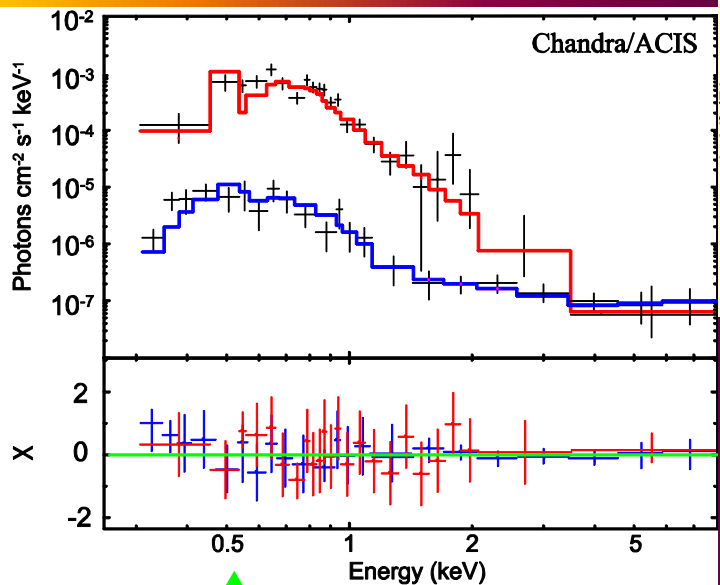


Зависимость цветовой температуры диска от массы ЧД

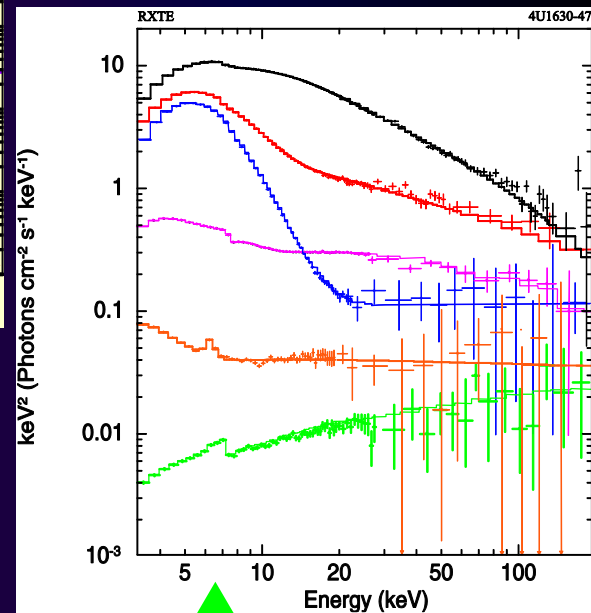
ЧД промежуточной массы

$$T_d \sim M^{-1/4}$$

ЧД зв. массы

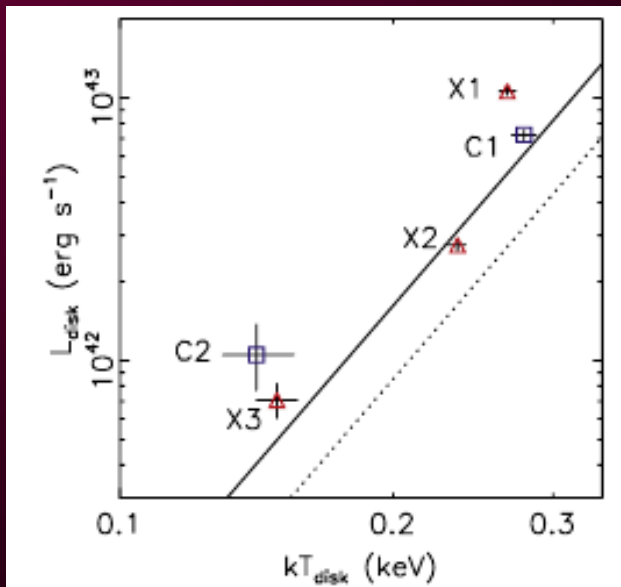


H3





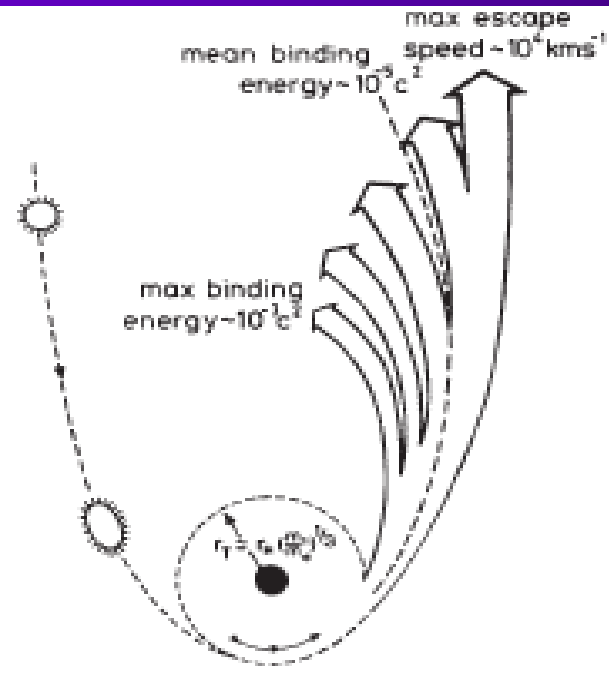
Зависимость **цветовой** температуры диска от массы ЧД



- Полученные данные указывают на то, что **ЧД с массой $5 \times 10^4 M_{\odot}$** разорвала звезду ГП с **массой $0,33 M_{\odot}$** и радиусом $0,41 R_{\odot}$, после чего вокруг ЧД образовался аккреционный диск из вещества разрушенной звезды.



ЧД промежуточной массы в событии приливного разрушения звезды



- Это открытие позволяет астрономам подтвердить тот факт, что 3ХММ J215022.4–055108 является одним из лучших кандидатов в черные дыры промежуточной массы на сегодняшний день.



Белые карлики в рентгеновском диапазоне



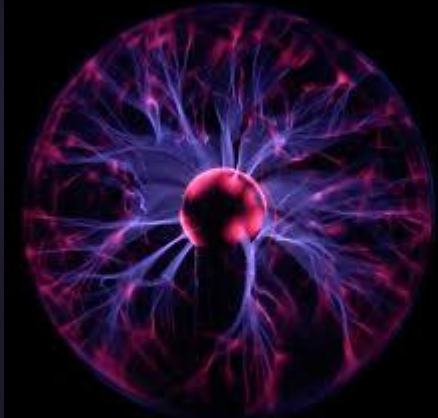
**БК скрывают от нас
внеземную цивилизацию**





Что такое белый карлик: звезда или фантом?

Звезды, которые зажег
для нас Фридрих
Бессель



- одна из увлекательнейших тем в истории астрономии: впервые были открыты небесные тела, обладающие свойствами, весьма далёкими от тех, с которыми мы имеем дело в земных





Белые карлики



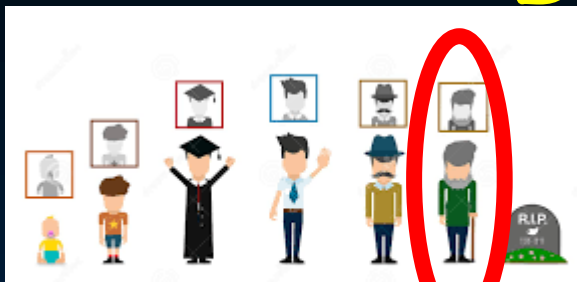
Повседневные

представления - ассоциации





Белые карлики



- - проэволюционировавшие звёзды с массой, не превышающей предел Чандрасекара (максимальная масса, при которой звезда может существовать как белый карлик), лишённые собственных источников термоядерной энергии.



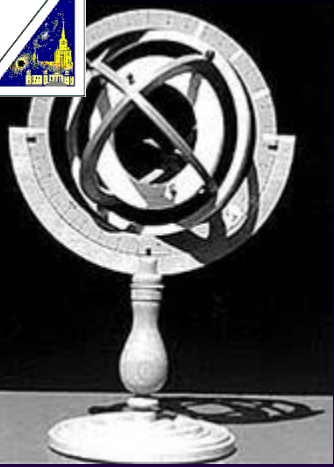


Вырожденные звезды

Белые карлики, также известные как «вырожденные звезды», состоят из вырожденных электронов, которые больше не производят энергию



- Вместо этого белые карлики излучают накопленную тепловую энергию в виде слабой светимости, но очень медленно



История открытия





Предсказание БК

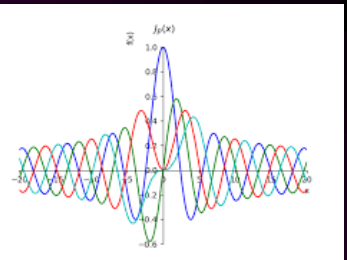


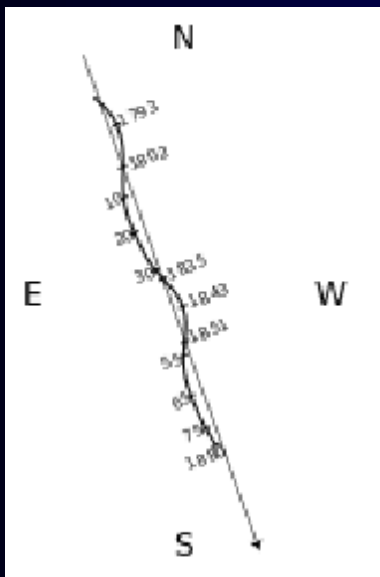
Ф.В. Бессель
(1784-1846)



К. Гаусс

- В 1844 году директор Кёнигсбергской обсерватории Фридрих Вильгельм Бессель, анализируя данные наблюдений, которые велись с 1755 года,





Видимое движение Сириуса по небесной сфере (по Фламариону)

- обнаружил, что Сириус, ярчайшая звезда неба, и Прокцион периодически, хотя и весьма слабо, отклоняются от прямолинейной траектории движения по небесной сфере.





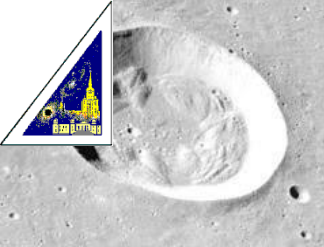
Мнение скептиков: слабый спутник является

НЕВИДИМЫМ, ПОЭТОМУ МАЛОВЕРОЯТЕН

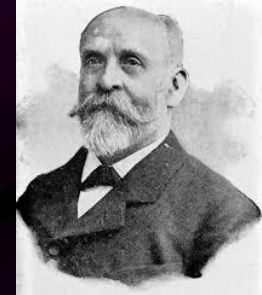


- **Бессель** пришёл к выводу, что у каждой из них должен быть близкий спутник. Сообщение было встречено скептически, поскольку **слабый спутник оставался ненаблюдаемым**, а его масса должна была быть достаточно велика - сравнимой с массой Сириуса и Прокциона, соответственно.





Обнаружение Сириуса В



- В январе **1862 г.** *Элвин Грэхэм Кларк*, юстируя 18-дюймовый рефрактор (Dearborn Telescope), обнаружил в непосредственной близости от Сириуса тусклую звёздочку. Это был спутник Сириуса, Сириус В, предсказанный Бесселем.





Сбылось и второе предсказание Бесселя!

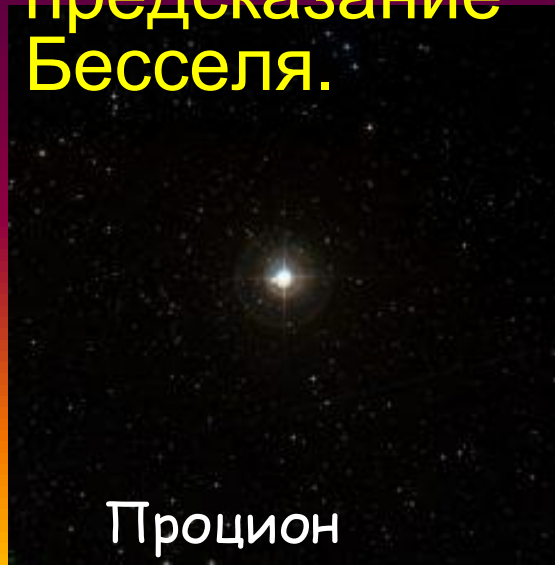


Джон Мартин Шеберле

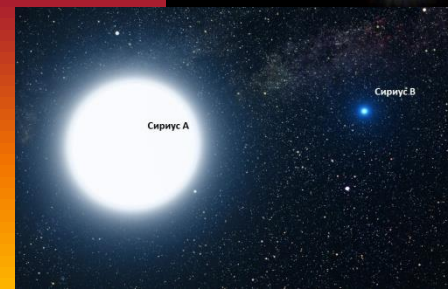
- А в **1896 г.** американский астроном **Джон Мартин Шеберле** открыл Процион В, подтвердив тем самым и **второе предсказание Бесселя.**



Ф.В. Бессель
(1784-1846)



Процион



Сириус А

Сириус В



Открытие белого карлика 40 Эридана В



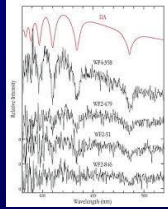
- Первым официально открытым белым карликом стала звезда **40 Эридана В** в тройной системе системе 40 Эридана, которую ещё в 1785 г. Вильям Гершель включил в каталог двойных звёзд.
- В **1910 г. Генри Норрис Расселл** обратил внимание на аномально **низкую светимость** 40 Эридана В при её **высокой цветовой температуре**, что и послужило впоследствии выделению подобных звёзд в отдельный класс белых карликов.



Спектр Сириуса В



Адамс, Уолтер Сидней



- В 1915 г. американский астроном **Уолтер Сидней Адамс** измерил спектр Сириуса В.
- Из измерений следовало, что его температура не ниже, чем у Сириуса А (**температура поверхности Сириуса В составляет $25\,000\text{ K}^\circ$** , а Сириуса А - $10\,000\text{ K}^\circ$,
- что, с учётом его в 10 000 раз более низкой светимости, чем у Сириуса А, указывает на **очень малый радиус** и, соответственно, высокую плотность - 10^6 г/см^3 (**плотность Сириуса $0,25\text{ г/см}^3$** , **плотность Солнца $1,4\text{ г/см}^3$**).



Адамс (лунный кратер)



Последующие открытия БК



Адриан ван Маанен

- В 1917 г. *Адриан ван Маанен* открыл ещё один белый карлик - звезду ван Маанена в созвездии Рыб.

- В 1922 г. *Виллем Якоб Лейтен* предложил называть такие звёзды «белыми карликами»



Кратер ван Маанен



Звезда ван Маанена



Сравнительные характеристики



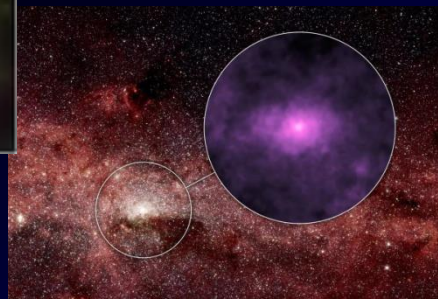
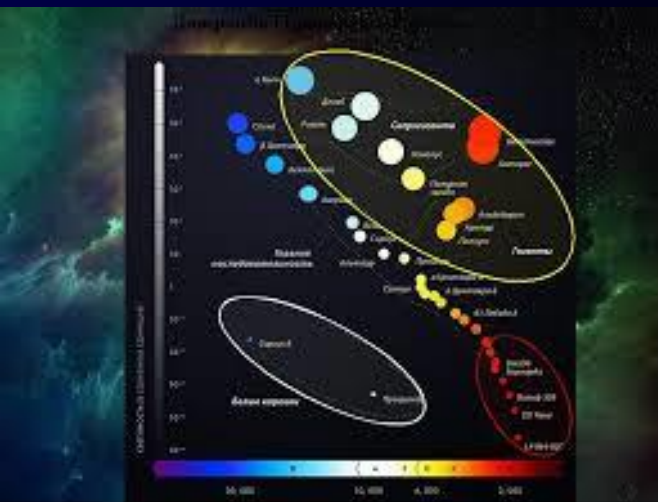
Характеристика	Солнце	Земля	Сириус Б
Масса (M_{\odot})	1.0	$3 \cdot 10^{-6}$	0.94
<u>Радиус (R_{\odot})</u>	1.0	0.009	<u>0.008</u>
Светимость (L_{\odot})	1.0	0.0	
<u>Средняя плотность (г/см^3)</u>	<u>1.41</u>	5.5	<u>$2.8 \cdot 10^6$</u>
Плотность ядра (г/см^3)	160	9.6	$3.3 \cdot 10^7$
Температура поверхности (K°)	5770	287	27000
Температура ядра (K°)	$1.6 \cdot 10^7$	4200	$2.2 \cdot 10^7$



Белые карлики



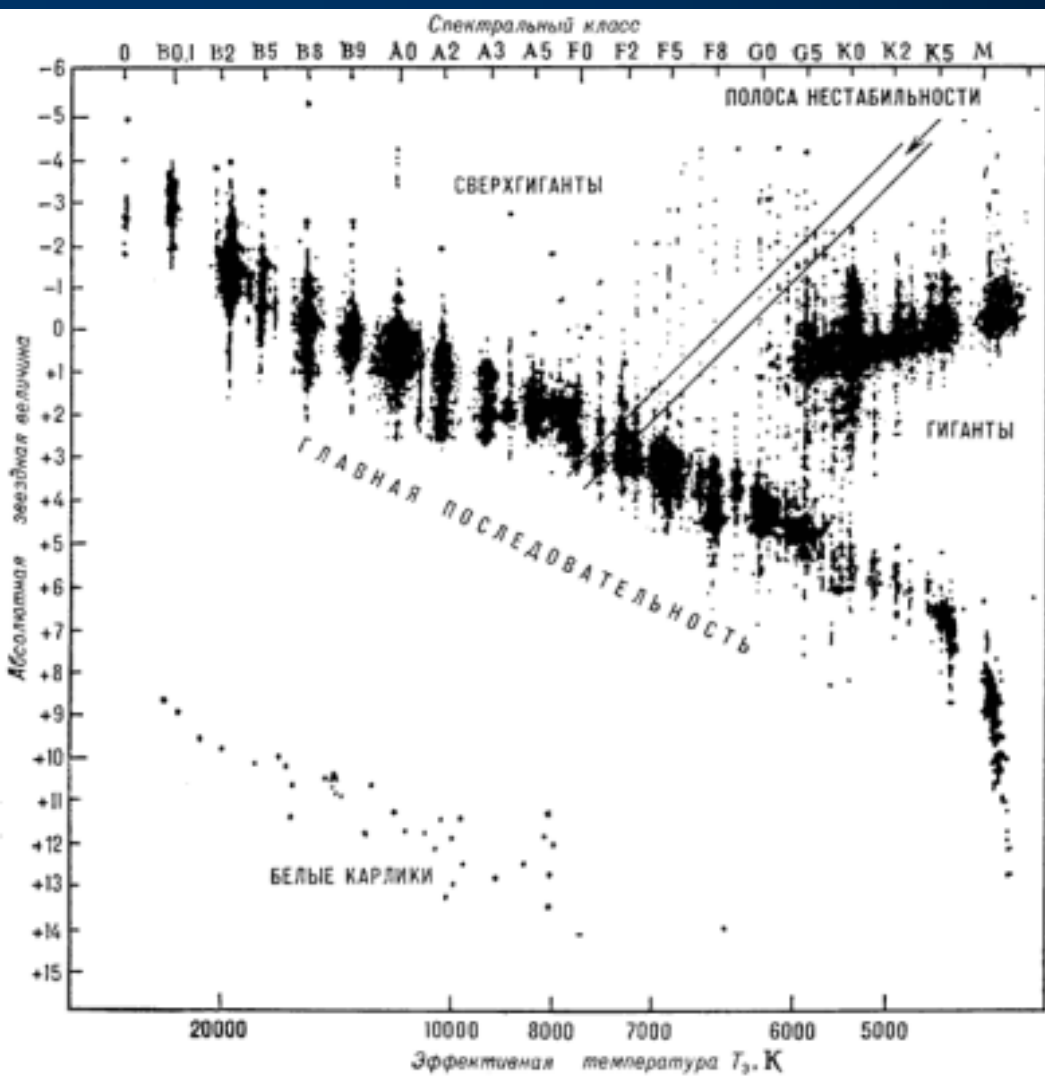
■ представляют собой компактные звёзды с массами, сравнимыми или больше массы Солнца, но с радиусами в 100 раз меньше и, соответственно, болометрическими светимостями в 10 000 раз меньшими солнечной. Средняя плотность вещества белых карликов в пределах их фотосфер $10^5 - 10^9$ г/см³, что почти в миллион раз выше плотности звёзд ГП.



■ По распространённости белые карлики составляют 3-10 % звёздного населения нашей Галактики.



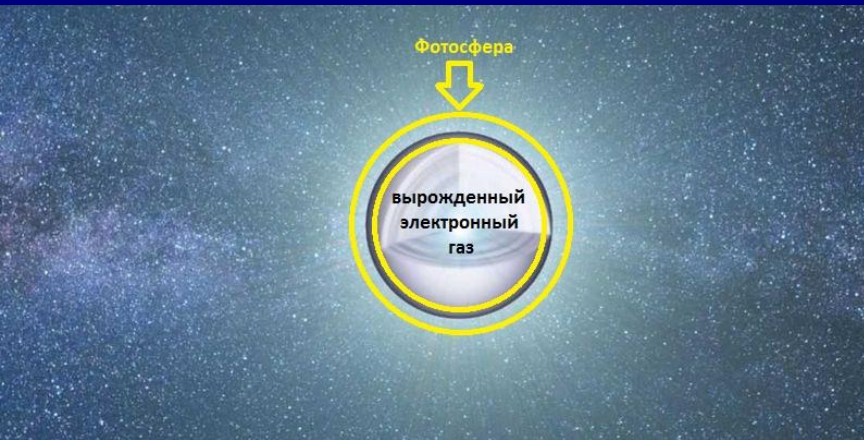
Парадокс плотности



- В начале XX века Герцшпрунгом и Расселлом была открыта закономерность в отношении спектрального класса (то есть температуры) и светимости звёзд
- - диаграмма Герцшпрунга-Расселла.



Высокая плотность БК

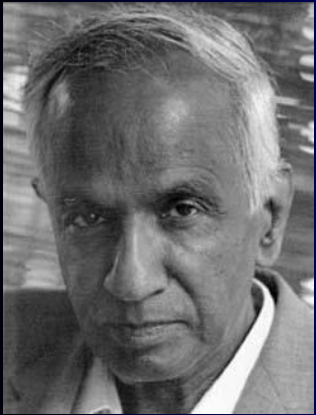


- Высокая плотность белых карликов оставалась необъяснимой в рамках классической физики и астрономии и нашла объяснение лишь в рамках квантовой механики после появления статистики Ферми-Дирака





Верхний предел массы БК

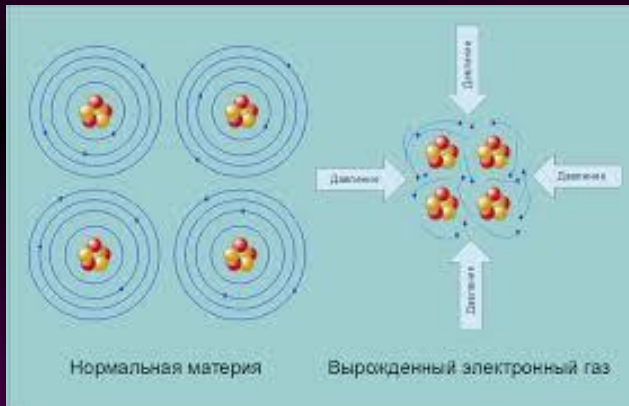


- В 1928 г. *Френкель* указал, что для БК должен существовать верхний предел массы, то есть эти звёзды с массой выше определённого предела неустойчивы и должны коллапсировать.
- К этому же выводу независимо пришёл в 1930 г. Э. *Стоунер*, который дал правильную оценку предельной массы.
- Более точно её вычислил в 1931 г. *Чандрасекар* в работе «Максимальная масса идеального белого карлика» (ApJ, 74, 81) (**предел Чандрасекара**) и независимо от него в 1932 г. *Л. Д. Ландау*.



Модель вырожденного электронного газа

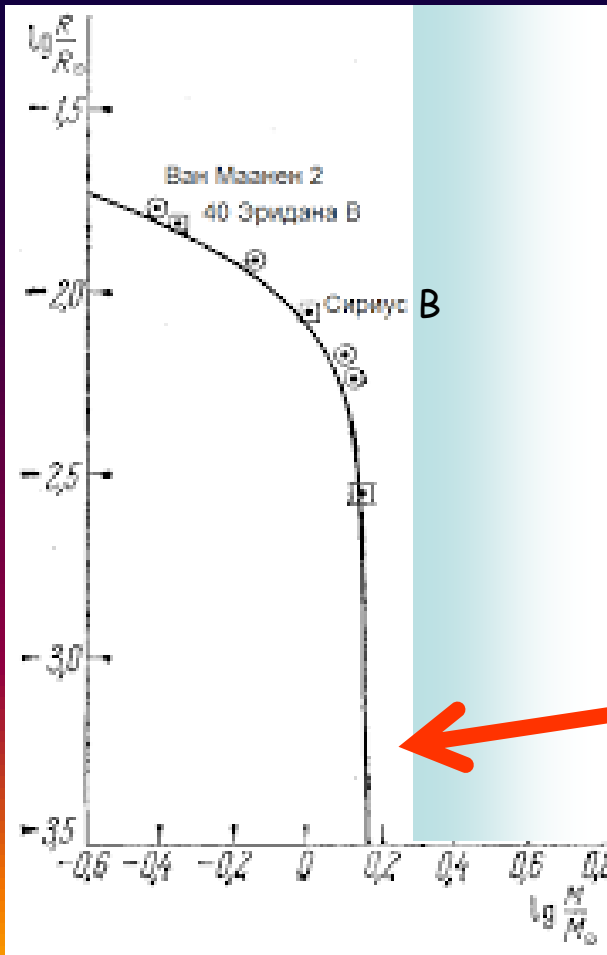
- ▶ В 1926 г. **Фаулер** в статье «On dense matter» (*MNRAS*, 87, 114) показал, что,



- ▶ в отличие от звёзд главной последовательности, для которых уравнение состояния основывается на модели идеального газа (стандартная модель Эддингтона),
- ▶ для БК плотность и давление вещества определяются свойствами **вырожденного электронного газа** (ферми-газа)



Почти все белые карлики имеют одинаковую массу



- Масса белых карликов не могут превышать $1,4 M_{\odot}$ предел, известный как «предел Чандрасекара».

Зависимость масса-радиус для белых карликов. Вертикальная асимптота соответствует пределу Чандрасекара.



Физика и свойства белых карликов

- Массы БК составляют порядка солнечной, но размеры составляют лишь сотую (и даже меньше) часть солнечного радиуса, то есть плотность вещества в белых карликах чрезвычайно высока и составляет $\rho \sim 10^5 - 10^9 \text{ г/см}^3$.
 - При таких плотностях электронные оболочки атомов разрушаются, и вещество представляет собой электронно-ядерную плазму, причем её электронная составляющая представляет собой вырожденный электронный газ.

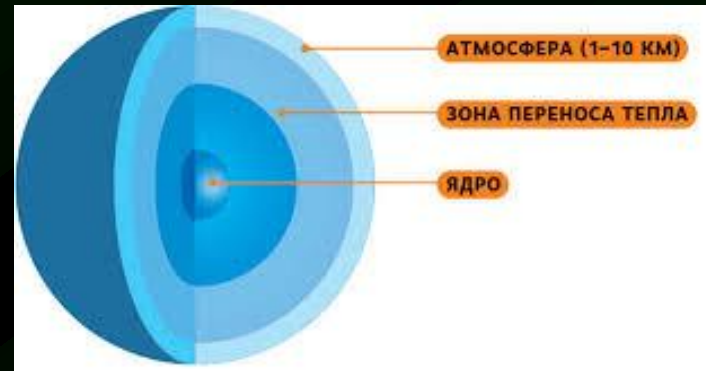




Давление вырожденного электронного газа

- Давление P такого газа подчиняется следующей зависимости:

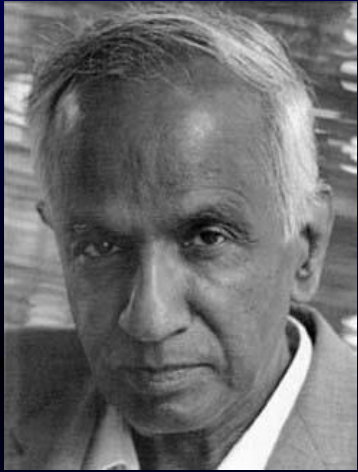
$$P = K \rho^{5/3}$$



- где ρ - его плотность, то есть, в отличие от уравнения Клапейрона (уравнения состояния идеального газа), для вырожденного электронного газа температура в уравнение состояния не входит - его давление от температуры не зависит, и, следовательно, **строение БК не зависит от температуры.**
- => для белых карликов, в отличие от звёзд ГП и гигантов, **не существует зависимость масса-светимость.**



Зависимость масса-радиус и предел Чандрасекара



- при росте плотности вещества из-за **запрета Паули** (два электрона не могут иметь одно квантовое состояние, то есть одинаковую энергию и спин), энергия и скорость электронов возрастают настолько, что начинают действовать эффекты теории относительности
- - **вырожденный электронный газ становится релятивистским**. Зависимость давления P релятивистского вырожденного электронного газа от плотности уже другая:

$$P = K \rho^{4/3}$$



Верхний предел массы БК

- Тогда средняя плотность БК

$$\rho \sim M/R^3,$$

- где M - масса, а R - радиус БК. Тогда давление:

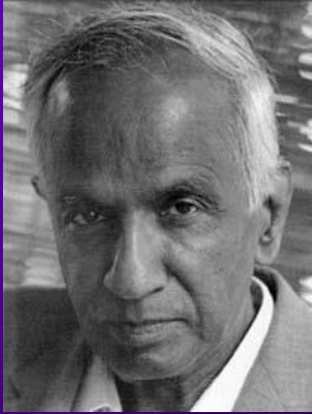
$$P \sim M^{4/3}/R^4$$

- и сила давления, противодействующая гравитации и равная перепаду давления по глубине:

$$\frac{P}{R} \sim \frac{M^{4/3}}{R^5}$$



Верхний предел массы БК ?



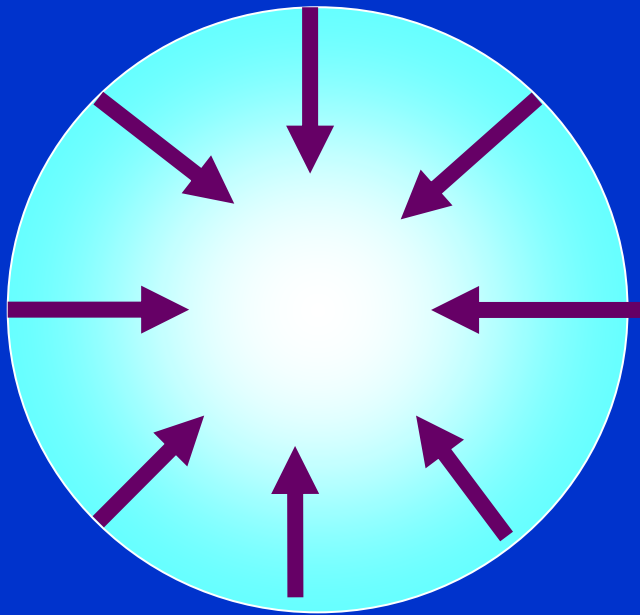
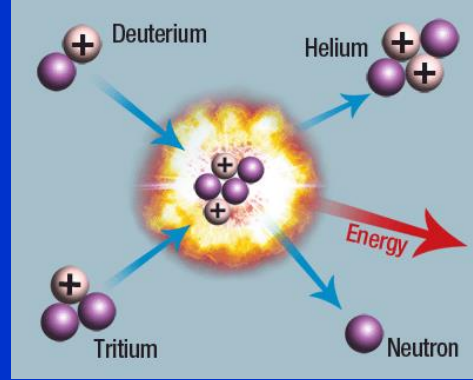
- Гравитационные силы, противодействующие давлению:

$$\frac{\rho G M}{R^2} \sim \frac{M^2}{R^3}$$

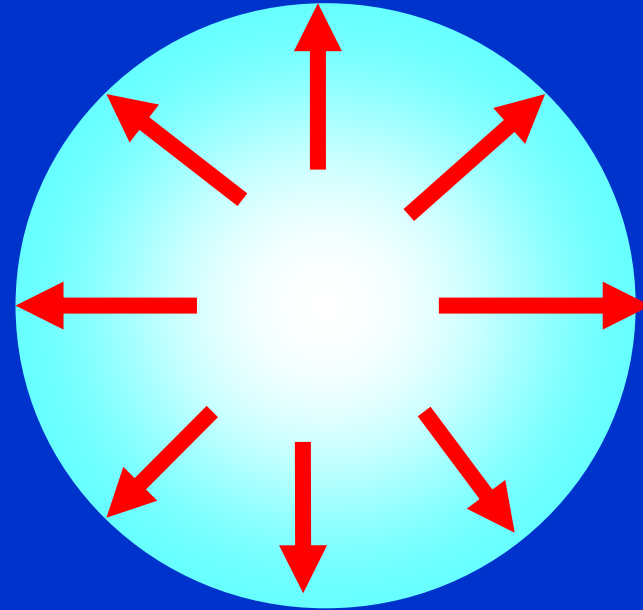
- Т.е., **хотя перепад давления и гравитационные силы одинаково зависят от радиуса, но по-разному зависят от массы** $\sim M^{4/3}$ и $\sim M^2$, соответственно. Следствием такого соотношения зависимостей является **существование некоторого значения массы звезды**, при которой **гравитационные силы уравновешиваются силами давления**, а при увеличении массы БК его радиус уменьшается. Другим следствием является то, что если масса больше некоторого предела (предел Чандрасекара), то звезда коллапсирует.



Что удерживает звезду в стабильном состоянии ?



Сила гравитации
сжимает звезду
к ее центру



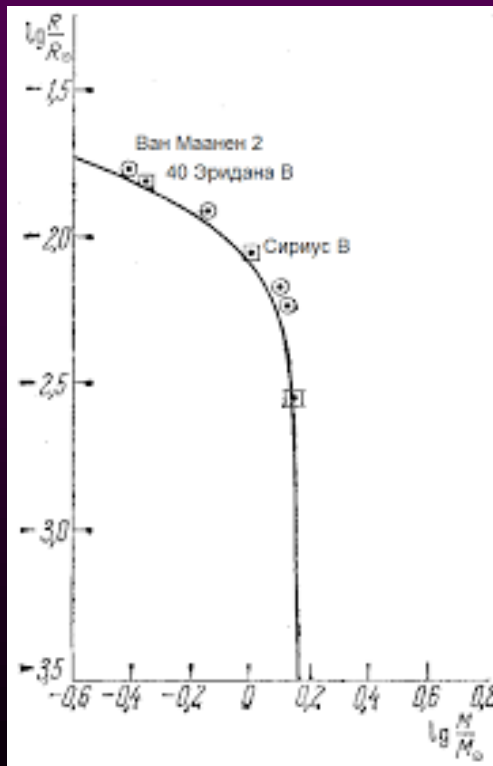
**Горение H , He , $O_2 \rightarrow$
давление излучения –
распирает звезду
+газовое давление**



Нижний предел массы БК ?

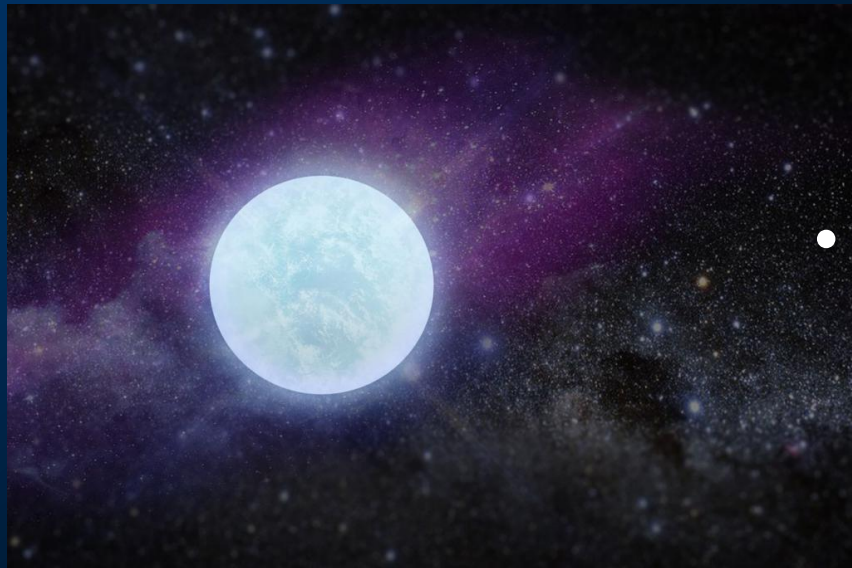
- Таким образом, для белых карликов существует **верхний предел массы**.

■ Интересно, что для наблюдаемых БК существует и аналогичный **нижний предел**: поскольку скорость эволюции звёзд пропорциональна их массе, то мы можем наблюдать маломассивные белые карлики как остатки лишь тех звёзд, которые успели проэволюционировать за время от начального периода звездообразования Вселенной до наших дней.





Белые карлики охлаждаются медленнее с возрастом

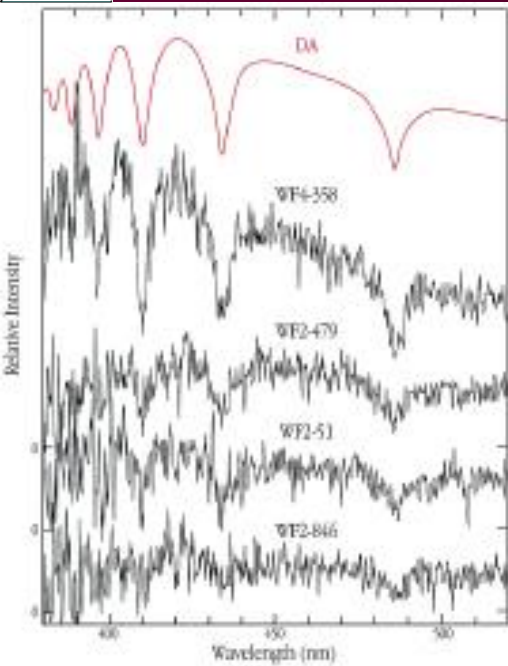


- Пример: БК с массой 0.59 раз больше, чем у Солнца с гелиевой атмосферой и температурой поверхности 8000 К, для охлаждения до 7140 К потребуется около 1,5 миллиарда лет.





Особенности спектров и спектральная классификация белых карликов



- Спектры БК сильно отличаются от спектров звёзд ГП и гигантов. Главная их особенность - **небольшое число сильно уширенных линий поглощения**, а некоторые БК (спектральный класс DC) вообще не содержат **заметных линий поглощения**.

- Это объясняется очень сильным уширением линий: только самые сильные линии поглощения, уширяясь, имеют достаточную глубину, чтобы остаться заметными, а слабые, из-за малой глубины, практически **сливаются с непрерывным спектром**.

Спектры белых карликов в шаровом скоплении NGC 6397. «Стандартный» спектр БК спектрального класса DA для сравнения показан сверху (красный)



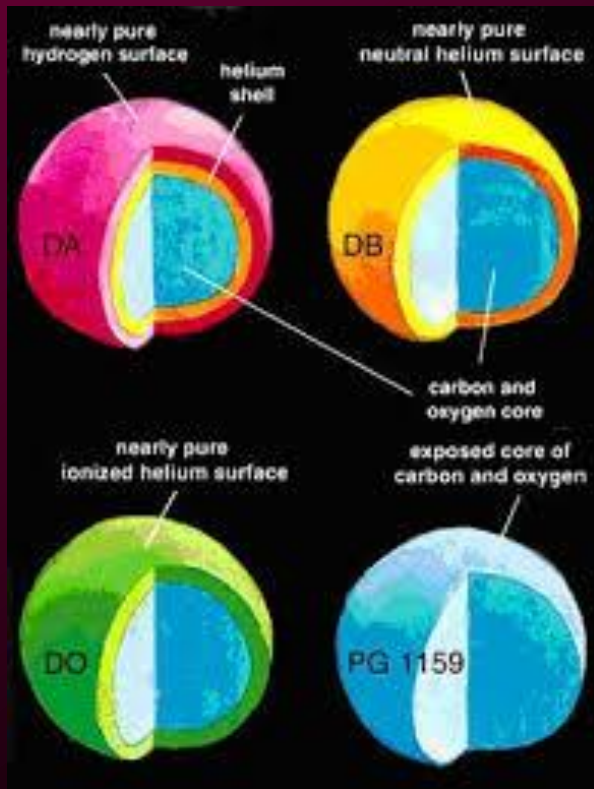
Особенности спектров белых карликов



- ➔ 1) из-за высокой плотности БК ускорение свободного падения на их поверхности составляет $\sim 10^8$ см/с² (или ~ 1000 км/с²), что, в свою очередь, приводит к **малым протяжённости их фотосфер, огромным плотностям и давлениям в них и уширению линий поглощения.**
- ➔ Другим следствием на поверхности является **сильного гравитационного поля гравитационное красное смещение линий в их спектрах**, эквивалентное скоростям в несколько десятков км/с.
- ➔ 2) у некоторых БК, обладающих сильными магнитными полями, наблюдаются сильная поляризация излучения и расщепление спектральных линий вследствие эффекта Зеемана.



Белые карлики выделяются в отдельный спектральный класс **D** (от англ. *Dwarf* - карлик)

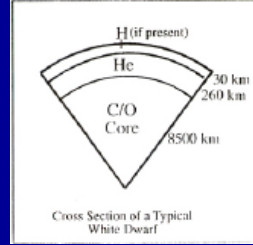


- классификации предложена в 1983 г. Эдвардом Сионом;
- формат:
- **D** [подкласс] [особенности спектра] [температурный индекс],

Разрезы белых карликов разных спектральных классов.



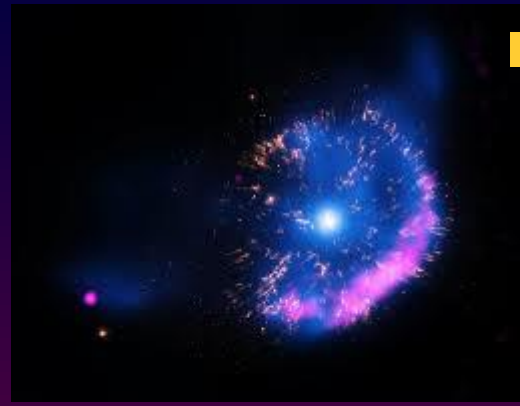
Классификация БК



- ➔ **DA** - в спектре присутствуют линии **бальмеровской серии водорода**, линии гелия не наблюдаются
- ➔ **DB** - в спектре присутствуют линии **гелия He I**, линии водорода или металлов отсутствуют
- ➔ **DC** - непрерывный спектр **без линий поглощения**
- ➔ **DO** - в спектре присутствуют **сильные линии гелия He II**, также могут присутствовать линии **He I и H**
- ➔ **DZ** - только **линии металлов**, линии H или He отсутствуют
- ➔ **DQ** - линии **углерода**, в том числе молекулярного **C2** и спектральные особенности:
- ➔ **P** - наблюдается **поляризация** света в **магнитном** поле
- ➔ **H** - **поляризация** при наличии магнитного поля не наблюдается
- ➔ **V** - звёзды типа **ZZ Кита** или другие переменные БК
- ➔ **X** - **пекулярные** или неклассифицируемые спектры



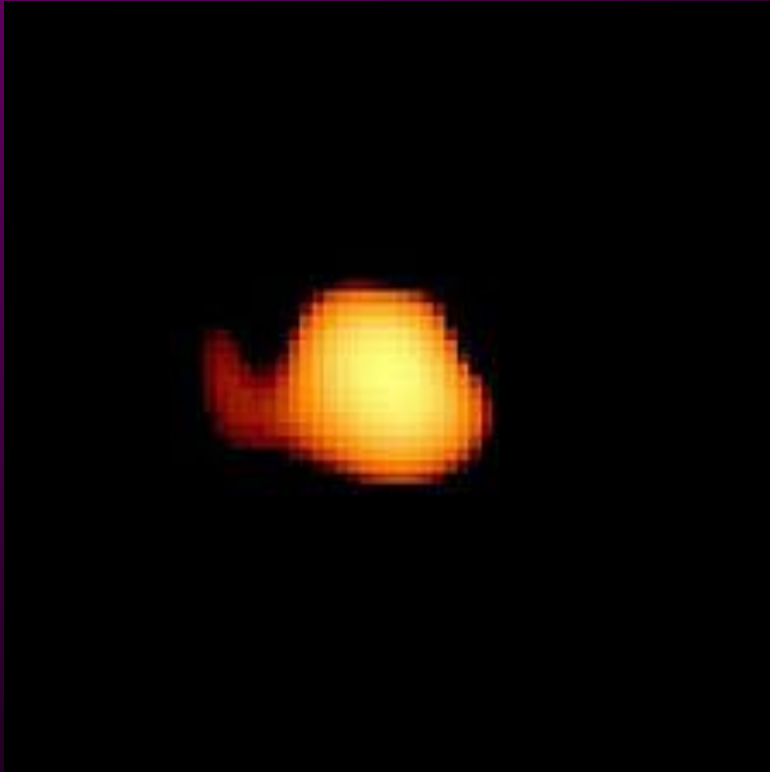
Эволюция белых карликов



- БК начинают свою эволюцию как обнажившиеся вырожденные ядра красных гигантов, сбросивших свою оболочку – т.е. в качестве **центральных звёзд молодых планетарных туманностей**.
- Температуры фотосфер ядер молодых планетарных туманностей чрезвычайно высоки - так, например, температура центральной звезды туманности NGC 7293 составляет от **90 000 К°** (оценка по линиям поглощения) до **130 000 К°** (оценка по рентгеновскому спектру). При таких температурах большая часть спектра приходится на **жёсткое ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское излучение**.



Мира (Кита)



Переменная звезда Мира (Кита) в ультрафиолетовом диапазоне. Виден аккреционный «хвост», направленный от основного компонента - красного гиганта к компаньону - белому карлику



Все-таки как же образуется БК ?

Схема звёздной эволюции





Происхождение белых карликов

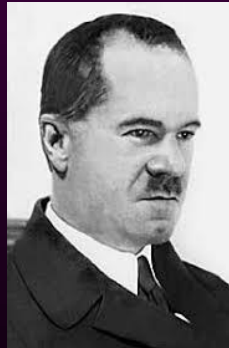


Эпик, Эрнст Юлиус, академик Эстонской академии наук



- Решение Фаулера объяснило внутреннее строение БК, но не прояснило механизм их происхождения.
- В объяснении генезиса БК ключевую роль сыграли две идеи:

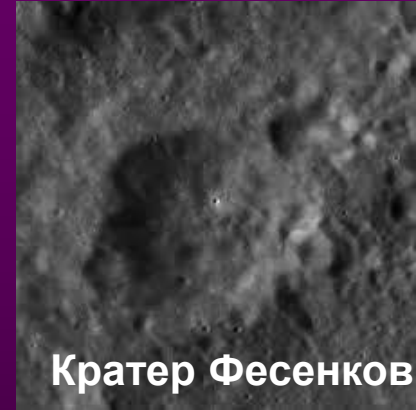
■ 1) мысль астронома **Эрнста Эпика**, что красные гиганты образуются из звёзд ГТ в результате выгорания ядерного горючего, и



Василий Григорьевич Фесенков

■ 2) предположение астронома **Василия Фесенкова**, что звёзды ГТ должны терять массу, и такая потеря массы должна оказывать существенное влияние на эволюцию звёзд.

■ Эти предположения полностью подтвердились.

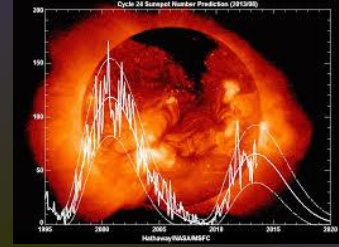


Кратер Фесенков





Тройная гелиевая реакция и изотермические ядра красных ГИГАНТОВ



- ➡ В процессе эволюции звёзд главной последовательности происходит «выгорание» водорода - **нуклеосинтез с образованием гелия**.
- ➡ Такое выгорание приводит к прекращению энерговыделения в центральных частях звезды, сжатию и, соответственно, к повышению температуры и плотности в её ядре.
- ➡ Рост температуры и плотности в звёздном ядре ведёт к условиям, в которых активируется новый источник термоядерной энергии: выгорание гелия (**тройная гелиевая реакция** или тройной альфа-процесс), характерный для красных гигантов и сверхгигантов.



Тройная гелиевая реакция

- При температурах порядка 10^8 К° кинетическая энергия ядер гелия становится достаточно высокой для преодоления кулоновского барьера: два ядра гелия (${}^4\text{He}$, альфа-частицы) могут сливаться с образованием нестабильного изотопа бериллия ${}^8\text{Be}$:





Тройная гелиевая реакция

- Большая часть ${}^8\text{Be}$ снова распадается на две альфа-частицы, но при столкновении ${}^8\text{Be}$ с высокоэнергетической альфа-частицей может образоваться стабильное ядро углерода ${}^{12}\text{C}$:





Энерговыделение в тройной гелиевой реакции

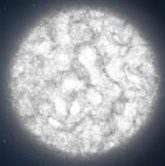
- Зависимость энерговыделения от температуры в тройной гелиевой реакции чрезвычайно высока, так, для диапазона температур $T \sim 2 \cdot 10^8 \text{ K}^\circ$ энерговыделение $\epsilon_{3\alpha}$:

$$\epsilon_{3\alpha} = 10^8 \rho^2 Y^3 * \left(\frac{T}{10^8}\right)^{30}$$

- где Y - парциальная концентрация гелия в ядре (в рассматриваемом случае «выгорания» водорода близка к единице).

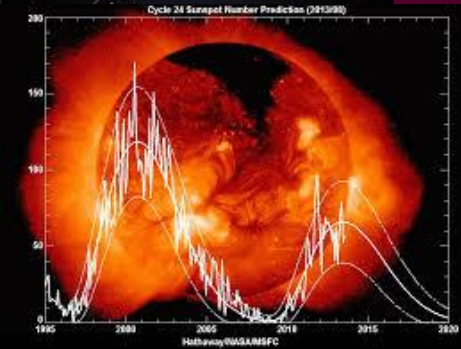


Механизм нейтринного охлаждения

- 
- при высоких температурах и давлениях возможно рассеяние фотонов на электронах с образованием нейтрино-антинейтринных пар, которые свободно уносят энергию из ядра: звезда для них прозрачна.
 - Скорость такого объёмного нейтринного охлаждения, в отличие от классического поверхностного фотонного охлаждения, не лимитирована процессами передачи энергии из недр звезды к её фотосфере.
 - В результате реакции нуклеосинтеза в ядре звезды достигается новое равновесие, характеризующееся одинаковой температурой ядра: образуется изотермическое ядро.



Ядрами красных гигантов являются белые карлики

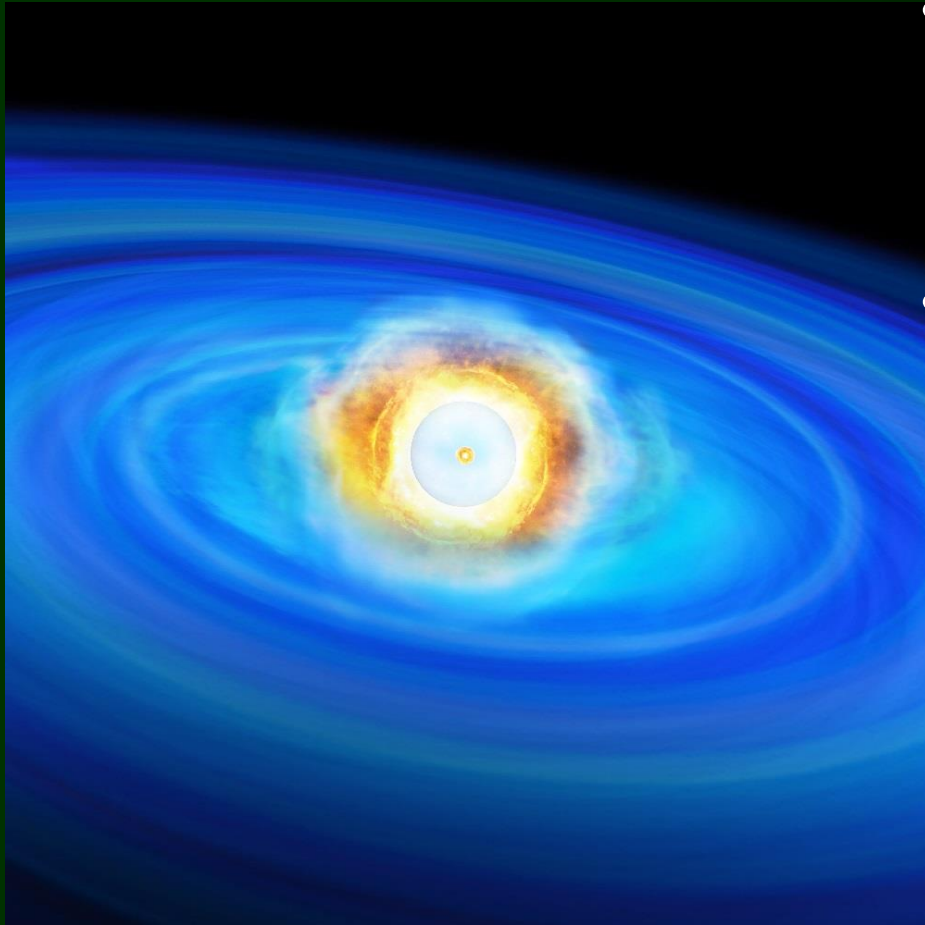


■ В случае красных гигантов с относительно небольшой массой (порядка солнечной) изотермические ядра состоят, в основном, из гелия, в случае более массивных звёзд - из углерода и более тяжёлых элементов.

■ Однако плотность такого изотермического ядра настолько высока, что расстояния между электронами образующей ядро плазмы становятся соизмеримыми с их длиной волны Де Бройля $\lambda = h/mv$, то есть выполняются **условия вырождения электронного газа**. Расчёты показали, что плотность изотермических ядер соответствует плотности БК, то есть **ядрами красных гигантов являются БК**.



Потеря массы красными гигантами и сброс ими оболочки



- Ядерные реакции в красных гигантах происходят не только в ядре:
- по мере выгорания водорода в ядре, нуклеосинтез гелия распространяется на ещё богатые водородом области звезды, **образуя сферический слой** на границе бедных и богатых водородом областей.



«Раздувание» звезды



- Аналогичная ситуация возникает и с тройной гелиевой реакцией: по мере выгорания гелия в ядре она также сосредотачивается в сферическом слое на границе между бедными и богатыми гелием областями.
- Светимость звёзд с такими «двухслойными» областями нуклеосинтеза значительно возрастает, достигая порядка нескольких тысяч светимостей Солнца, звезда при этом **«раздувается»**, увеличивая свой диаметр.
- Зона нуклеосинтеза гелия поднимается к поверхности звезды: доля массы внутри этой зоны составляет 70% массы звезды. **«Раздувание»** сопровождается достаточно интенсивным **истечением вещества с поверхности звезды**, наблюдаются такие объекты как протопланетарные туманности.





Механизм образования планетарных туманностей



И.С. Шкловский

- Такие звёзды явно нестабильны, и в 1956 г. астроном и астрофизик *Иосиф Шкловский* предложил механизм образования планетарных туманностей через **сброс оболочек красных гигантов**, при этом обнажение изотермических вырожденных ядер таких звёзд приводит к рождению белых карликов.

• Точные механизмы потери массы и дальнейшего сброса оболочки для таких звёзд пока неясны, но можно предположить следующие факторы, способные внести свой вклад в потерю оболочки:

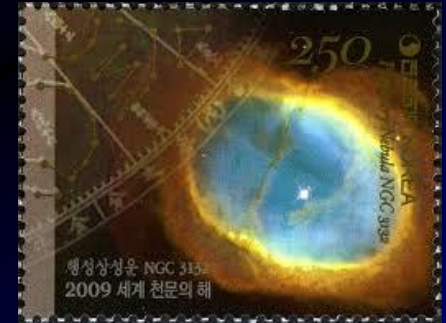
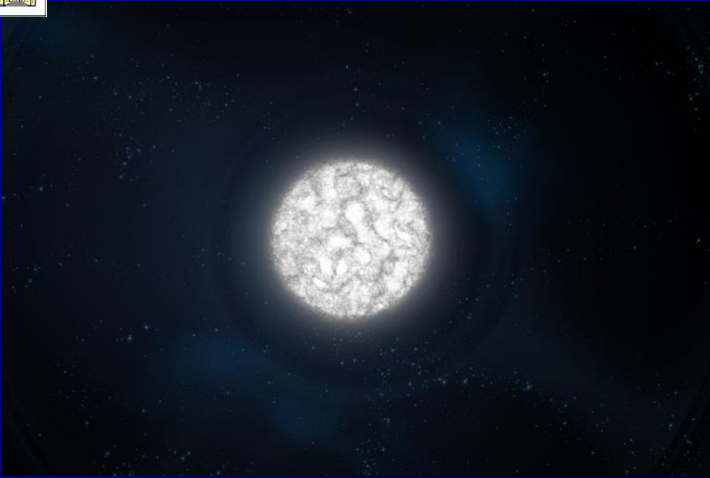


Потеря оболочки

- Из-за крайне высокой светимости существенным становится световое давление потока излучения звезды на её внешние слои, что может привести к потере оболочки за несколько тысяч лет.
- Вследствие ионизации водорода в областях, лежащих ниже фотосферы, может развиться сильная конвективная неустойчивость.
- Аналогичную природу имеет солнечная активность, в случае же красных гигантов мощность конвективных потоков должна значительно превосходить солнечную.



Потеря оболочки

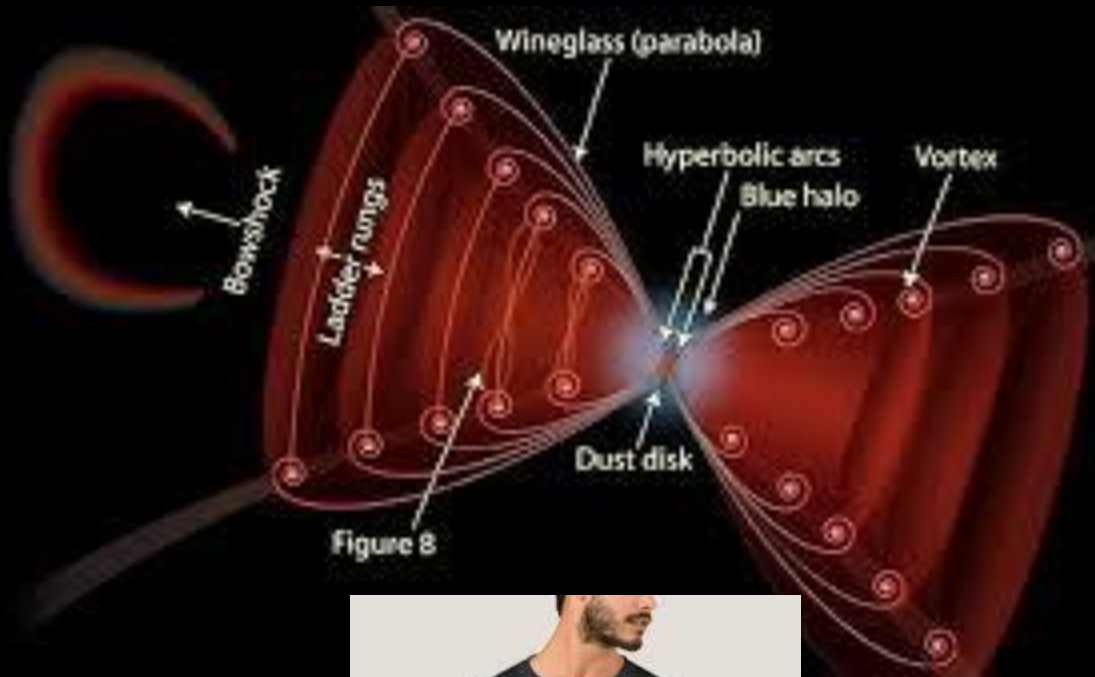


- В протяжённых звёздных оболочках могут развиваться **неустойчивости**, приводящие к сильным колебательным процессам, сопровождающимся изменением теплового режима звезды.





Наблюдаются волны плотности выброшенной звездой материи, которые могут быть следствиями таких колебаний



Протопланетарная туманность HD 44179: асимметричный выброс газопылевой материи красным гигантом.





Потеря оболочки



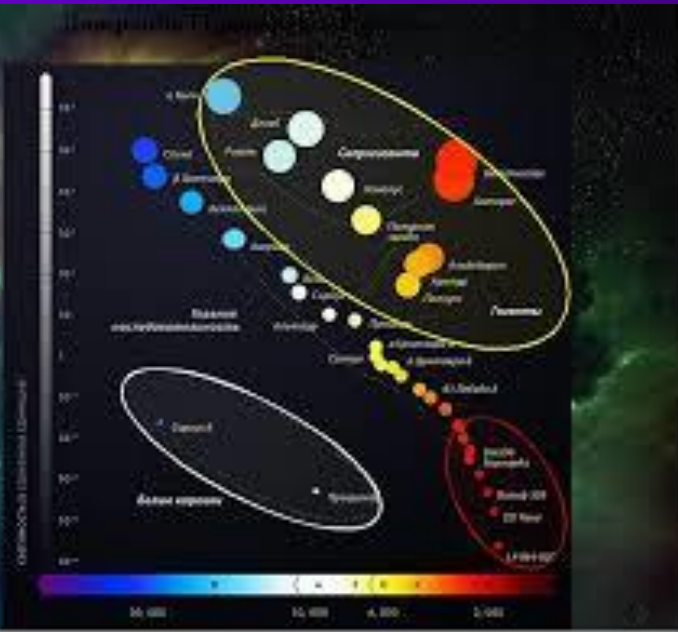
- У красных гигантов с **«двуслойным»** термоядерным источником, перешедших на поздней стадии своей эволюции на асимптотическую ветвь гигантов,
- наблюдаются термические пульсации, сопровождающиеся **«переключением»** водородного и гелиевого термоядерных источников и интенсивной потерей массы.

Планетарная туманность NGC 3132: в центре двойная звезда - аналог Сириуса.



Сценарий конца эволюции красных гигантов

ГИГАНТОВ

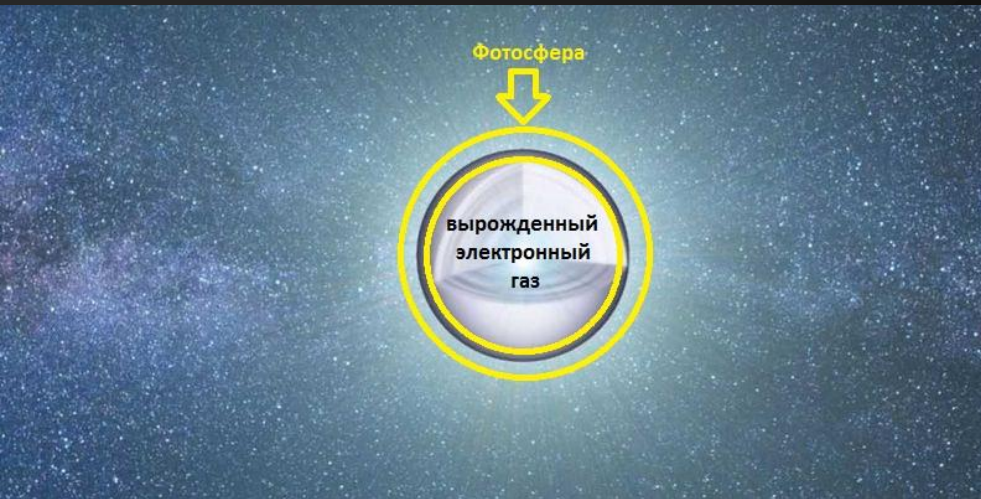


- Сейчас предложенный Шкловским сценарий конца эволюции красных гигантов является общепринятым и подкреплён многочисленными наблюдательными данными.





Белые карлики имеют атмосферу

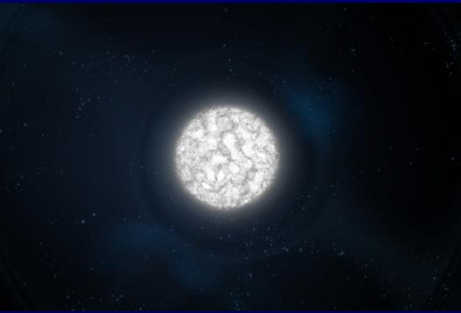


- Спектроскопические исследования показали, что большая часть светимости звезды БК происходит из ее атмосферы, которая может состоять из водорода или гелия.

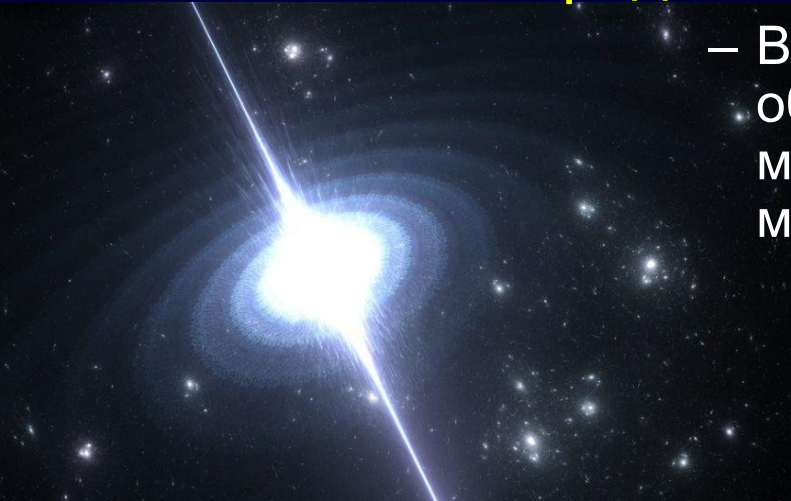
- Хотя оба элемента обычно присутствуют в атмосфере БК, один из них всегда преобладает по меньшей мере в 1000 раз по сравнению со всеми другими элементами в звездной атмосфере.



Гравитация разделяет элементы в атмосфере



Большинство исследователей сходятся во мнении, что это результат процесса, в котором гравитация разделяет элементы в атмосфере, когда самые массивные молекулы накапливаются на поверхности звезды или вблизи нее, а более легкие элементы укладываются на этот слой в порядке их массы.



- В случае атмосфер, богатых водородом, общая масса водородного компонента может составлять до 1/10 000 от общей массы звезд.

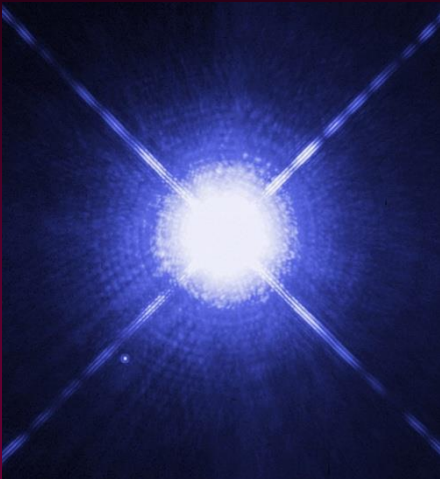


За счет чего светят БК ?



- Поскольку БК лишены собственных термоядерных источников энергии, то они излучают **за счёт запасов своего тепла**. Мощность излучения абсолютно чёрного тела, приходящаяся на единицу площади поверхности:

$$j = \sigma T^4$$



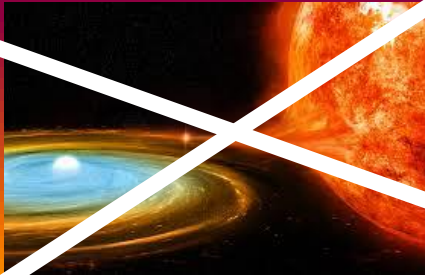
– где j - мощность на единицу площади излучающей поверхности, а σ Вт/(м²·К⁴) - постоянная *Стефана-Больцмана*.



В отсутствие аккреции



Самуил Аронович Каплан
(1921-1978)



- ИСТОЧНИКОМ светимости белых карликов является запас тепловой энергии ионов в их недрах, поэтому их **СВЕТИМОСТЬ ЗАВИСИТ ОТ ВОЗРАСТА.**

- **Количественную теорию остывания белых карликов построил в конце 1940-х гг. профессор **Самуил Каплан****



Остывание белых карликов

- в уравнение состояния вырожденного электронного газа температура не входит, т.е. радиус БК и излучающая площадь остаются неизменными: =>



- для БК **не существует зависимость масса-светимость**, но существует зависимость возраст-светимость (зависящая только от температуры, но не от площади излучающей поверхности), и,

- **сверхгорячие молодые БК должны достаточно быстро остывать**, т.к. ПОТОК излучения и, соответственно, темп остывания, пропорционален четвёртой степени температуры.





Черные карлики

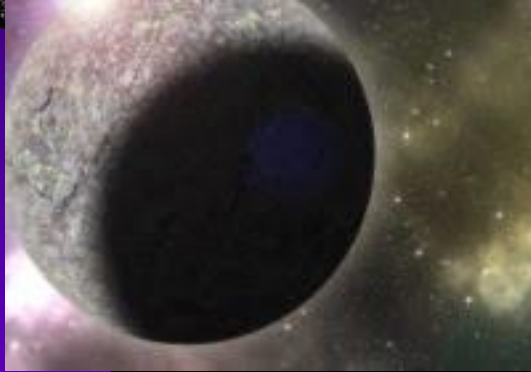


- В пределе, после десятков миллиардов лет остывания любой БК должен превратиться в так называемый **Чёрный карлик** (не излучающий видимый свет).
- Хотя пока таких объектов во Вселенной не наблюдается (по некоторым подсчетам минимум 10^{15} лет требуется для остывания БК до температуры 5K°),





Черные карлики - портал в другую Вселенную ?



- т.к. время, прошедшее со времени образования первых звезд во Вселенной, составляет около 13 миллиардов лет, но некоторые БК уже охладились до температур ниже 4000 K°
- (например белые карлики WD 0346+246 и SDSS J110217, 48+411315.4 с температурами 3700 K° - 3800 K° и спектральным классом M0 на расстоянии около 100 световых лет от Солнца), что,
- наряду с малыми размерами, делает их **обнаружение весьма сложной задачей.**



Некоторые белые карлики богаты металлами

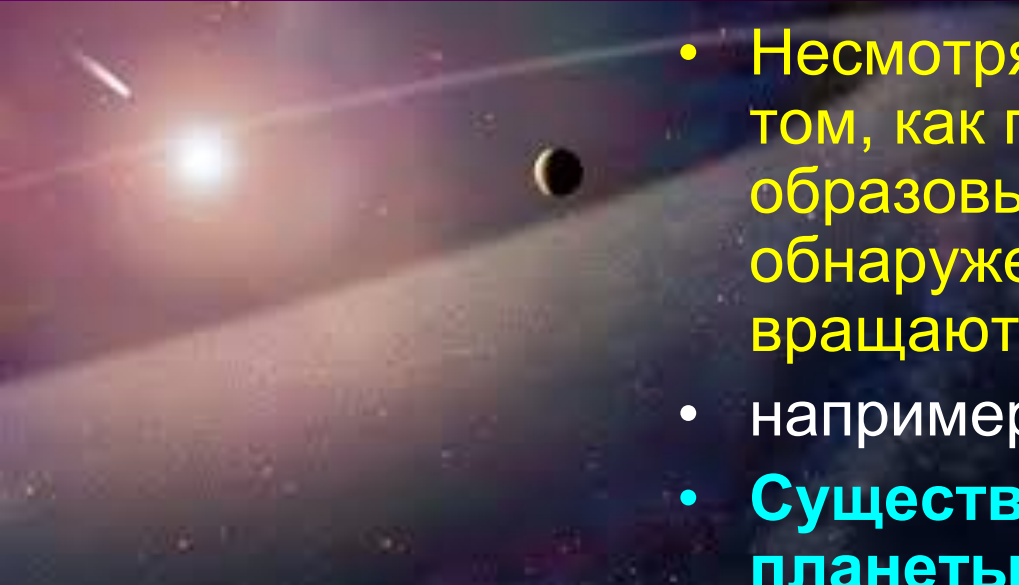
- Тот факт, что спектры некоторых БК показывают сильные металлические линии, стал неожиданностью для астрономов, поскольку эти тяжелые элементы должны были притягиваться к ядру звезды вскоре после его формирования.





Некоторые БК «принимают» планеты

- Несмотря на скептицизм в вопросе о том, как планеты могут образовываться вокруг БК, обнаружено множество БК, которые вращаются вокруг одной из планет...
- например, система NN Serpentis.
- Существует представление, что планеты, вращающиеся вокруг БК, - это останки планет, которые были уничтожены созданием белого карлика, что может произойти, когда наше Солнце вздувается во время фазы красного гиганта.





Белые карлики могут взорваться несколько раз, но при этом выжить



Хотя некоторые процессы могут уничтожить звезду белого карлика при взрыве сверхновой звезды, многие БК выживают при повторных, но менее катастрофических термоядерных взрывах аккрецированного водородного материал на их поверхностях.

- При условии, что ядро звезды остается нетронутым, БК может пережить **столько взрывов на своей поверхности, сколько потребуется, чтобы истощить источник падающего материала.**





Два типа БК



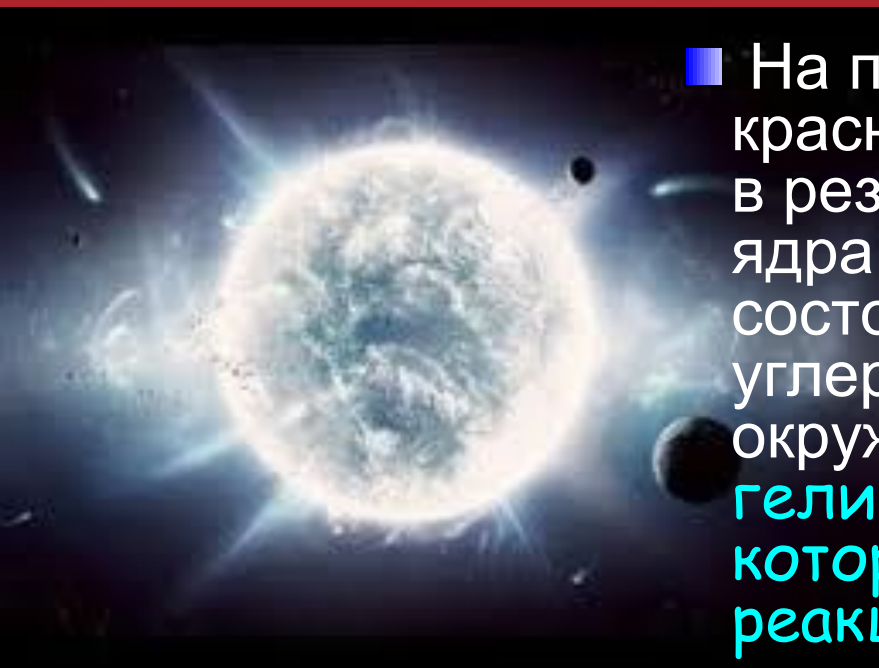
- Все известные белые карлики в зависимости от своего спектра делятся на две группы:
- объекты **водородные**, спектрального класса **DA**, в спектре которых отсутствуют линии гелия;
- **гелиевые** карлики, спектральный класс **DB**. Основные линии в спектре приходятся на гелий.
- **Причина такого различия состава атмосфер БК долгое время оставалась неясной**



■ **БК водородного типа составляют большинство популяции, до 80% из всех известных на данный момент объектов подобного типа. На гелиевые карлики приходится оставшиеся 20%.**



Сценарий гелиевой вспышки



- На поздней стадии эволюции у красных гигантов с массами до $10 M_{\odot}$ в результате «выгорания» гелиевого ядра образуется вырожденное ядро, состоящее преимущественно из углерода и более тяжёлых элементов, окружённое невырожденным гелиевым слоевым источником, в котором идёт тройная гелиевая реакция.

- В свою очередь, над ним располагается слоевой водородный источник, в котором идут термоядерные реакции цикла Бете превращения водорода в гелий, окружённый водородной оболочкой; таким образом, внешний водородный слоевой источник является «производителем» гелия для гелиевого слоевого источника.



Сценарий гелиевой вспышки (продолжение)



- Горение гелия в слоевом источнике подвержено **тепловой неустойчивости** вследствие чрезвычайно высокой зависимости от температуры, и это усугубляется большей скоростью преобразования водорода в гелий по сравнению со скоростью выгорания гелия;
- результатом становится накопление гелия, его сжатие до начала вырождения, резкое повышение скорости тройной гелиевой реакции и развитие слоевой **гелиевой вспышки**.



Новый поджог водородного слоевого источника



- ▶ За короткое время (~30 лет) светимость гелиевого источника увеличивается настолько, что горение гелия переходит в **конвективный режим**, слой расширяется, **выталкивая наружу водородный слоевой источник**, что ведёт к его охлаждению и прекращению горения водорода.
- ▶ После выгорания избытка гелия в процессе вспышки светимость гелиевого слоя падает, внешние водородные слои красного гиганта сжимаются, и происходит **новый поджог водородного слоевого источника**.



Идея Ико Ибена: для «гелиевого» и «водородного» БК



Icko Iben Jr

- Ибен предположил, что пульсирующий красный гигант может сбросить оболочку, образовав планетарную туманность, как в фазе **гелиевой вспышки**, так и в спокойной фазе с активным **слоевым водородным источником**, и,
- поскольку поверхность отрыва оболочки зависит от фазы, то при сбросе оболочки **во время гелиевой вспышки обнажается «гелиевый» БК спектрального класса DB**, а при сбросе оболочки гигантом с активным **слоевым водородным источником** - **«водородный» карлик DA**; длительность гелиевой вспышки составляет около 20% от длительности цикла пульсации, что и объясняет соотношение водородных и гелиевых карликов DA:DB 80:20.



Рентгеновское излучение белых карликов



- Температура поверхности молодых БК - изотропных ядер звёзд после сброса оболочек, очень высока ($>2 \cdot 10^5 \text{ K}^\circ$), однако достаточно быстро падает за счёт нейтринного охлаждения и излучения с поверхности.
- Такие очень молодые БК наблюдаются в рентгеновском диапазоне (например, наблюдения белого карлика HZ 43 с помощью спутника ROSAT).



Светимость БК в рентгене превышает светимость звезд ГП

- В рентгеновском диапазоне **светимость БК** превышает светимость звезд ГП:
- иллюстрацией могут служить снимки Сириуса, сделанные рентгеновским телескопом «*Chandra*» - на них БК Сириус Б выглядит ярче, чем Сириус А спектрального класса А1, который в оптическом диапазоне в 10 000 раз ярче Сириуса Б

Снимок Сириуса в мягком рентгеновском диапазоне. Яркий компонент – белый карлик Сириус Б, тусклый - Сириус А

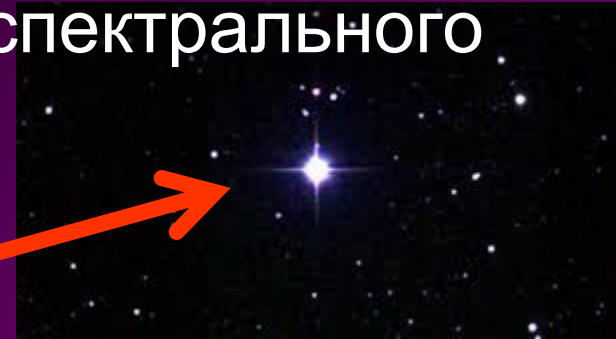


Диапазон температур поверхности БК



- Температура поверхности наиболее горячих белых карликов - $7 \cdot 10^4 \text{ K}^\circ$,
- наиболее холодных - меньше $4 \cdot 10^3 \text{ K}^\circ$ (см., например, **Звезда ван Маанена** и **WD 0346+246** с **SDSS J110217, 48+411315.4** спектрального класса **M0**).

Звезда ван Маанена





Особенностью излучения белых карликов в рентгеновском диапазоне



- является тот факт, что основным источником рентгеновского излучения для них является **фотосфера**, что резко отличает их от “**нормальных**” звёзд: у последних в **рентгене излучает корона**, разогретая до нескольких миллионов кельвин, а температура фотосферы слишком низка для испускания рентгеновского излучения.



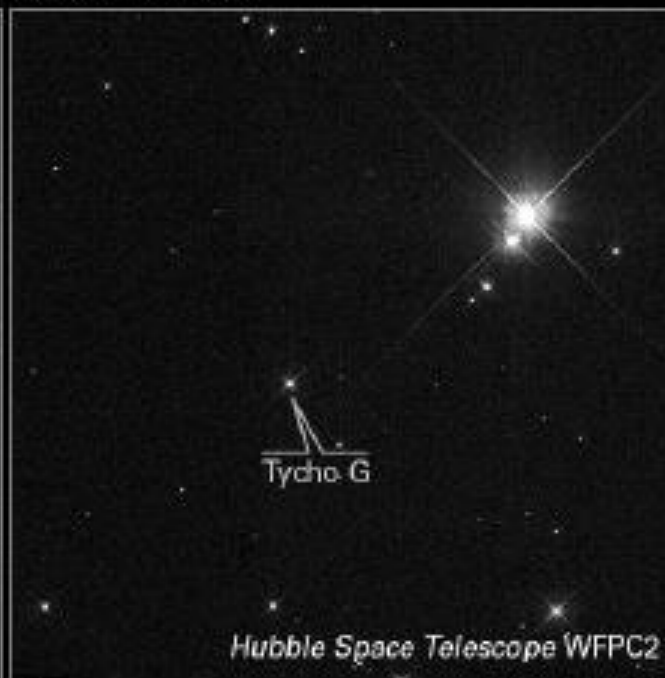
Остаток сверхновой SN 1572 типа Ia в рентгене



Candidate Progenitor Companion to Tycho's Supernova 1572



NASA, ESA and P. Ruiz-Lapuente (University of Barcelona)



STScI-PRC04-34

- Слева - изображение в рентгеновском диапазоне остатков сверхновой SN 1572 типа Ia, наблюдавшейся Тихо Браге в 1572 г. Справа - фотография в оптическом диапазоне, отмечен бывший компаньон взорвавшегося белого карлика



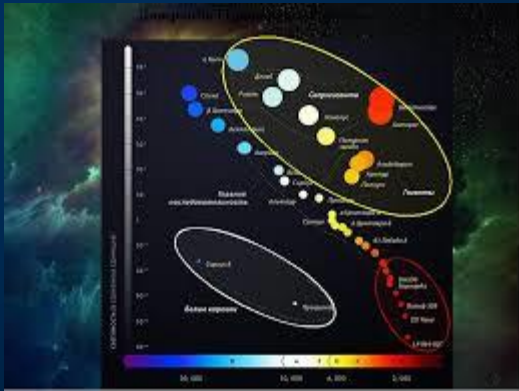
Аккреция на белые карлики в двойных системах



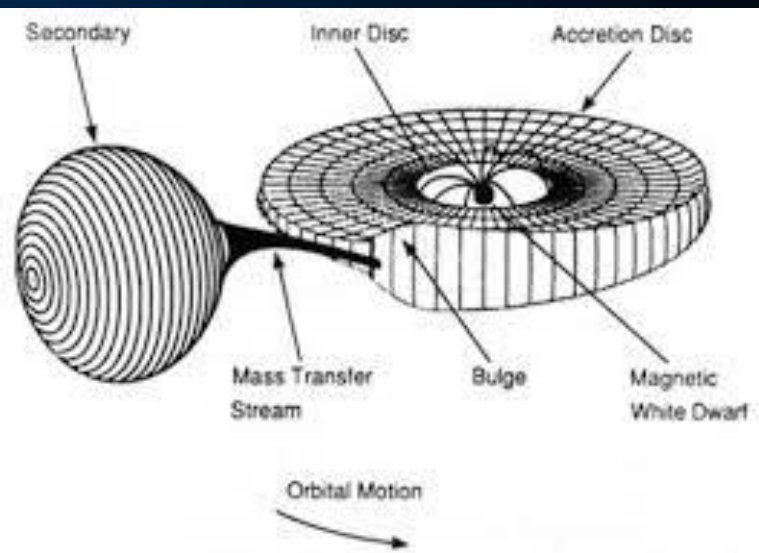
- При эволюции звёзд различных масс в двойных системах темпы эволюции компонентов неодинаковы, при этом более массивный компонент может проэволюционировать в белый карлик, в то время как менее массивный к этому времени может оставаться на главной последовательности.



Перетекание вещества в двойной системе с БК



- при сходе в процессе эволюции менее массивного компонента с ГП и его переходе на ветвь красных гигантов размер эволюционирующей звезды начинает **расти до тех пор, пока она не заполняет свою полость Роша.**



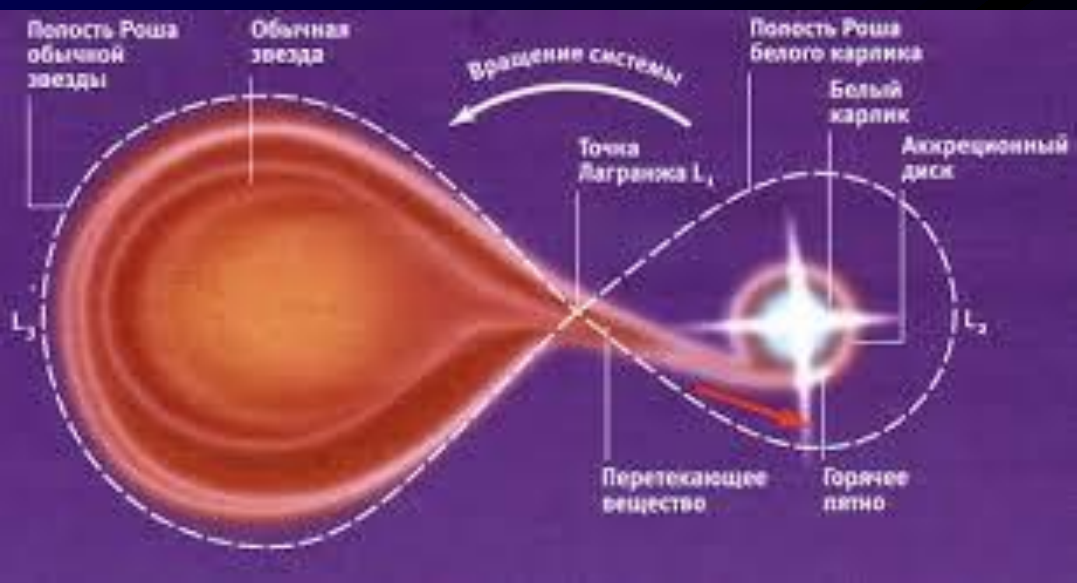


Модель Роша



- Полости Роша компонентов двойной системы соприкасаются в точке Лагранжа L_1 , =>

– на этой стадии эволюции менее массивного компонента чего через точку L_1 начинается переток материи с красного гиганта в полость Роша белого карлика и дальнейшая аккреция богатой водородом материи на его поверхность, что приводит к ряду астрономических феноменов:





Особенности БК в двойных системах



- Нестационарная аккреция на БК в случае, если компаньоном является массивный красный карлик, приводит к возникновению **карликовых новых** (звёзд типа U Gem (UG)) и новоподобных катастрофических переменных звёзд.



- Аккреция на БК, обладающие **сильным магнитным полем**, направляется в район магнитных полюсов белого карлика, и циклотронный механизм излучения аккрецирующей плазмы в околополярных областях магнитного поля карлика вызывает сильную поляризацию излучения в видимой области (**поляры и промежуточные поляры**).





– Аккреция на БК богатого водородом вещества приводит к его накоплению на поверхности (состоящей из гелия) и разогреву до температур реакции синтеза гелия, что, в случае развития тепловой неустойчивости, приводит к взрыву, наблюдаемому как **вспышка новой звезды**.



- Достаточно длительная и интенсивная аккреция на массивный БК приводит к превышению его массой предела Чандрасекара и **гравитационному коллапсу**, наблюдаемому как **вспышка сверхновой типа Ia**.



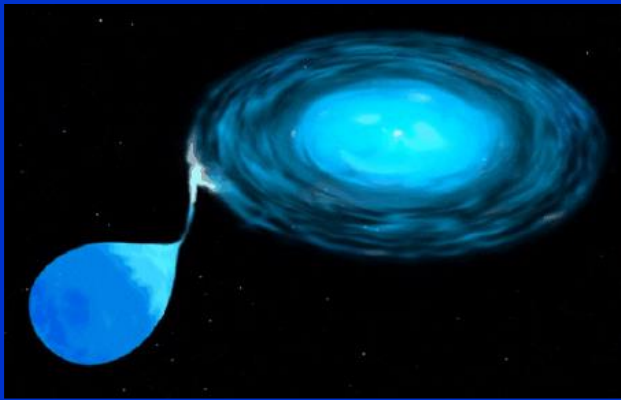
Белые карлики - самые загадочные объекты:



- ➔ **1)** очень любопытно выглядит процесс вырождения ядра звезды, в результате которого звездное вещество не разлетается в космосе, а наоборот, сжимается до невообразимых размеров;
- ➔ **2)** при отсутствии термоядерных реакций, белые карлики остаются достаточно горячими космическими объектами;
- ➔ **3)** эти звезды, имея высокую цветовую температуру, обладают низкой светимостью.

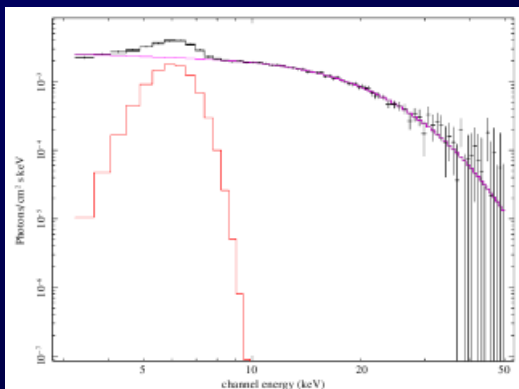


Катаклизмические переменные

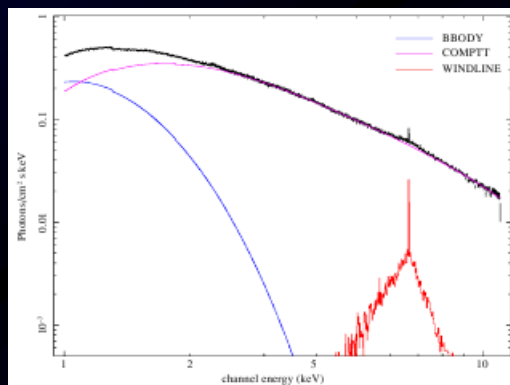


ТДС, состоящие из БК и проэволюционировавшей звезды, например, красного карлика

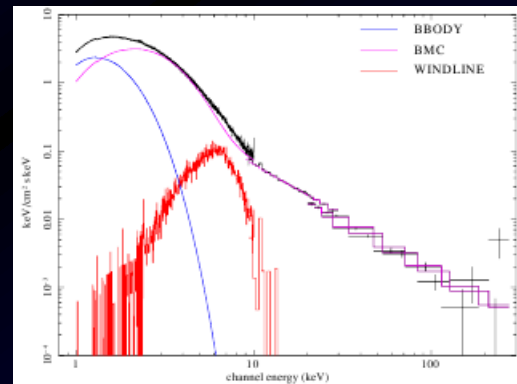
Нерелятивистское происхождение асимметрии красного крыла линий железа в катаклизмических переменных, источниках с НЗ и ЧД



GK Per



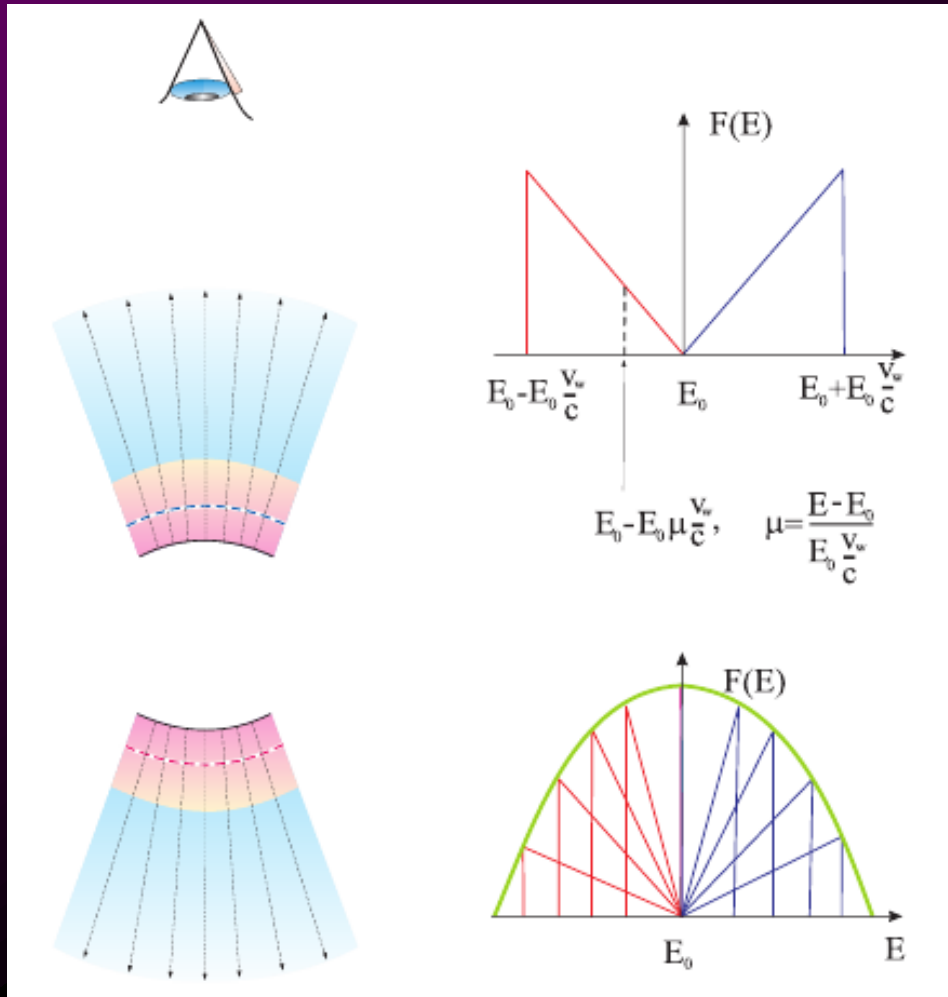
Ser X-1



GX 339-4



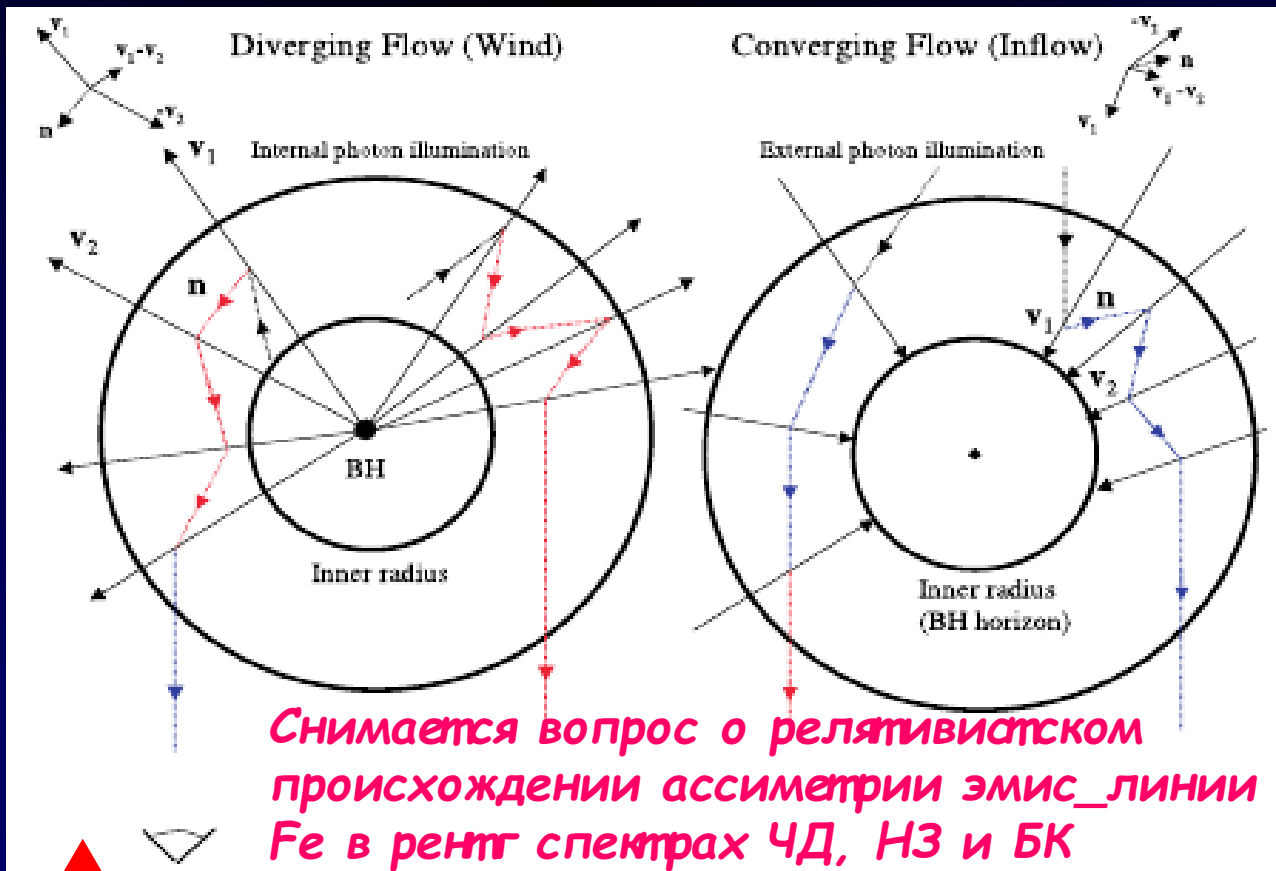
Формирование эмиссионных линий в оттекающем ветре



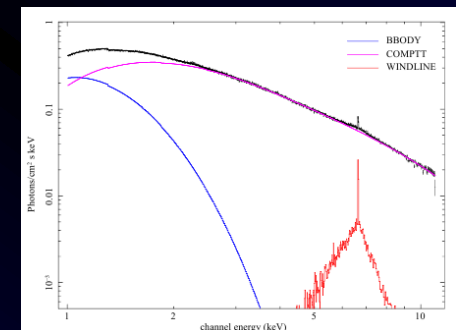
- Spherical wind geometry and wind line profiles of direct component



Случаи сходящегося и расходящегося ветрового потока



- Schematic diagram showing wind geometry.



Titarchuk, Laurent & Shaposhnikov, 2009, ApJ, 700, 1831



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 700:1831–1846, 2009 August 1

doi:10.1088/0004-637X/700/2/1831

© 2009. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in the U.S.A.

ON THE NONRELATIVISTIC ORIGIN OF RED-SKEWED IRON LINES IN CATAclySMIC VARIABLE, NEUTRON STAR, AND BLACK HOLE SOURCES

LEV TITARCHUK^{1,2,3,4,5}, PHILIPPE LAURENT^{6,7}, AND NIKOLAI SHAPOSHNIKOV^{8,9}

¹ George Mason University, Fairfax, VA 22030, USA; lev.titarchuk@arl.navy.mil

² US Naval Research Laboratory, Code 7655, Washington, DC 20375-5352, USA

³ Goddard Space Flight Center, NASA, code 663, Greenbelt MD 20771, USA

⁴ Physics Department, University of Ferrara, Via Saragat, I 44100 Ferrara, Italy

⁵ ICRANET Piazzale d. Repubblica 10-12 65122 Pescara (PE), Italy

⁶ CEA/DSM/DAPNIA/SAp, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France; pl Laurent@cea.fr

⁷ Laboratoire APC, 10 rue Alice Domont et Leonie Duquet, 75205 Paris Cedex 13, France

⁸ University of Maryland, Astronomy Department, College Park, MD 20742, USA

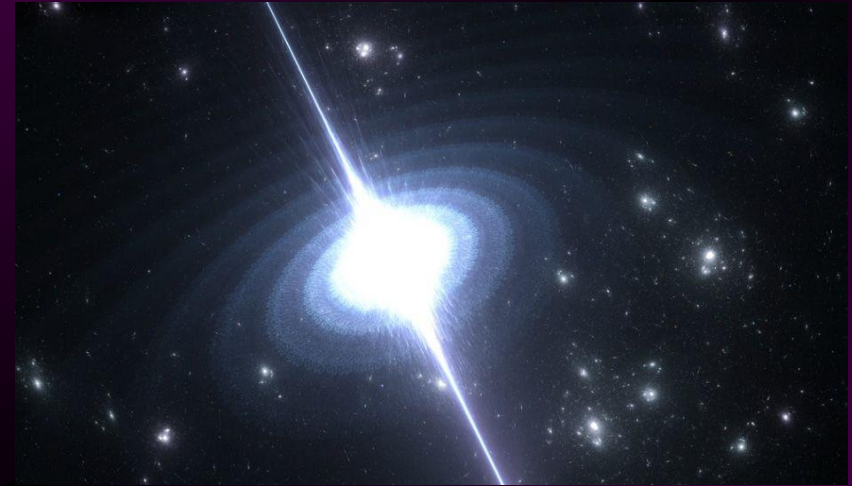
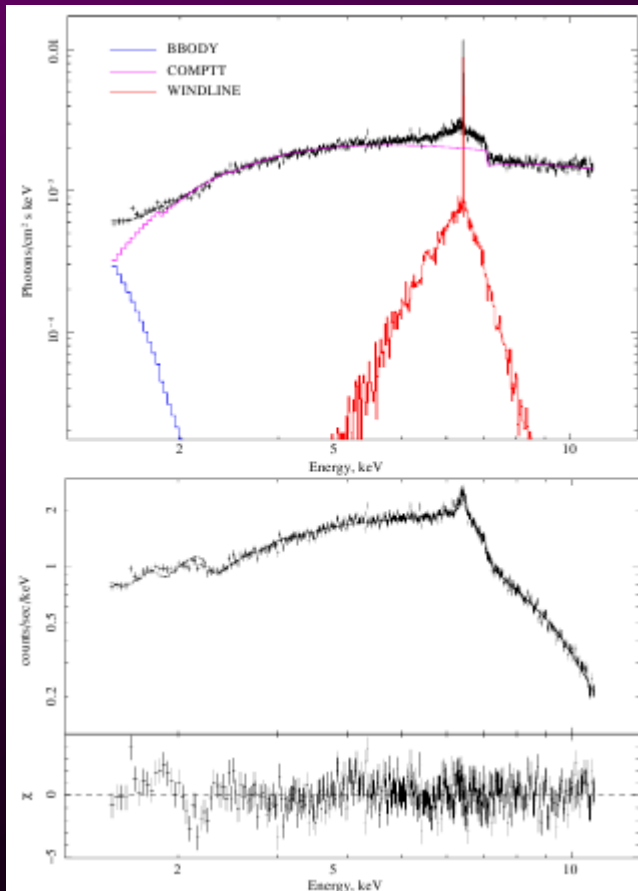
⁹ CRESST/GSPC/NASA, code 662, Greenbelt MD 20771, USA

Received 2008 December 31; accepted 2009 June 9; published 2009 July 16

ABSTRACT

We perform the analysis of the iron K_{α} lines detected in three sources representing three types of accreting compact sources: cataclysmic variable (CV) GK Per, neutron star (NS) Serpens X-1, and black hole (BH) GX 339-4. We find, using data from Epic-PN Camera onboard *XMM-Newton* observatory, that the iron K_{α} emission line in GK Per has a noticeable red-skewed profile. We compare the GK Per asymmetric line with the red-skewed lines observed by *XMM-Newton* in Serpens X-1 and GX 339-4. The observation of the K_{α} emission with red-skewed features in CV GK Per cannot be related to the redshift effects of General Relativity (GR). Therefore, if the mechanism of the K_{α} -line formation is the same in CVs, NSs, and BHs then it is evident that the GR effects would be ruled out as a cause

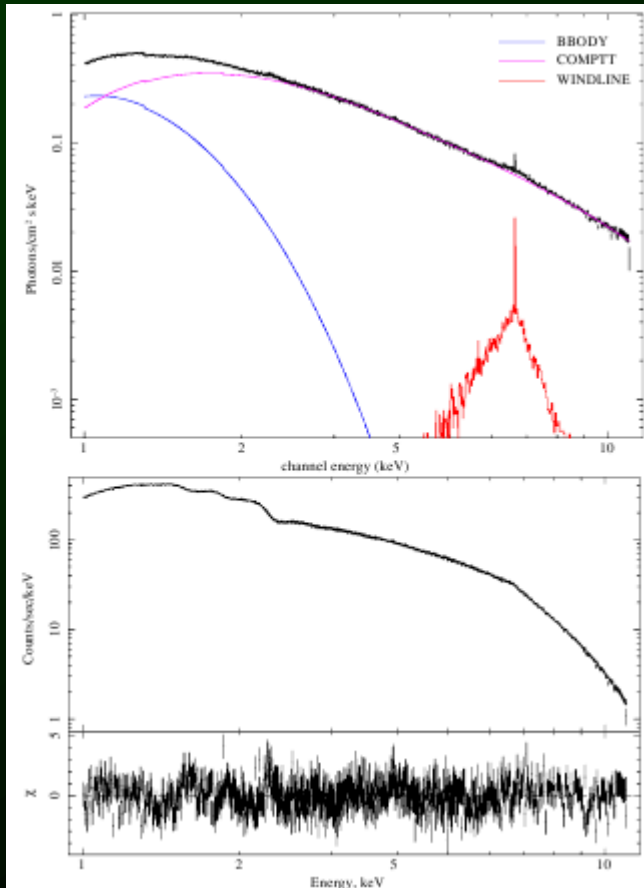
Асимметрия линии железа в БК



XMM-Newton observation of GK Per (rev. 412) The data (error bars), model (solid line). Here we have used the best-fit model
 $wabs*(COMPTT+BBODY+WINDLINE)*EDGE$



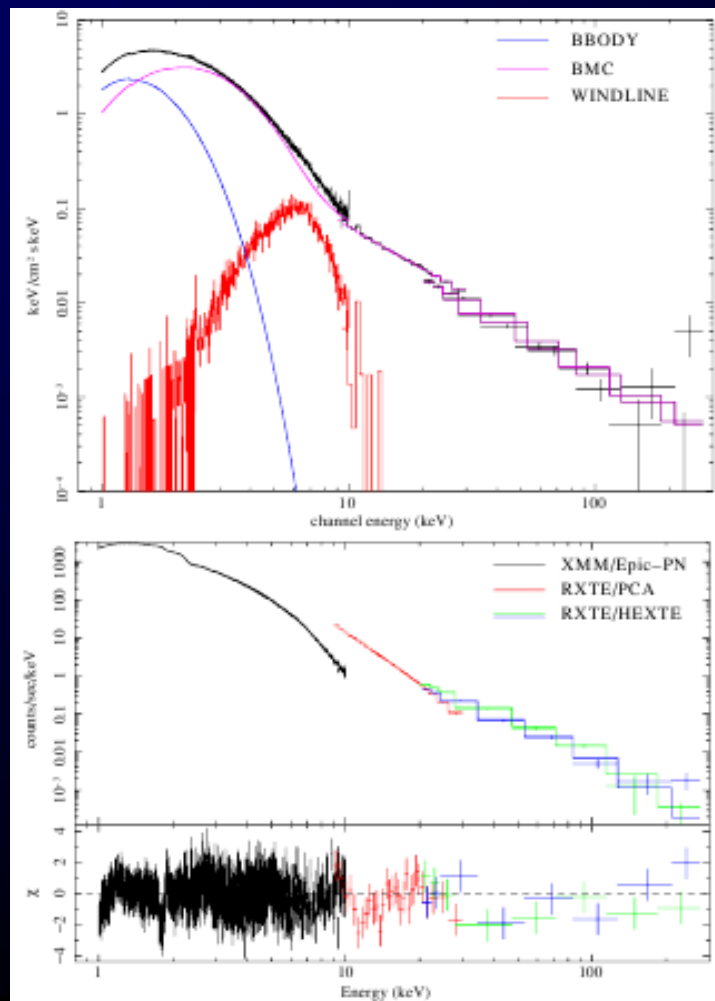
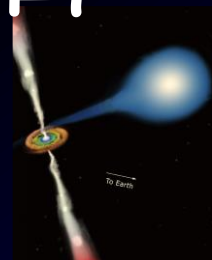
Асимметрия линии железа в H3



- XMM-Newton observation of Ser X-1 (XMM rev. 785)
The upper panel shows the data (error bars), model (solid line). Here we have used the best-fit XSPEC model $WABS*(COMPTT+BBODY+WINDLINE)$. The lower panel shows the count spectrum along the residual of the data vs. model in units of $\chi = (data - model)/\sigma$.



Асимметрия линии железа в ЧД



- XMM-Newton and RXTE joint observation of GX 339-4 on 2002 September 29 (Observation 2). Here we have used the best-fit XSPEC model $wabs*(BMC+BB+GAUSSIAN+WINDLINE)$ (see Table 4). In the top panel we show unfolded spectrum where different colors indicate different model components.
- The bottom panel shows count spectrum with data from different instruments shown by different colors

Снимается вопрос о релятивистском происхождении асимметрии эмис_линии Fe в рентг спектрах ЧД, НЗ и БК



Судьба **Солнца** - судьба белого карлика

- На эти и многие другие вопросы учеными всех мастей, астрофизикам, физикам и ядерщикам еще предстоит дать ответы, которые позволят предугадать **судьбу** нашего родного светила. Солнце ожидает судьба БК, однако остается под вопросом, сможет ли человек наблюдать **Солнце** в этой роли.





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



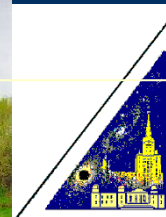


КОМПТОНИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

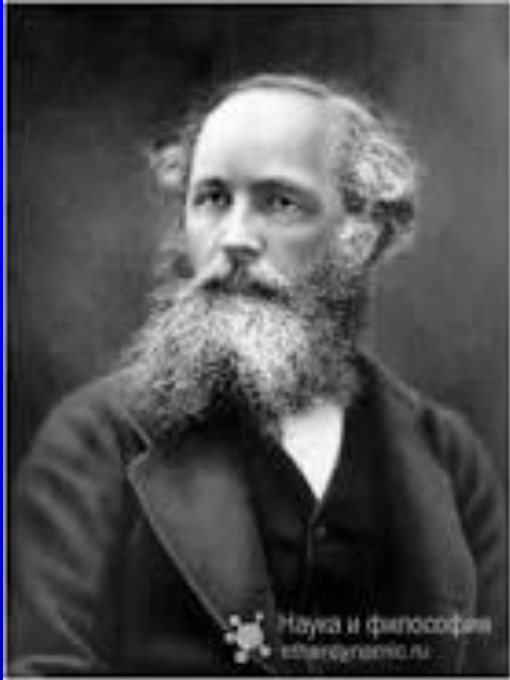
*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

БАЗИС

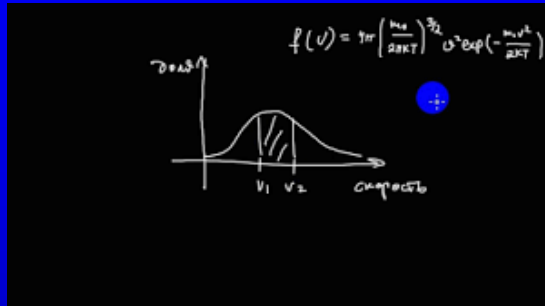




Обобщенные модели Комptonизации



Максвелл
Джеймс Клерк



■ **Комптонизация** – обмен энергией при рассеянии фотонов на электронах;

■ - изменение частоты фотонов в результате многократных комптоновских рассеяний на тепловых (т.е. с **распределением Максвелла** по энергиям) электронах.



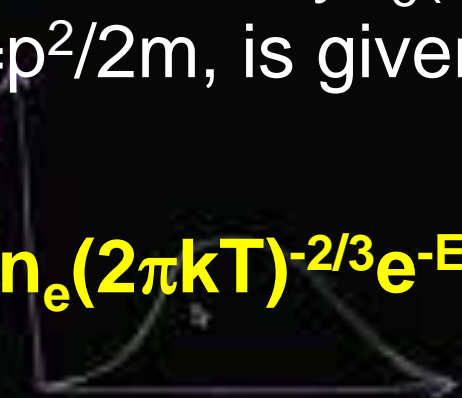
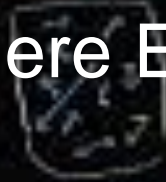


Тепловое распределение - Максвелловское распределение электронов по скоростям



Джеймс Клерк Максвелл

Распределение Максвелла — Больцмана



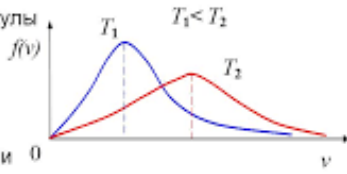
- For a thermal distribution of nonrelativistic electrons, the phase space density $f_e(E)$, where $E = p^2/2m$, is given by

$$f_e(E) = n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT}$$

Распределение Максвелла:

$$f(v) = \frac{dn}{ndv} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

m – масса молекулы



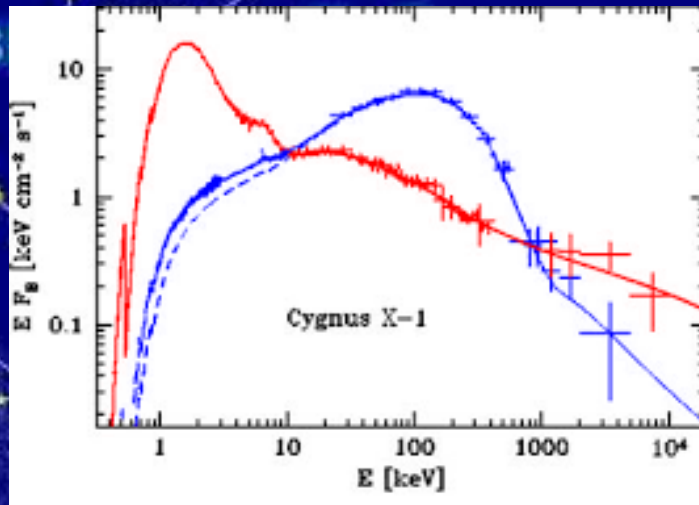
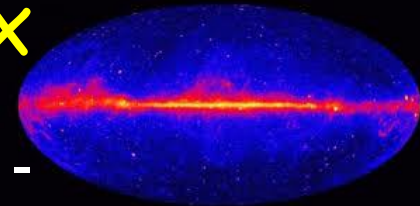
Распределение найдено с применением методов теории вероятности.

- Where n_e is the electron space density.

Нетепловое распределение - степенное распределение электронов по скоростям



Механизм обмена энергией между плазмой и излучением в компактных рентгеновских источниках



■ Комptonизация - важнейший механизмом обмена энергией между плазмой и излучением в ранней Вселенной и в компактных рентгеновских источниках.

■ Комptonизация в тепловой плазме может приводить к характерным степенным спектрам рентгеновского излучения, наблюдаемым в таких объектах, как Суг X-1, квазары и ядра галактик.

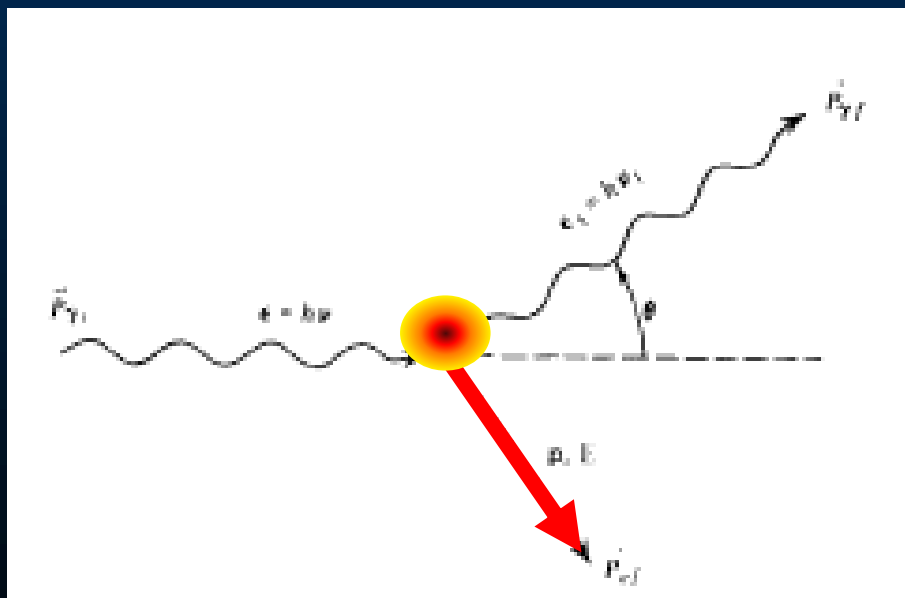




Изменение энергии и импульса фотона в результате одного рассеяния

- ➡ Два типа рассеяния:
- ➡ Рассеяние на **покоящемся** электроне
 - ➡ Рассеяние на **движущемся** электроне

E



E_1

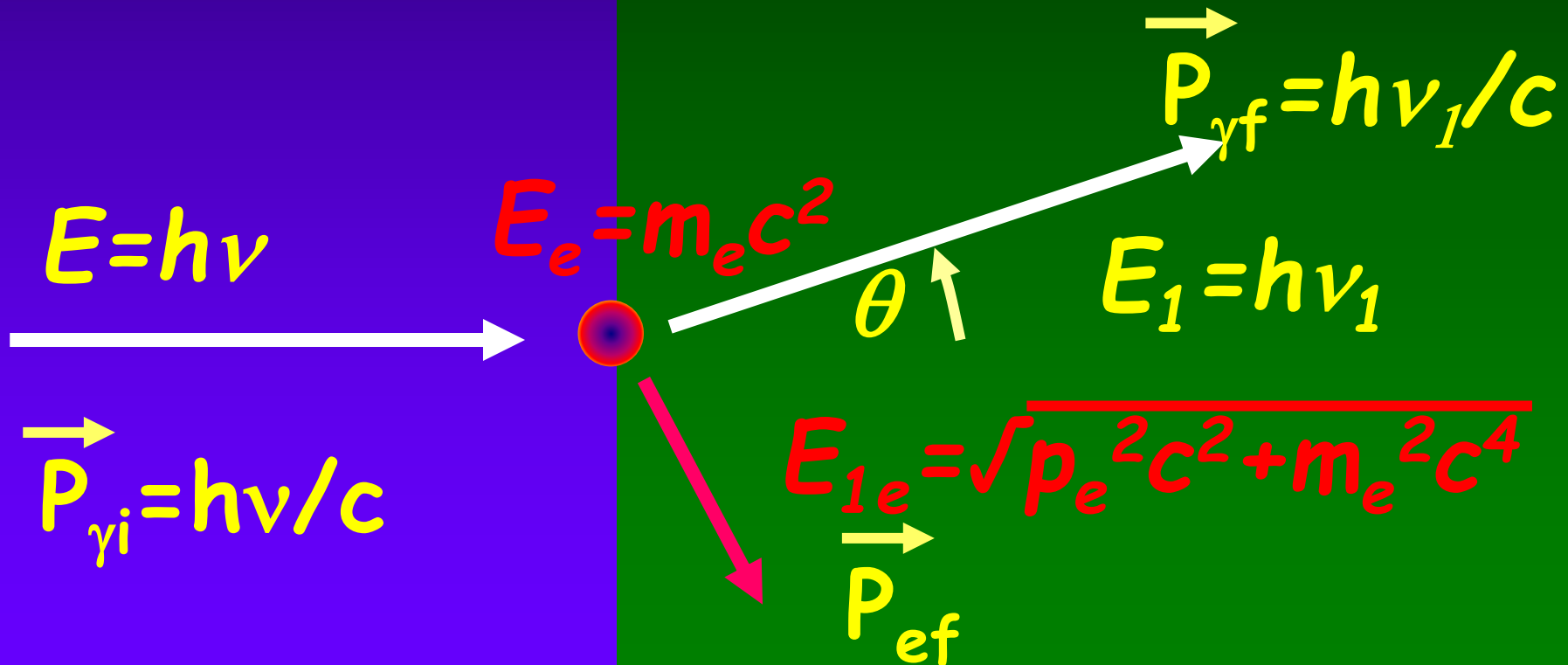
$m_e c^2$

?



Неупругое рассеяние, $E \neq E_1$

- ➡ Закон сохранения энергии
- ➡ Закон сохранения момента движения





Закон сохранения момента движения и энергии

$$\vec{P}_{e1} + \vec{P}_{\gamma1} = \vec{P}_{e2} + \vec{P}_{\gamma2}$$

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon}{1 + \frac{\epsilon}{mc^2} (1 - \cos \theta)}$$



1) Закон сохранения энергии

- $E + E_e = E_1 + E_e'$
- $h\nu + m_e c^2 = h\nu_1 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$ (*)



Элементы релятивистской динамики

Энергия фотона после рассеяния

$$\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

- $E = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \rightarrow (E/mc^2)^2 = \gamma^2$
- $P = mv / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \rightarrow \underline{(p/mc)^2 = (v/c)^2 \gamma^2}$
- term-by-term subtraction
- $(1/mc^2)^2 [E^2 - (pc)^2] = (1 - (v/c)^2) / (1 - (v/c)^2) = 1$
- $E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \rightarrow E = \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$



2) Закон сохранения момента движения

- $\vec{P} = \vec{P}_1 + \vec{P}_e$ (электрон покоился \Rightarrow его импульс был $=0$)

- cosine theorem:

- $P_e^2 = (E/c)^2 + (E_1/c)^2 - 2EE_1 \cos \theta / c^2$ (**)

- 1) $h\nu + m_e c^2 = h\nu_1 + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$ (*)

- $h^2(\nu - \nu_1)^2 + (m_e c^2)^2 + 2h(\nu - \nu_1) m_e c^2 = m_e^2 c^4 + (**)^2 c^2$

Энергия фотона $h\nu_1$
после рассеяния на
покоящемся электроны:

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon}{1 + \frac{\epsilon}{mc^2} (1 - \cos \theta)}$$



Что изменится в записи законов сохранения, когда электрон является подвижным ?

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1 - \mu v/c}{1 - \mu' v'/c + (h\nu/\gamma m c^2)(1 - \cos \alpha)}$$

• ...

$$\mu = \Omega \cdot \mathbf{v}/v, \mu' = \Omega' \cdot \mathbf{v}'/v'$$

• Если $\mathbf{v} = 0$, то частота (энергия) фотона изменяется из-за эффекта отдачи

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{1}{1 + (h\nu/mc^2)(1 - \cos \alpha)}$$



Обобщенные модели Комptonизации

- **Средняя энергия обмена при рассеянии определяется соотношением между энергиями фотонов и электронов:**
 - Для теплового распределения электронов с kT_e и нерелятивистских фотонов с $h\nu$ ($h\nu \ll m_e c^2$)

$$\frac{\langle \Delta\nu \rangle}{\nu} = \frac{4kT_e}{m_e c^2}$$

$$- h\nu \ll kT_e$$



Сечение Комптоновского рассеяния

- Полное сечение дается формулой Клейна-Нишины

$$\sigma = \frac{2\pi r_e^2}{x} \times \left[\left(1 - \frac{4}{x} + \frac{8}{x^2} \right) \ln(1+x) + \frac{1}{2} + \frac{8}{x} - \frac{1}{2(1+x)^2} \right]$$

- В нерелятивистском случае ($x \ll 1$)

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} r_e^2 (1-x) = \sigma_T (1-x),$$

- В ультрарелятивистском случае ($x \gg 1$)

- Где $x = h\nu/kT_e$

$$\sigma = 2\pi r_e^2 x^{-1} (\ln x + \frac{1}{2})$$



Что может случиться с частицей (электроном) в фазовом пространстве?



- В фазовом пространстве частица (электрон) характеризуется координатами (x, y, z) и импульсом (P_x, P_y, P_z) . Что может случиться с частицей – изменение по:
 - времени t ,
 - координате x ,
 - импульсу P .
- Если предположить, что пространство **бесконечно**, то d/dx – исключается и остается только изменение по t и P .
- Закон сохранения – **уравнение Больцмана**, оно детализирует, за счет чего меняется плотность фотонов:
 - рассеяние
 - поглощение
 - “приход/уход”



Больцман
Людвиг

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \text{приход} - \text{уход}$$

$$\left(p + \omega \right) \approx \left(p_1 + \omega_1 \right)$$



УРАВНЕНИЕ КОМПАНЕЙЦА

- Рассмотрим изменение **плотности фотонов** в фазовом пространстве $n(\omega)$ из-за рассеяния на электронах. Предположим, что $n(\omega)$ является изотропной. Пусть $f_e(p)$ – фазовая плотность **электронов** с моментом p , тогда уравнение Больцмана для $n(\omega)$:



Компанеец
Александр
Соломонович

*Stimulated
scattering
effect*
(статистика
Бозе-
Эйнштейна)

$$\frac{dn(\omega)}{dt} = c \int d^3p \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega [\overset{\text{приход}}{f_e(p_1)n(\omega_1)(1+n(\omega))} - \underset{\text{уход}}{f_e(p)n(\omega)(1+n(\omega_1))}]$$

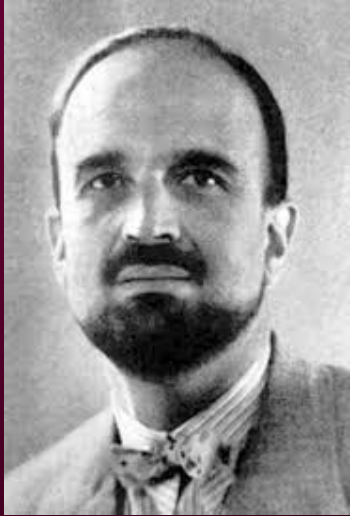
$$p + \omega \approx p_1 + \omega_1$$



Всмирный Апокалипсис
© Николай Соболев, 2011



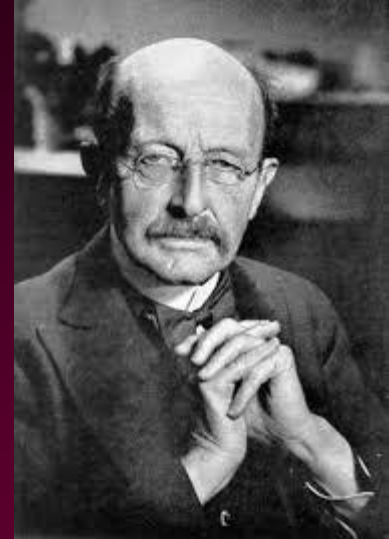
Уравнение Фоккера-Планка



Фоккер Адриан
Даниэль

➤ Когда **электроны не релятивистские**, относительная передача энергии при одном рассеянии является **небольшой**. В частности, уравнение Больцмана может быть разложено в ряд **до второго порядка** по этой малой величине, давая приближение, называемое уравнением Фоккера-Планка.

➤ Для фотонов, рассеивающихся на нерелятивистских, **электронах с тепловым рассеянием**, уравнением Фоккера-Планка было впервые получено **А.С. Компанейцем** (1957) и известно как **уравнение Компанейца**



Макс Карл Эрнст
Людвиг Планк



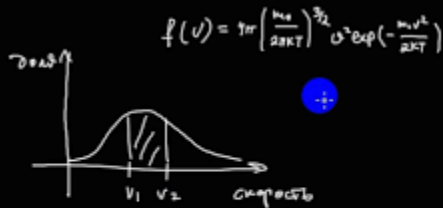


Уравнение Фоккера-Планка



Фоккер Адриан
Даниэль

- Для нерелятивистских электронов с «тепловым» распределением, плотность в фазовом пространстве $f_e(E)$, где $E = p^2/2m$, дается формулой



$$f_e(E) = n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT}$$



• где n_e – пространственная плотность электроном. Определим безразмерную передачу энергии фотонам



Макс Карл Эрнст
Людвиг Планк

$$\Delta E \equiv \frac{h(\omega_1 - \omega)}{kT}$$



- Теперь рассмотрим ситуацию, когда передаваемая энергия мала, и разложим $f_e(E)$ и $n(\omega_1)$ для этого случая. Например, для $n(\omega_1)$ это разложение до второго порядка имеет вид

$$n(\omega_1) = n(\omega) + (\omega_1 - \omega) \frac{\partial n(\omega)}{\partial \omega} + \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega)^2 \frac{\partial^2 n(\omega)}{\partial \omega^2} + \dots$$

- Далее, полагая

$$x \equiv \frac{\hbar\omega}{kT}$$

$$\frac{\partial n(\omega)}{\partial t} = c \int d^3p \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega [f_e(p_1) n(\omega_1) (1 + n(\omega)) - f_e(p) n(\omega) (1 + n(\omega_1))]$$



Повторные рассеяния на нерелятивистских электронах: **Уравнение Компанейца**



Компанец
Александр
Соломонович

- Мы получили, до второго порядка по Δ



$$c^{-1} \frac{\partial n}{\partial t} = [n' + n(1+n)] \int \int d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta$$

$$+ \left[\frac{1}{2} n'' + n'(1+n) + \frac{1}{2} n(1+n) \right] \int \int d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta^2,$$



$$n' \equiv \partial n / \partial x$$



$$f_e(E) = n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT}$$

$$\frac{\Delta \epsilon'}{\epsilon'} \equiv \frac{\epsilon'_1 - \epsilon'}{\epsilon'} = -\frac{\epsilon'}{mc^2}$$

$$\frac{\partial f_e(E)}{\partial E} = (-E/kT) n_e (2\pi kT)^{-2/3} e^{-E/kT} = (1/kT) f_e(E)$$

Учтем, что электрон отдает энергию фотону и приращение его энергии отрицательное

$$\frac{\partial^2 f_e(E)}{\partial E^2} = (1/kT)^2 f_e(E)$$

$$f_e(E) \approx 1 + \Delta + \frac{1}{2} \Delta^2$$

$$\frac{\partial n(\omega)}{\partial t} = c \int d^3p \int \frac{d\omega'}{\omega'} d\Omega' [f_e(\mathbf{p}_1) n(\omega_1) (1 + n(\omega)) - f_e(\mathbf{p}) n(\omega) (1 + n(\omega_1))]$$



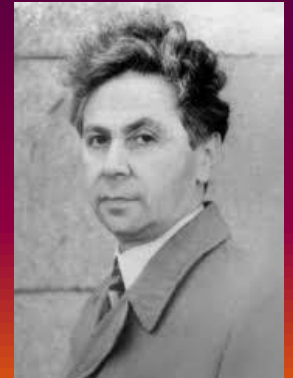
Уравнение Больцмана в разложении **ДО** **ВТОРОГО** порядка



Больцман
Людвиг



$$c^{-1} \frac{\partial n}{\partial t} = [n' + n(1+n)] \int \int d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta$$
$$+ \left[\frac{1}{2} n'' + n'(1+n) + \frac{1}{2} n(1+n) \right] \int \int d^3p \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega f_e \Delta^2,$$



Компанеец
Александр
Соломонович



Ограниченная среда - «облако»

- Перейдем от случая бесконечной среды к случаю ограниченной среды





Передача энергии при многократных рассеяниях в **ограниченной** тепловой среде: параметр Комptonизации γ



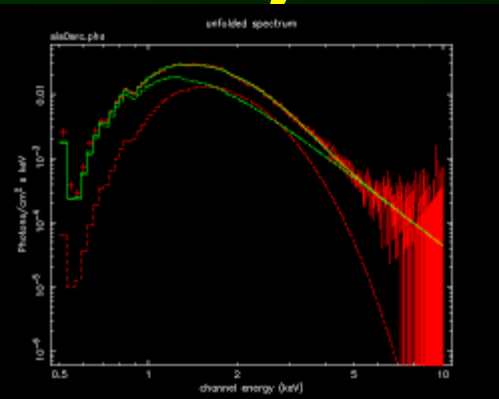
- Каковы условия, при которых процесс рассеяния значительно изменяет полную энергию фотона ?
- Ограничимся рассмотрением ситуаций, в которых применим Томсоновский предел:
 $\gamma E < mc^2$



Параметр Комптонизации γ

- В ограниченной среде можно определить **параметр Комптонизации γ** , для оценки того, насколько велико изменение его энергии при прохождении среды:

$$\alpha \sim 1/\gamma$$



α – спектральный индекс

$$\gamma = \left[\begin{array}{l} \text{average fractional} \\ \text{energy change per} \\ \text{scattering} \end{array} \right] \times \left(\begin{array}{l} \text{mean number of} \\ \text{scatterings} \end{array} \right).$$



Удобно перейти к безразмерным величинам:

$$x = \frac{h\nu}{kT_e} \quad y = \int \frac{kT_e(t)}{m_e c^2} \sigma_T N_e c dt \quad \text{- комптонизационный параметр}$$

Отдача (Комптон-эффект)

Допплер

$$\frac{\partial n}{\partial y} = \frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} x^4 \left(n + n^2 + \frac{\partial n}{\partial x} \right)$$

$$h\nu, kT_e \ll m_e c^2$$

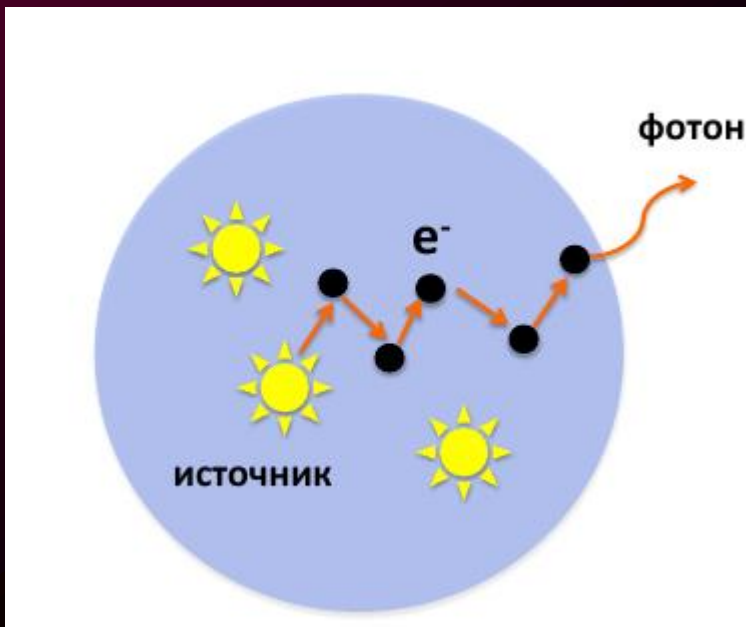
Индукированное
рассеяние



В ограниченной плазменной среде:

Существуют и влияют на формирование спектра процессы двух типов:

- Диффузия фотонов по пространству
- Диффузия фотонов по времени



фотоны получают и теряют энергию при свободном блуждании в облаке плазмы



Комптонизационный параметр y

$$y_{\text{nr}} = \frac{4kT_e}{m_e c^2} \sigma_T N_e t$$

- Определяет энергию фотонов, получаемую за счет эффекта Доплера при их блуждании вдоль случайной траектории за время t

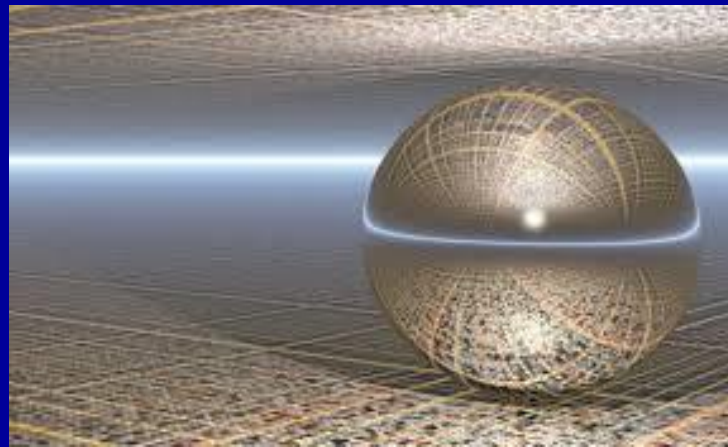
$$y = 4 \int \frac{kT_e(t)}{m_e c^2} \sigma_T N_e c dt$$



Граничное условие (наложенное «руками»)

- Фотоны не входят в облако плазмы
- Для $\tau_0 \gg 1$ среднее число рассеяний $\sim \tau_0^2$ и Комптониционный параметр

$$y \sim \frac{4kT_e}{m_e c^2} \tau_0^2$$



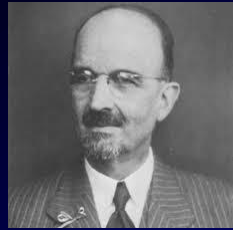


Теория переноса излучения



Макс Карл Эрнст
Людвиг Планк

- Фотоны, которые подвергаются более, чем одному рассеянию ($N > 1$), независимо от τ облака плазмы, создают обычно **диффузионное** поле излучения и могут быть описаны в диффузионном (Фоккера-Планка) приближении



Фоккер
Даниэль

Рассмотрим случай $\tau \gg 1$





- Транспортное сечение Комптоновского рассеяния, усредненное по Максвелловскому распределению

$$\sigma_{tr} = \frac{\sigma_T}{\lambda_{tr}(\nu, \Theta)} = \int \left(1 - \frac{\nu}{\nu'} \cos \vartheta \right) d\sigma_c(\nu \rightarrow \nu')$$



- ν и ν' – частоты фотонов до и после рассеяния, θ – угол рассеяния фотона, σ_T – Томсоновское сечение и безразмерная температура плазмы

$$\Theta = \frac{kT_e}{m_e c^2}$$

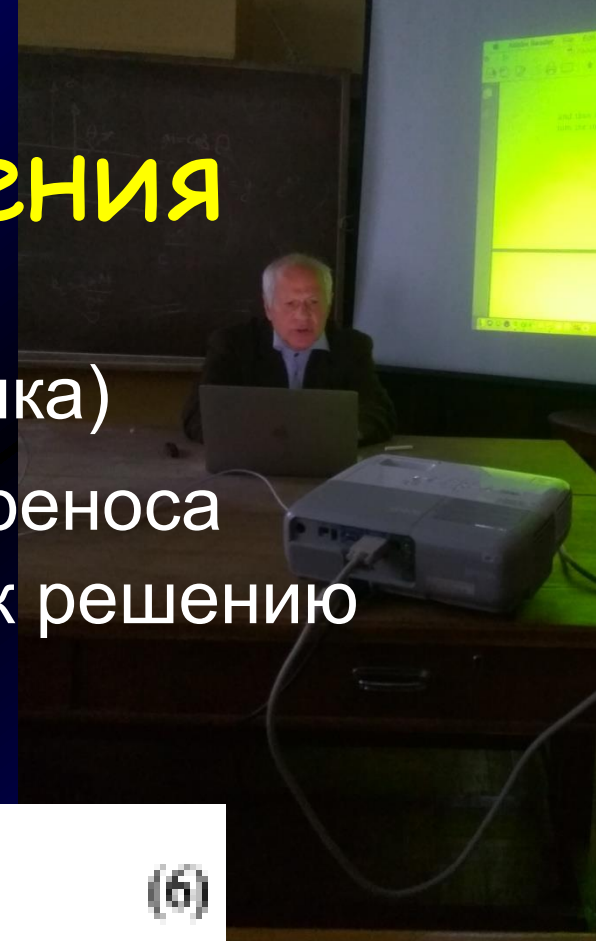


Основные уравнения

- В диффузионном (Фоккера-Планка) приближении ($\tau \gg 1$) задача переноса излучения может быть сведена к решению дифференциального уравнения

$$L_r n + L_r^{(0)} n = - \frac{B_0(x, \tau) \lambda_0^{-1}(x) \Theta}{x^3} \quad (6)$$

- с соответствующими граничными условиями





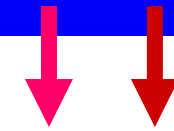
• Здесь

$$L_{\nu} = \frac{\Theta \lambda_{T_e}^{-1}(x\Theta)}{x^3} \frac{\partial}{\partial x} \left[n(x\Theta, \Theta) \left(\frac{\partial}{\partial x} + E \right) \right].$$

- И пространственные операторы L_{ν}^d для сферической и плоской геометрий. Перепишем Eq.(6) используя безразмерные переменные
 - $\tau = \tau_T$ и $x = hv/kT_e$
 - $n(x, \tau) = I_{\nu} c^2 / 2 \nu^3$ - число заполнения фотонов
 - $B_0(x, \tau)$ - исходное распределение источников
- 1-ый член в Eq.(6) описывает дисперсию и смещение фотонов из-за эффектов **Доплера и отдачи** на электронах.
- 2-ой член – связан с **пространственной диффузией**



- Если предположить, что правая часть Eq.(6)

$$\Phi(\tau, x) = \frac{B_0(x, \tau) \lambda_{\tau}^{-1}(x \Theta)}{x^2} = \phi(x) r(\tau),$$


- Т.е. факториальна по x и τ , то решение Eq.(6) может быть представлено следующей конволюцией:





$$n(x, \tau) = \int_0^{\infty} N(x, u) R(\tau, u) du .$$

- $N(x, u)$ – решение, зависящее от времени для пространства энергий с $x > 0$:

$$\frac{\partial N}{\partial u} = L_x N .$$

- С начальным условием

$$N(x, 0) = \psi(x)$$





- $R(\tau, u)$ - решение, зависящее от времени в пространстве $0 \leq \tau \leq 2\tau_0$ для диска и в $0 \leq \tau \leq \tau_0$ для сферического облака плазмы:

$$\frac{\partial R}{\partial u} = L_{\tau}^{(d)} R$$



- С начальным условием $R(\tau, 0) = r(\tau)$
- Если $r(\tau)$ равно первой собственной функции $L_{\tau}^{(d)}$ то

$$R(\tau, u) = R_1(\tau) \exp(-\beta u) .$$



- ➡ Основное решение $n(\tau, u)$ имеет очень простую форму

$$n(x, \tau) = n_1(x, \tau) = R_1(\tau) \int_0^{\infty} N(x, u) e^{-\beta u} du = R_1(\tau) N_1(x) .$$

- ➡ Смысл конволюций – процесс получения фотонами энергии и процесс свободного блуждания фотонов через облако плазмы должны рассматриваться независимо друг от друга

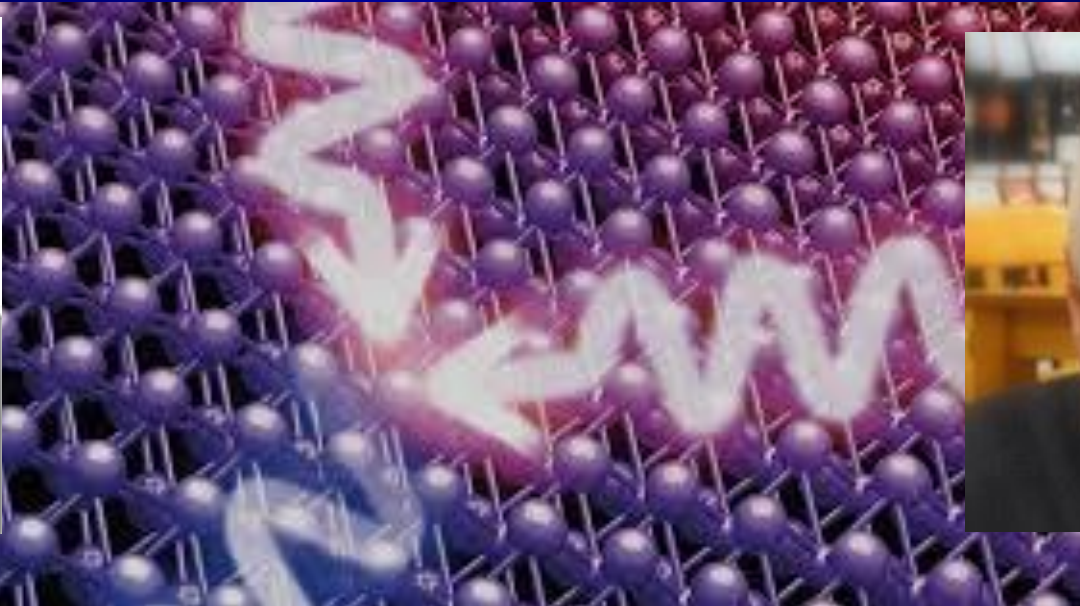


получения
фотонами
энергии

Свободное
блуждание
фотонов



- И Комptonизационная задача сводится к решению стационарного уравнения Комptonизации $L_1 N_1 - \beta N_1 = -\psi(x)$



- *Решение см. в статье Sunyaev & Titarchuk, 1980, A&A, 86, 121*



Комптонизация рентгеновского излучения в облаке плазмы. Типичные спектры

Astron. Astrophys. 86, 121–138 (1980)



ASTRONOMY
AND
ASTROPHYSICS



Comptonization of X-rays in Plasma Clouds. Typical Radiation Spectra

R. A. Sunyaev and L. G. Titarchuk

Space Research Institute, USSR Academy of Sciences, Profsoyuznaja 84/32, Moscow 117810, USSR

Received March 30, 1979

Summary. A cloud of completely ionized plasma with sources of photons distributed in it is considered. The photon diffusion problem is solved and the distribution of the photons over their escape times is found to be similar to the light curve for X-ray

The Second Problem

It is known that multiple scatterings of X-ray photons on thermal electrons result in comptonization of the radiation – that is in



Сохранение числа фотонов

- Комptonовское рассеяние **сохраняет** число фотонов и лишь **перераспределяет** их по спектру. Поэтому Комptonизация в газе с заданной T_e не может сформировать планковский спектр излучения даже за бесконечное время.



Сюняев и Титарчук (1980) записали и решили стационарное уравнение Компанейца ($\tau \gg 1$):

Doppler effect

$$\frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial x} x^4 \left(\frac{\partial n}{\partial x} + n \right) = \gamma n - \frac{\gamma f(x)}{x^3}$$

спектр источника

Compton effect

**пространственная
диффузия фотонов**

$$\gamma = \frac{\pi^2}{3} \frac{m_e c^2}{(\tau + 2/3)^2 kT_e}$$

**коэффициент зависит
от геометрии**



Сюняев Р.А.



Титарчук И.И.



◆ Решение при $x_0 \ll x \ll 1$:

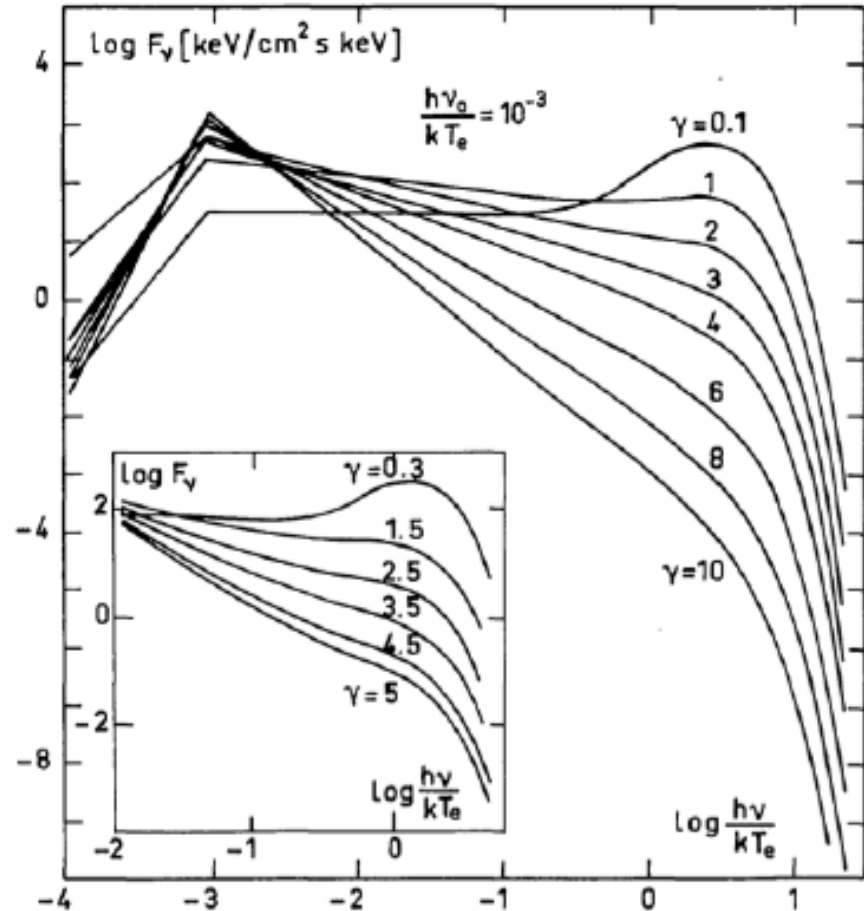
$$F_\nu(x) = Cx^{-\alpha}$$

$$\alpha = -\frac{3}{2} + \sqrt{\frac{9}{4} + \gamma}$$

◆ При $x \gg 1$:

$$F_\nu(x) = Dx^3 e^{-x}$$

- спектр Вина

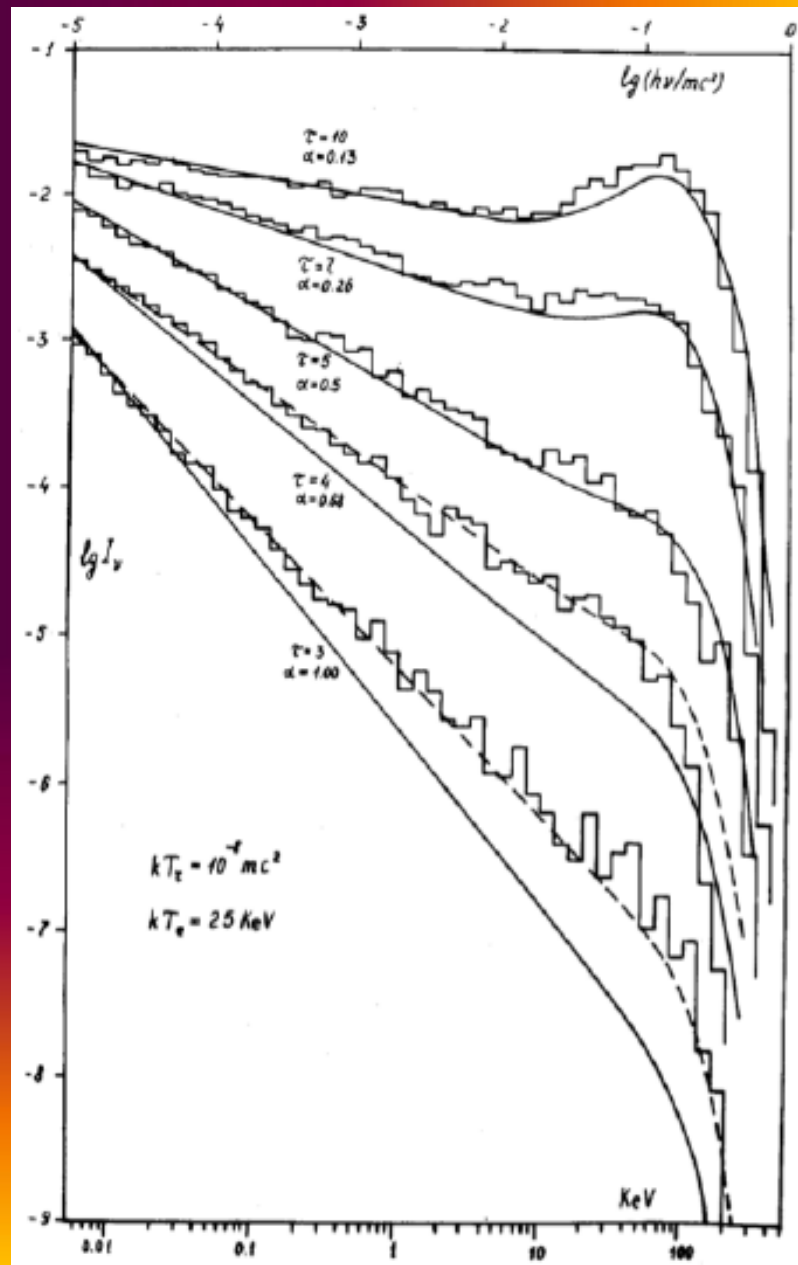
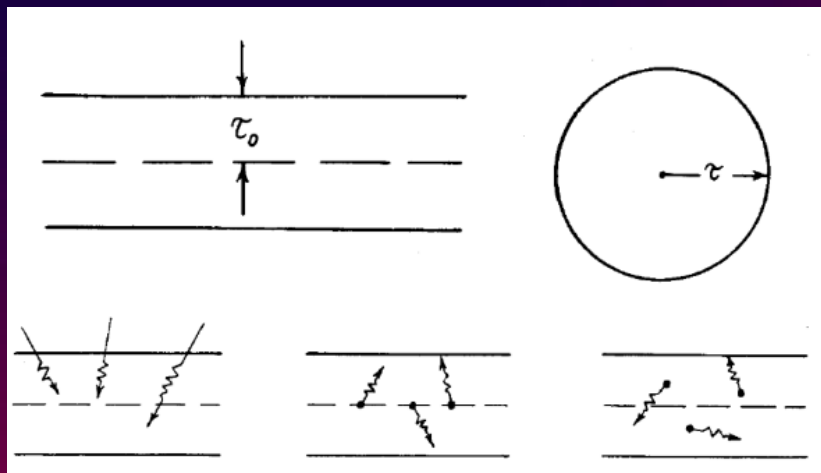


◆ При $\gamma \ll 1$ насыщение в спектр Вина



Если $\tau \leq 1$ и/или $kT_e \leq m_e c^2$,

необходимы численные расчеты методом Монте-Карло



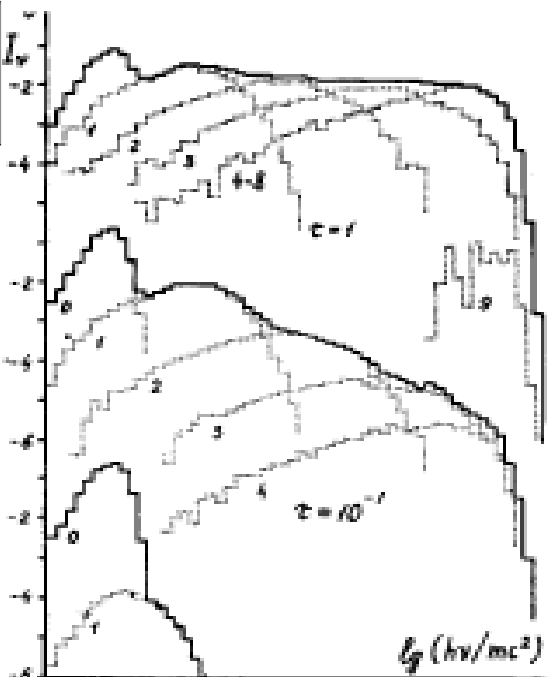
Поздняков и др. 1983



Comptonization and the shaping of X-ray source spectra: Monte-Carlo calculations

(Поздняков, Соболев, Сюняев, 1983, ASPR, 2, 189)

- **Abstract** -- Дано детальное описание комптоновского рассеяния в **тепловой** плазме; приведены асимптотические формулы, описывающие среднюю длину пробега фотона и силу давления света в **максвелловской** плазме с учетом **релятивистских** и квантовых поправок; описан **двойной комптон-эффект**, рассматривается связь между **количеством рассеяний**, испытанных фотоном в плазме, и его частотой; обсуждается угловое распределение и поляризация фотонов, выходящих из аккреционных дисков конечной оптической толщины по томсоновскому рассеянию; описана комптонизация излучения в **немаксвелловской ультрарелятивистской** плазме.

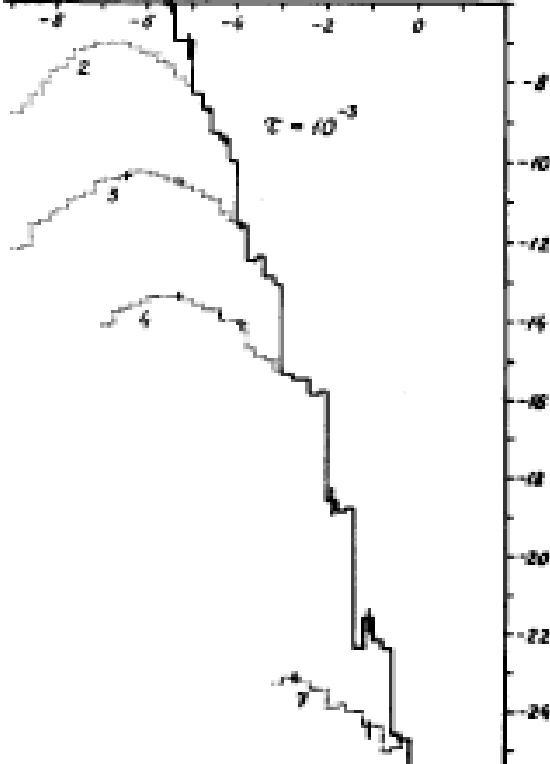


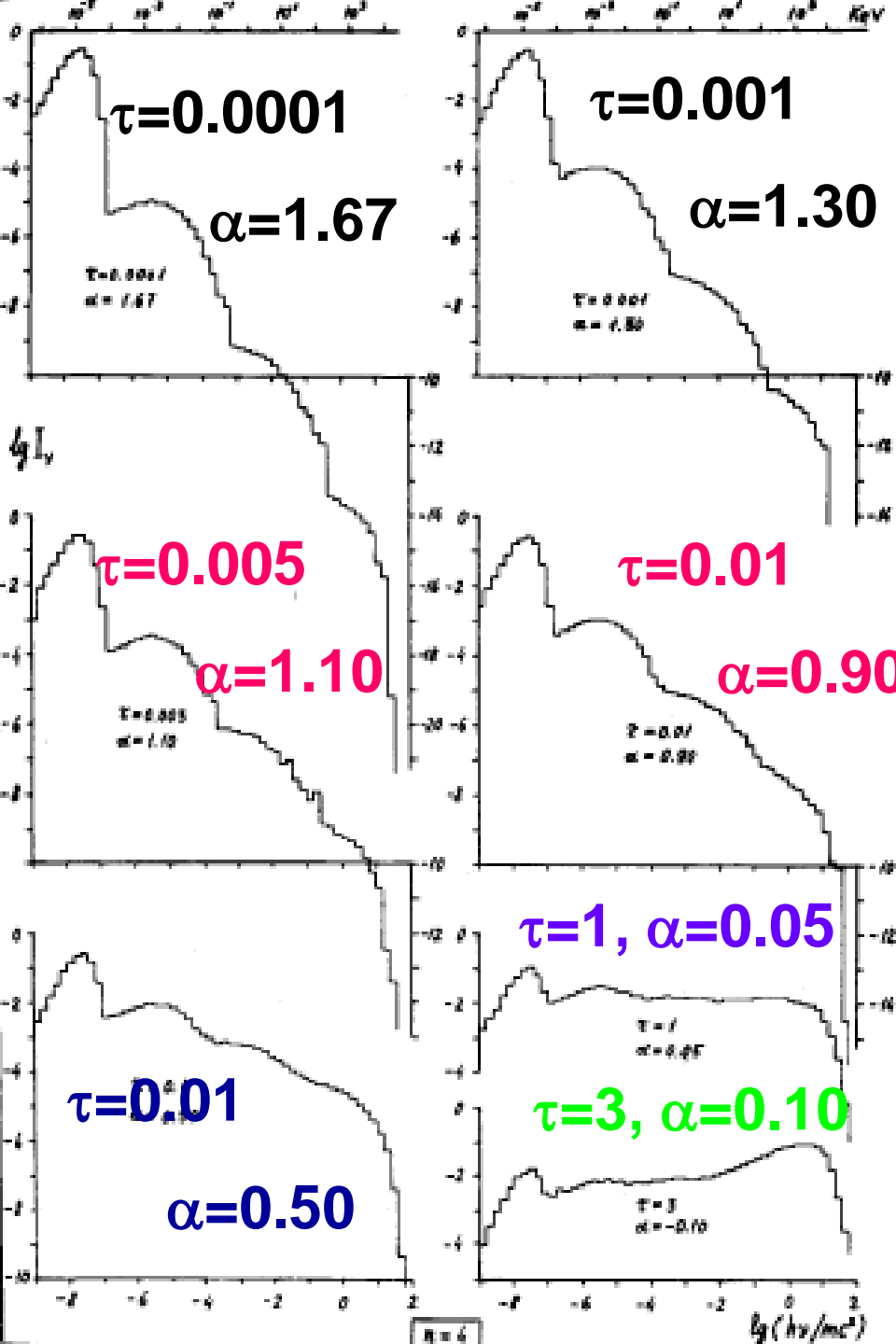
$\tau=1$ Зависимость от τ

$\tau=0.1$

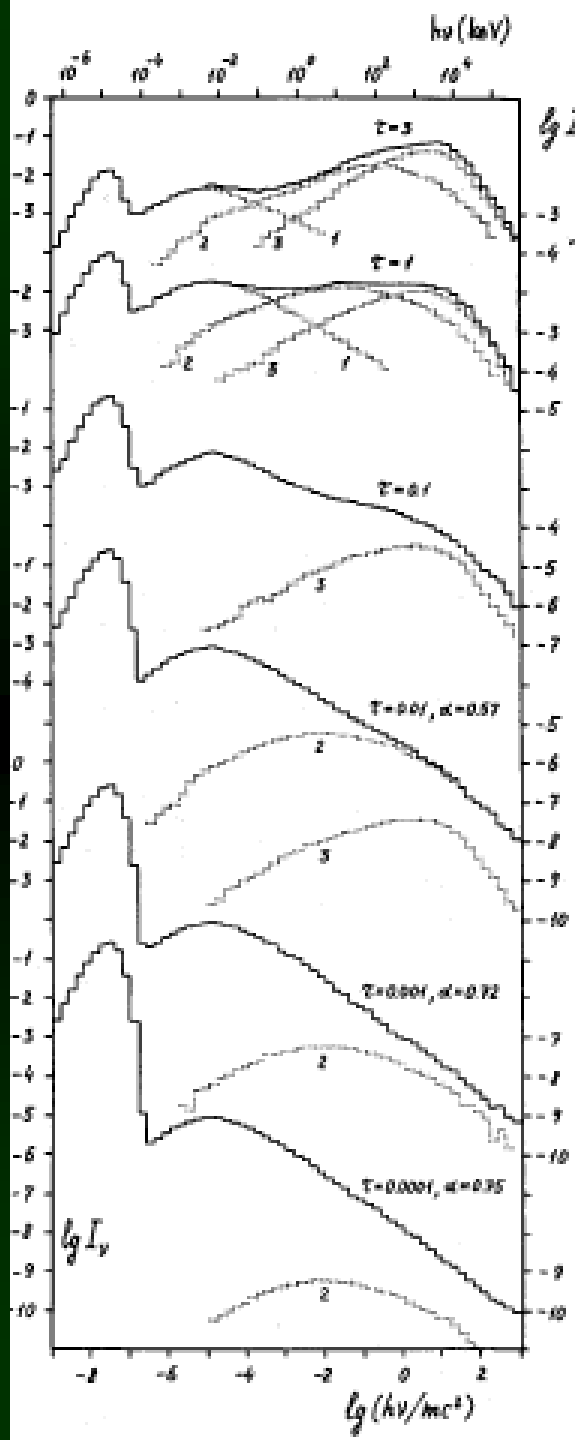
- Комptonизация низко-частотного излучения облака слаборелятивистской плазмы в зависимости от τ

$\tau=0.001$





- Комптонизация
 низко-частотного
 излучения
 ($kTe=0.001 \text{ mc}^2$) в
 сферическом
 облаке
 релятивистской
 плазмы при
 температуре $kTe/$
 $mc^2 = 4$



Случай немаксвелловского распределения

$\tau=3$

$\tau=1$

$\tau=0.1$

$\tau=0.01$

$\alpha=0.57$

$\tau=0.001$

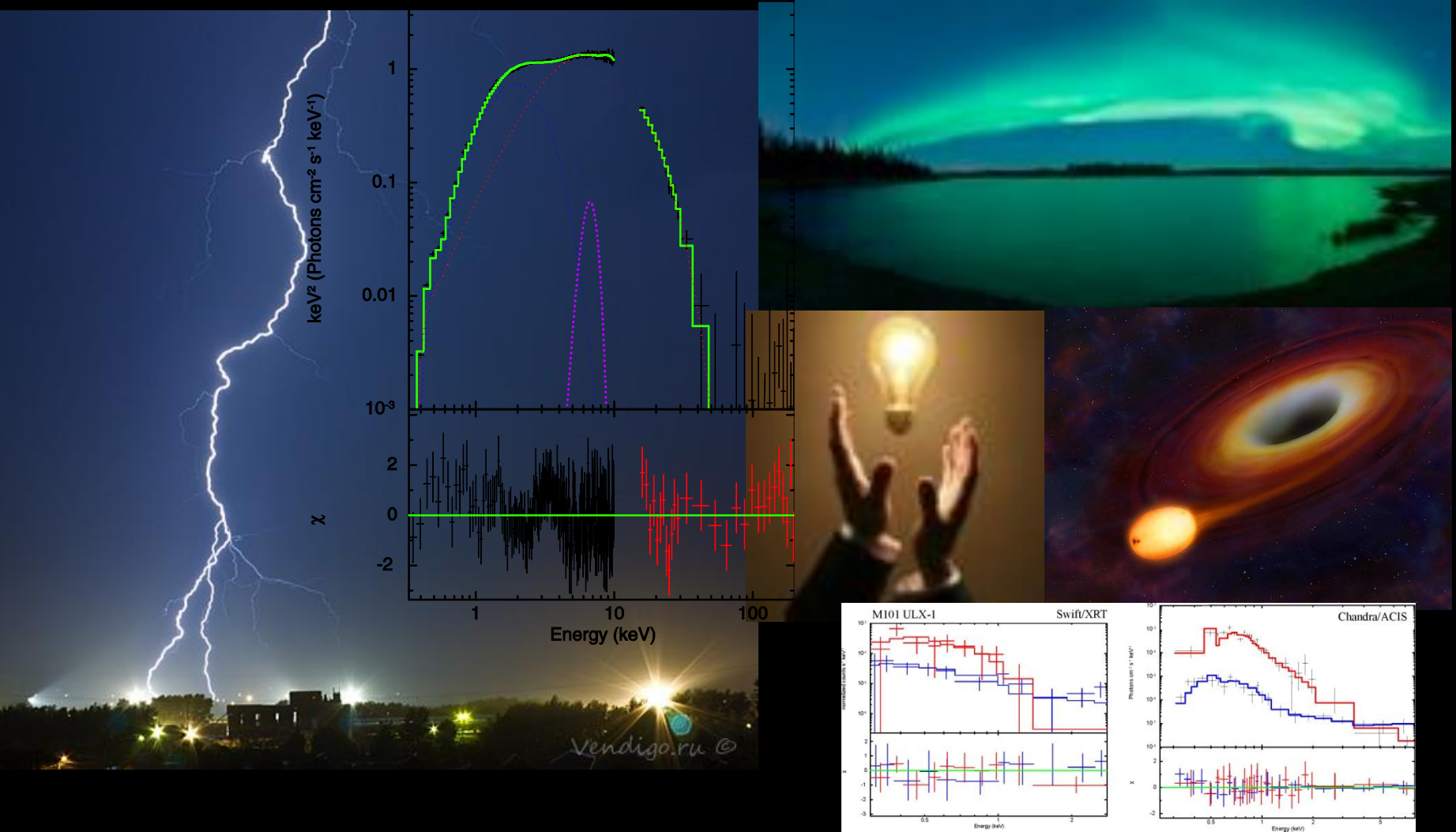
$\alpha=0.72$

$\tau=0.0001$ $\alpha=0.75$

- Роль многократного рассеяния в облаке ультрарелятивистских электронов со степенным распределением по энергиям $\gamma^{-\beta} \exp(-\gamma_0/\gamma)$ и разными τ по Томсоновскому рассеянию



Приложение к наблюдениям и возможная интерпретация в тепловых Комптонизационных моделях





Как пользоваться моделью ВМС в XSPEC ?

```
XSPEC12>model
```

```
Additive Models:
```

spec	tbody	tbodyrad	bexrav	bexriv	bknpower
bmc	bremss	c6mekl	c6pmekl	c6vmekl	cemekl
cevmkl	cflow	compLS	compST	compTT	compbb

cutoffpl	disk	diskbb	diskline	diskm	disko
diskpn	equil	gaussian	gnei	grad	grbm
laor	lorentz	meka	mekal	mkcflow	nei
npshock	nteea	pegpwr1w	pexrav	pexriv	plcabs
posm	powerlaw	pshock	raymond	redge	refsch
sedov	srcut	sresc	step	vapec	vbremss
vequil	vnei	vmcflow	vmeka	vmekal	vnei
vnpshock	vshock	vraymond	vsedov	ztbody	zbremss
zgauss	zpowerlw				

```
Multiplicative Models:
```

SSS_ice	TBabs	TBgrain	TBvarabs	absori	cabs
constant	cyclabs	dust	edge	expabs	expfac
highcut	hrefl	notch	pcfabs	phabs	plabs
redden	smedge	spline	uvred	varabs	vphabs
wabs	wndabs	xion	zTBabs	zedge	zhight
zpcfabs	zphabs	zvarabs	zvfeabs	zvphabs	zwabs
zwndabs					

```
Convolution Models:
```

asmooth	lsmooth	reflect
---------	---------	---------



BMC: Bulk-Motion Comptonization



6.2.10 **bmc: Comptonization by relativistic matter**

This is an analytic model describing Comptonization of soft photons by matter undergoing relativistic bulk-motion. The typical scenario involves thermal X-rays from the inner region of an accretion disk in a black-hole binary illuminating in-falling matter in close proximity to the black-hole event horizon. For a detailed description of the model, refer to Titarchuk, Mastichiadis & Kylafis 1997, ApJ, 487, 834; Titarchuk & Zannias, 1998, ApJ, 493, 863; Laurent & Titarchuk 1999, ApJ, 511, 289; Zannias, Borozdin, Revnivtsev., Trudolyubov, Shrader, & Titarchuk, 1999, ApJ, 517, 367; or Shrader & Titarchuk 1999, ApJ 521, L21. The model parameters are the characteristic black-body temperature of the soft photon source, a spectral (energy) index, and an illumination parameter characterizing the fractional illumination of the bulk-motion flow by the thermal photon source. It must be emphasized that this model is not an additive combination of power law and thermal sources, rather it represents a self-consistent convolution. The bulk-motion up-scattering and Compton recoil combine to produce the hard spectral tail, which combined with the thermal source results in the canonical high-soft-state spectrum of black hole accretion. The position of the sharp high energy cutoff (due to recoil) can be determined using the theta function $\theta(E_c - E)$. The model can also be used for the general Comptonization case when the energy range is limited from above by the plasma temperature (see compTT and compST).

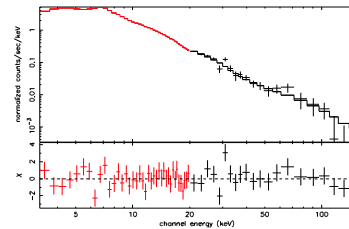
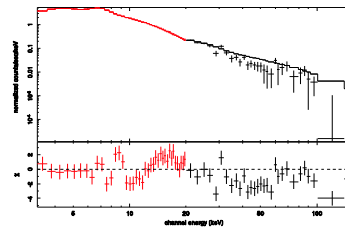
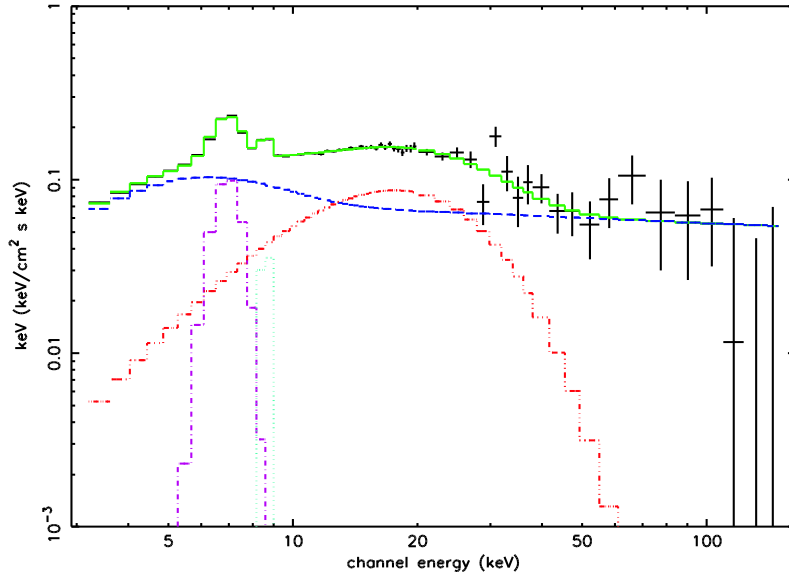


Параметры модели ВМС

par1	Temperature of thermal photon source in keV
par2	Energy spectral index α
par3	Log of the A parameter. Note that f in Borozdin et al. 1999 and Shrader & Titarchuk 1999 is 10^{par3}
norm	A_N defined in <i>Borozdin et al 1999</i> and <i>Shrader & Titarchuk (1999)</i>



Пример использования модели BMC для фитирования спектра SS433



BMC+Gauss1+Gauss2+”Bbody”

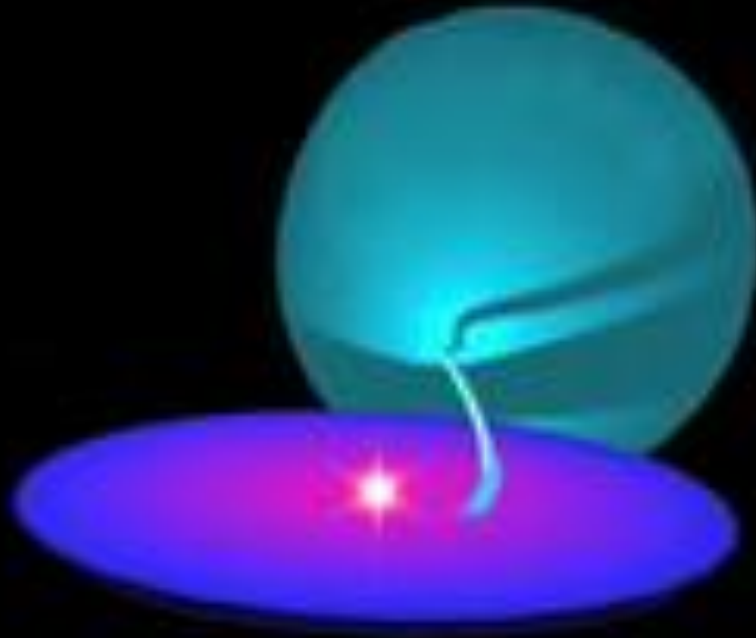
Left: $\chi^2=5.01$ (72 d.o.f.) Right: $\chi^2=1.07$ (70 d.o.f.)

$kT_{\text{”bbody”}} \sim 4.5 \text{ keV}$ $EW_{\text{”bbody”}} \sim 1 \text{ keV}$

Model	Parameter
BMC	α
	kT
	$\log A$
	N_{bmc}
GAUSSIAN_1	E_{line1}
	Sigma1
	N_{bmc1}
GAUSSIAN_2	E_{line2}
	Sigma2
	N_{laor2}
BBODY	kT_{body}
	N_{body}

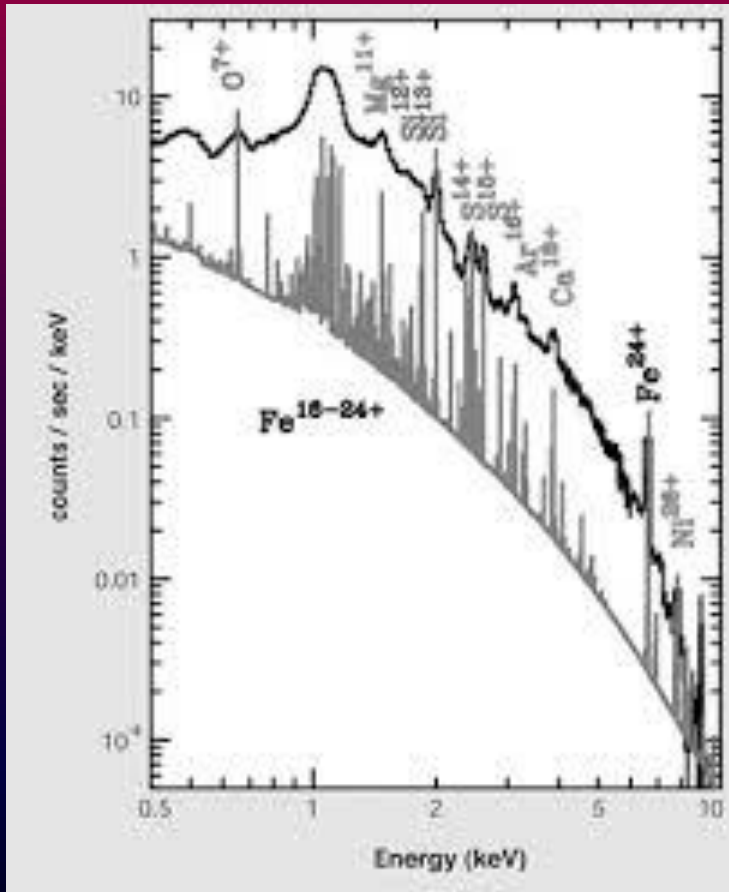


Properties of Comptonized model





Как изменится профиль линии нейтрального железа ?

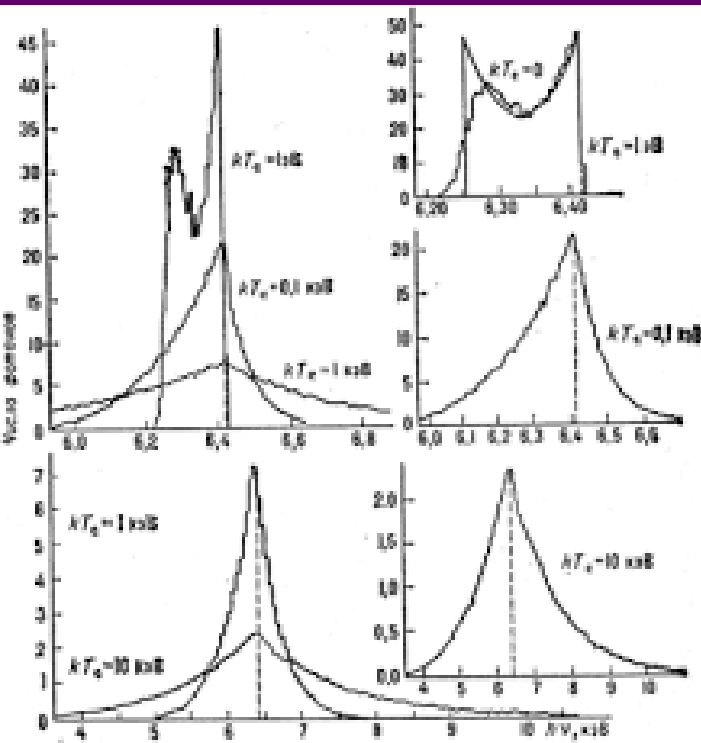


■ Результаты расчёта спектра фотонов монохроматической линии с $h\nu_0 \approx 6.4 \text{ кэВ} \ll m_e c^2$, испытавших одно рассеяние на тепловых электронах.

■ при низких температурах электронов T_e фотоны из-за эффекта отдачи сдвигаются в сторону низких частот, отдавая свою энергию электронам.



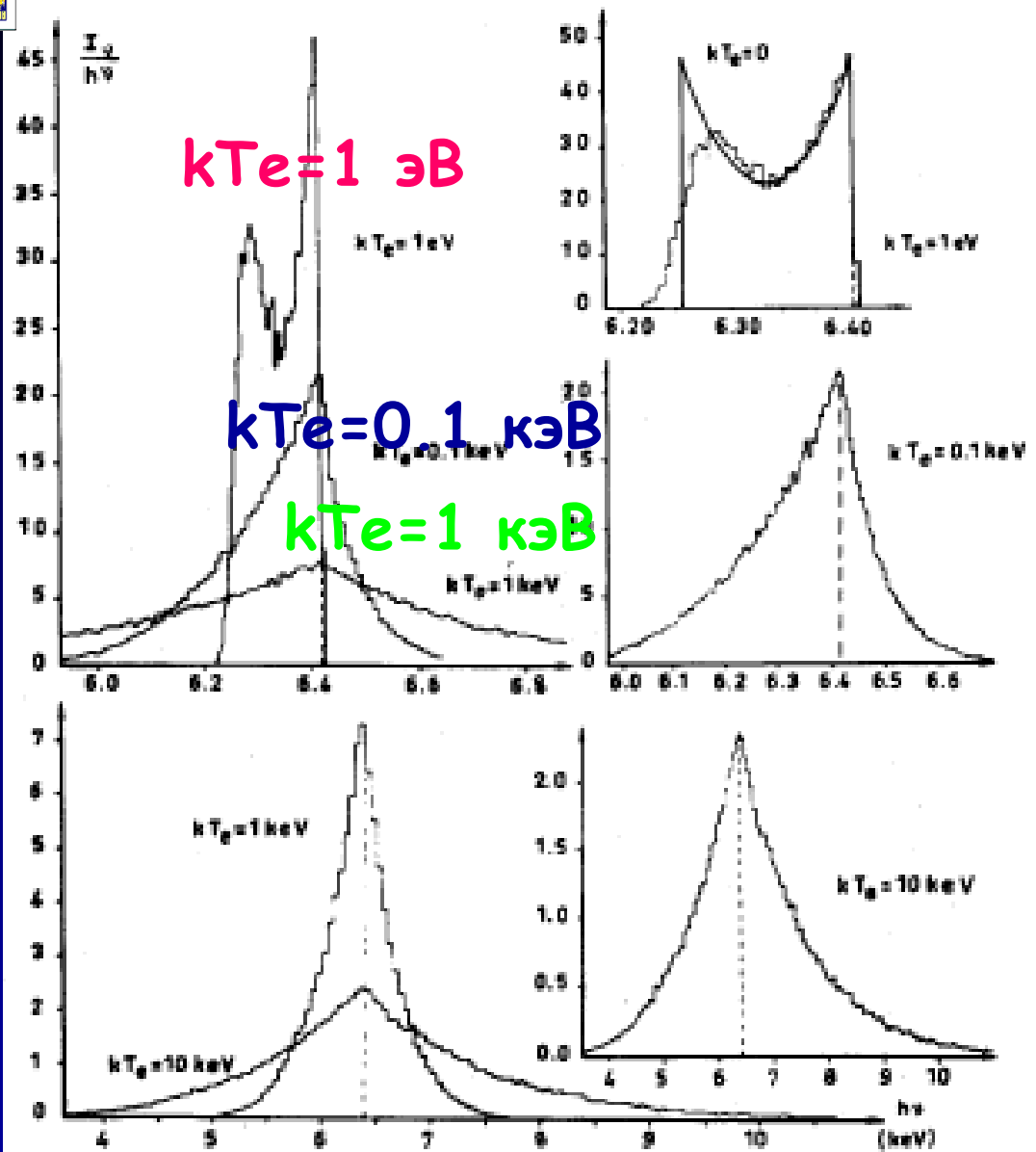
Профиль линии нейтрального железа



- для $kT_e = 1$ эВ становится заметным влияние эффекта Доплера на профиль линии.
- При дальнейшем повышении kT_e эффект Доплера уширяет линию, но её "центр тяжести" по-прежнему смещается в сторону низких частот.
- только правое крыло линии после рассеяния становится мощнее левого, т.е. электроны в среднем передают свою энергию излучению, при этом охлаждаясь.



Профиль рентгеновской линии железа $h\nu_0 = 6.4$ кэВ после одного рассеяния фотонов на тепловых электронах с заданной температурой. По вертикальной оси - число фотонов в единичном интервале энергий, по горизонтальной - энергия фотонов (кэВ). Ступенчатость кривых обусловлена методом расчёта Монте-Карло.

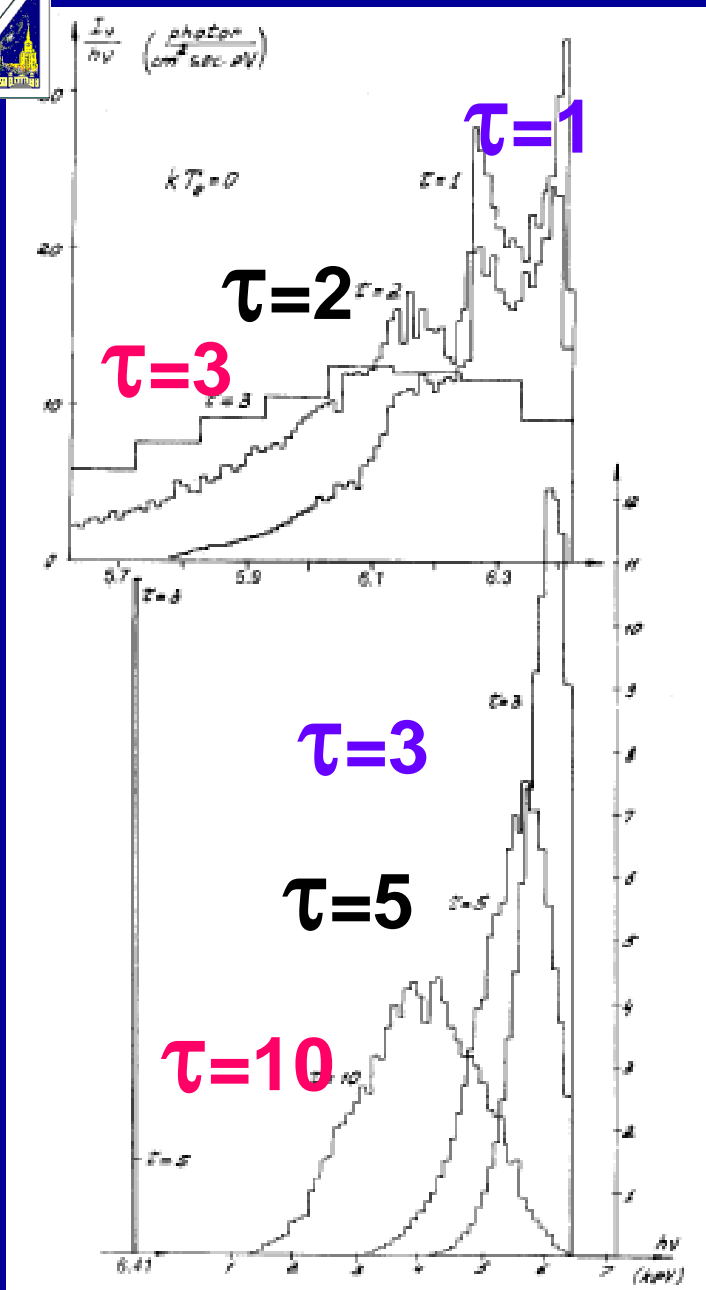


Профиль
рентгеновской
линии железа
 $h\nu_0 = 6.4 \text{ кэВ}$
после
однократного
рассеяния на
максвелловских
электронах



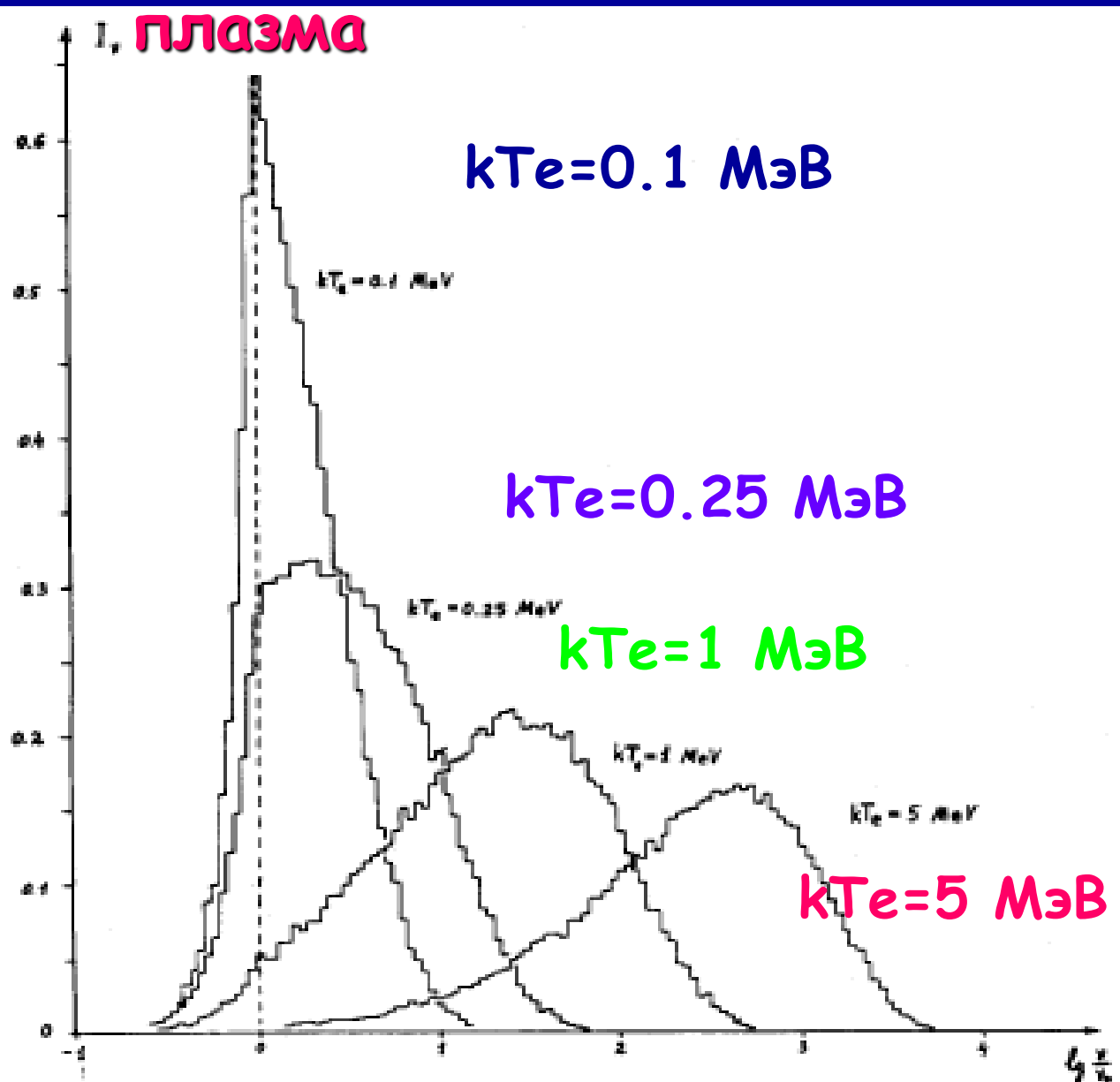
Изменение по τ

- Профиль линии железа 6.4 кэВ, идущей из облака плазмы с $kT_e=0$ кэВ и разными оптическими глубинами τ





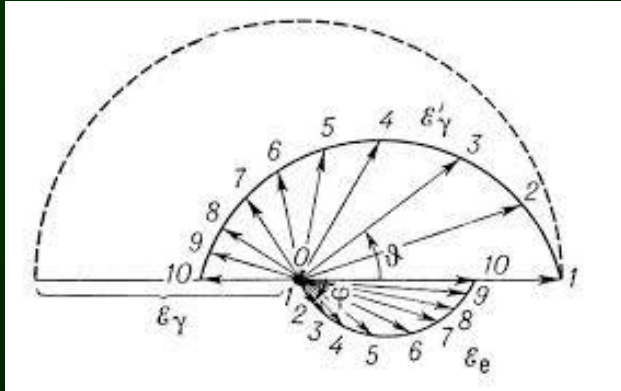
Слаборелятивистская и релятивистская



Профиль линии
железа 6.4 кэВ
после
однократного
рассеяния на
Максвелловских
электронах



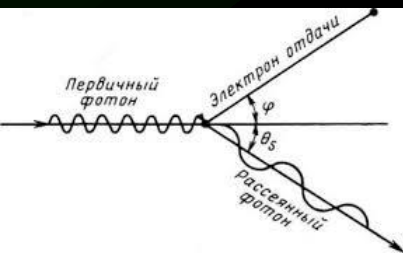
Предельные случаи: рассеяние вперед и назад



- Симметричная двугорбая кривая, соответствующая $kT_e = 0$, отражает свойства рэлеевской индикатрисы рассеяния (вероятность рассеяния максимальна для рассеяния вперед и назад).

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon}{1 + \frac{\epsilon}{mc^2} (1 - \cos \theta)}$$

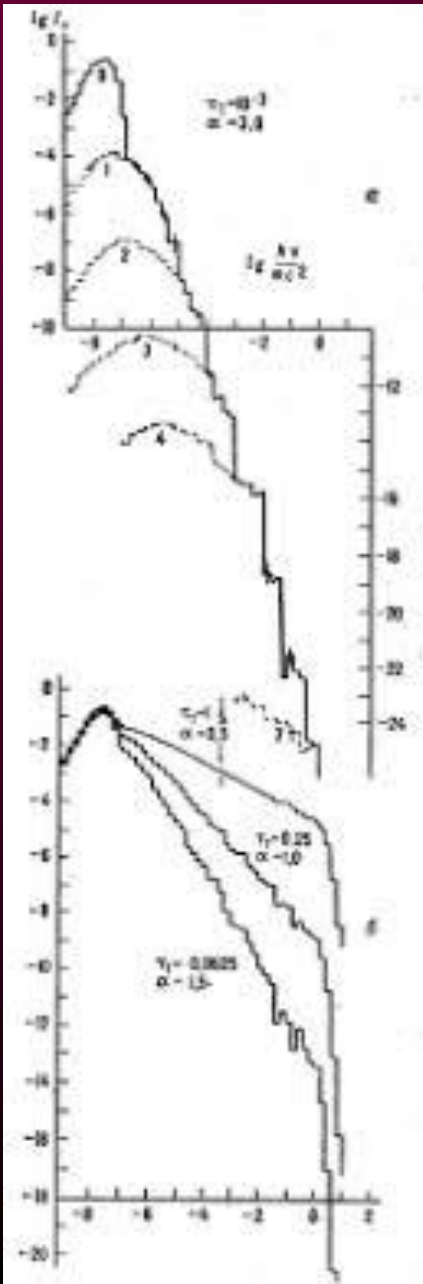
- При рассеянии вперед изменение частоты минимально, а при рассеянии назад - максимально.





Формирование степенного спектра излучения при рассеянии низкочастотных фотонов

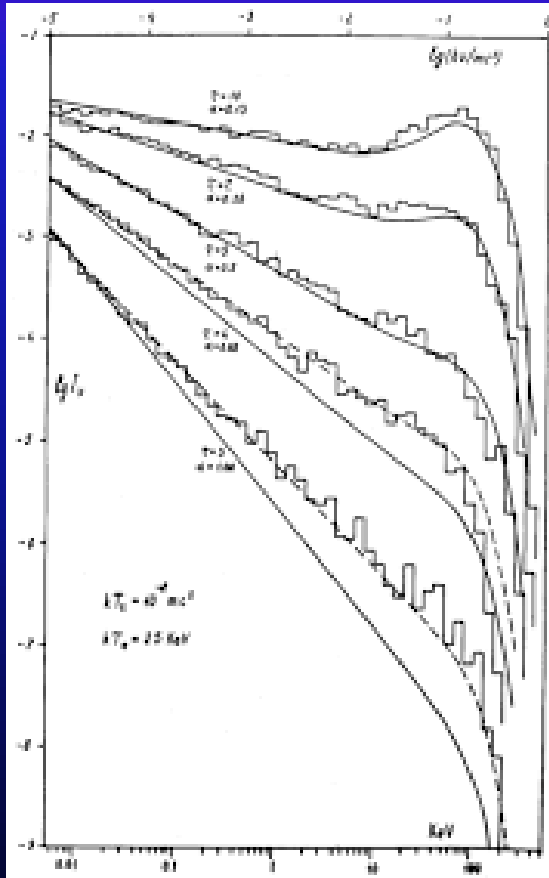
- Изменение частоты фотонов с $h\nu_0 \ll m_e c^2$ при рассеянии на тепловых электронах с $kT_e \ll m_e c^2$ очень мало, но многократное повторение рассеяний и малого обмена энергией между электронами и фотонами приводит к значительным эффектам.



- Формирование степенного спектра излучения при рассеянии низкочастотных фотонов с $h\nu_0 = 10^{-8} m_e c^2$, на тепловых электронах с $kT_e = 0.5 m_e c^2 = 250$ кэВ. Показаны вклады отдельных рассеяний (прерывистые линии, цифры рядом с ними - число рассеяний) в облаке плазмы (а). Наклон спектра тем меньше, чем больше оптическая толщина облака (б).



Множественные рассеяния фотонов



■ В результате $m_e c^2/h\nu_0$ рассеяний на холодных электронах фотон может потерять (передать электронам) значительную часть своей энергии.

■ Достаточно примерно $m_e c^2/4 kT_e$ рассеяний низкочастотного фотона с на горячих ($kT_e \gg m_e c^2$) электронах, чтобы его энергия стала порядка kT_e . При этом электроны охлаждаются.



Комптонизация в компактных источниках рентгеновского излучения

- В компактных рентгеновских источниках спектр излучения обычно формируется в **облаке высокотемпературной плазмы** сравнительно **малой оптической толщины** по томсоновскому рассеянию $\tau_T \sim 1-10$.

- Источниками низкочастотных фотонов в облаке плазмы могут быть:

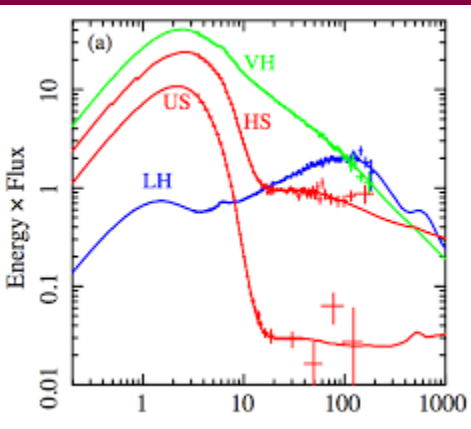
- излучение более плотных облаков,
- собственное тормозное излучение,
- циклотронное излучение электронов в сильном магнитном поле,
- двойной комптон-эффект, и

- излучение внешних источников.





Почему результирующий спектр является степенным ?

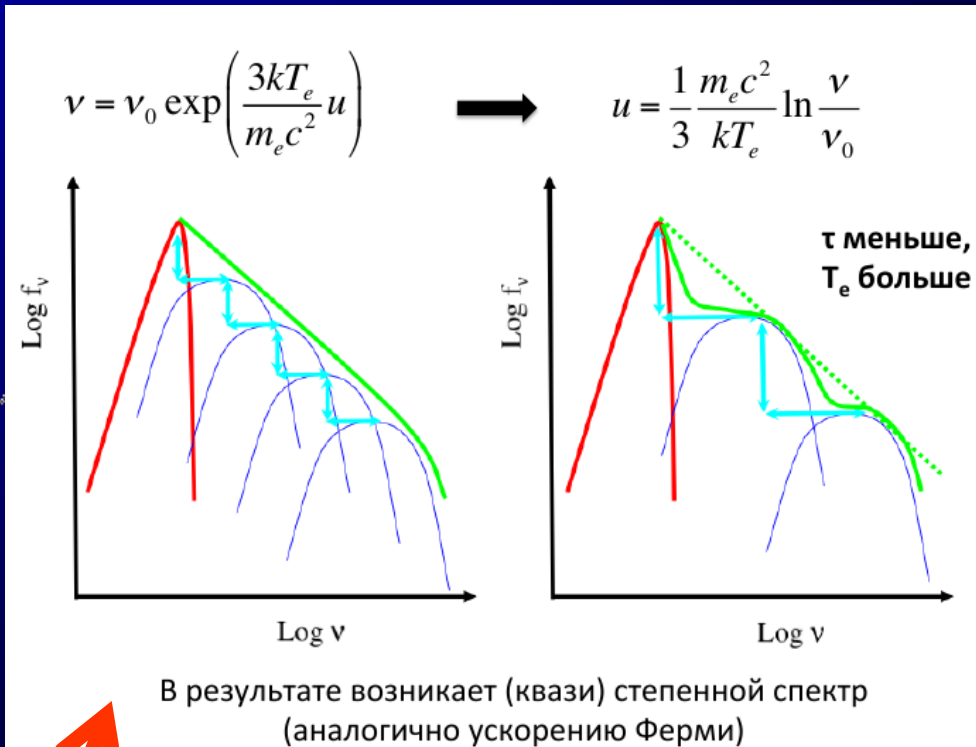


■ Эти фотоны диффундируют в облаке. В среднем они испытывают в нём примерно $\bar{U} \sim \tau_T^2$ рассеяний, но существует конечная вероятность испытать намного большее число рассеяний U , чем среднее (\bar{U}), и сильно изменить свою энергию вследствие Комptonизации.

■ Механизм увеличения энергии фотонов напоминает статистический механизм ускорения КЛ, предложенный Ферми. И в том и в другом случае формируется степенной спектр (в одном случае - излучения, в другом - КЛ).



Почему результирующий спектр является степенным ?



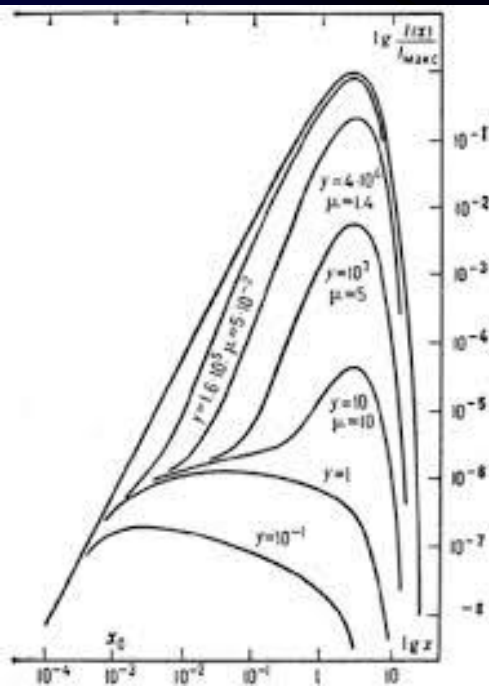
- в результате многократных рассеяний низкочастотных фотонов на тепловых электронах формируется степенной спектр (т.е. интенсивность излучения $I_\nu \sim \nu^{-\alpha}$, где α - спектральный индекс).

- Спектр, формирующийся в результате индивидуального рассеяния, имеет характерный экспоненциальный завал (уменьшение интенсивности), но результирующий спектр - сумма всех рассеяний - оказывается **степенным**.

■ Лишь тысячная доля фотонов испытывает одно рассеяние в облаке, миллионная - два, миллиардная - три.



За счет чего увеличивается энергия фотона ?



Формирование планковского спектра при совместном действии тормозных и комптоновских процессов

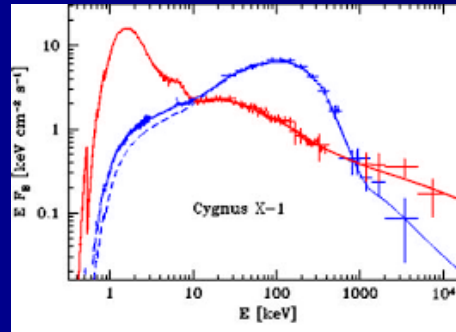
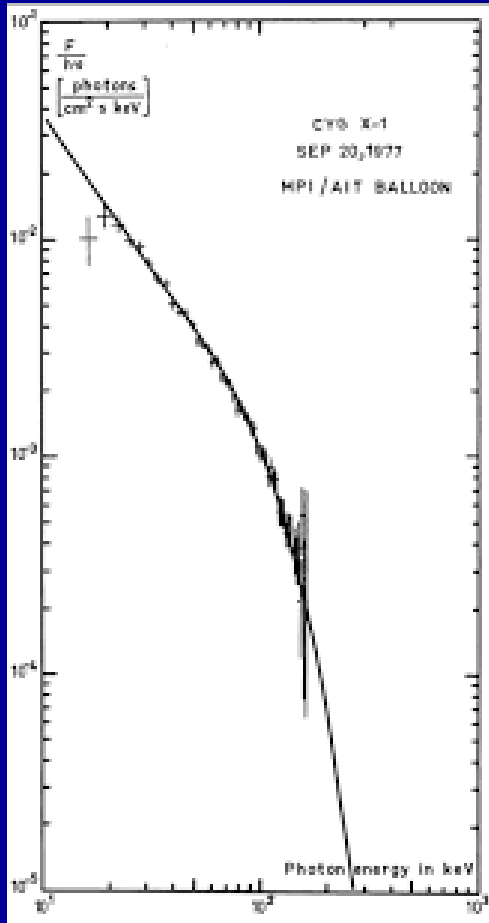
- Энергия фотонов увеличивается за счёт эффекта Доплера до тех пор, пока $h\nu_0 < 4 kT_e$; при $h\nu_0 > 4 kT_e$, доминирует эффект отдачи.

- Совместное действие двух эффектов формирует **ВИНОВСКИЙ ЗАВАЛ** спектра $I_\nu \sim \nu^3 \exp(-h\nu_0/kT_e)$. В области $h\nu_0 < h\nu < kT_e$ (где ν_0 - характерная частота низкочастотных фотонов источника) спектр излучения, выходящего из источника, является степенным с $\alpha = -3/2 + \sqrt{9/4 + \delta}$,

где
$$\delta = \pi^2 m_e c^2 / [3kT_e (\tau_T + 2/3)^2]$$



Сравнение данных с теорией (для Cyg X-1)



■ Теоретический спектр, формирующийся в результате Комptonизации согласуется с наблюдаемым жёстким спектром рентгеновского излучения от источника Cyg X-1 - известного кандидата в ЧД.

■ Сравнение данных наблюдений с теорией позволило определить $kT_e = 26,5$ кэВ в зоне аккреционного диска, где формируется рентгеновское излучение, и оптическую толщину диска относительно томсоновского рассеяния $\tau_T \sim 4$.

Спектр излучения источника Лебедь X-1, экспериментальные точки получены при балонных наблюдениях. Сплошная кривая построена в соответствии с теорией комptonизации для $\delta=2$, $\alpha=0.57$ $kT_e=26.5$ кэВ.





Линейная поляризация жёсткого рентгеновского излучения

■ => поверхностная плотность вещества в диске оказалась 10 г/см^2 .

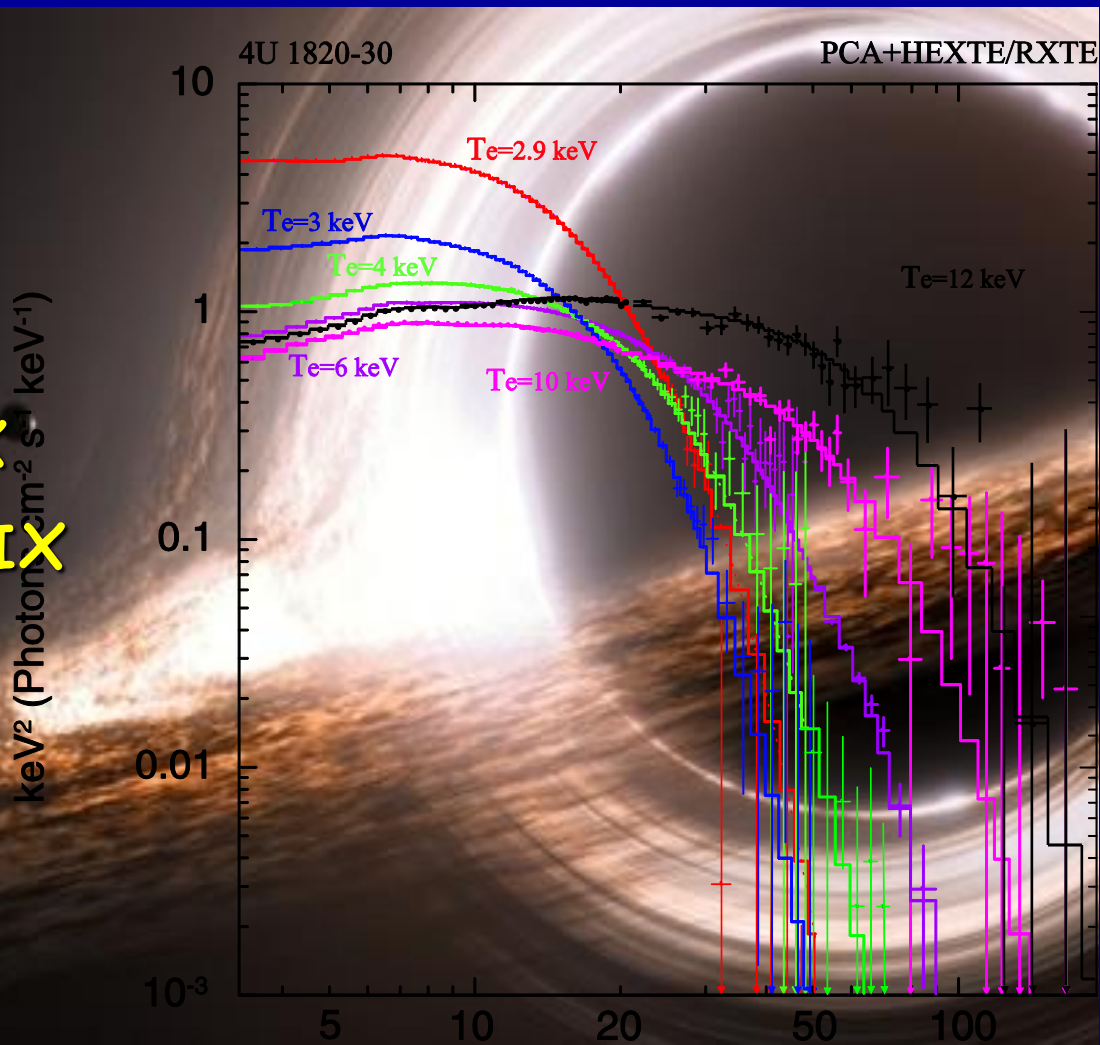
■ Комptonизация излучения в аккреционных дисках сопровождается характерной линейной поляризацией жёсткого рентгеновского излучения. Степень поляризации зависит лишь от τ_T и угла наклона диска.





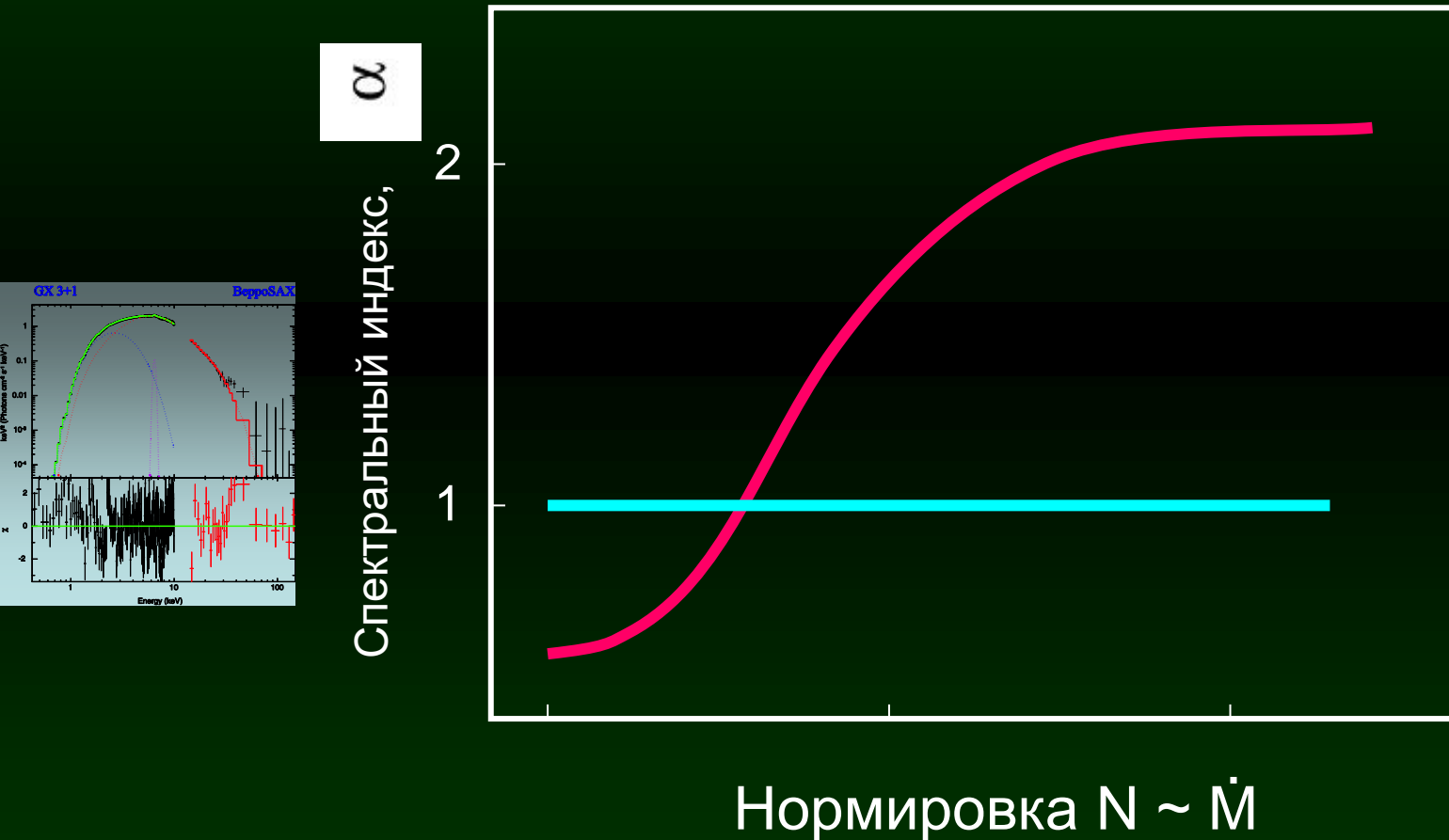
Применение модели ВМС для аппроксимации рентгеновских спектров ЧД

- Позволило установить спектральные признаки черных дыр и нейтронных звезд





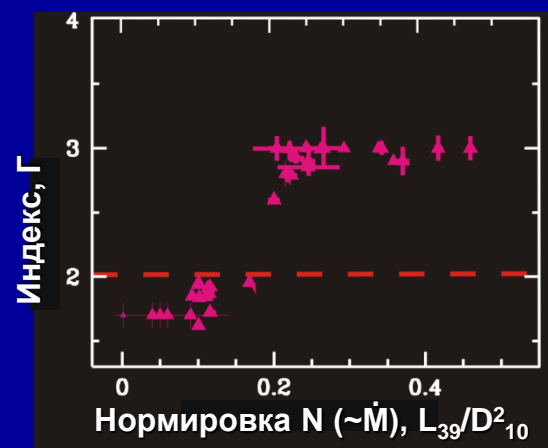
Получено согласие наблюдений и
теоретических предсказаний для ЧД (*Titarchuk
& Zannias, 1998; Laurent & Titarchuk, 1999*)



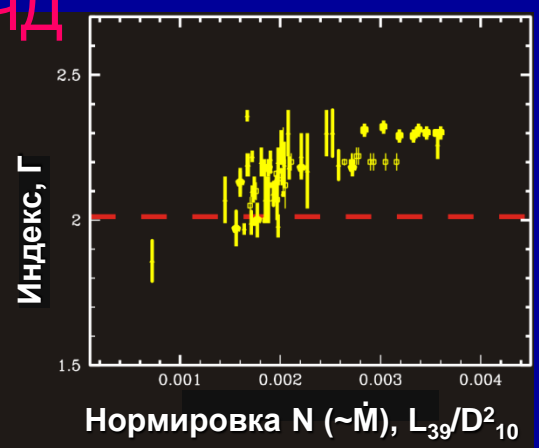
Burke M., Gilfanov M., Sunyaev, 2018, MNRAS, 474, 760



GRS 1915+105

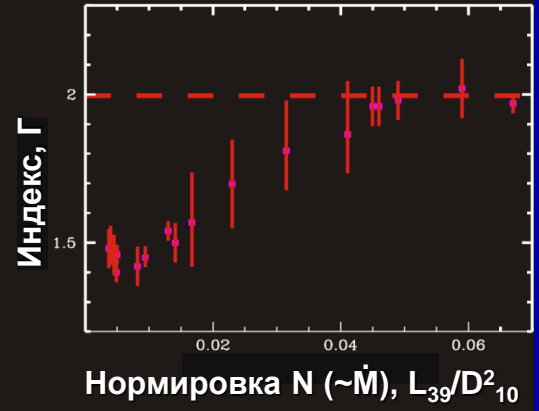
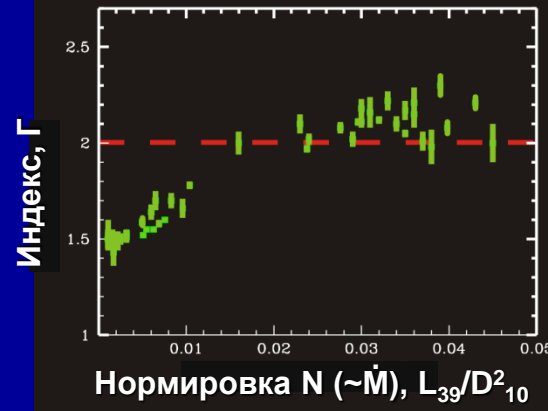


ЧД



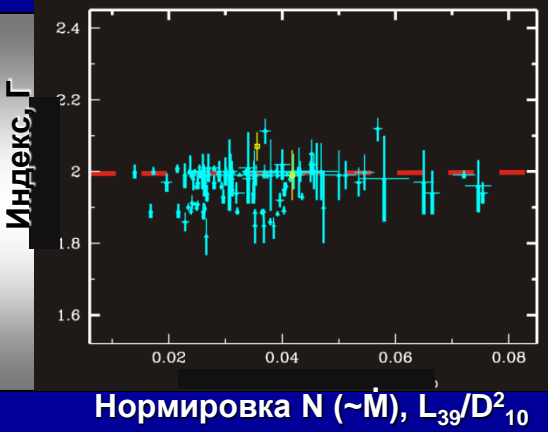
4U 1630

GX 339-4

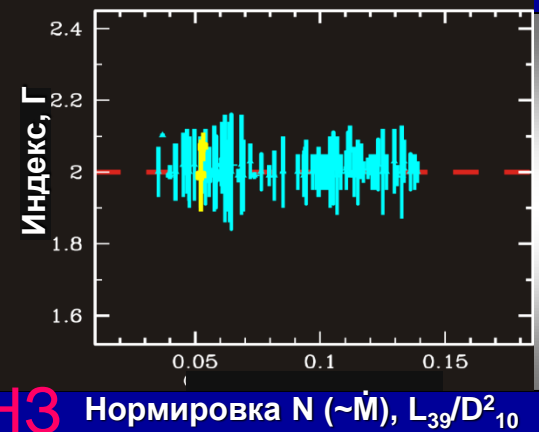


GRO J1655-40

4U 1728-34



НЗ

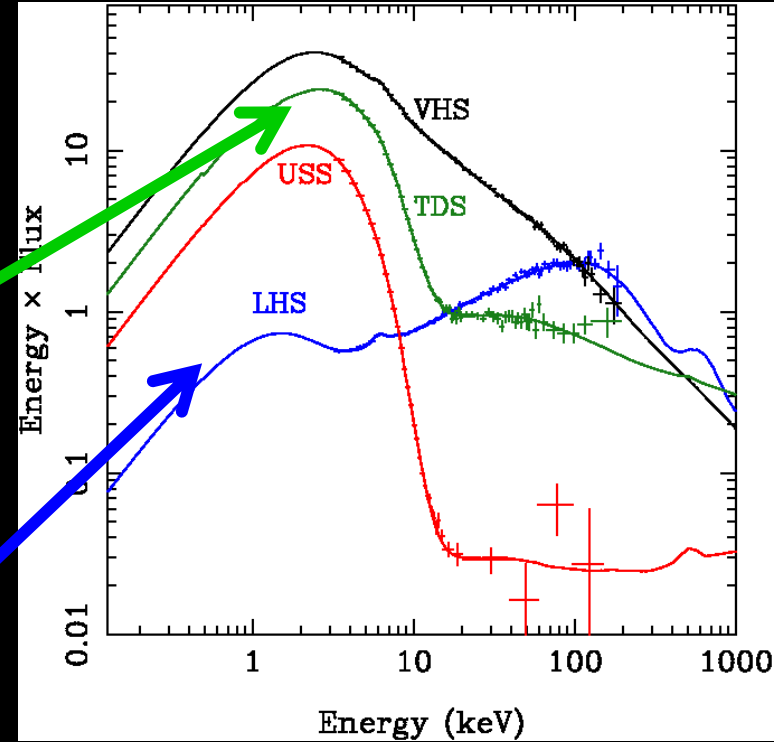
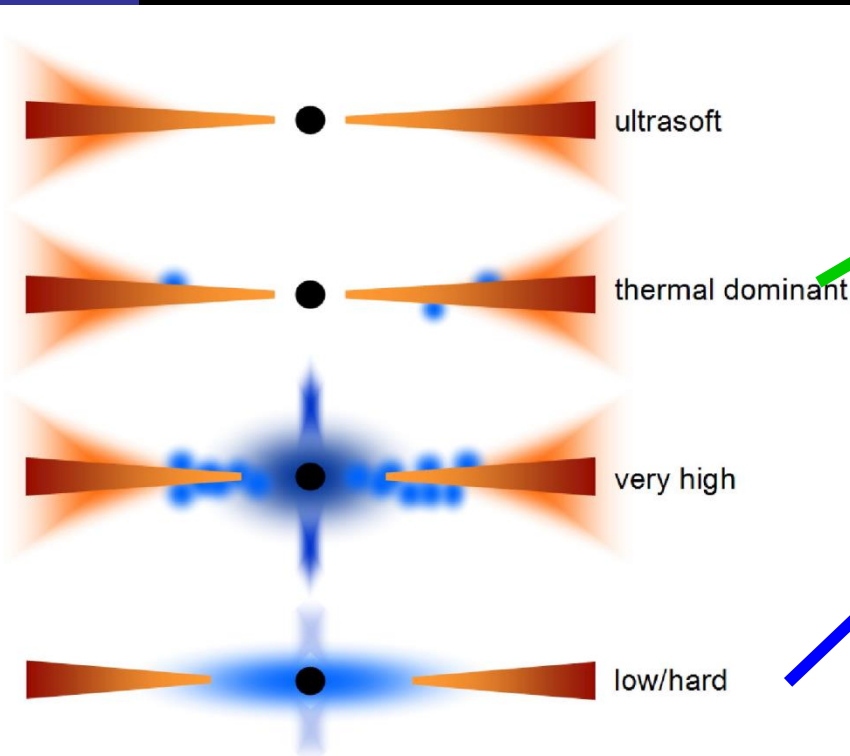


GX 3+1



Broad band Spectra of BHXBs

XTE J 1550-564:



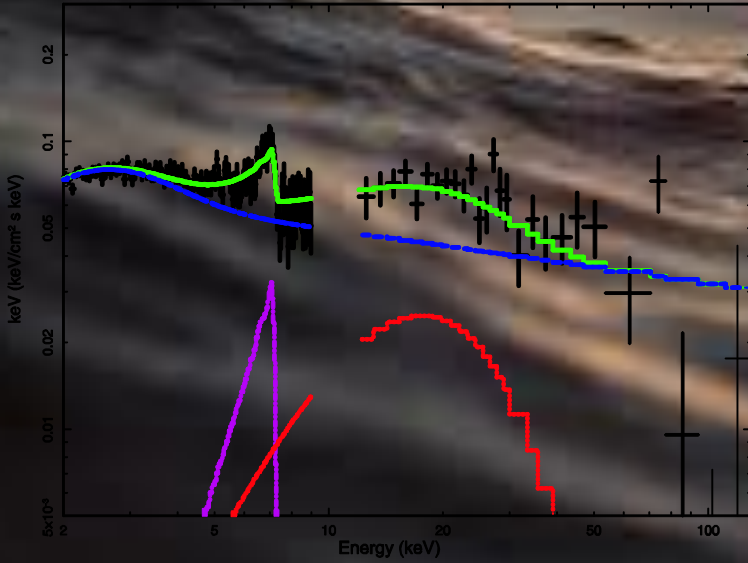
(From Done et al. 2007, A&ARv)



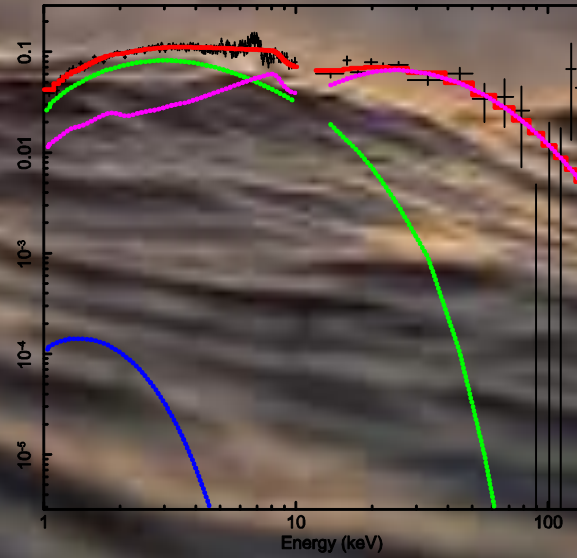
От атомного взрыва до взрыва сверхновых



TBabs*(CompTB+Laor+"body")



TBabs*(nthComp+refsch+diskbb)





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!



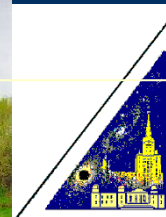


Активные ядра галактик. Блазары.

д ф.-м.н. Сейфина Е.В.

*Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова/астрономический институт имени П.К. Штернберга*

БАЗИС





Активные ядра галактик

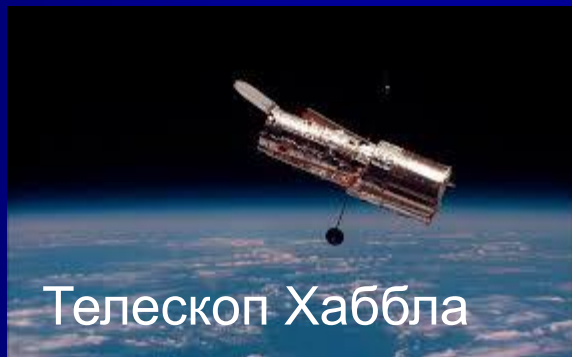
- Активные ядра галактик — ядра, в которых происходят процессы, сопровождающиеся выделением большого количества энергии, не объясняющиеся активностью находящихся в них отдельных звёзд и газовой-пылевой комплексов.



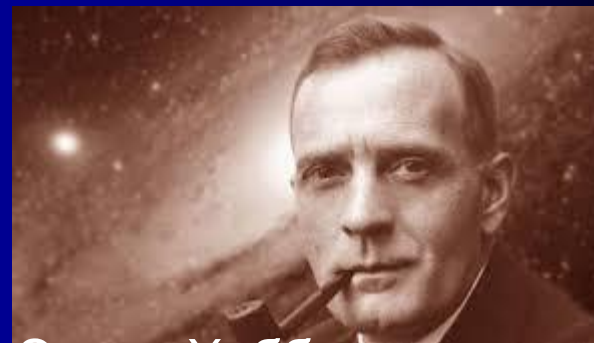
Классификация галактик по Хаббл



Лунный кратер Хаббл

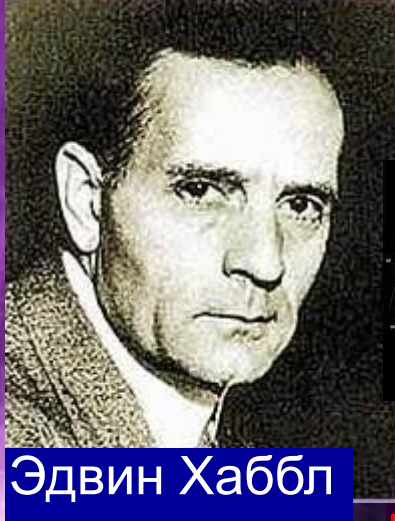


Телескоп Хаббла

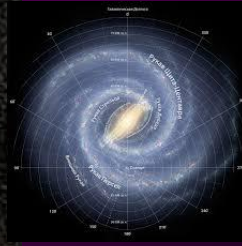


Эдвин Хаббл





Эдвин Хаббл



■ Классификация Хаббла – **морфологическая** - по форме галактик, и совершенно не учитывала характер их поведения.

■ Они бывают относительно спокойными, например, как наша галактика, а бывают чрезвычайно изменчивыми.

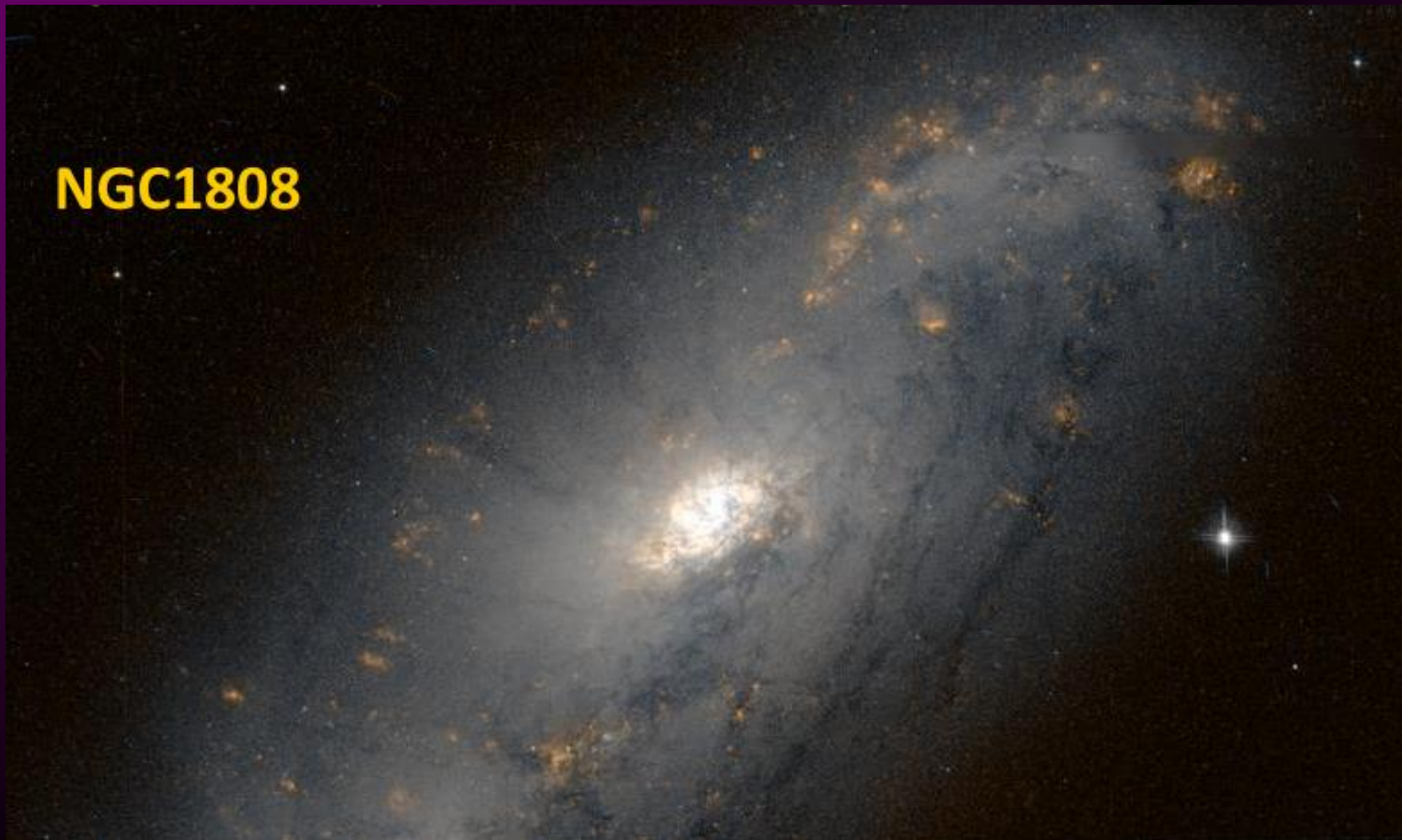
■ Галактики различаются по виду распределения энергии в спектральных диапазонах.





Активное звездообразование – одно из проявлений активности ядерных областей

NGC1808

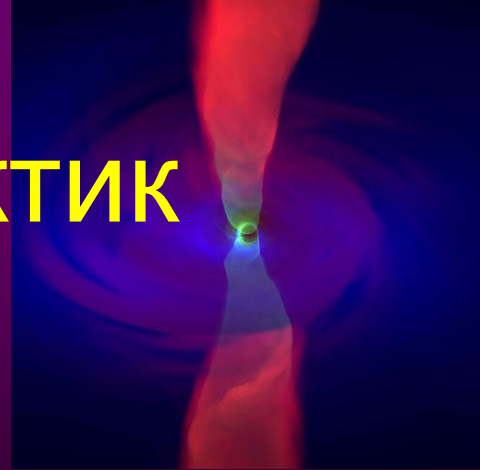




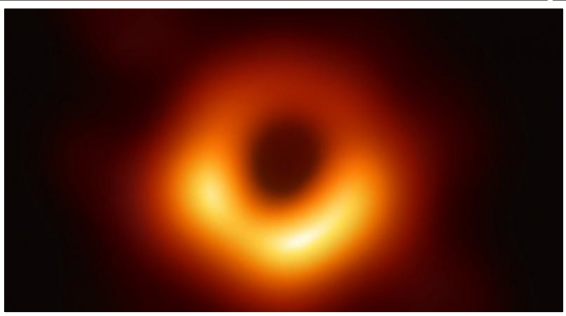
Активные ядра галактик



© Wolfgang Steffen, Institute for Astronomy, UNAM, Mexico (Courtesy Image)

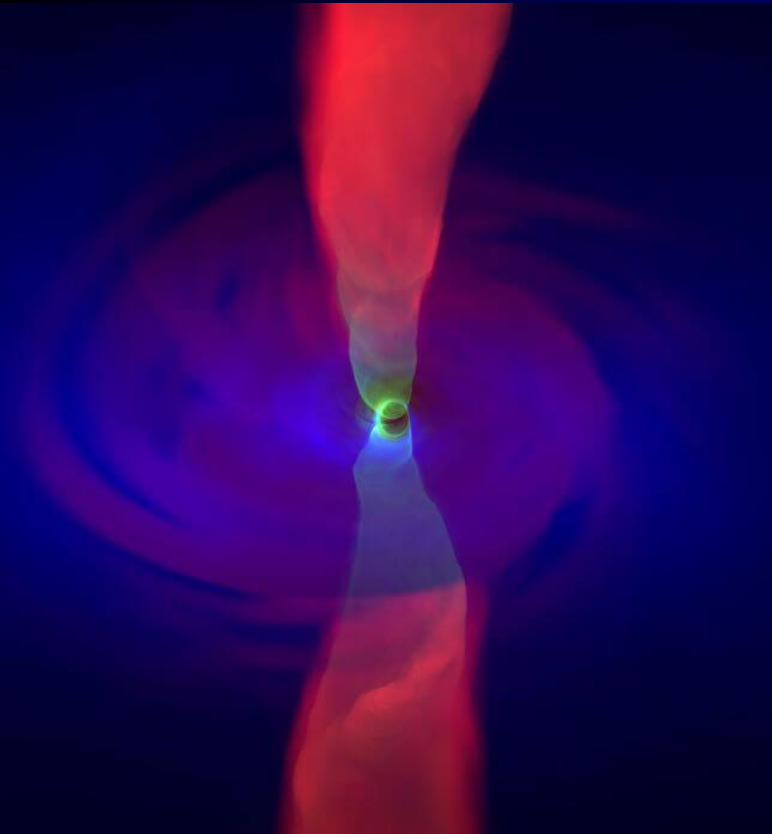


- Из очень небольшой центральной области галактики «выплескивается» поток энергии, сравнимый с излучением ста млн. или ста млрд. таких звезд, как Солнце.
- Излучение переменное, без четкого периода, на различных временах — часы, месяцы, годы.
- Необычно высокая мощность излучения в самых разных интервалах длин волн — от радио до гамма-лучей.
- Часто наблюдается выброс мощных струй плазмы и релятивистских электронов.

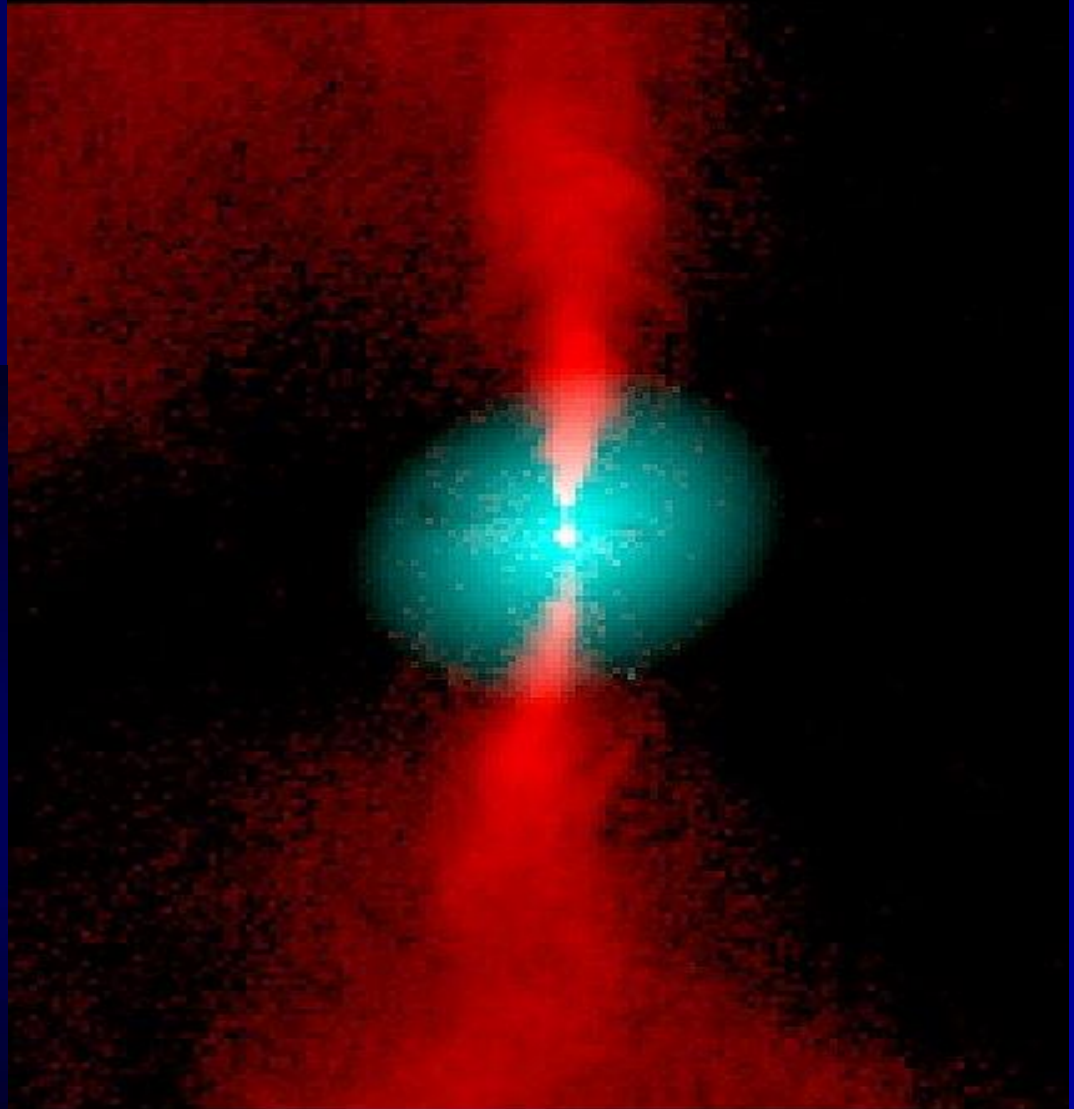




Джеты



Radio Galaxy 3C272.1 = M84 = NGC4374
Radio/optical superposition



Copyright (c) NRAO/AUI 1999

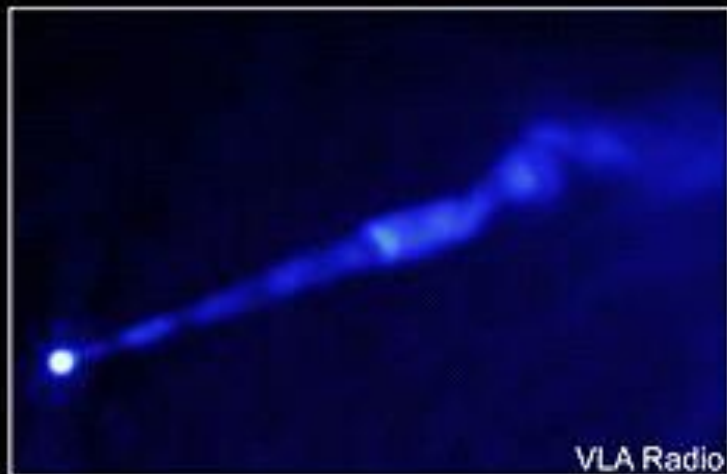


Джет (выброс) из М87

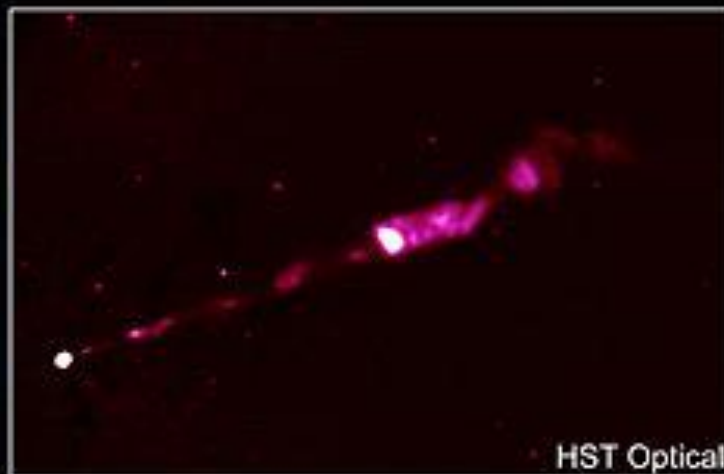
В 1918 г.
американский
астроном *Гербер*
Кертис обнаружил
«любопытный
прямой луч ...
видимо, связанный
с ядром тонкой
линией материи».



Chandra X-Ray



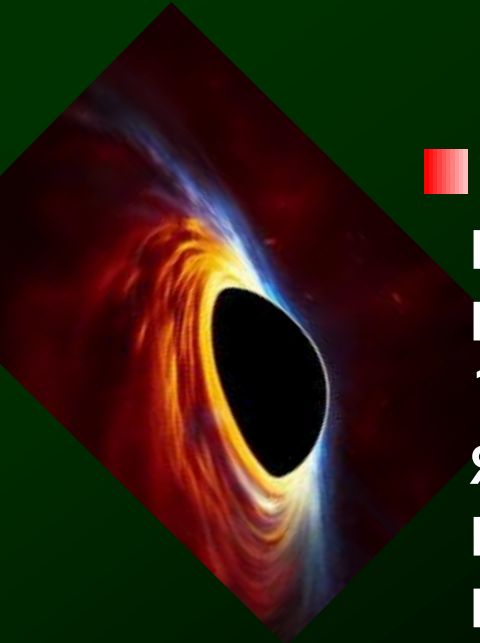
VLA Radio



HST Optical



Ядра галактик



- Ядро Галактики имеет массу порядка $\sim 10^7 \div 10^8 M_{\odot}$, оно окружено газовыми облаками до расстояний 150 пк от центра. Размер самого ядра меньше 10 пк, а его центральной части ("ядрышка") $\sim 10^{-4}$ пк.
- Процессы в ядрах **не могут быть объяснены** свойствами только сконцентрированных в них звезд и газа. 1% галактик имеют **активные** ядра (AGN). Нестационарность ядер проявляется в генерации мощного рентгеновского, УФ-, ИК- и радиоизлучения, в выбросах облаков радиоизлучающей плазмы, в ускорении газовых облаков и т.д.



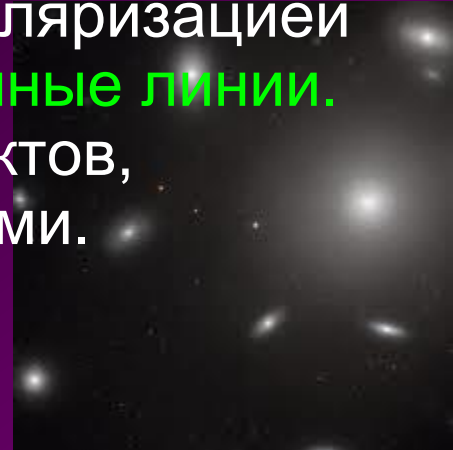
Основные типы галактик с
нестационарными ядрами:

Сейфертовские галактики,
радиогалактики, активные
галактические ядра, квазары,
лацертиды



Типы галактик с нестационарными ядрами

- **Сейфертовские** галактики: наличие широких эмиссионных линий в оптическом спектре.
- **Радиогалактики** обладают мощным радиоизлучением, сравнимым с их оптическим излучением, а часто превышающим его.
- **Лацертиды** получили свое название от объекта **VL Lac**, в каталоге переменных звезд характеризуются **оптич. переменностью** с большой амплитудой (до 4-5 m), **переменным радиоизлучением** и заметной поляризацией излучения. **Отсутствуют эмиссионные линии.** Имеют вид звездоподобных объектов, окруженных туманными оболочками.





- **Квазары** - **точечные** источники. У близких квазаров обнаружены слабые туманные оболочки, спектры которых позволяют считать квазары ядрами далеких галактик.
- Излучение ядра составляет значительную часть излучения галактики;

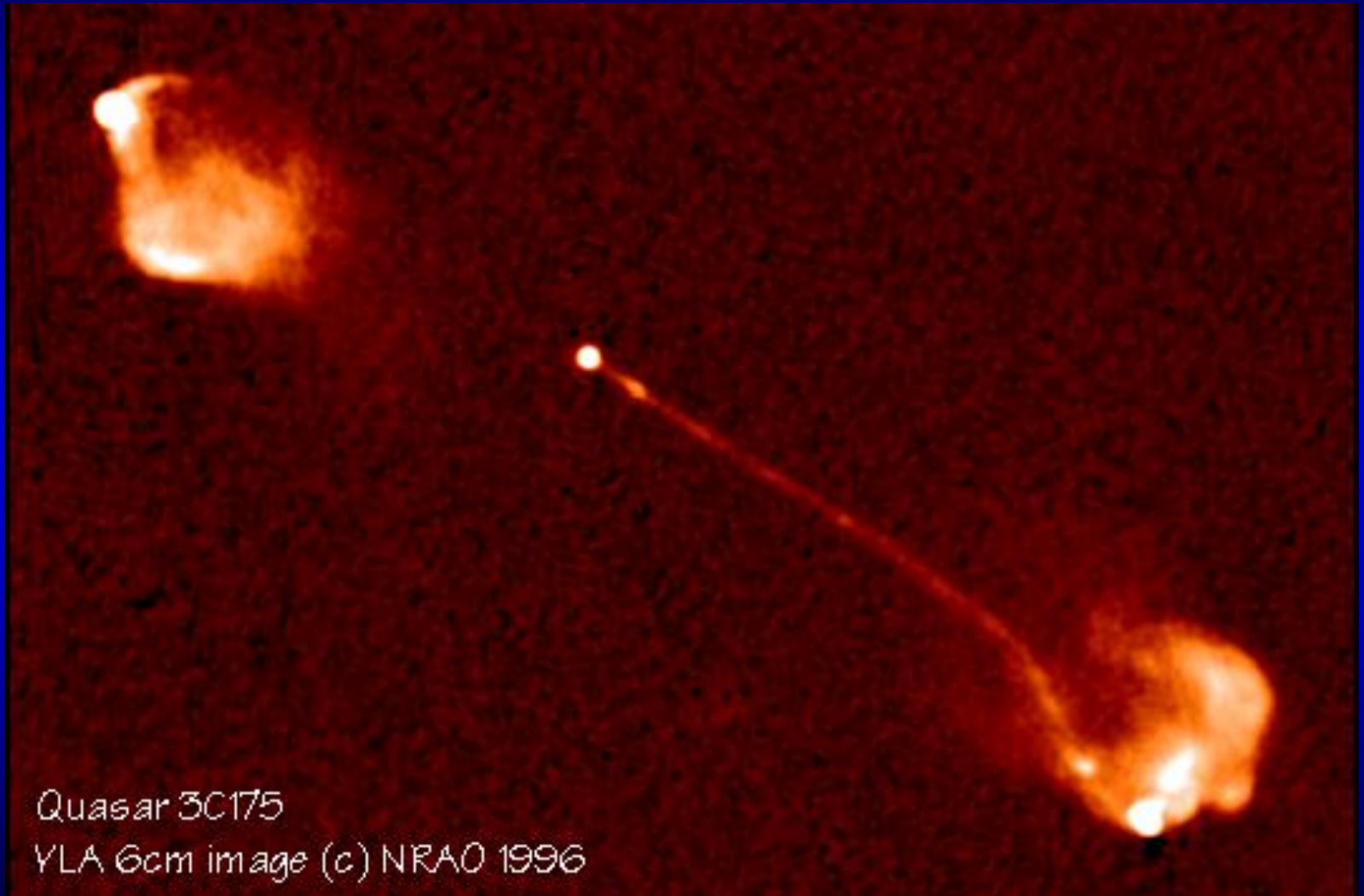
- в широком интервале длин волн излучение ядра является **нетепловым** и избыточным по сравнению с нормальными галактиками в УФ-, ИК-, радио- и рентгеновской областях;
- излучение ядра, как правило, **переменно**;
- в спектре ядра присутствуют **широкие эмиссионные линии**.



Квазар QSO 229+204



- Квазар 3C 175 ($z=0.768$)





	$L_g(M/M_{\odot})$	$L_g(L, \text{эрг/с})$
Квazarы 3C 273	8,7	47,3
3C 48	8,95	46,65
Радиогалактики 3C 120	8,4	45.0
3C 390,3	8,95	45.2
Сейфертовские NGC1275	7.0	44.7
галактики 1-го NGC4151	7.7	44.72
типа NGC3227	6.9	43.0
Маркарян 205	8.2	45.0
Сейф.2: Маркарян 1	7.7	43.5
NGC 1068	9.1	44.3



Сейфертовские галактики



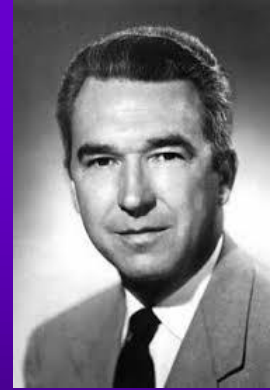
Карл Кинан Сейферт

● В 1943 г. Карл Сейферт обнаружил галактики с необычными свойствами. В спектрах этих галактик присутствовали яркие и очень широкие эмиссионные линии.

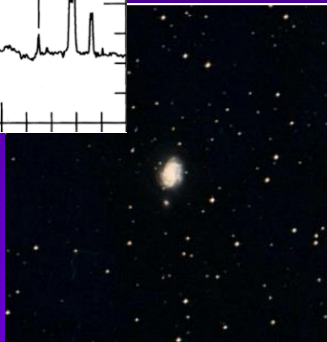
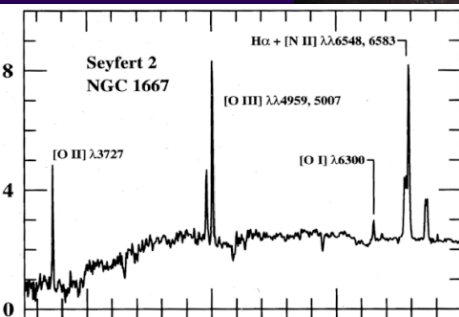
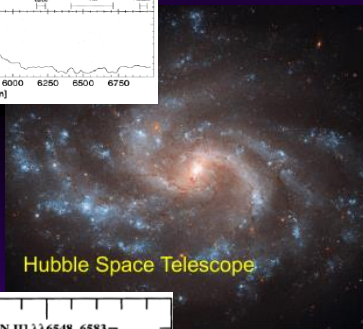
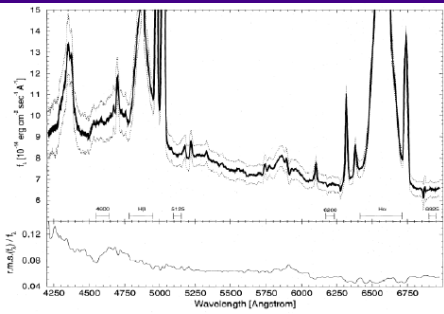
- Дисперсия скорости движения, обеспечивающего столь значительное расширение линий, составляла тысячи, а порой десятки тысяч км/с.
- Эти галактики имели очень яркое и компактное ядро. Сейферт обнаружил 12 галактик с подобными свойствами.



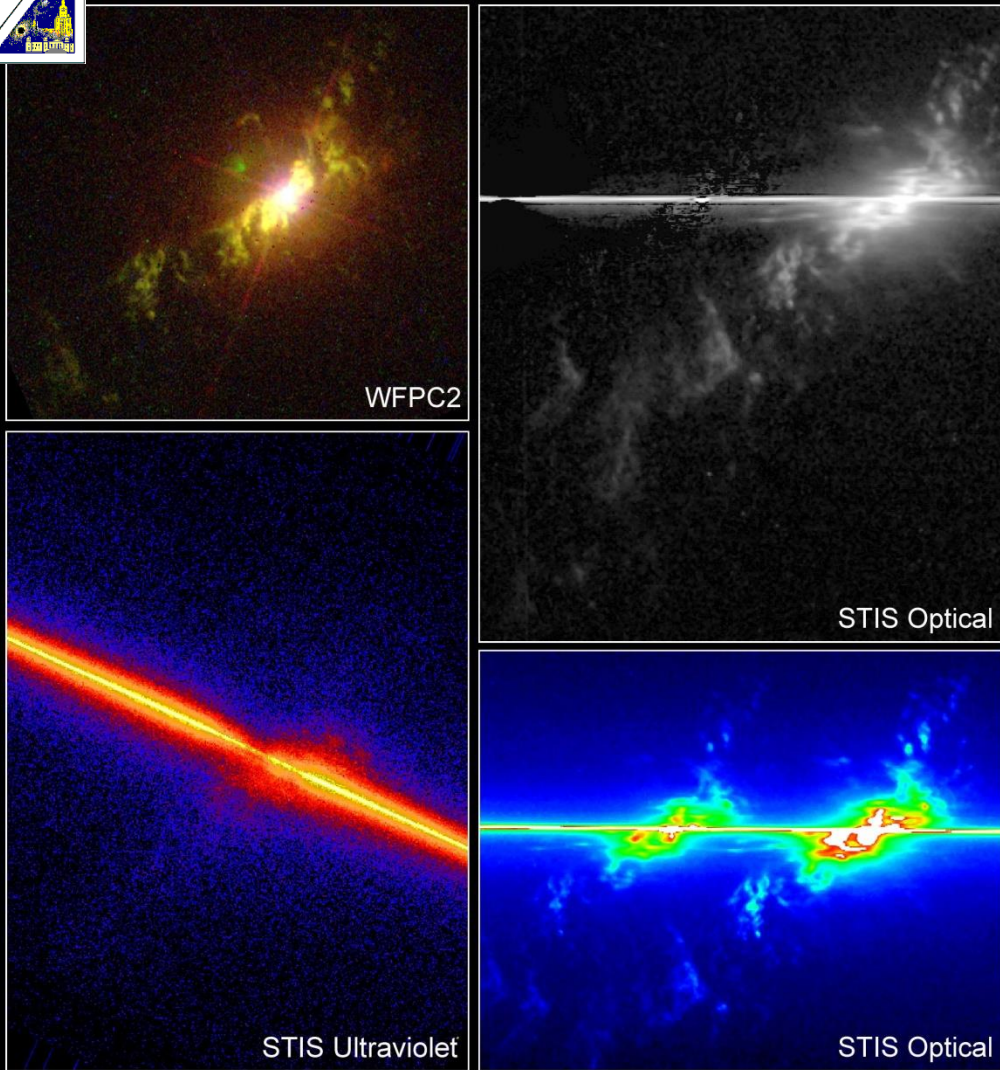
По виду спектров Сейфертовские галактики делят на два типа



Карл Сейферт



- У галактик **1-го типа разрешенные** спектральные линии имеют ширины, соответствующие доплеровским скоростям в несколько тыс. км/с, тогда как **запрещенные линии уже**, их ширины соответствуют скоростям источников в несколько сотен км/с. **Яркие в рентгене.**
- Сейфертовские галактики **2-го типа** имеют как **разрешенные**, так и **запрещенные** линии **одинаковой ширины**, отвечающие скоростям движения до тысячи км/с. **Слабые в рентгене.**



Seyfert Galaxy NGC 4151

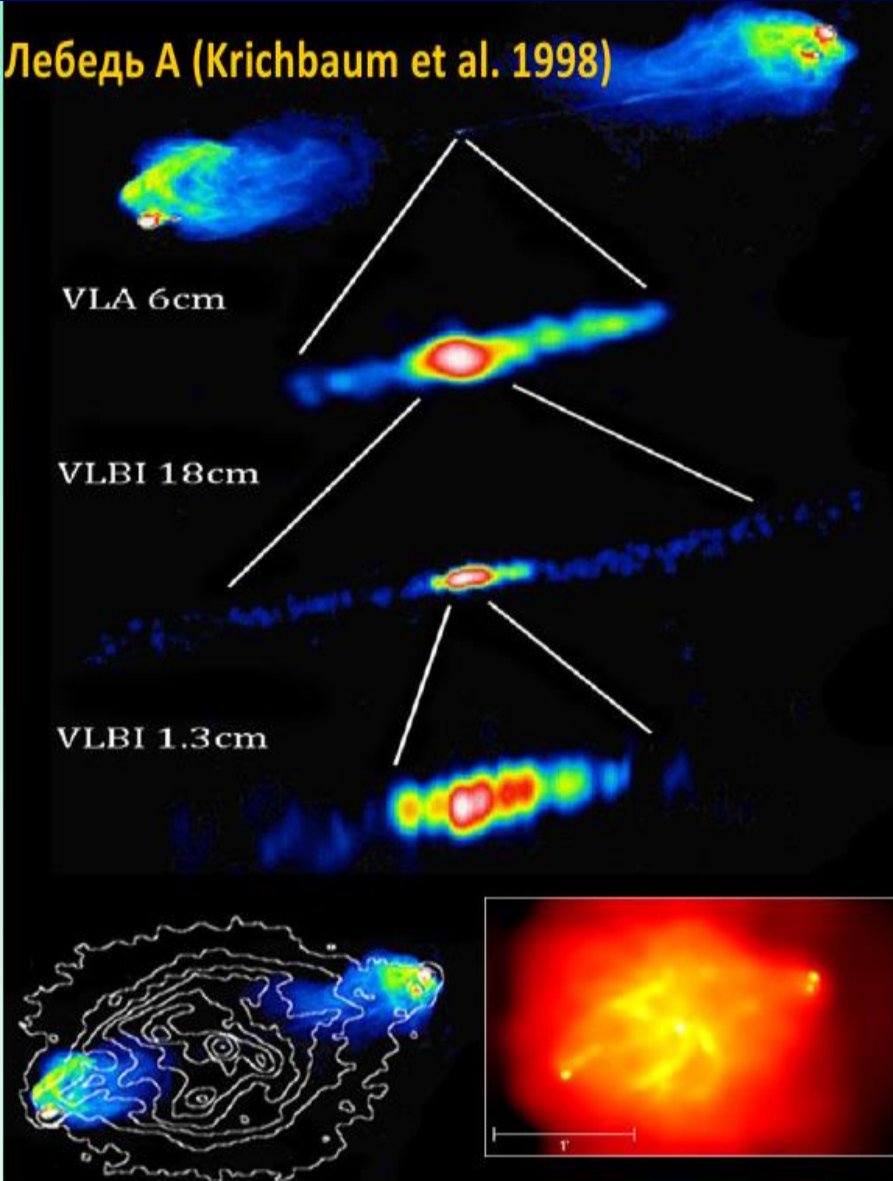
Hubble Space Telescope • STIS • WFPC2



- Выбросы газа из ядра NGC 4151 (слева) в видимом диапазоне (сверху, линии излучения кислорода 495.9 и 500.7 нм) и ультрафиолете (снизу, линия излучения кислорода 154.9 нм).



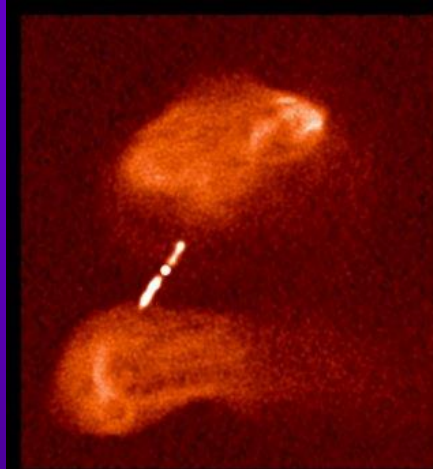
АЯГ 2: Радиогалактики



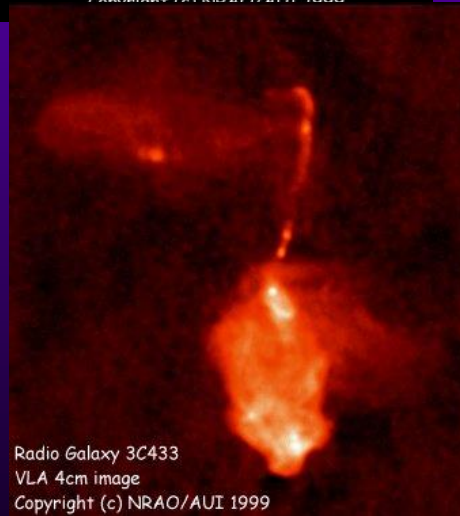
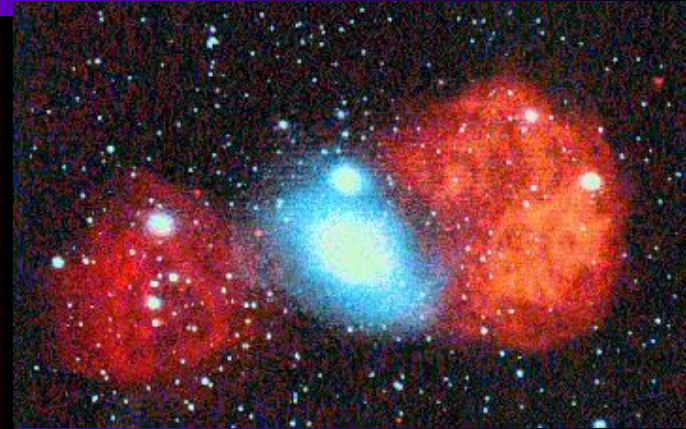
- ▶ Высокая светимости в радио диапазоне (10^{42} - 10^{44} эрг/с).
- ▶ Радиоизлучение связано с выбросом потоков релятивистских электронов из ядра.
- ▶ В основном это **эллиптические** галактики.
- ▶ **Broad Line Radio Galaxies** (с широкими эмиссионными линиями):
 - ▶ - Ширины эмиссионных линий как у сейфертовских 1;
- ▶ **Narrow Line Radio Galaxies** (с узкими эмиссионными линиями):
 - ▶ - Ширины эмиссионных линий как у сейфертовских 2.



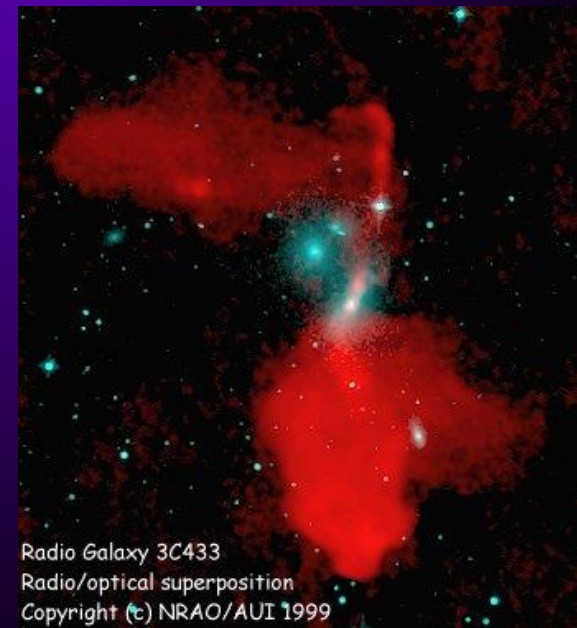
Радиогалактики (VLA, 4 см)



Radio Galaxy 3C288 VLA 4cm image
Copyright (c) NRAO/AUI 1999



Radio Galaxy 3C433
VLA 4cm image
Copyright (c) NRAO/AUI 1999



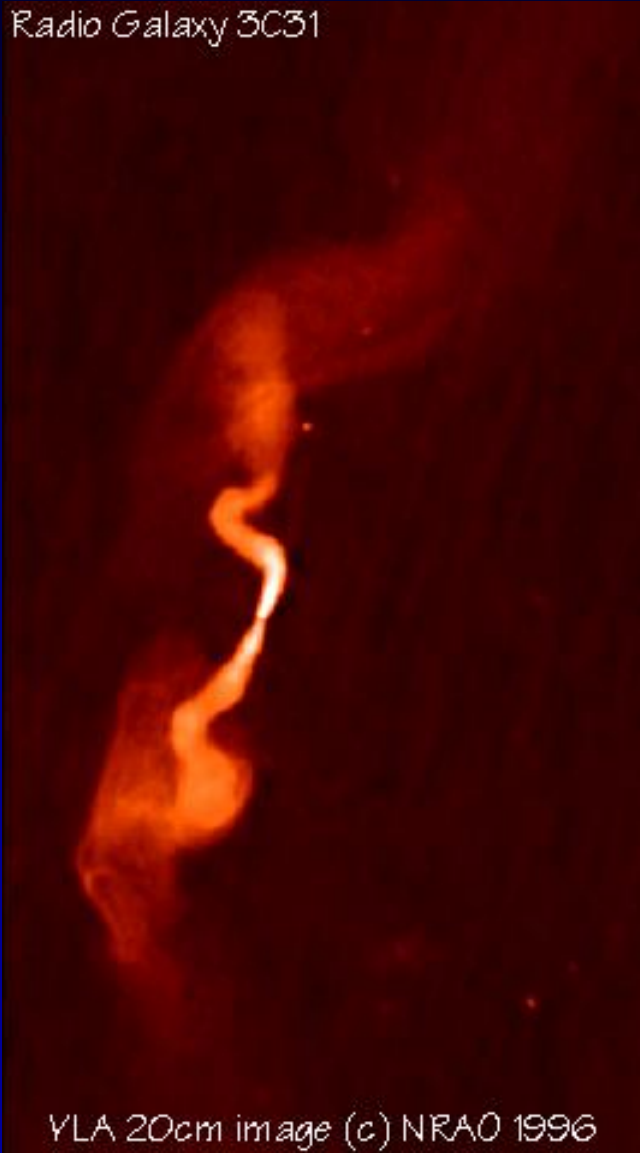
Radio Galaxy 3C433
Radio/optical superposition
Copyright (c) NRAO/AUI 1999

Fanarev-Riley FR I, FR II.



Радиогалактики на $z=0.0169$

Radio Galaxy 3C31



VLA 20cm image (c) NRAO 1996

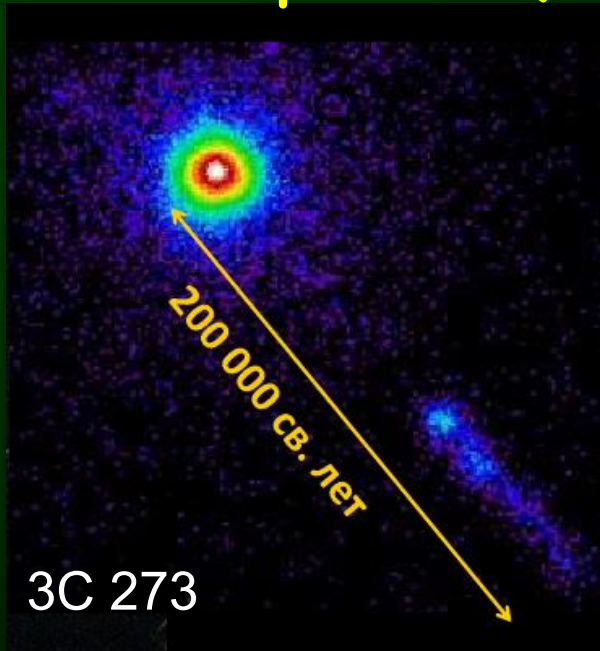


Radio Galaxy 3C31
VLA 3.6cm image

Copyright (c)
NRAO/AUI 2000



Квазары - QSO - квазизвездные объекты - quasars



■ (сокр. от **quasistellar radio source** - **квазизвёздный источник радиоизлучения** - самые мощные долговременные источники излучения во Вселенной

- Высокая светимость (10^{41} - 10^{44} эрг/с), в основном в **оптическом** и **рентгеновском** диапазонах.
- - Широкие и узкие эмиссионные линии в оптическом спектре.
- - Родительская галактика чаще всего **эллиптическая**, реже встречается **спиральная**.
- Активная фаза – порядка 100 млн. лет.



Блазары

- Их более 3000 – *экстремальные представители АЯГ*



- Характеризуются **непрерывным** спектром во всех диапазонах, от радиодиапазона до гамма-лучей.
- Родительские галактики блазаров чаще всего гигантские **эллиптические**.
- На основе спектров блазары разделяют на два подкласса: **BL Lacertae** объекты и **квазары с плоским спектром** FSRQ (flat spectrum radio quasars).



Блазары



M96

- **BL Lacs:**

- Оптический спектр BL Lacs без особенностей, относительно других AGN, например, квазаров.
- Сильная оптическая поляризация ($>3\%$ до 60-70% во время вспышек).
- Быстрая переменность по светимости во всех диапазонах спектра (порядка суток). Эффекты **«Джет направлен на нас»+размер самого ядра**

- **FSRQ:**

- Оптический спектр с эмиссионными линиями.
- Наблюдается не только быстрая (порядка суток), но и сильная переменность (около 10%, до 50%, от полной светимости).



M58



Лацертиды

- Немногочисленная группа галактик с активными ядрами.



- VL **Lacertae** наблюдался в 1929 г. немецким астрономом *Куно Хофмейстером* в созвездии Ящерицы (Lacertae). Первоначально был отнесен к переменным звёздам (z VL Lac $\sim 0,07$)

Куно Хофмейстер

- Оптические спектры, как правило, являются непрерывными, поэтому обнаружение красного смещения весьма затруднено. Блеск лацертид изменяется в широких пределах.
- Излучение лацертид сильно поляризовано (до 30–40%), а это указывает на присутствие **магнитного поля**.
- Лацертиды подобно квазарам окружены туманными оболочками.
- Характерное время переменности составляет **недели и месяцы**.



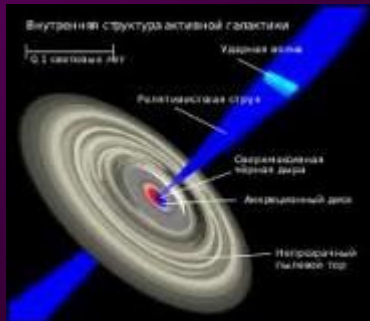
Какова же природа активности ядер?

- Существовало несколько гипотез, но в настоящее время доминирует одна:

- Ядра – диски ультра горячей замагниченной плазмы вокруг сверхмассивных черных дыр.

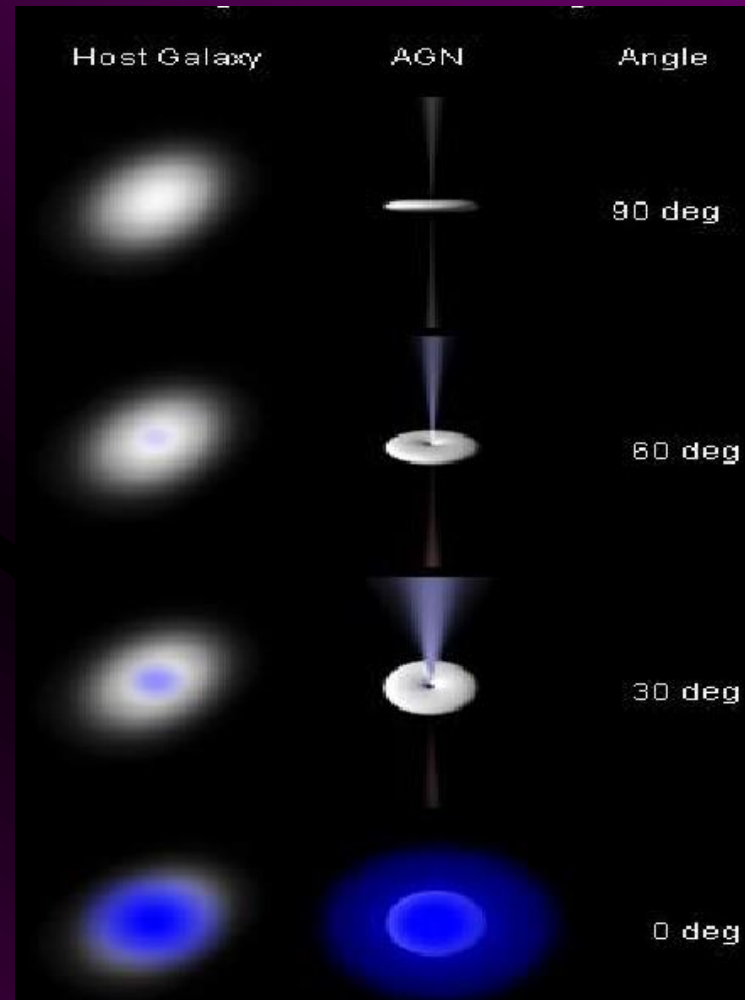
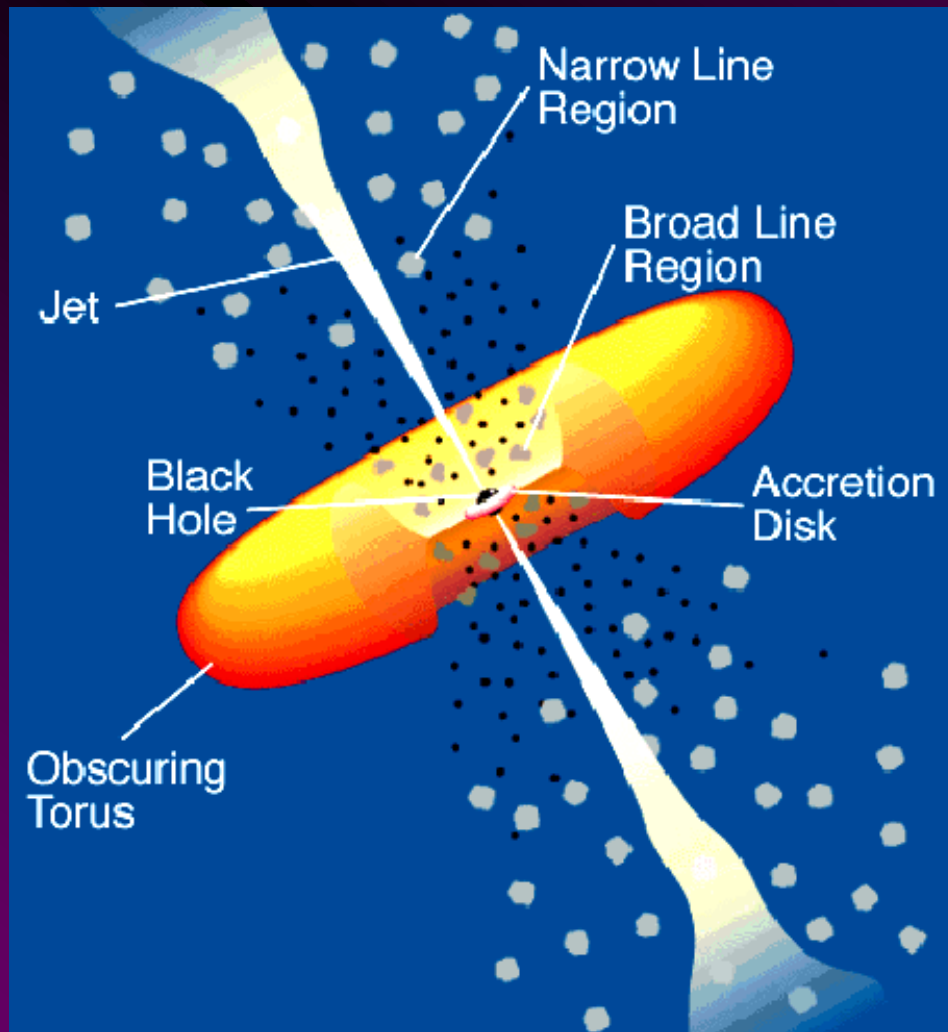
- Активное ядро = сверхмассивная черная дыра + потоки падающего на нее газа.

- **Источник энергии – гравитационное поле, преобразующее потенциальную энергию падающего газа в кинетическую и тепловую.**





Как объяснить разнообразие наблюдательных свойств АЯГ?



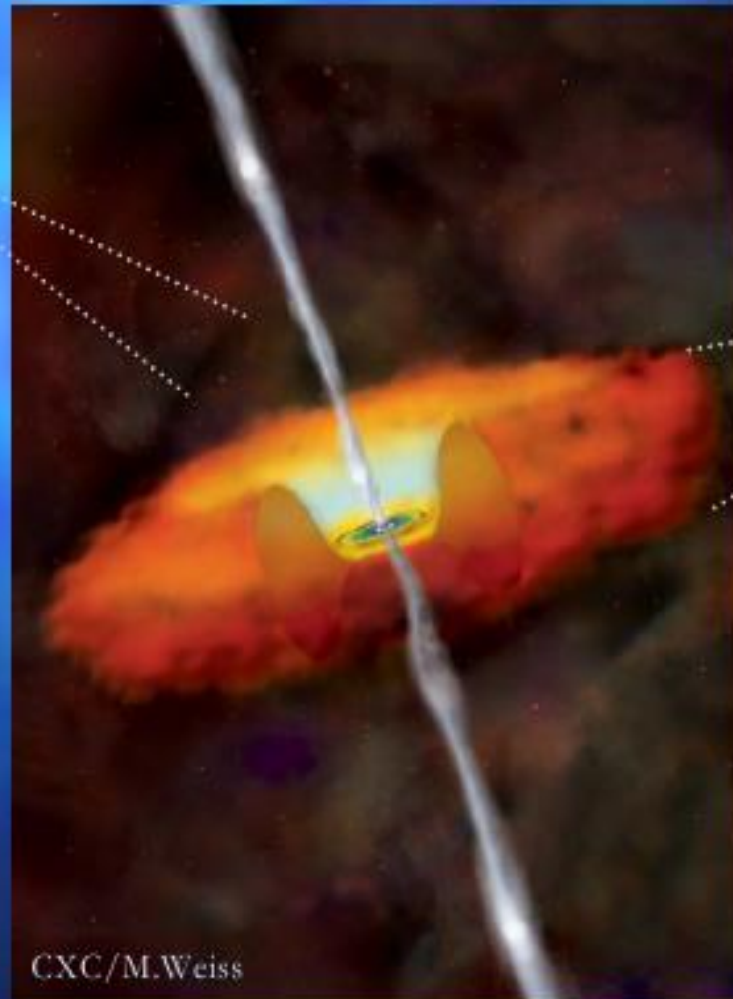
Urry & Padovani 1995



Activity



Type 1:
One-Sided Jets;
Broad and Narrow
Line Region;
No absorption of
soft X-Rays



CXC/M.Weiss

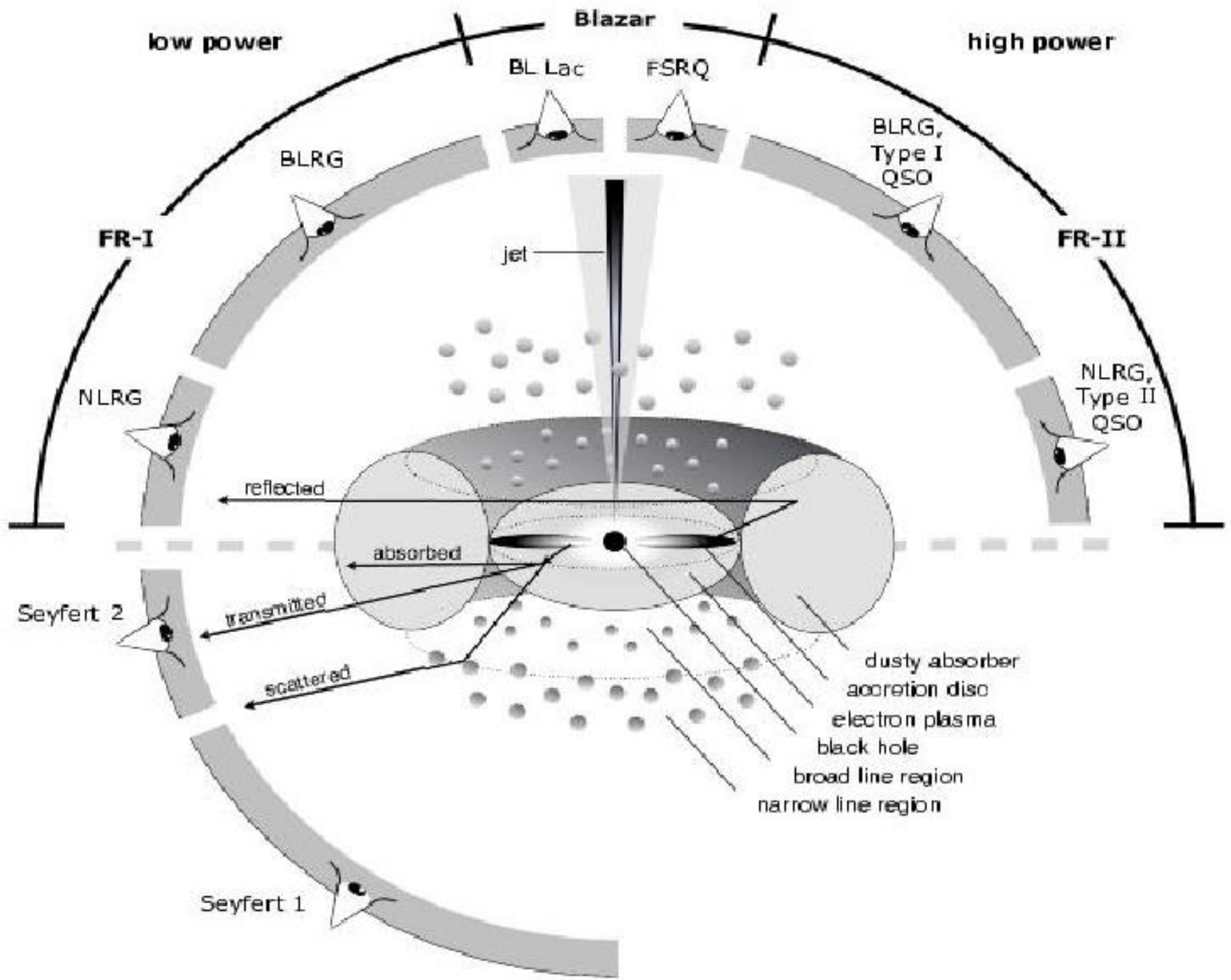


Type 2:
Two-Sided Jets;
Free-Free Absorption;
Narrow Line Region;
Strong Absorption of
soft X-Rays



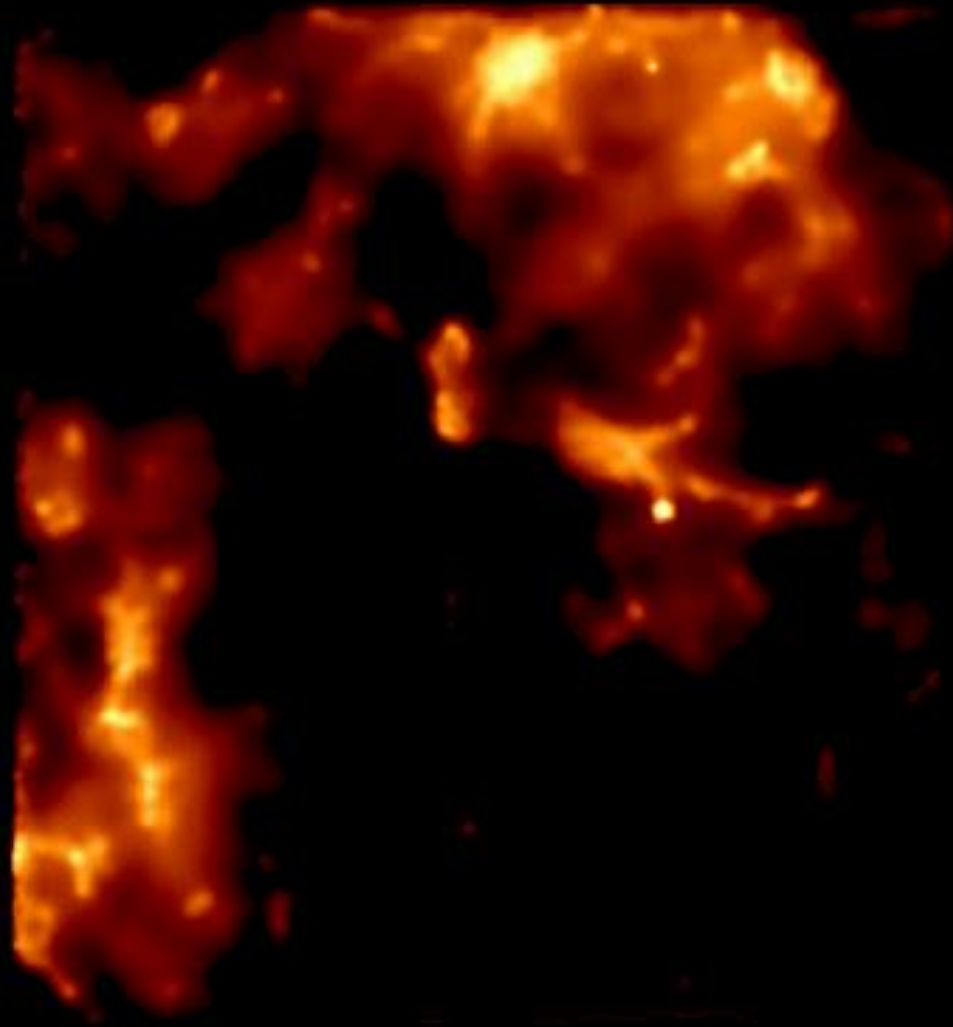
radio-loud (RL) AGN

radio-quiet (RQ) AGN



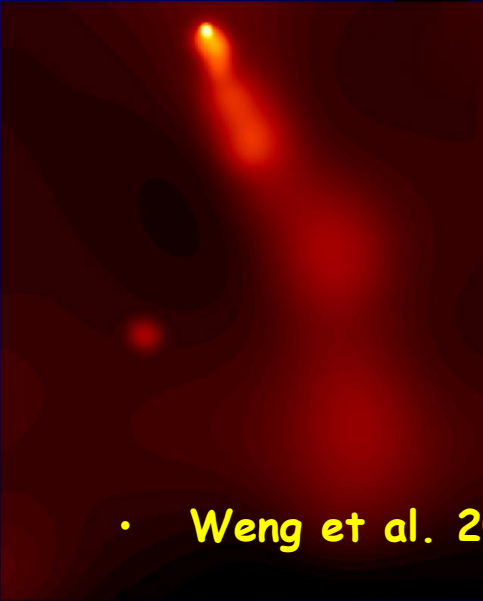
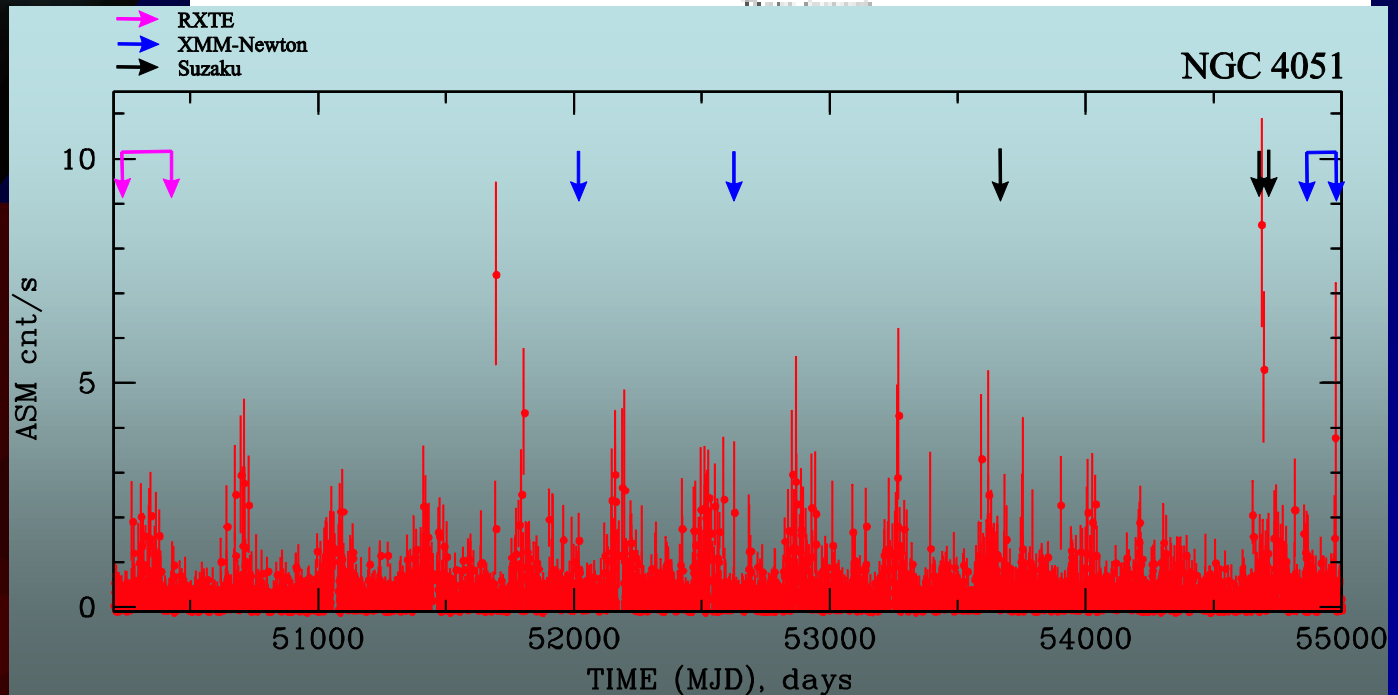
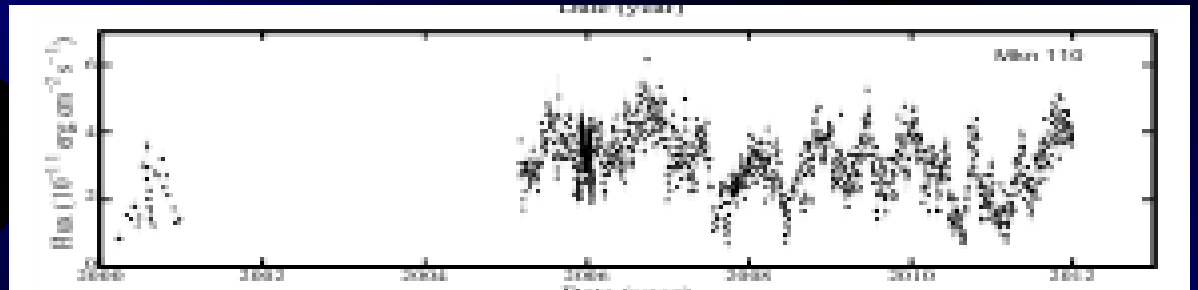


Вспышки – своеобразный способ исследования объектов





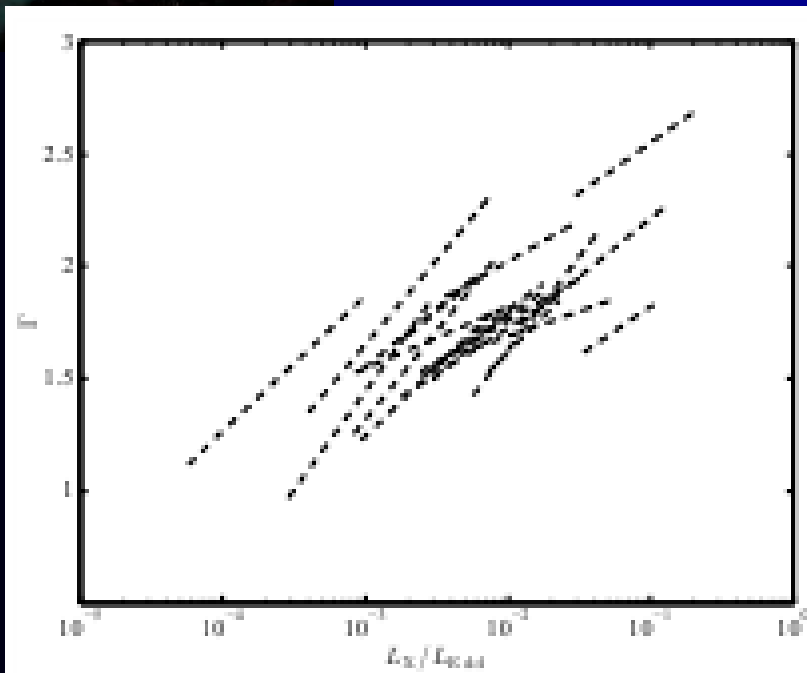
Переменность Сейфертовских галактик в рентгеновском диапазоне



• Weng et al. 2020, MNRAS, 491, 257



Галактики Seyfert-1



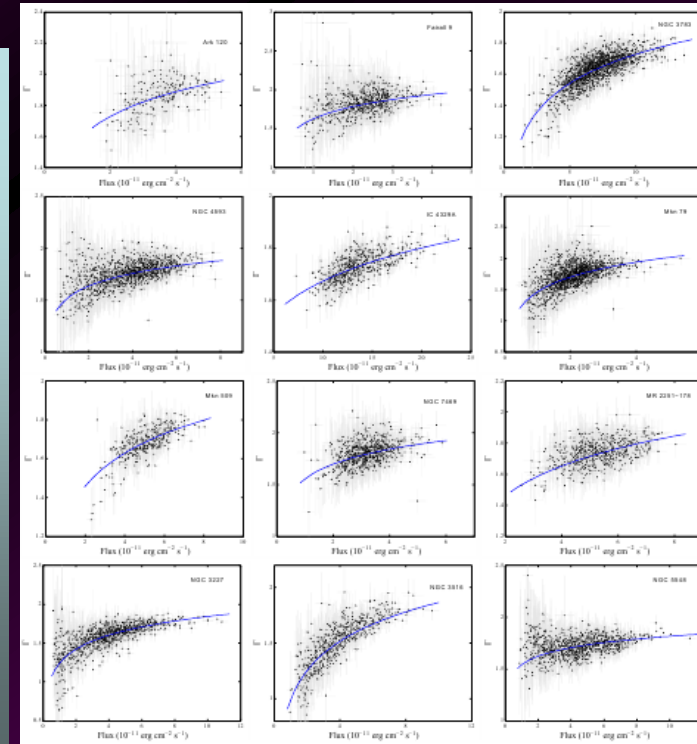
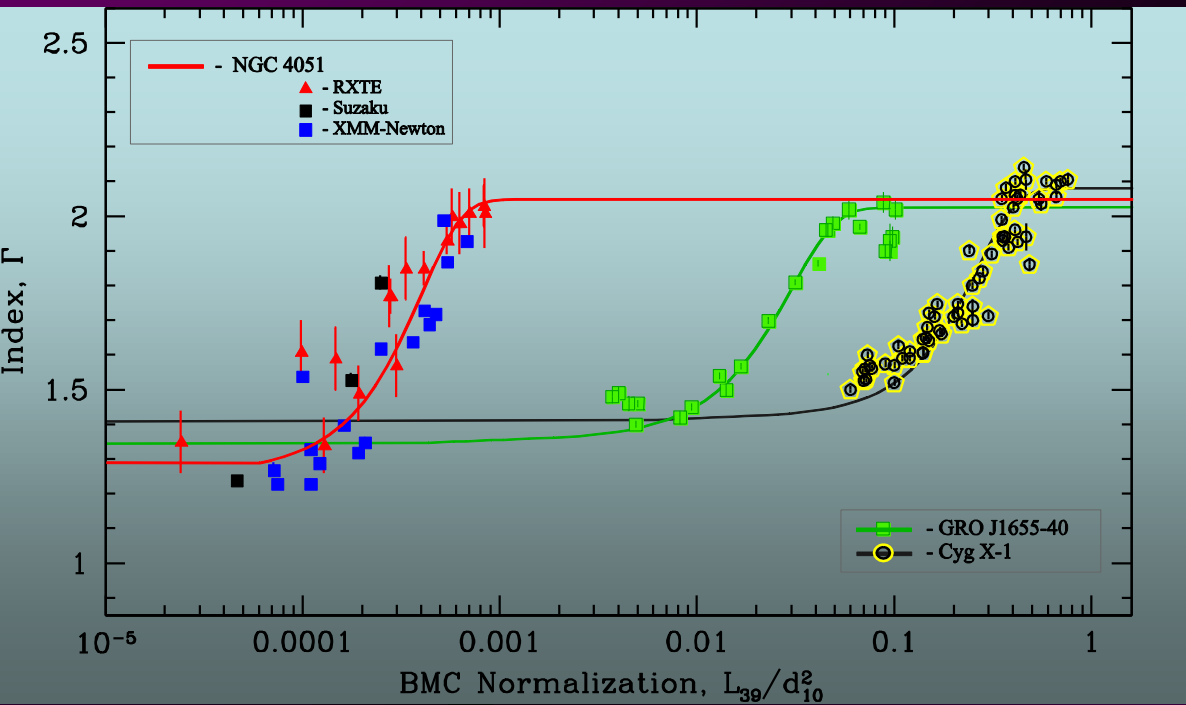
Source	ObsID	MJD	Γ	$f_{\text{flux}} - 10 \text{ keV}$	χ^2 / dof
Ark 120	30232-01-96-00	51248	$1.73^{+0.17}_{-0.17}$	$3.33^{+0.56}_{-0.26}$	19.1/43
Fairall 9	20313-01-80-00	50690	$1.84^{+0.18}_{-0.19}$	$2.15^{+0.19}_{-0.19}$	19.0/43
NGC 3783	40152-04-91-00	51564	$1.68^{+0.08}_{-0.08}$	$7.08^{+0.50}_{-0.50}$	14.8/35
NGC 4593	91140-04-05-00	53703	$1.79^{+0.14}_{-0.13}$	$3.75^{+0.24}_{-0.24}$	17.2/38
IC 4329A	70148-01-01-15	52872	$1.76^{+0.03}_{-0.03}$	$13.36^{+0.23}_{-0.23}$	22.7/36
Mkn 79	96127-02-78-00	55715	$1.71^{+0.21}_{-0.20}$	$2.06^{+0.20}_{-0.21}$	16.4/38
Mkn 509	80157-01-11-10	53653	$1.72^{+0.08}_{-0.07}$	$5.11^{+0.19}_{-0.19}$	15.6/38
NGC 7469	10315-01-55-30	50273	$1.84^{+0.10}_{-0.10}$	$3.12^{+0.14}_{-0.14}$	18.0/43
MR 2251-178	92114-01-43-00	54003	$1.75^{+0.107}_{-0.10}$	$5.29^{+0.27}_{-0.27}$	17.8/38
NGC 3227	50153-07-43-00	51647	$1.65^{+0.12}_{-0.12}$	$3.82^{+0.22}_{-0.22}$	18.3/37
NGC 3516	40223-01-76-00	51499	$1.63^{+0.12}_{-0.12}$	$3.73^{+0.24}_{-0.24}$	16.1/35
NGC 5548	96390-03-04-00	55573	$1.69^{+0.12}_{-0.11}$	$4.39^{+0.25}_{-0.25}$	13.8/38
NGC 7314	40151-02-61-00	51741	$1.80^{+0.15}_{-0.15}$	$3.64^{+0.28}_{-0.28}$	17.3/37
Ark 564	10291-02-01-01	50440	$2.51^{+0.09}_{-0.09}$	$2.41^{+0.09}_{-0.09}$	26.4/43
MCG-6-30-15	40155-01-01-06	51380	$1.76^{+0.09}_{-0.09}$	$5.08^{+0.24}_{-0.24}$	15.9/35
Mkn 110	96127-10-05-10	55765	$1.81^{+0.16}_{-0.15}$	$3.18^{+0.24}_{-0.23}$	17.0/38
Mkn 335	95382-01-10-00	55215	$1.97^{+0.31}_{-0.45}$	$0.98^{+0.21}_{-0.20}$	18.7/38
Mkn 766	92108-02-07-00	53824	$2.02^{+0.20}_{-0.19}$	$2.90^{+0.28}_{-0.28}$	18.5/38
NGC 4051	70141-01-01-02	52539	$1.90^{+0.10}_{-0.10}$	$2.57^{+0.11}_{-0.11}$	17.0/37
NGC 5506	60133-02-85-00	52138	$1.85^{+0.06}_{-0.06}$	$12.73^{+0.48}_{-0.48}$	14.7/35

- Корреляция между Γ и L_X/L_{Edd} при аппроксимации моделью power-law для всех галактик Seyfert 1.
- В целом, Γ изменяется от 1.5 до 2.5



Насыщение индекса в Сейфертовских галактиках

- NGC 4051 - narrow line Seyfert 1s



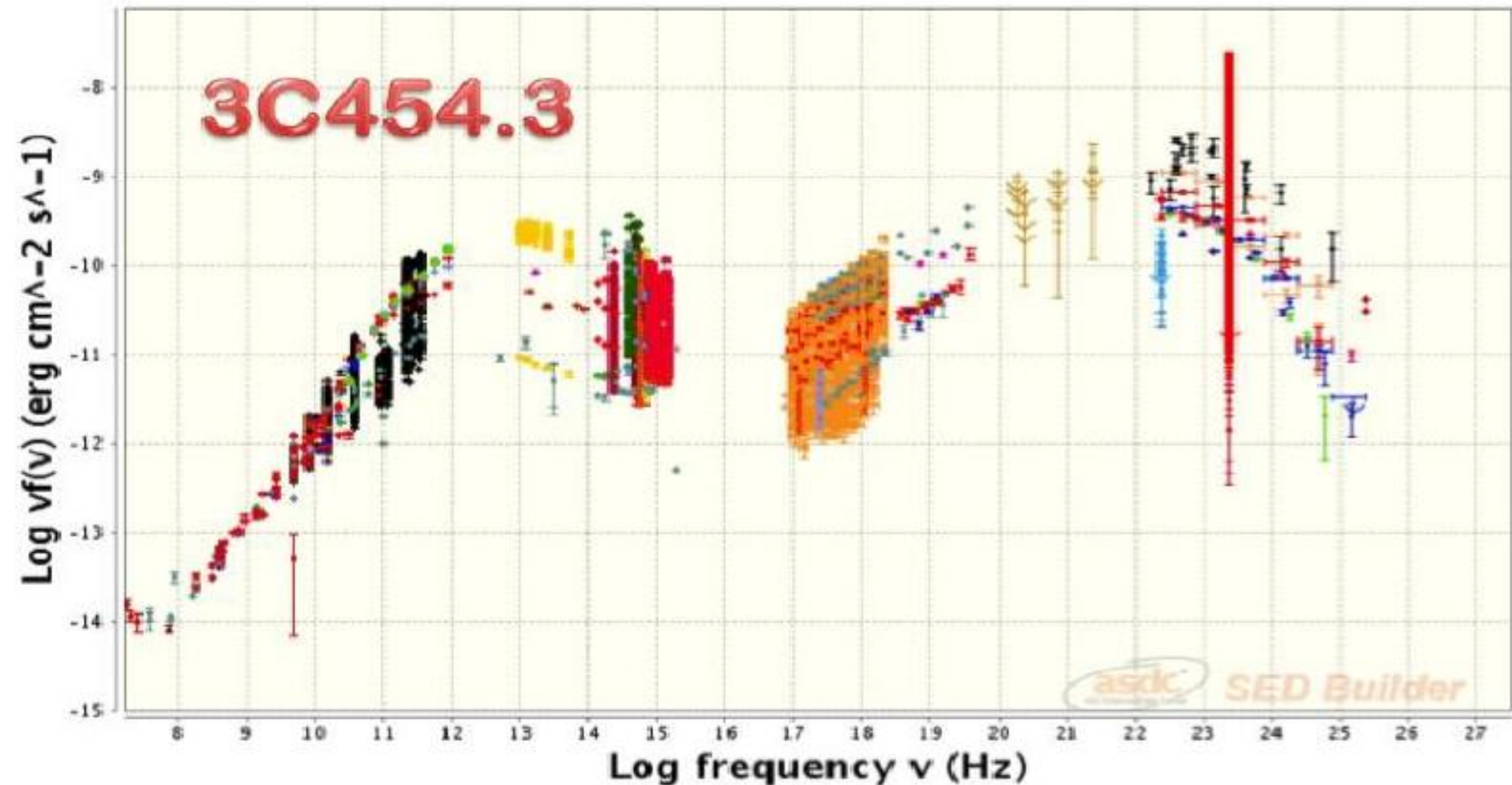
Процедура скалирования для NGC 4051 (красная линия - target source), и GRO J1655-40 и Cygnus X-1 (reference sources, зеленая и черная линии, соответственно).

$$M_{\text{BH}} = 6 \times 10^5 M_{\odot}$$

Seifina, Chekhtman & Titarchuk, A&A 613, A48 (2018)



Распределение энергии в спектре блазаров





Модель "джет в джете"

- излучающая газообразная среда в релятивистском джете разделена на множество элементов, которые двигаются в хаотических направлениях с релятивистскими скоростями относительно средней системы джета. Хаотические движения вызывают новые релятивистские эффекты.
- Каждый элемент является источником излучения в направлении его движения. Только небольшая часть элементов излучает в направлении наблюдателя, но в результате релятивистских эффектов яркость излучения источника растет. Эта модель объясняет большую видимую светимость и быструю переменность блазаров. Обычно рассматриваются две версии модели "джет в джете":



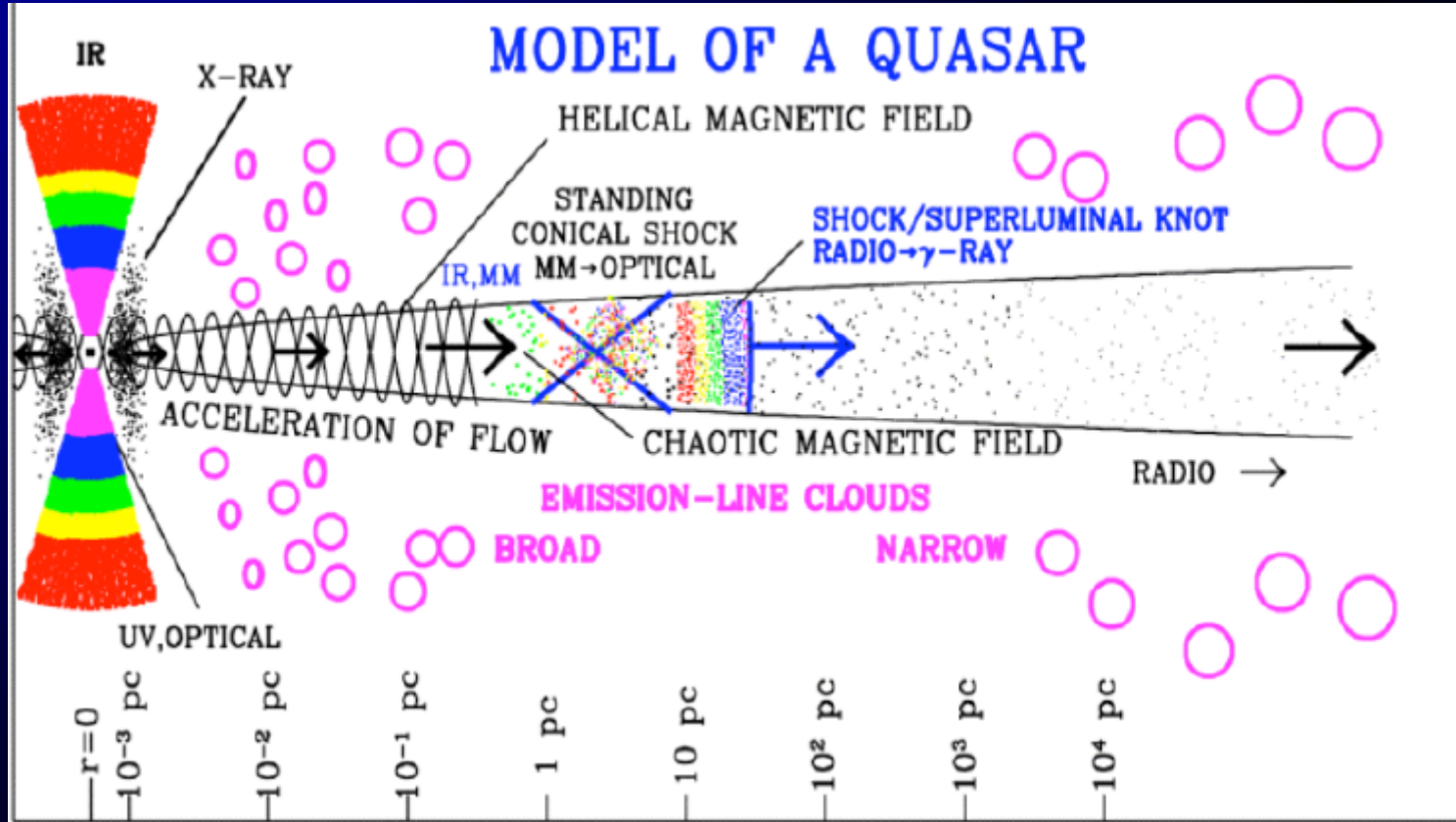
Переменность блазаров



- 1) Предполагается, что во многих образованиях внутри джета происходит **перезамыкание магнитных силовых линий** внутри среды джета. Каждое перезамыкание создает спаренные релятивистские элементы, движущиеся в противоположных направлениях вдоль магнитного поля. Продолжительность времени импульсов в наблюдаемой кривой блеска определяется размерами уплотнений в джете. Роль релятивистского эффекта – обеспечить увеличение светимости.
- 2) **Модель турбулентности**: предполагается, что нестабильность среды внутри джета приводит к релятивистским беспорядочным движениям внутри элементов. В результате продолжительность вспышек определяется размерами этих элементов.
- Эти две модели похожи, но отличаются в деталях, которые становятся важны в случае экстремальных объектов.



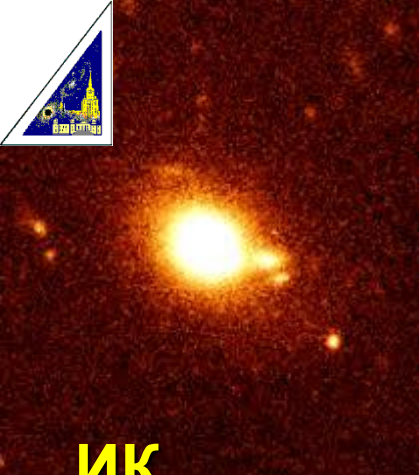
Модель



- Схематическое представление ультрарелятивистского джета в АЯГ (Marsher 2009), иллюстрирующее приблизительное расположение мест ускорения джета и образования γ -излучения. Шкала расстояний дана в логарифмическом масштабе.



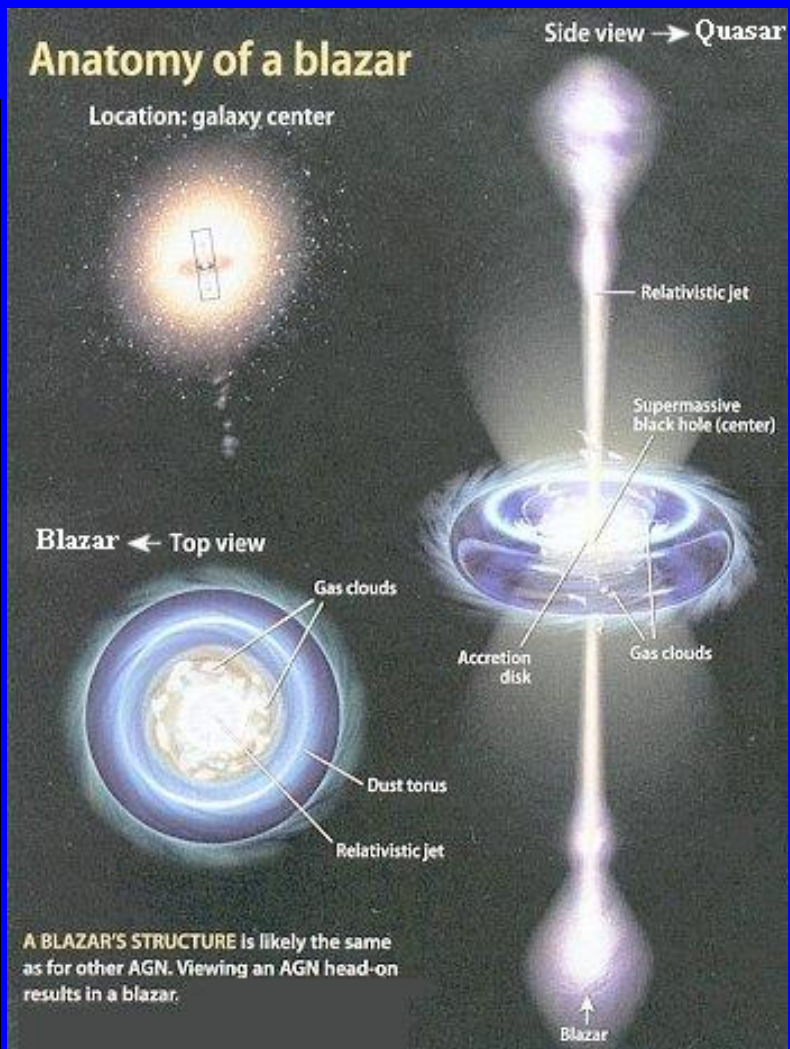
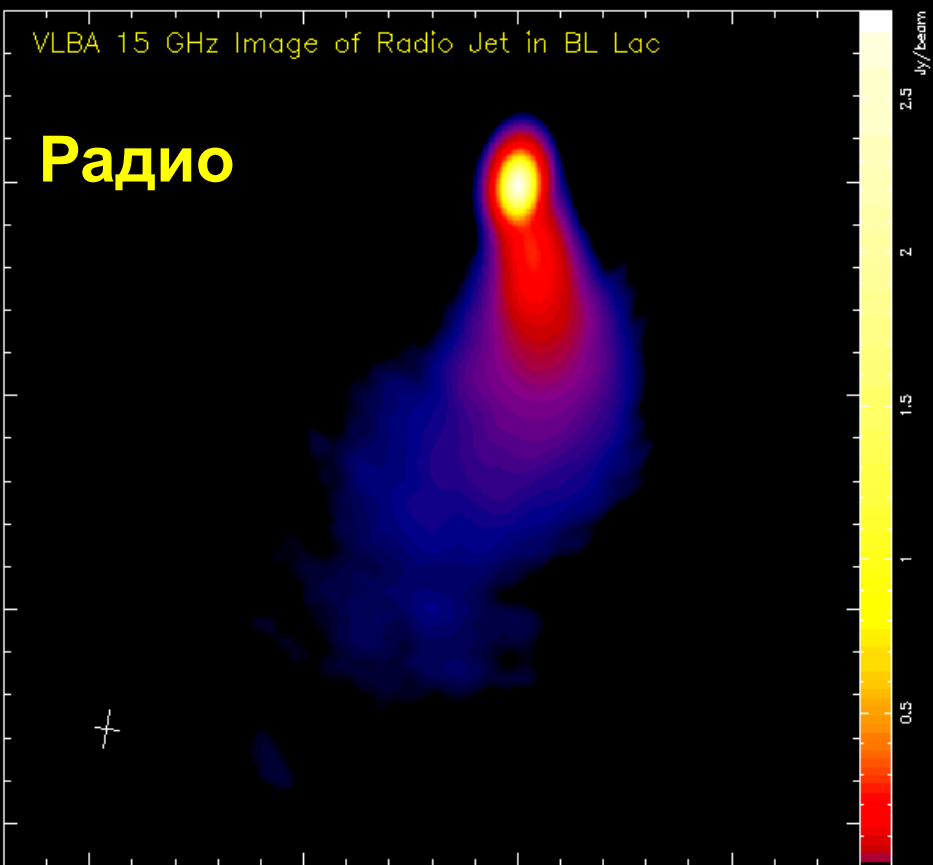
Блазар BL Lacertae



ИК

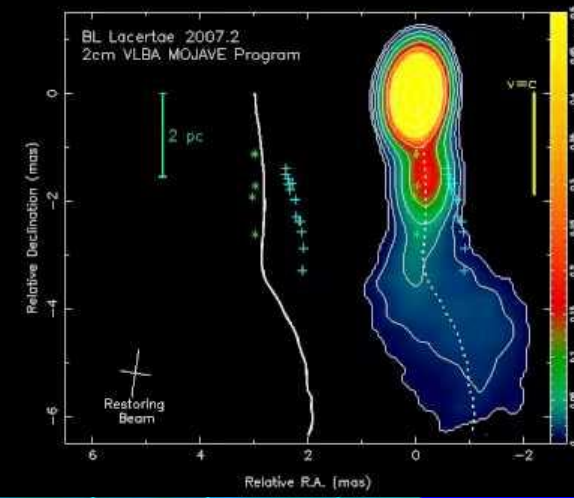
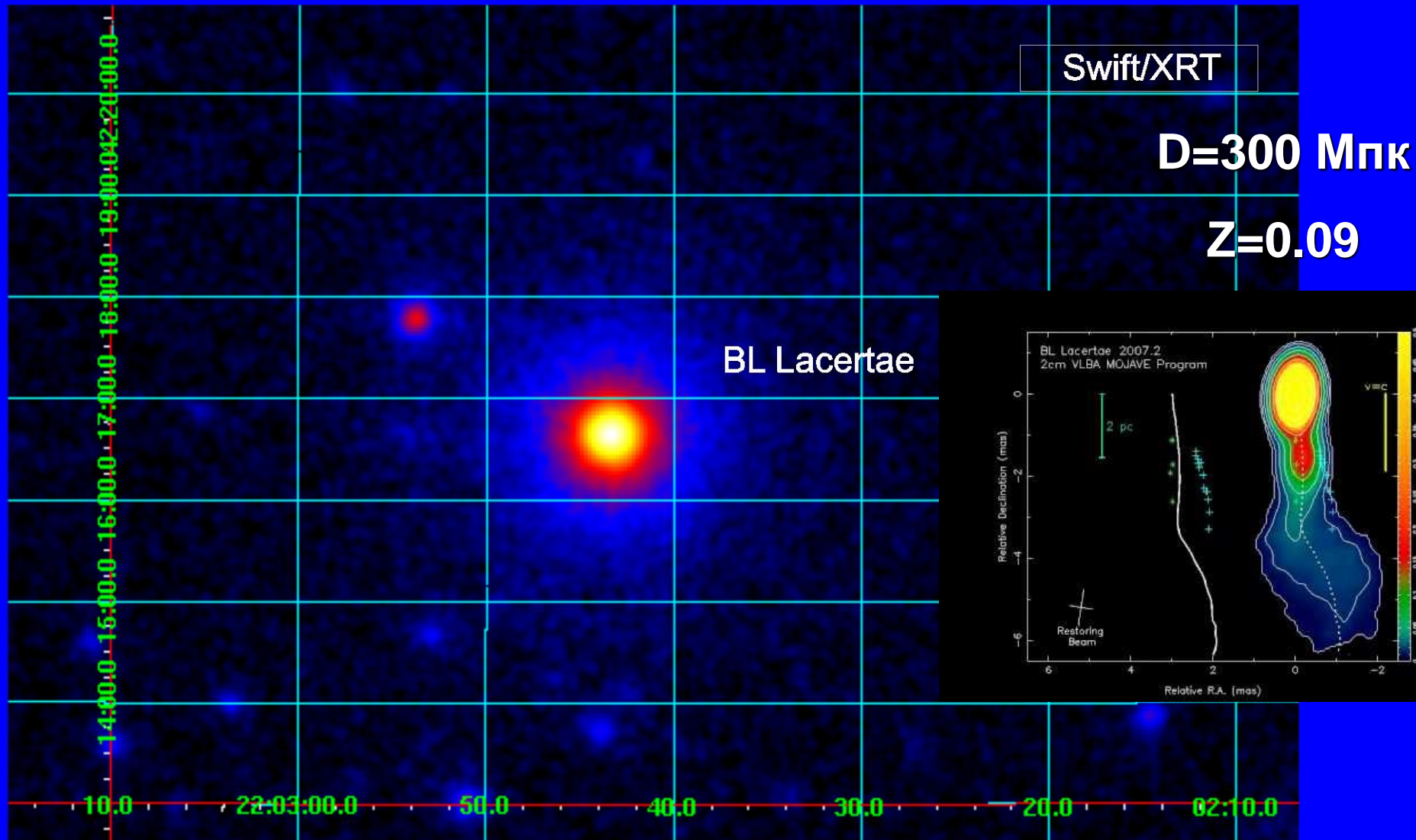
VLBA 15 GHz Image of Radio Jet in BL Lac

Радио





Эволюция рентгеновского излучения блазара BL Lac (B2200+420)





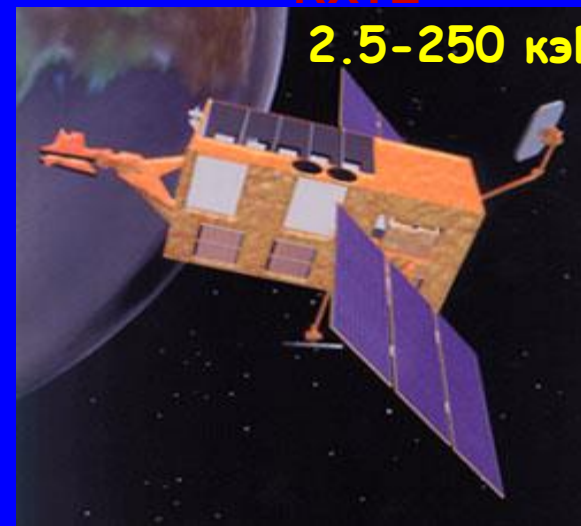
Рентгеновские инструменты

ВерроSAX



RXTE

2.5-250 кэВ



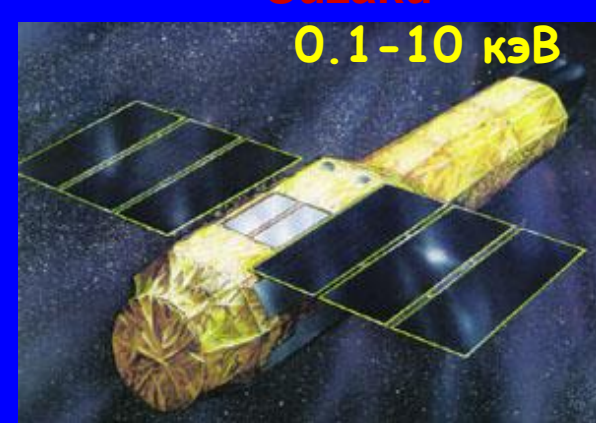
Chandra



Swift

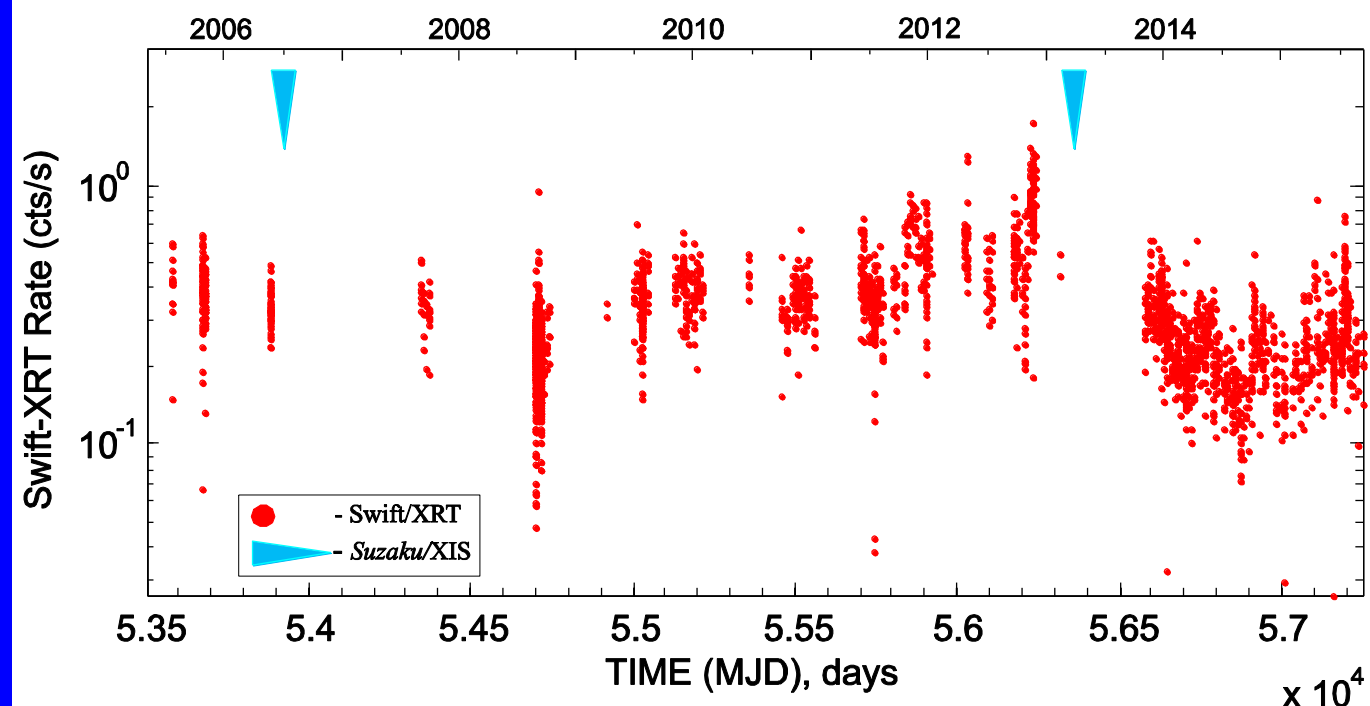
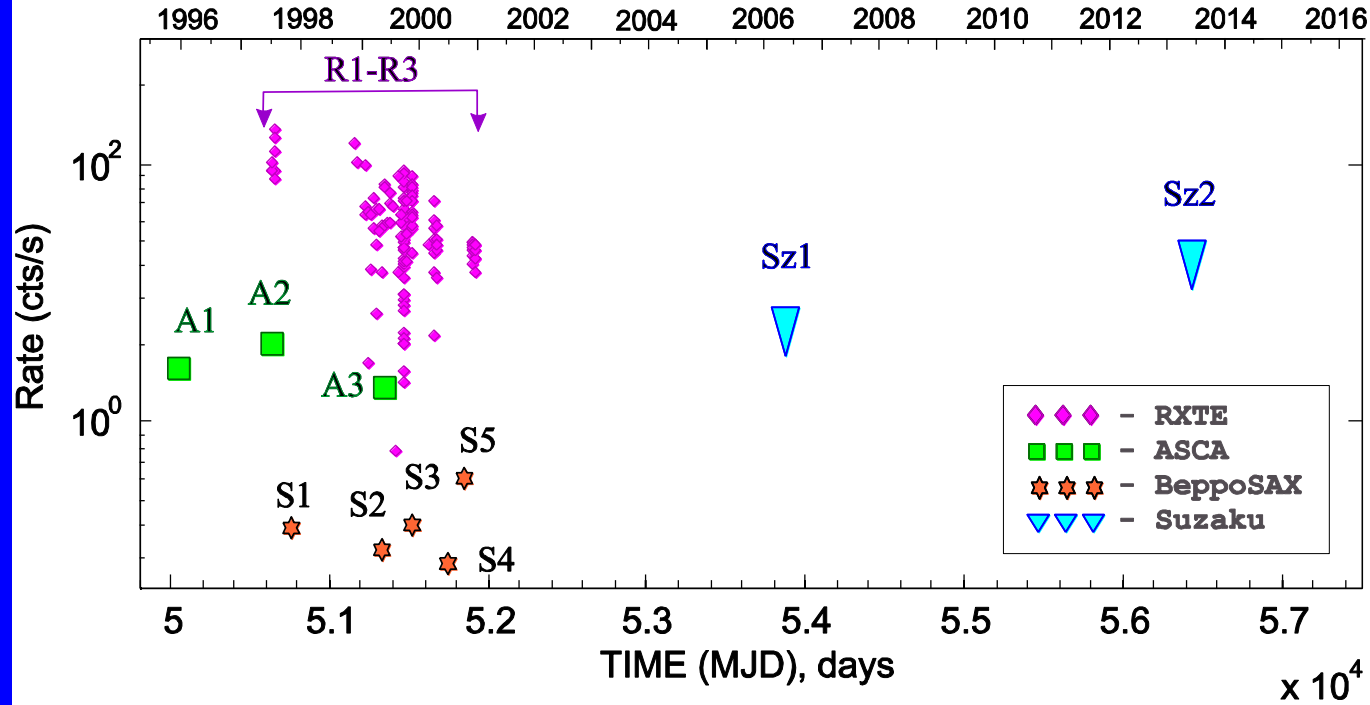


Suzaku



0.1 - 200 кэВ





Наблюдения:

ASCA

RXTE

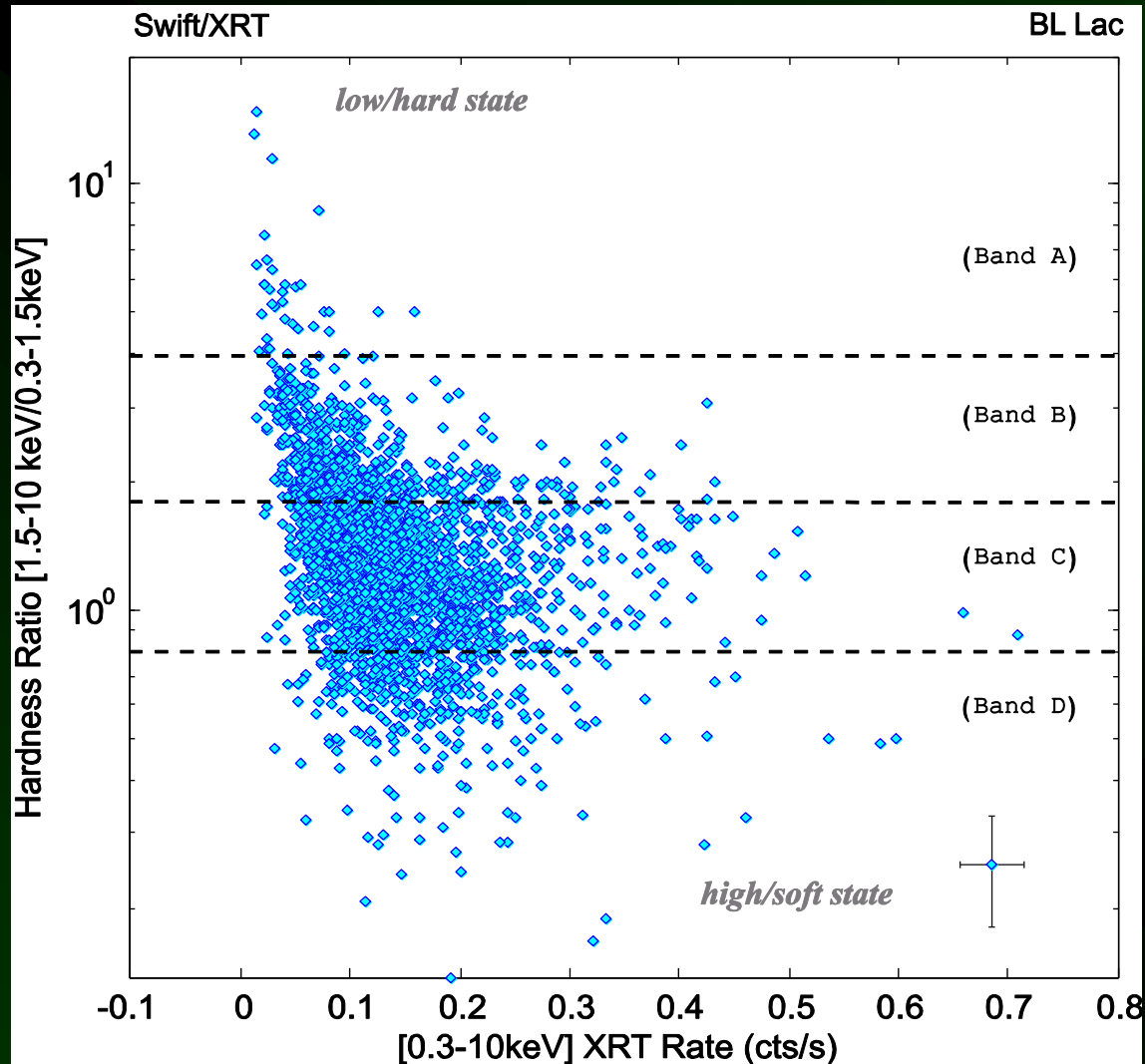
BeppoSAX

Suzaku

Swift

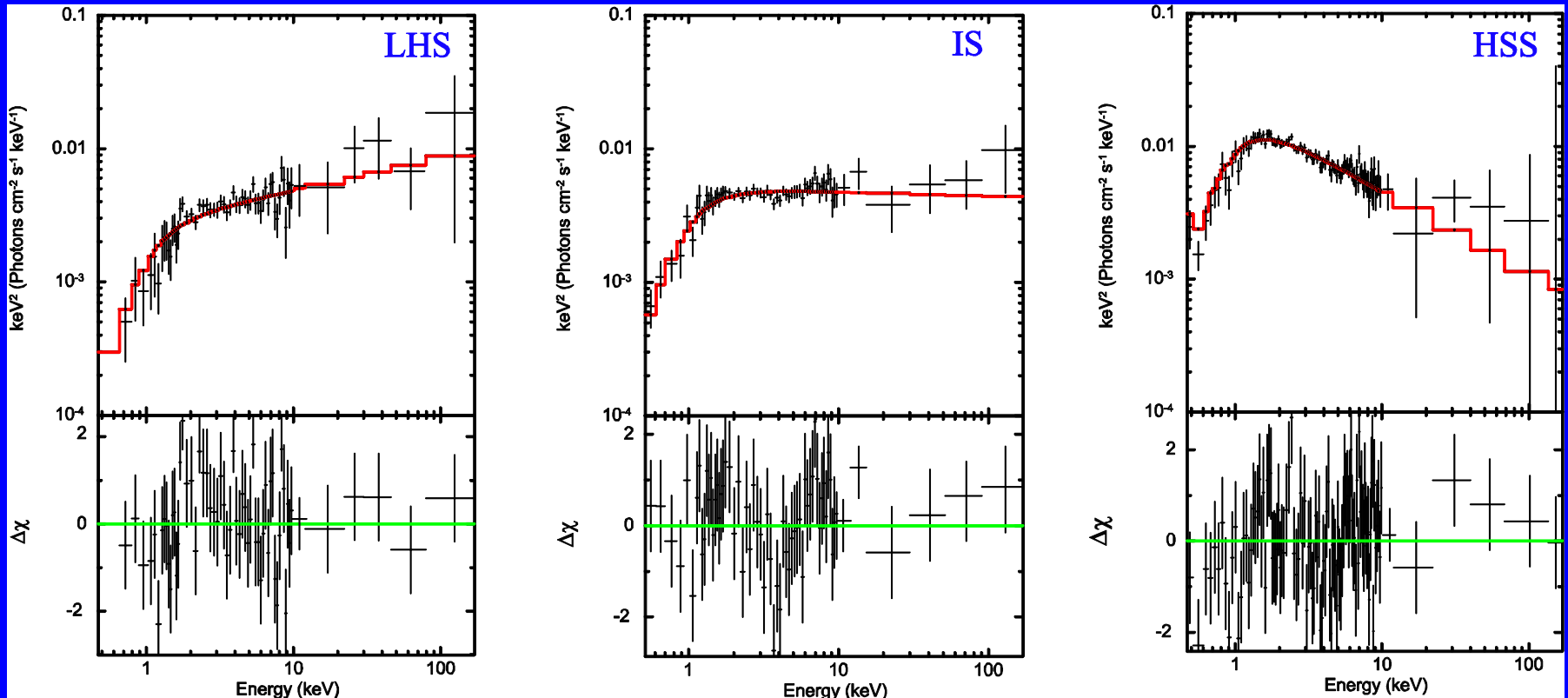


Эволюция жесткости рентгеновского спектра Sw J1644-47 [0.3-10 кэВ]



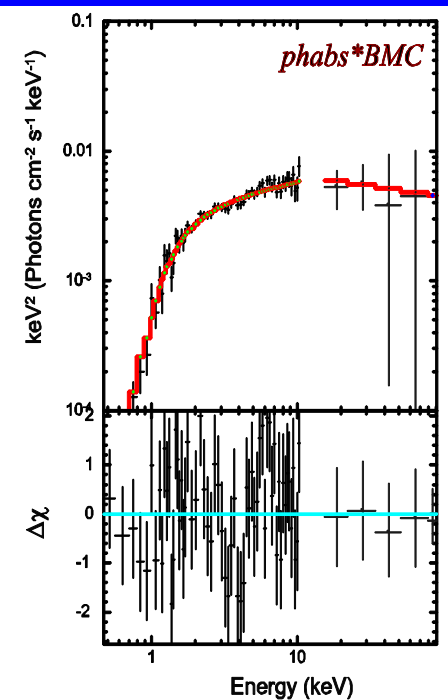
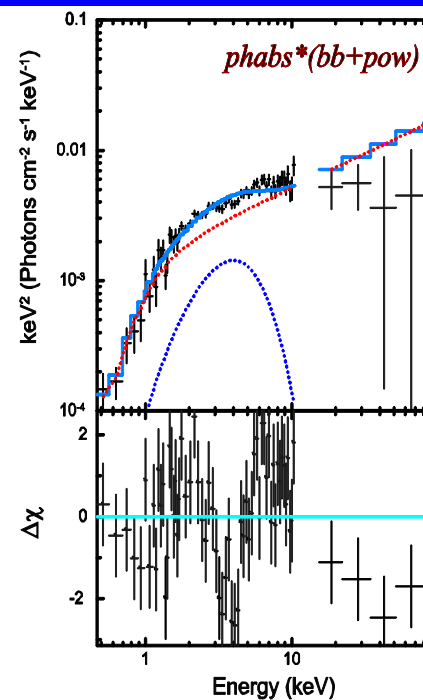
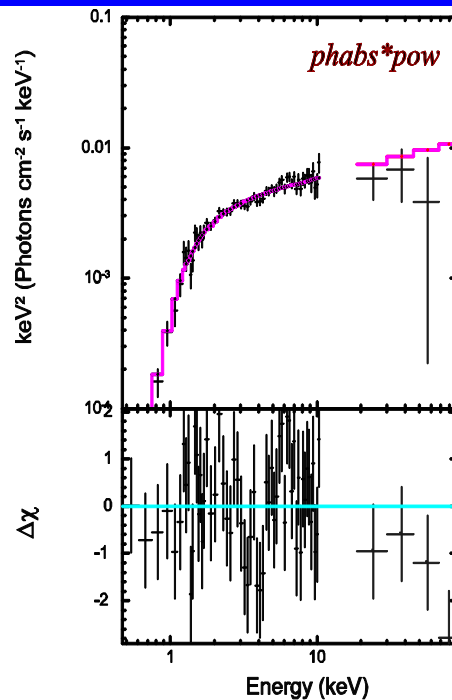
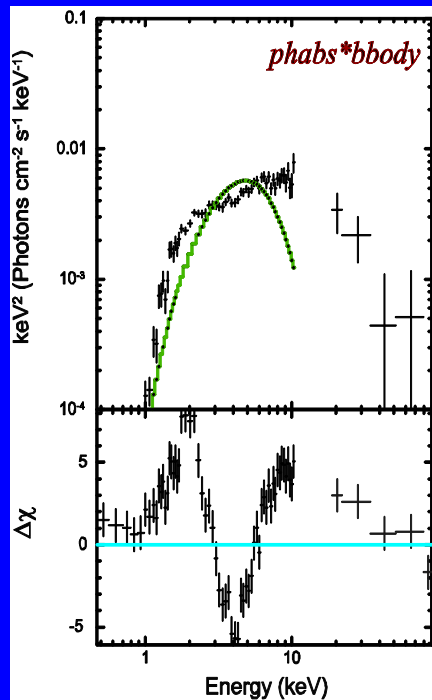


Изменение формы спектра BL Lac по данным *BeppoSAX*



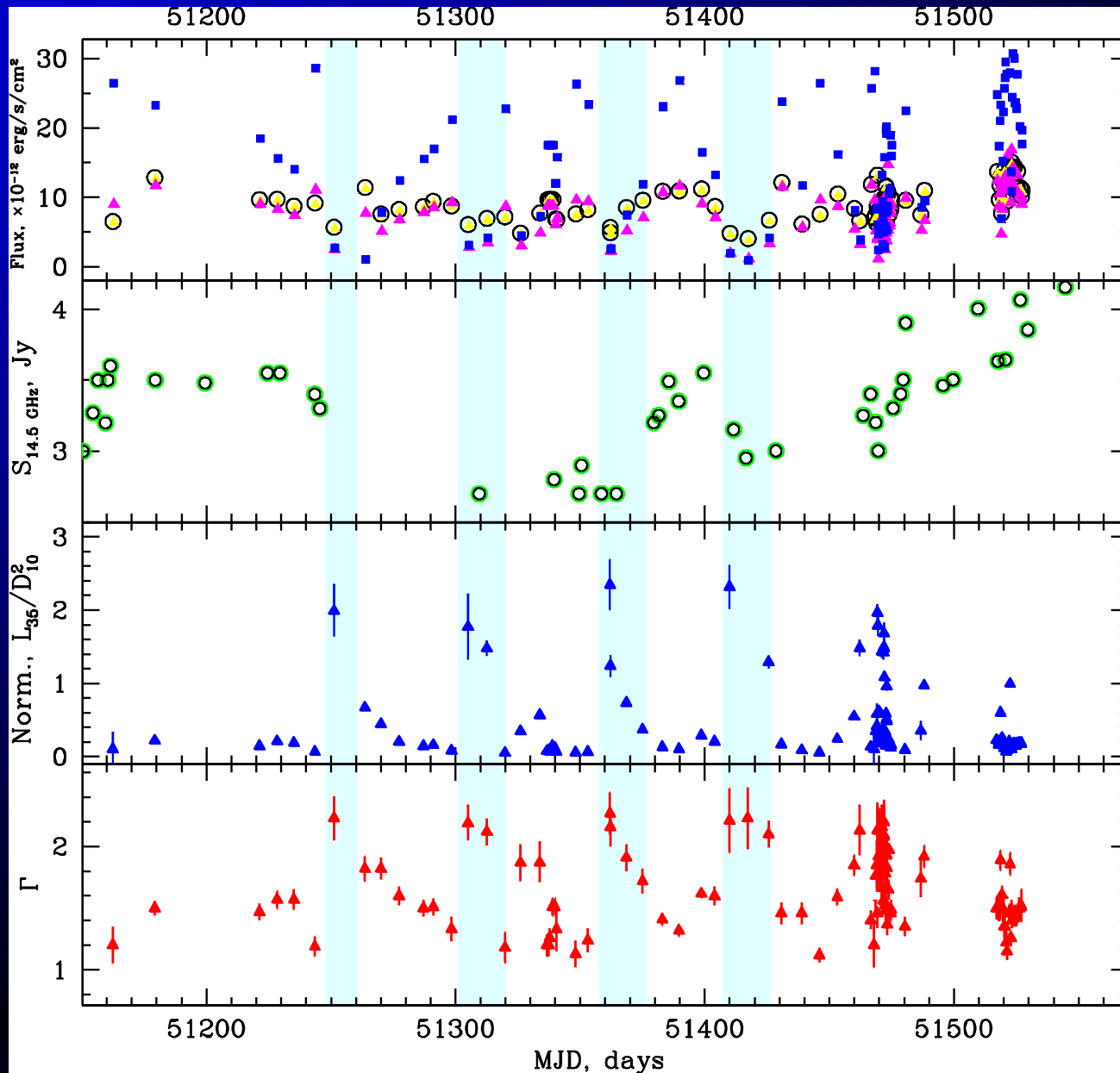


Выбор модели для аппроксимации спектра VL Lac по данным RXTE





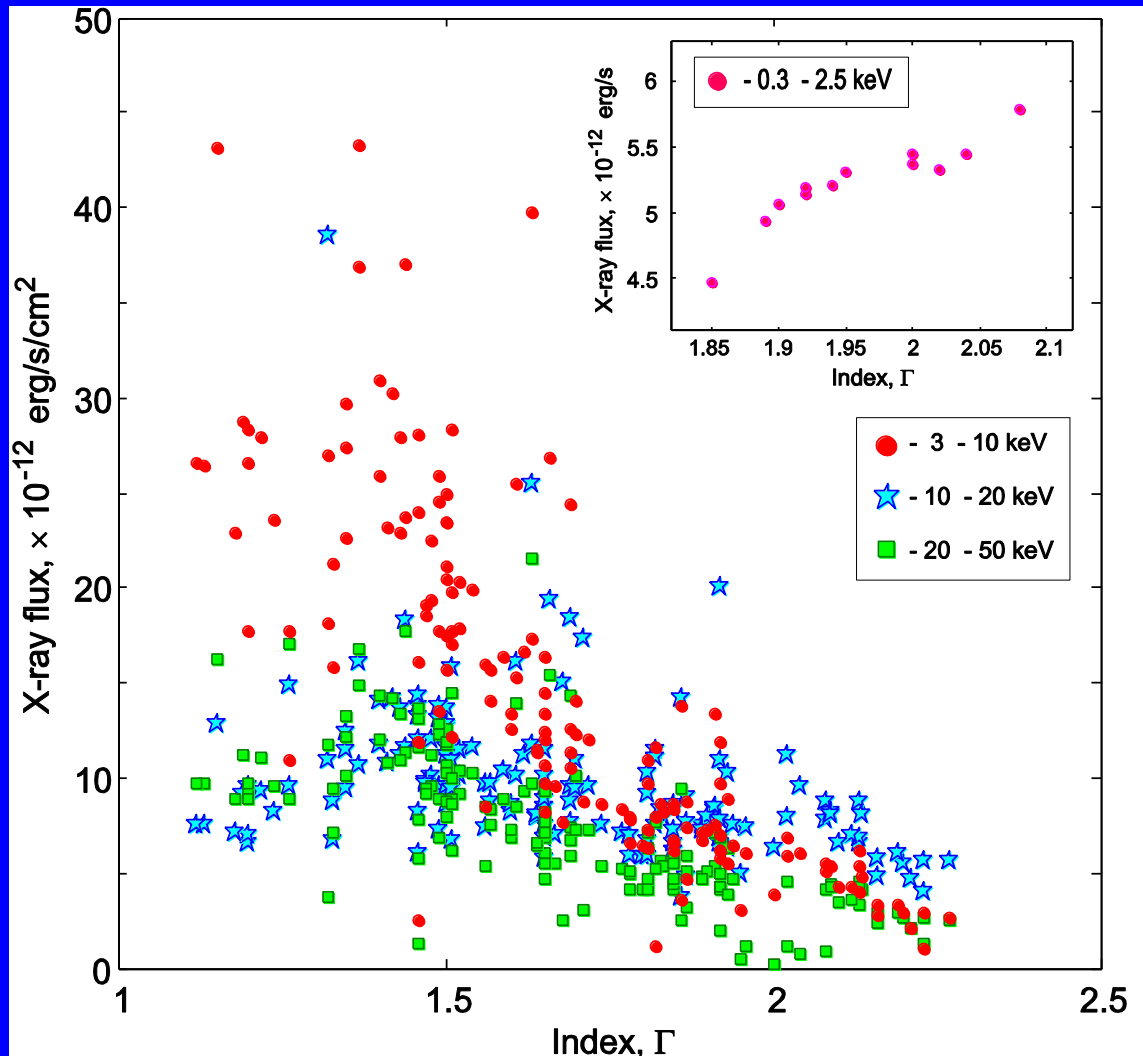
Сопоставление с радиоданными

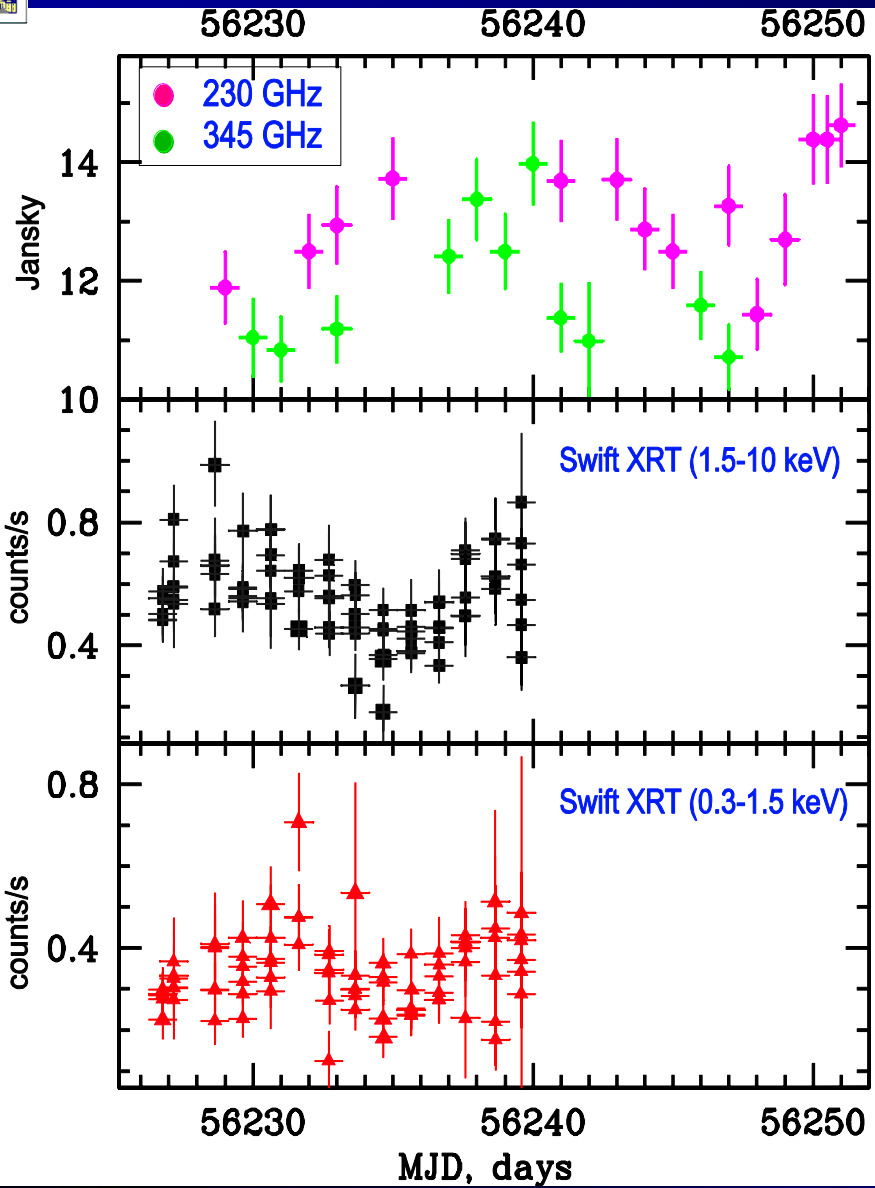


*Благодарность
Валентине
Конниковой*



Жесткость спектра VL Лас в разных диапазонах

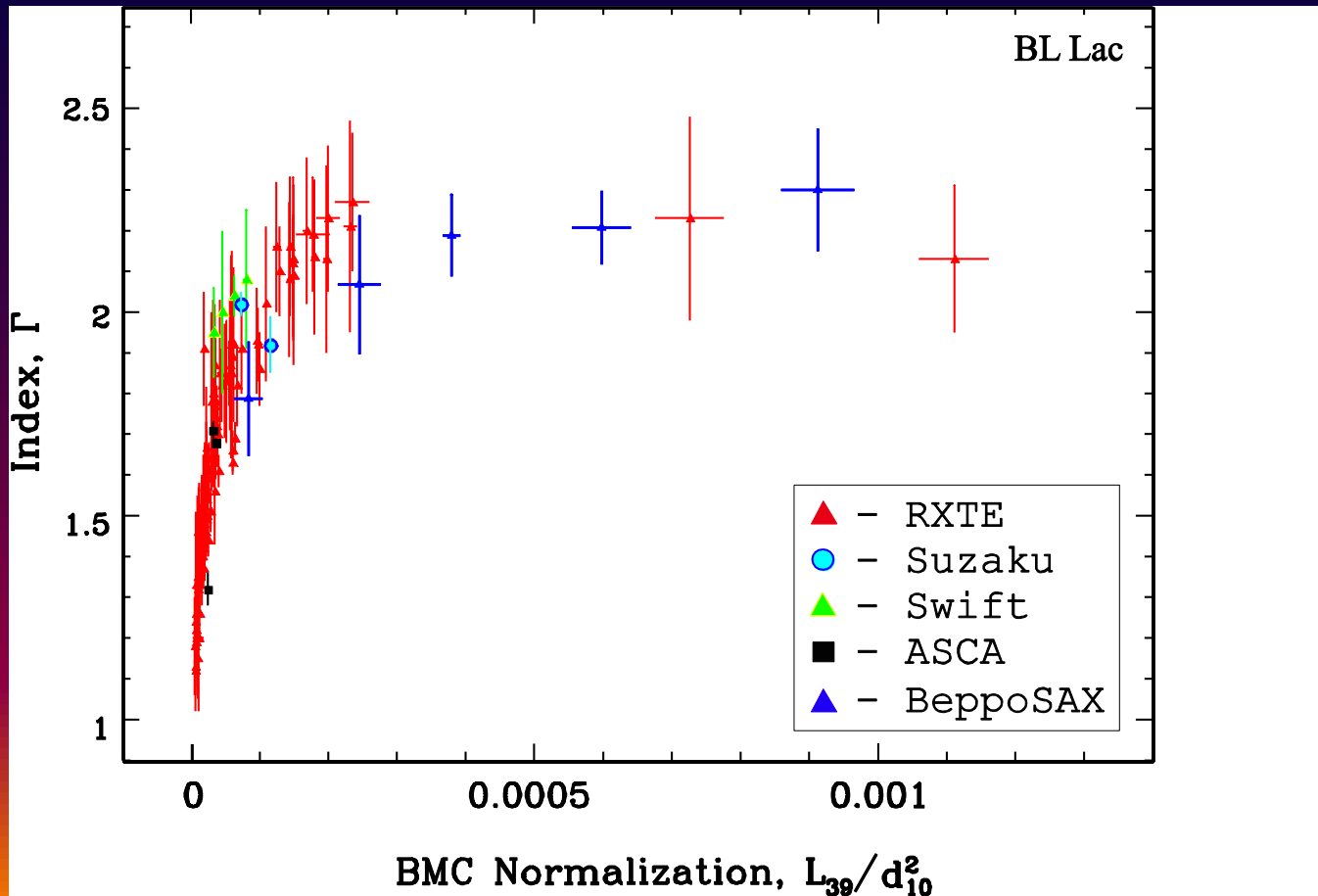




Антикорреляция
радио/рентгеновского
излучения VL Lac во
время активных
состояний



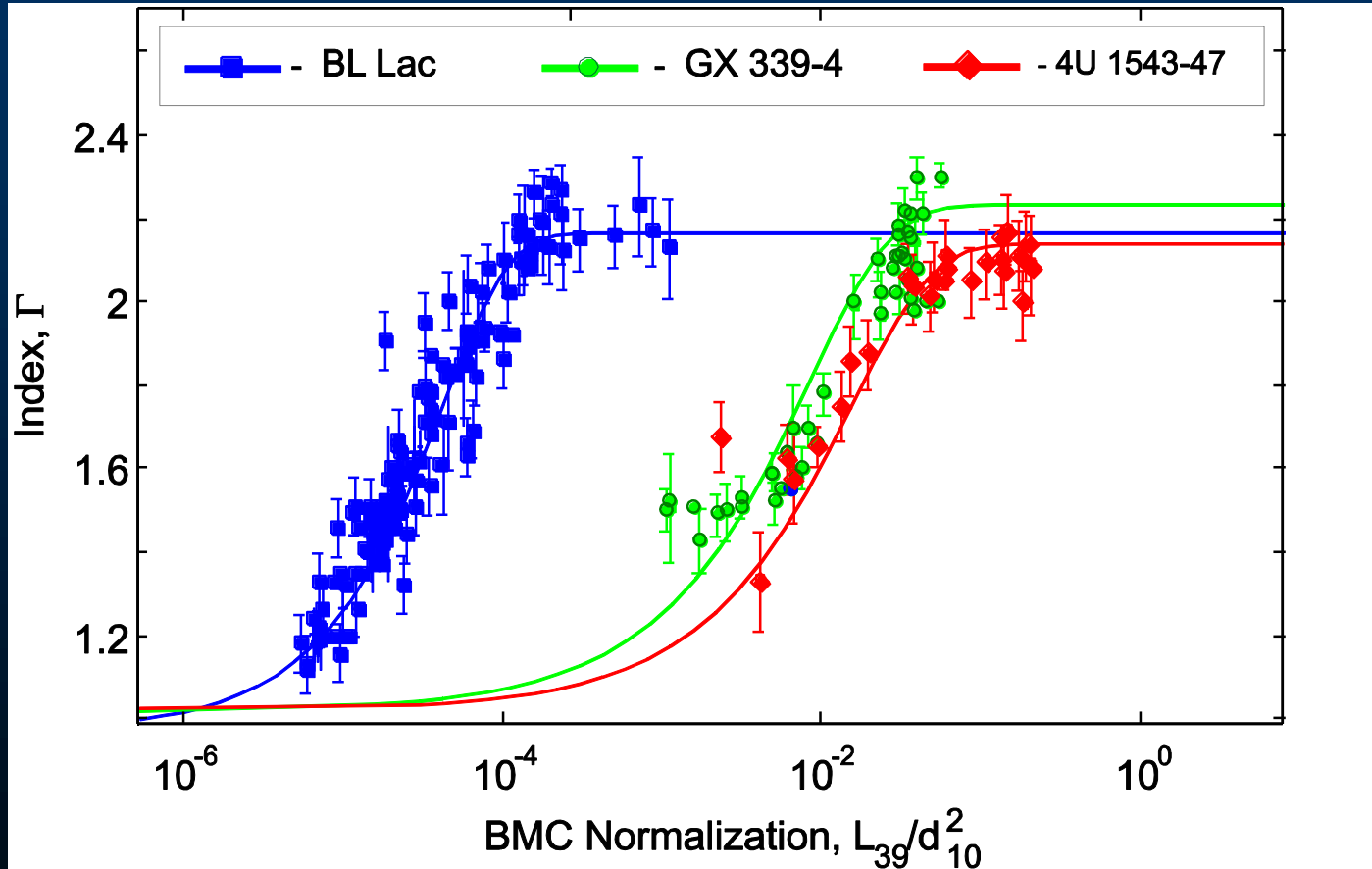
Обнаружение насыщение индекса в спектре *BL Lac*





Оценка массы ЧД в BL Lac методом масштабирования

$$M_{\text{ЧД}} = 3 \times 10^7 M_{\odot}$$

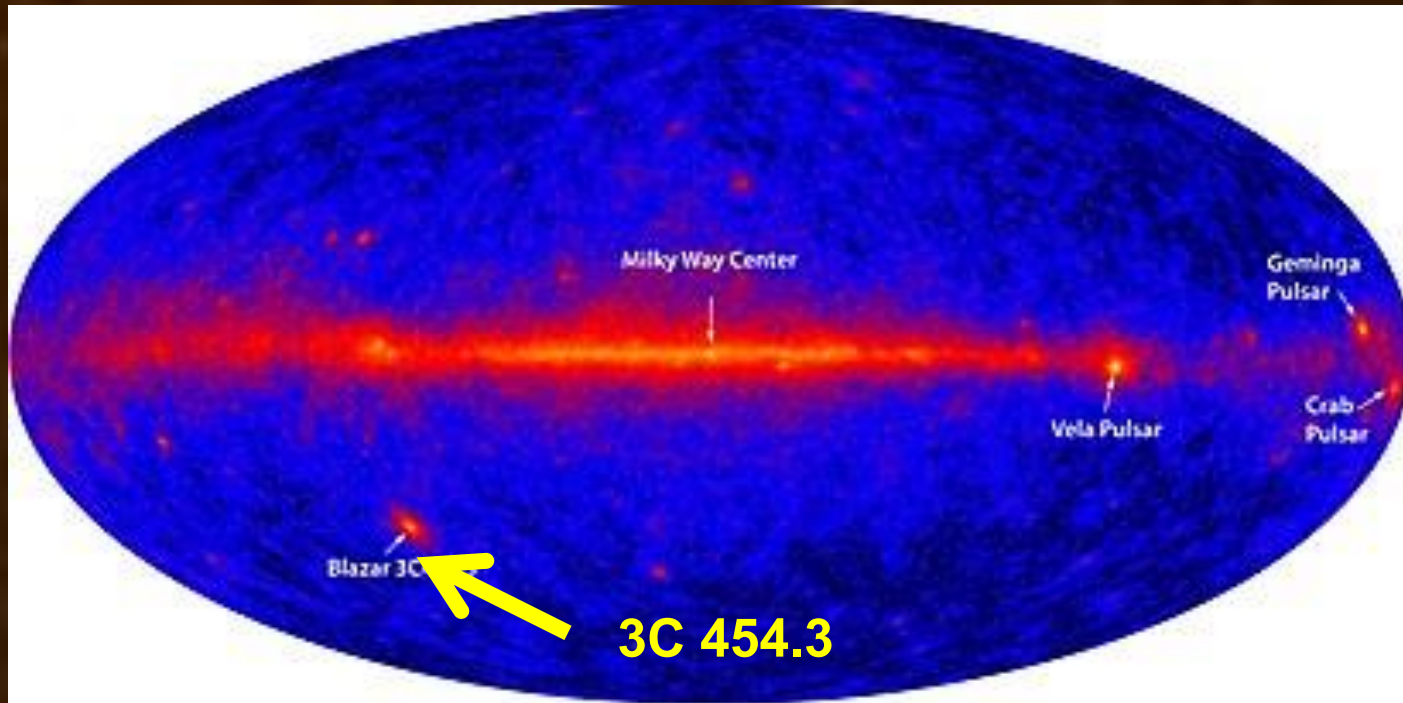




- Метод скалирования - универсальный метод, который работает как для ЧД звездной массы, так и для сверхмассивных ЧД
- Получены оценки масс ЧД, согласующиеся с оценками масс другими методами
- Подход в оценке массы ЧД и понимание физики ЧД согласуется с самыми последними достижениями:



Блазар 3C 454.3



- **блазар, расположенный вдали от плоскости Галактики. Является одним из наиболее ярких источников гамма-излучения на небе и объектом с наибольшей светимостью, когда-либо наблюдавшимся**

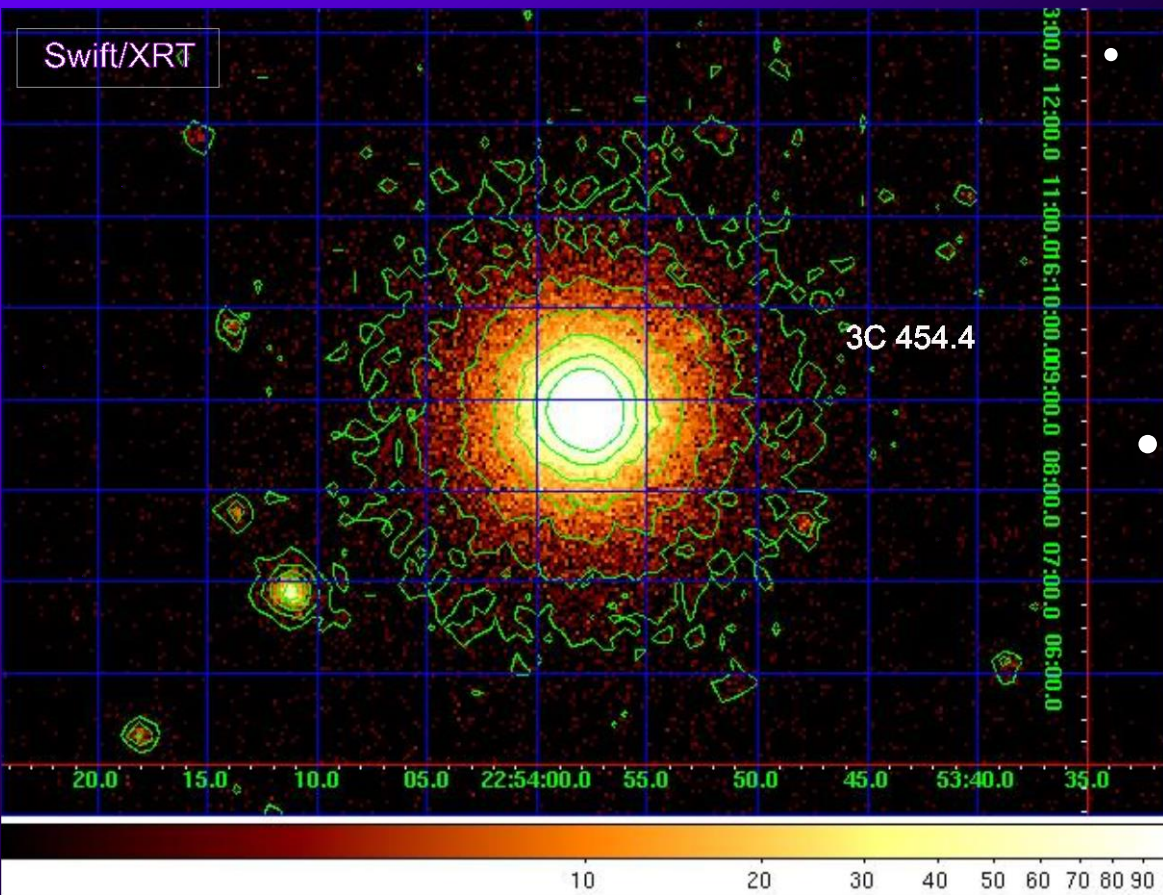


- **ЗС 454.3** — блазар (вид квазара, «релятивистский» выброс вещества которого направлен в сторону Земли)





Блазар 3C 454.3 в созвездии Пегас



- Расстояние 7,7 млрд св. лет
- (2,4 млрд пк)
- **Z=0.86**
- $M=(0.5-1.5) \times 10^9 M_{\odot}$

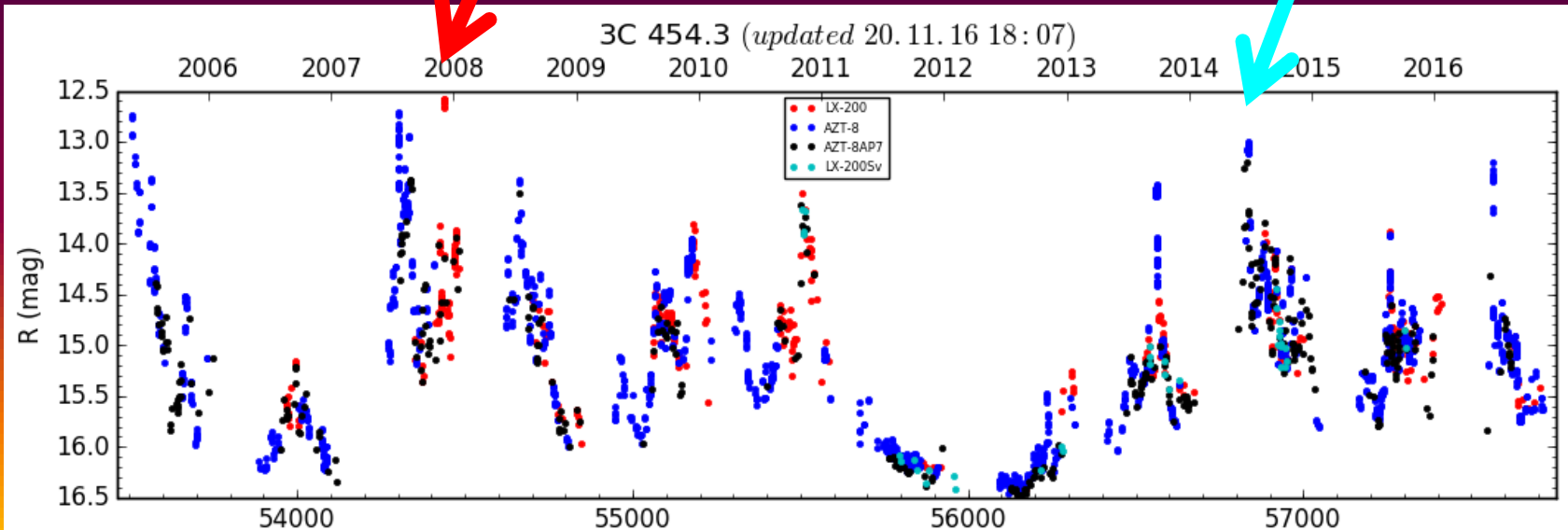


Видимая Звездная Величина: 16,1



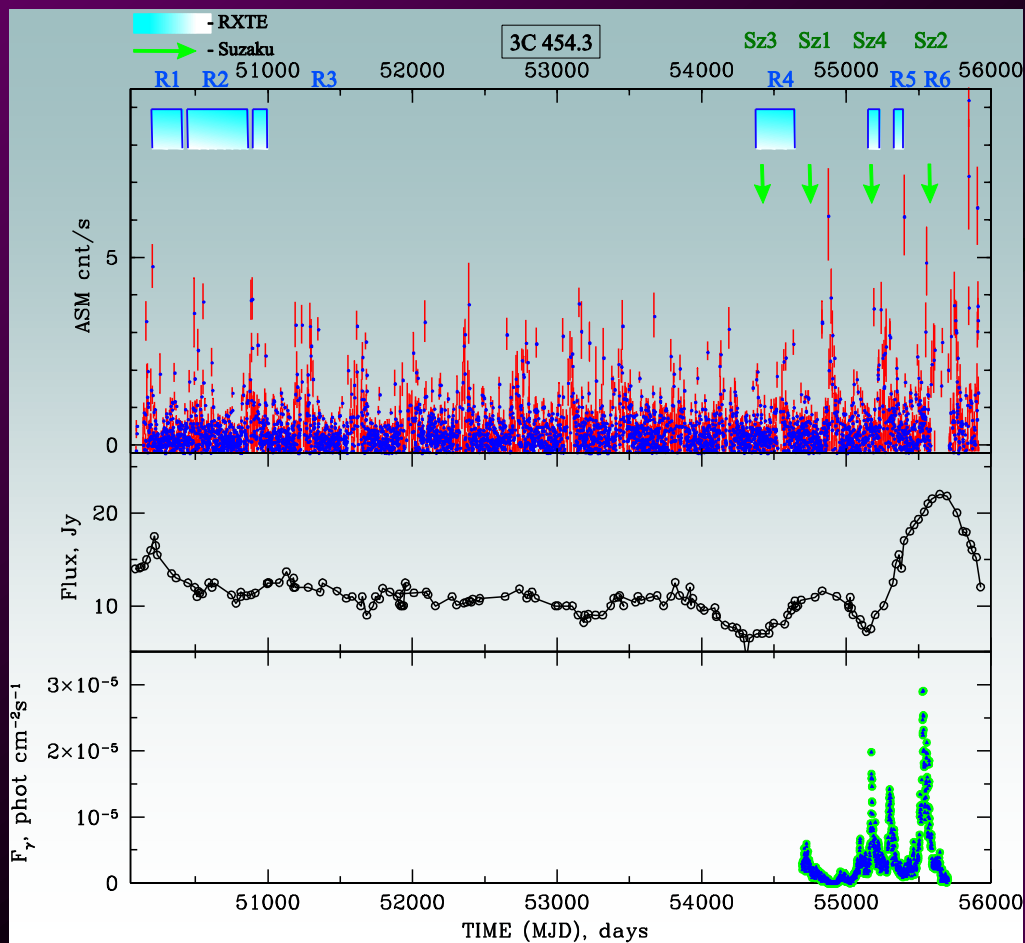
ЗС 454.3: Оптика

- Периодически испытывает вспышки, наиболее мощная из которых произошла в **июне 2014 г.**
- В июле и августе **2007 г.** произошла сильная вспышка в гамма-диапазоне (см. след. слайд), спустя два года после рекордной вспышки в оптическом диапазоне.





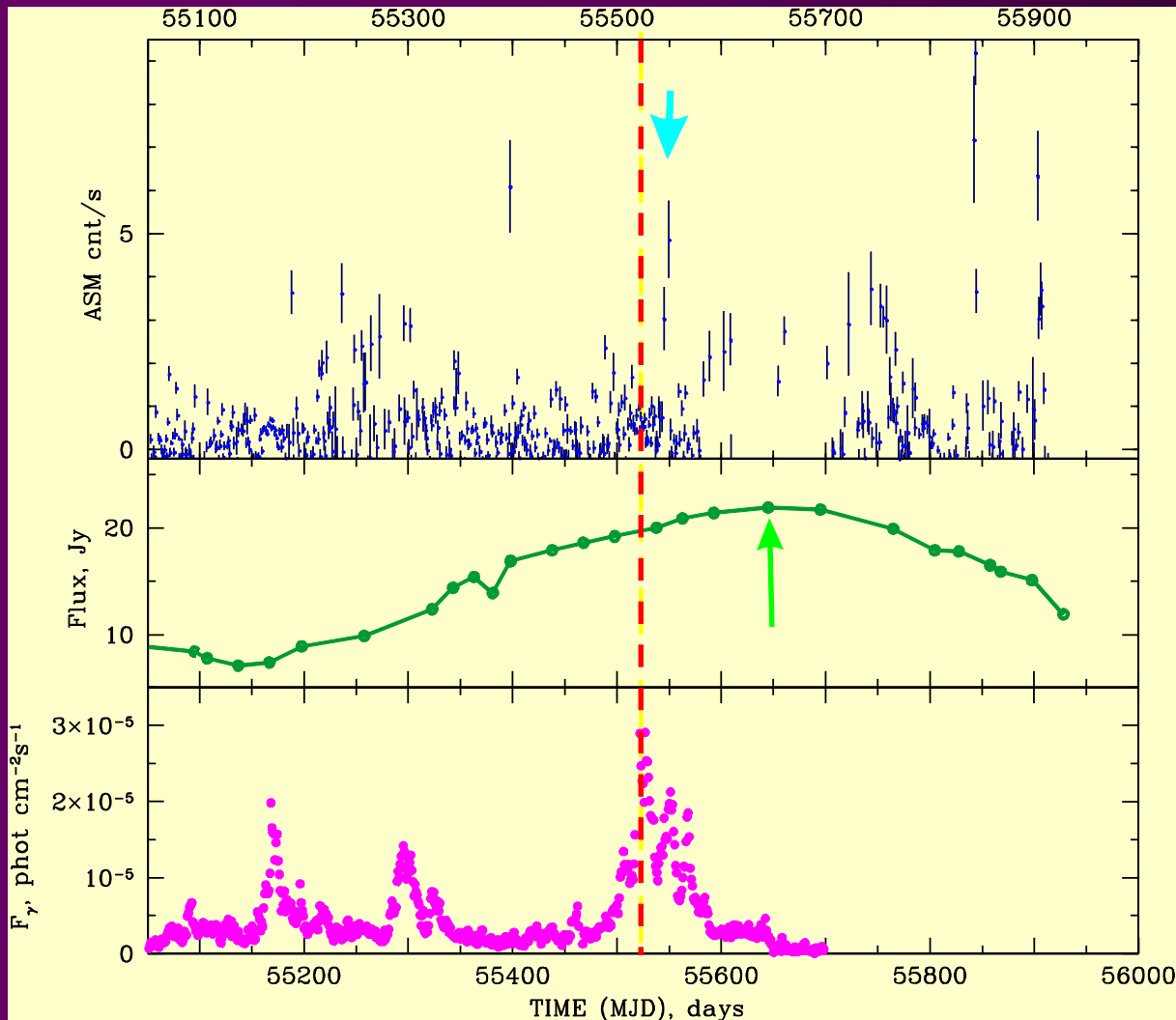
Рентгеновская кривая блеска 3C 454.3



- 1996-2012 гг.
- **ASM/RXTE** (2-12 кэВ, сверху,
- **радио** (8 ГГц, средняя панель) и
- **гамма**-излучение (0.1–300 ЕэВ, снизу)
- Вертикальные стрелки показывают распределение RXTE (голубые) и Suzaku (зеленые) данных



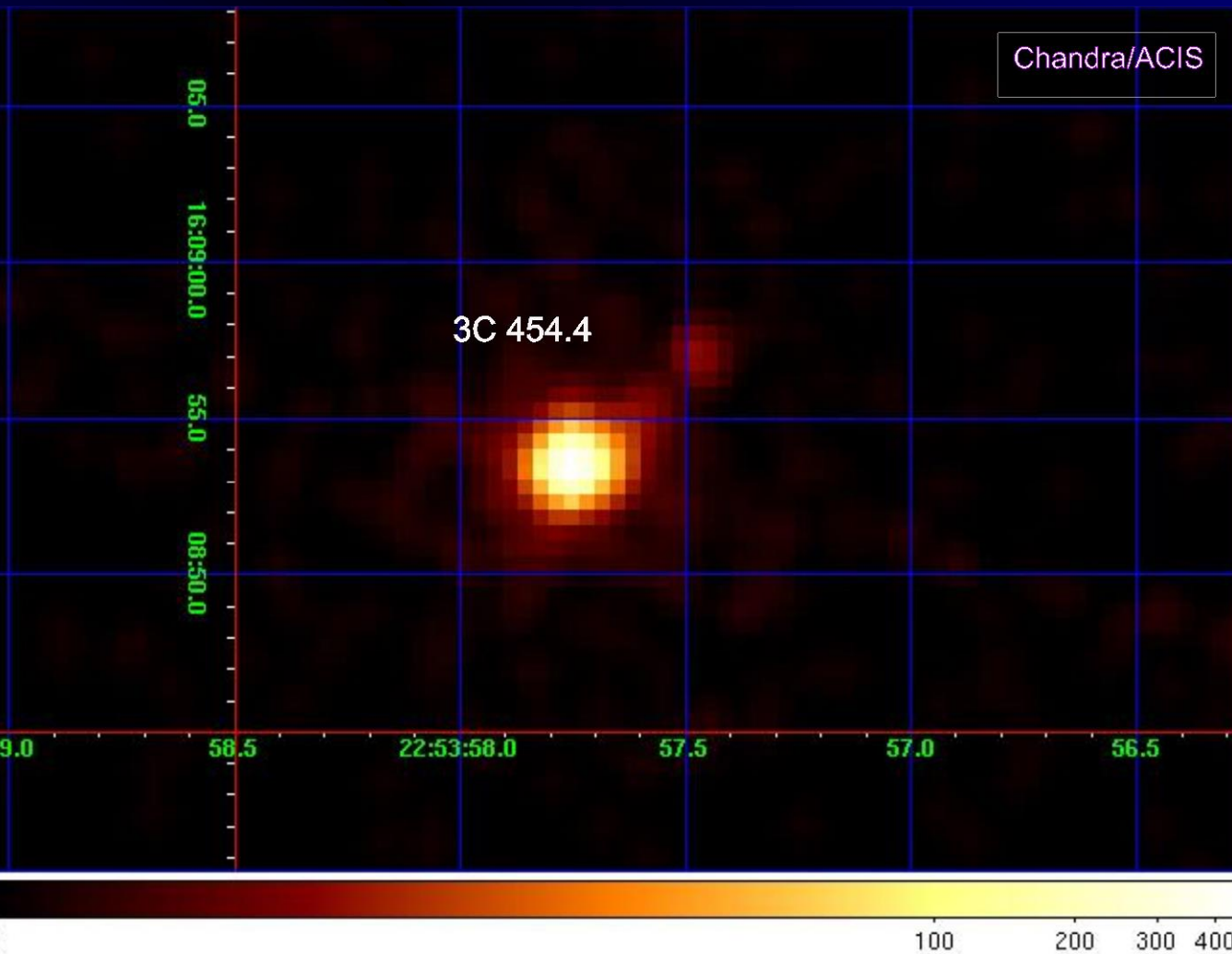
Запаздывание сигнала в разных диапазонах спектра ЗС 454.3



- Задержки пиков кривой блеска при вспышках ЗС 454.3, наблюдаемых в период 2010–2012 для трех диапазонов:
- **2–12 keV** (сверху),
- **8 ГГц** (средняя панель) и
- **0.1–300 ГэВ** (снизу). Вертикальные стрелки указывают соответствующие пики и вертикальной пунктирной линией отмечен пик вспышки в гамма-диапазоне



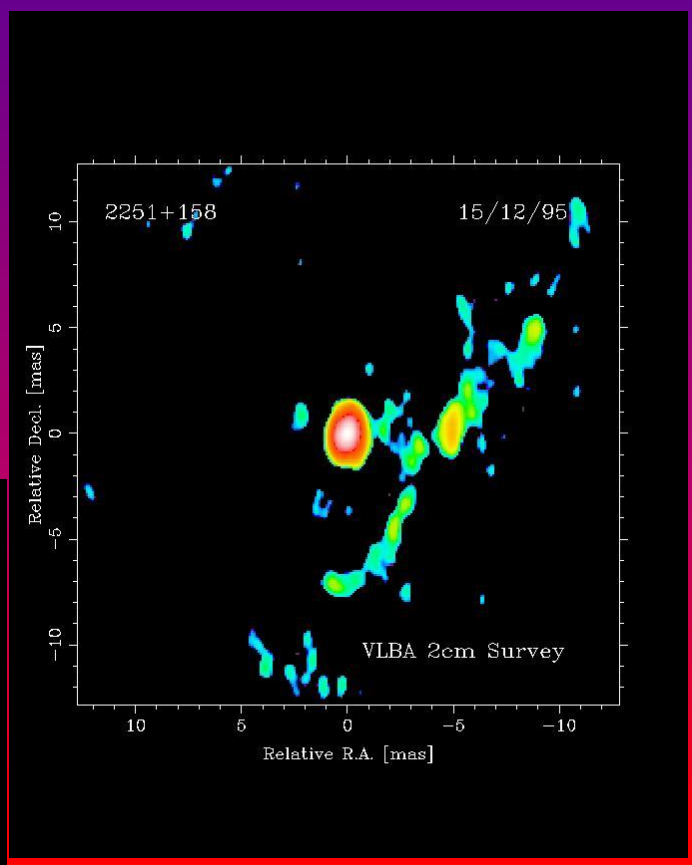
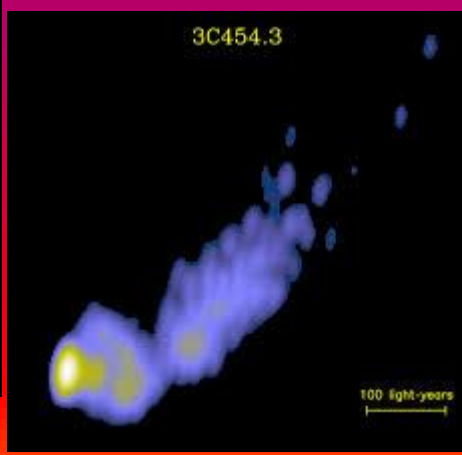
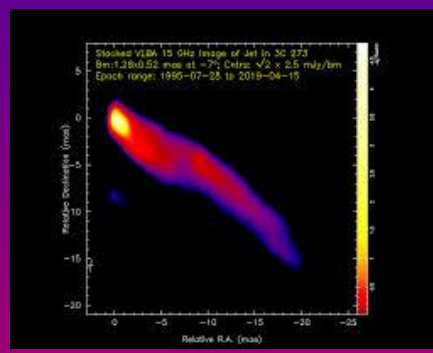
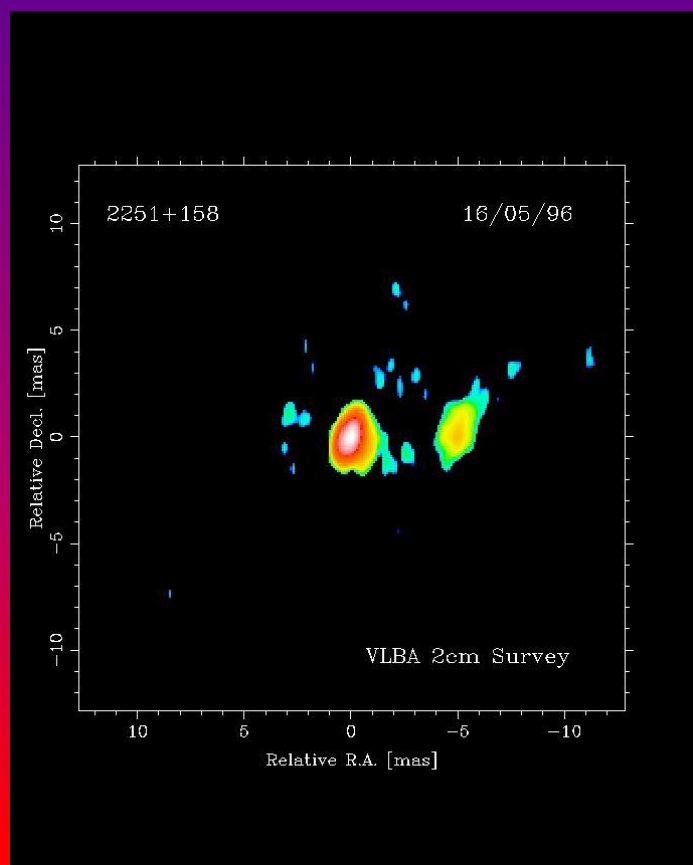
Учет влияния джета (по данным *Chandra*)



Изображение 3C 454.3 по наблюдениям Chandra/ACIS (0.3-10 кэВ) 6 ноября 2002 с временем экспозиции 4929 сек (MJD = 52584).

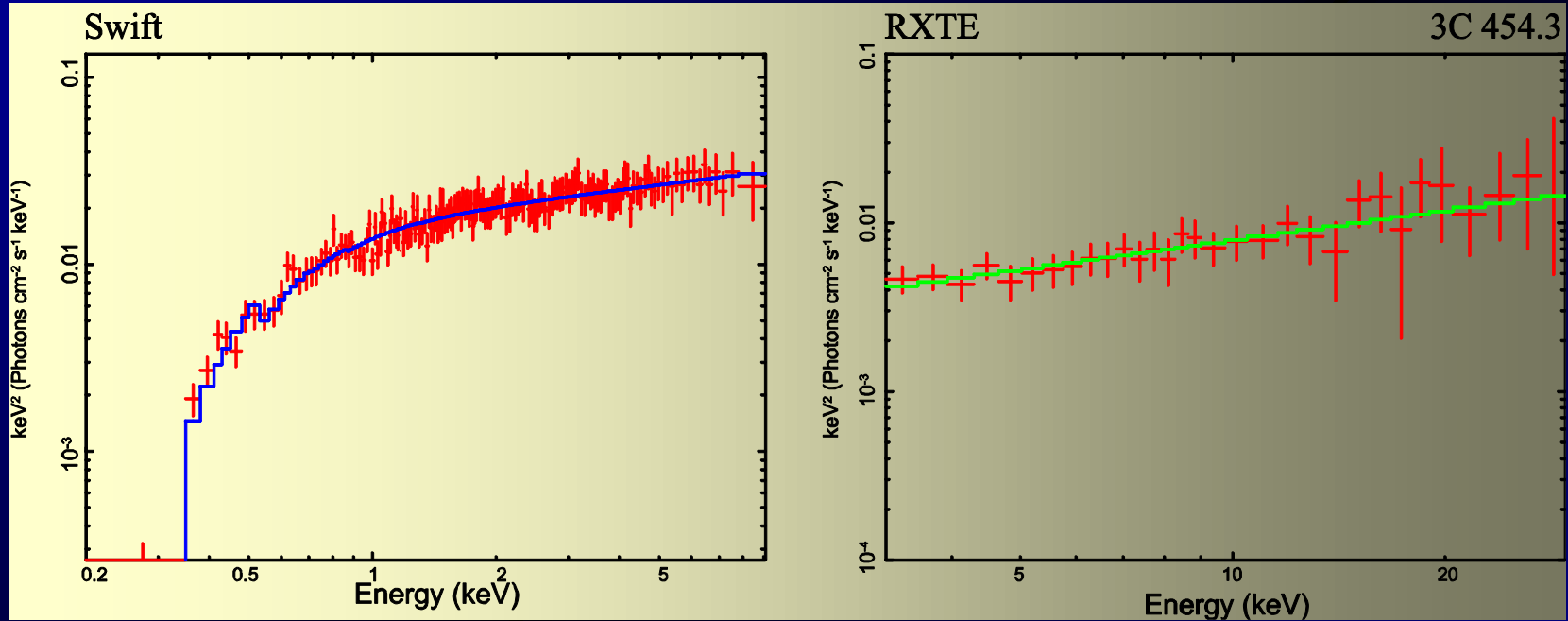


Радио изображение 3C 454.3 (VLBI, 2 см)





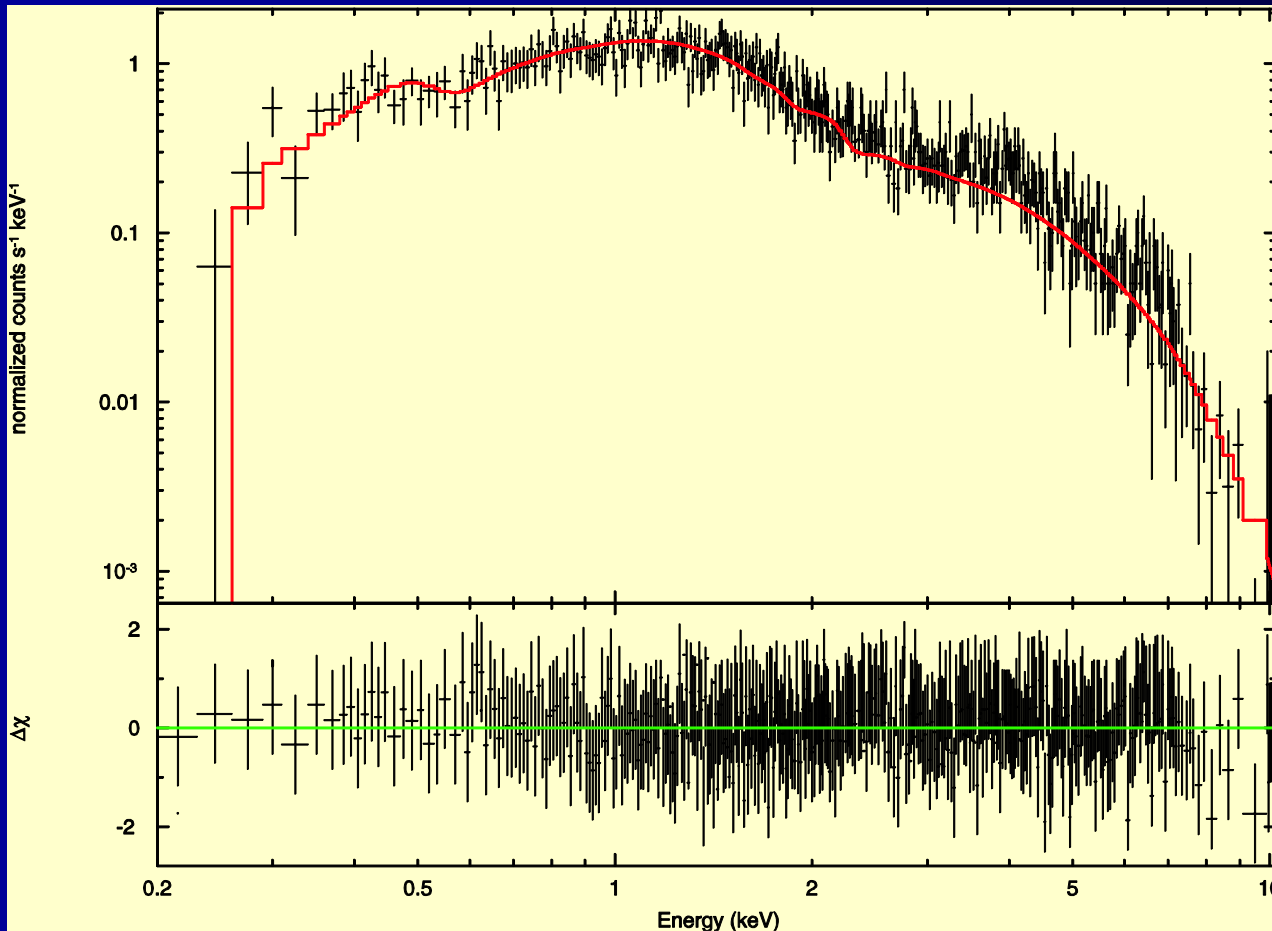
Стыковка спектров Swift и RXTE



- Два $E F_E$ –спектра во время низкого-жесткого состояния LHS (18 сентября 2009, синяя линия, левая панель) и LHS (2 ноября 1996, зеленая линия, правая панель).
- Используются данные Swift (ID= 00031493003) и данные RXTE (ID=20346-01-01-00).



Рентгеновский спектр ЗС 454.3 по данным Swift



Swift: Спектр ЗС 454.3 наилучшей аппроксимации для промежуточного состояния IS с применением модели tbabs^*bmc model [$\chi^2_{\text{red}} = 1.02$ (770 d.o.f.)]. Полученные параметры:

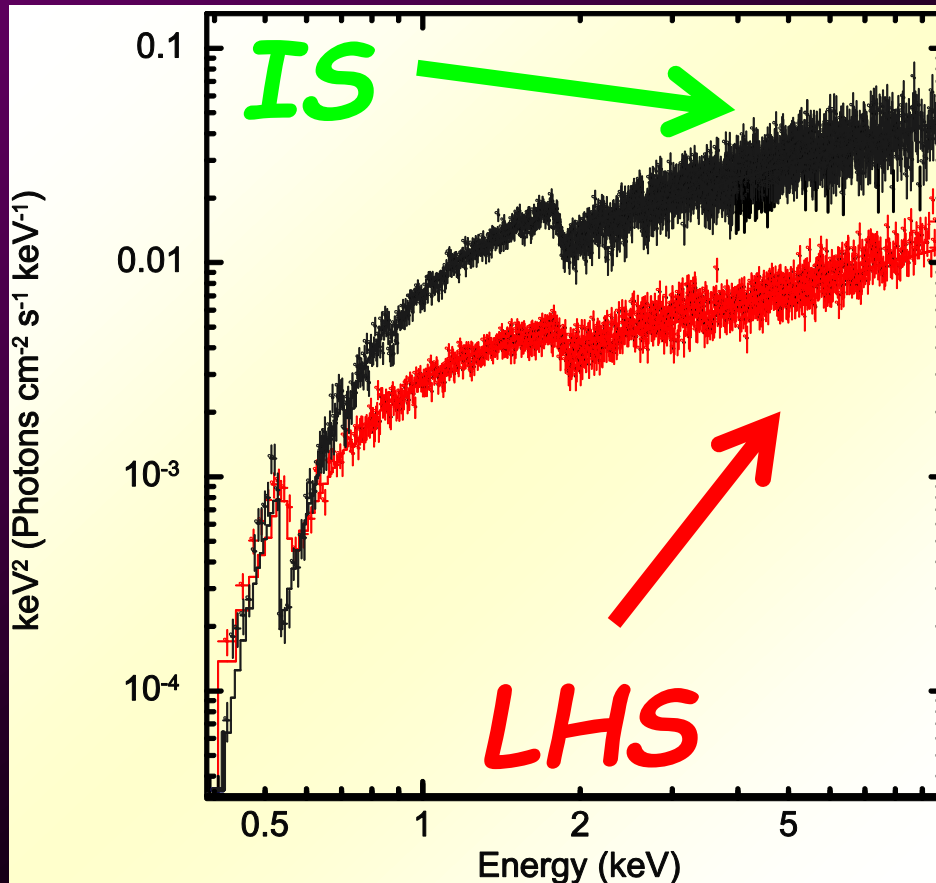
- $\Gamma = 1.63 \pm 0.1$ и
- $T_s = 280 \pm 20$ эВ.

Данные показаны черными крестами и спектральная модель представлена красной гистограммой

Модель: tbabs^*bmc



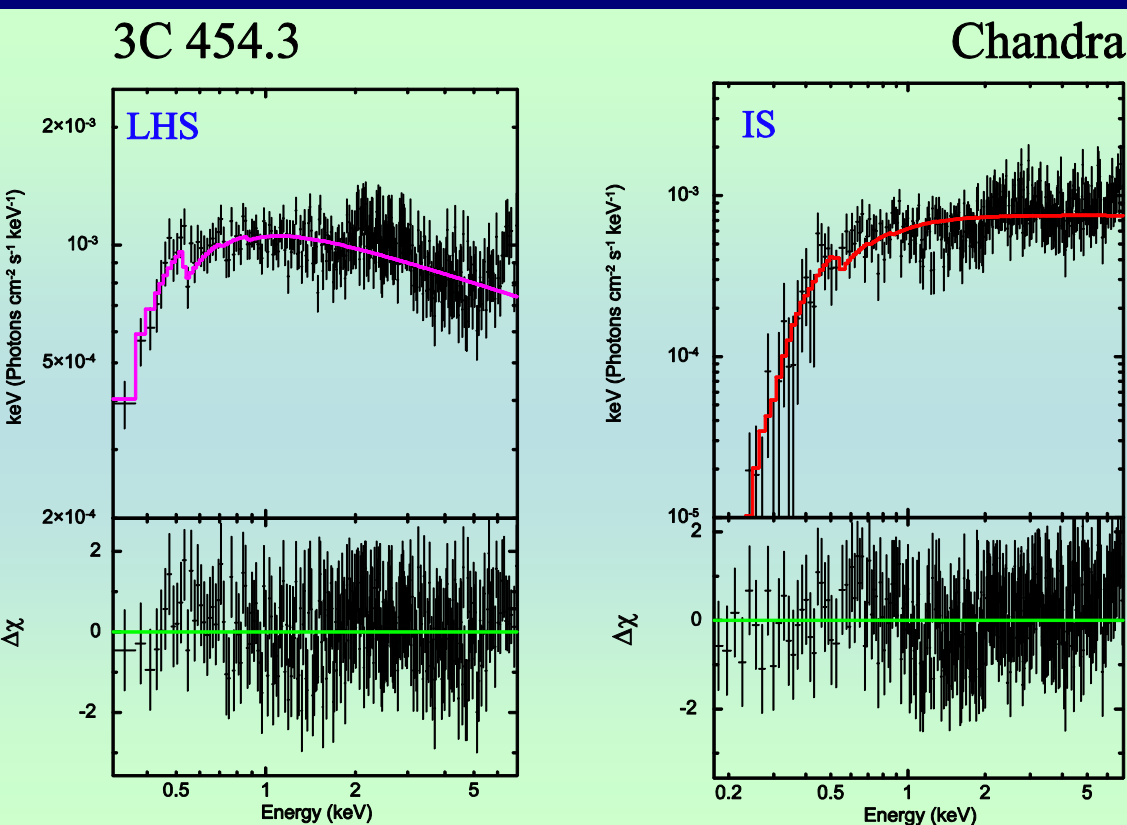
Эволюция рентгеновского спектра 3C 454.3 по данным Suzaku



- Характерные EF(E)-спектры 3C 454.3 для низкого-жесткого состояния (красный, id = 703006010) и для промежуточного состояния (черный, id = 904003010) по данным Suzaku.



Эволюция рентгеновского спектра 3C 454.3 по данным Chandra

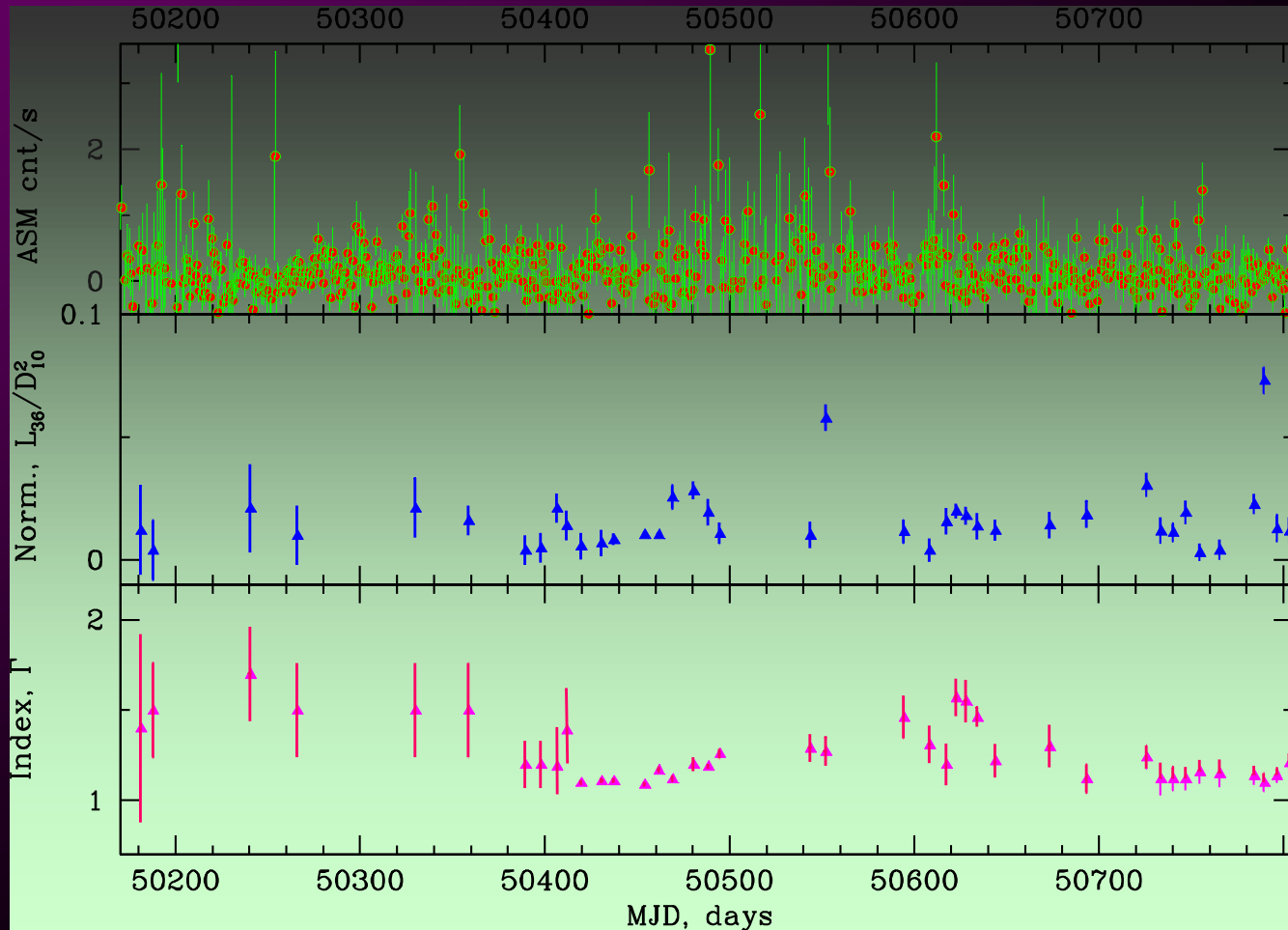


- Два характерных EF(E)-спектра для разных состояний 3C 454.3.
- Использованы данные Chandra ID = 4843 (слева, LHS) и ID = 3127 (справа, IS).
- Данные показаны черными крестами и спектральная модель представлена цветными линиями

Модель: $\text{tbabs}^* \text{bmc}$



Переменность в рентгене ЗС 454.3 во время вспышки 1996–1997 гг.



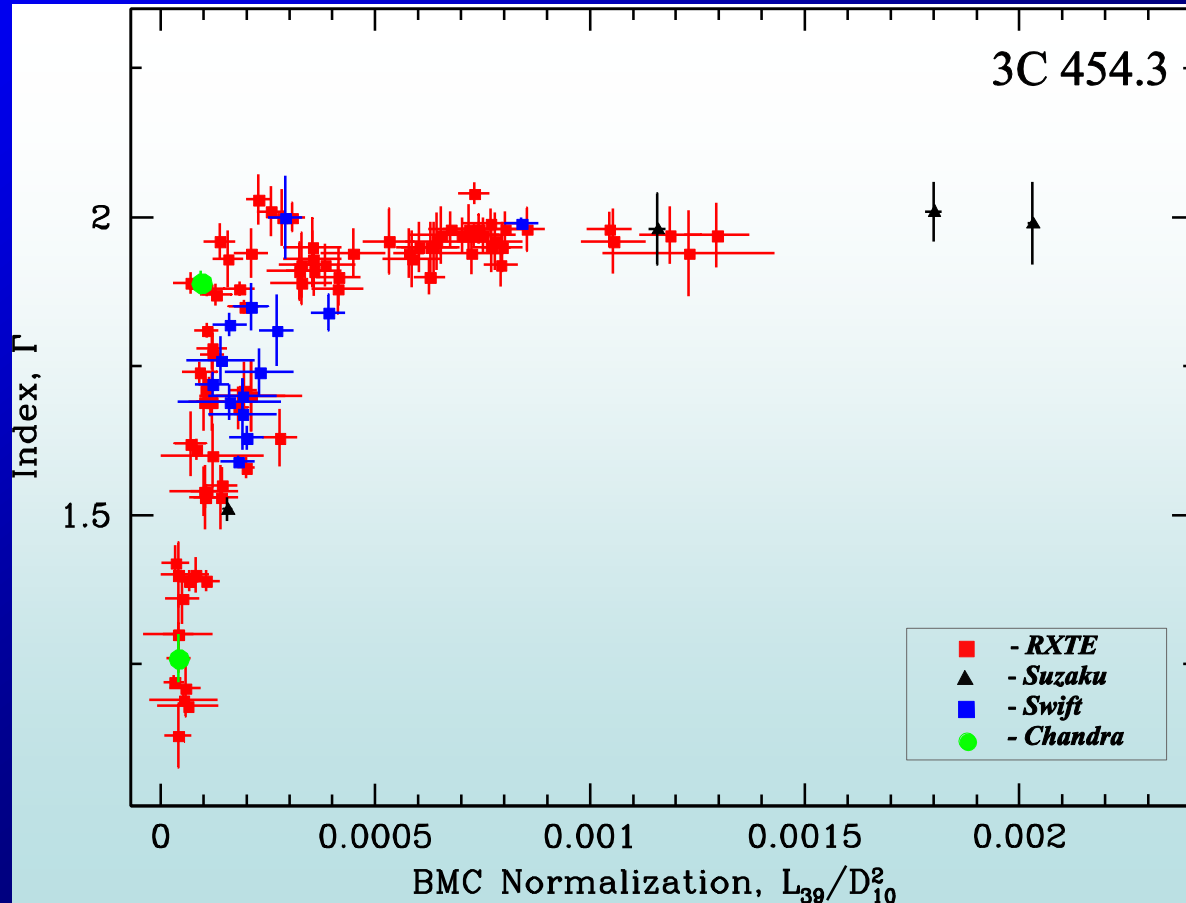
- RXTE/ASM

- VMC-
нормировка

- фотонный
индекс $\Gamma = \alpha + 1$.



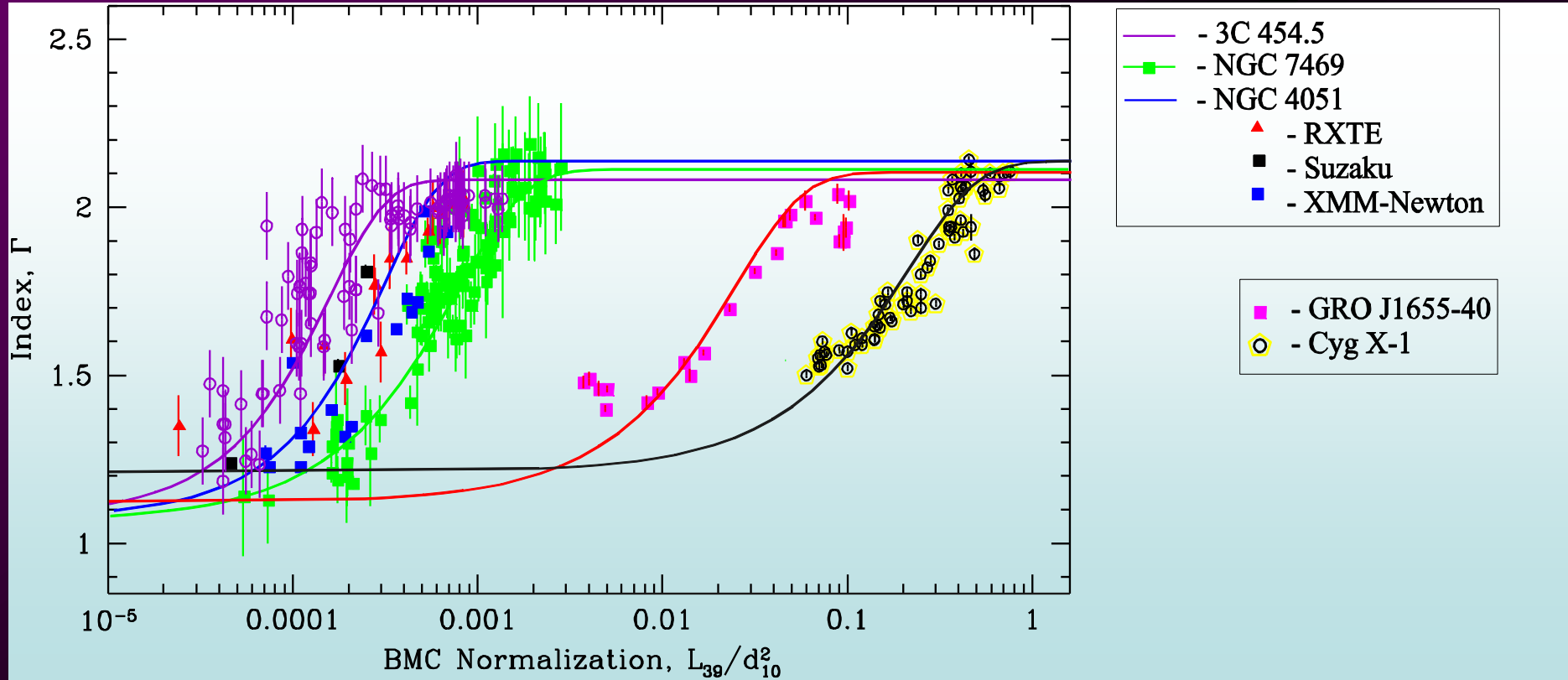
Насыщение индекса в ЗС 454.3



- ЗС 454: корреляция фотонного индекса Γ ($\Gamma = \alpha + 1$) с ВМС-нормировкой, $N_{\text{ВМС}}$ (пропорциональна темпу аккреции) в единицах $L_{39} = D_{10}^2$.
- Красными и синими квадратами показаны **RXTE** и **Swift** наблюдения, соответственно, черные треугольники и зеленые точки указывают **Suzaku** и **Chandra** наблюдения, соответственно.



Определение массы центральной ЧД в 3C 454.3



$M_{\text{BH}} = 3,4 \times 10^9 M_{\odot}$ - сверхмассивная ЧД
Совпадает с оценками другими



3C 454.3: Массы и расстояния

Source	$M_{\text{disk}} (M_{\odot})$	$i_{\text{orb}} (\text{deg})$	$d (\text{kpc})$	$M_{\text{lum}} (M_{\odot})$	$M_{\text{scat}} (M_{\odot})$
GRO J1655-40	$6.3 \pm 0.3^{(1,2)}$	$70 \pm 1^{(1,2)}$	$32 \pm 0.2^{(3)}$	...	...
Cyg X-1	$6.8 - 13.3^{(4,5)}$	$35 \pm 5^{(4,5)}$	$2.5 \pm 0.3^{(4,5)}$	...	7.9 ± 1.0
NGC 4051 ^(6,7,8,9,10)	...	...	$\sim 10 \times 10^3$	...	$\geq 6 \times 10^3$
NGC 7469 ^(11,12,13)	...	...	$\sim 70 \times 10^3$	...	$\geq 3 \times 10^6$
XTE J1550-564 ^(14,15,16)	9.5 ± 1.1	72 ± 5	~ 6	...	$10.7 \pm 1.5^{\circ}$
H 1743-322 ⁽¹⁷⁾	...	75 ± 3	8.5 ± 0.8	...	$13.3 \pm 3.2^{\circ}$
GRS 1915+105 ⁽¹⁸⁾	...	60-70	8.5 ± 0.8	...	$13.3 \pm 3.2^{\circ}$
4U 1630-47 ⁽¹⁹⁾	...	≤ 70	$\sim 10 - 11$	...	9.5 ± 1.1
M101 ULX-1 ^(20,21,22,23,24)	3 - 1000	60 ⁽²⁵⁾	$(6.4 \pm 0.5) \times 10^3,$ $(7.4 \pm 0.6) \times 10^3$	...	$\geq 3.2 \times 10^4, \geq 4.3 \times 10^4$
ESO 243-49 HLX-1 ^(26,27)	...	70 ⁽²⁸⁾	$\sim 95 \times 10^3$	$8 \pm 4 \times 10^4$	$\geq 7.2 \times 10^4$
3C 454.3 ⁽²⁹⁾	...	$\leq 4^{(29)}$	$\sim 30 \times 10^3$	...	$\sim 3.4 \times 10^9$
M87 ^(30,31)	...	$\leq 20^{(31)}$	$(16.8 \pm 0.8) \times 10^3$	$6.5 \pm 0.7 \times 10^9$	$\sim 5.6 \times 10^7$

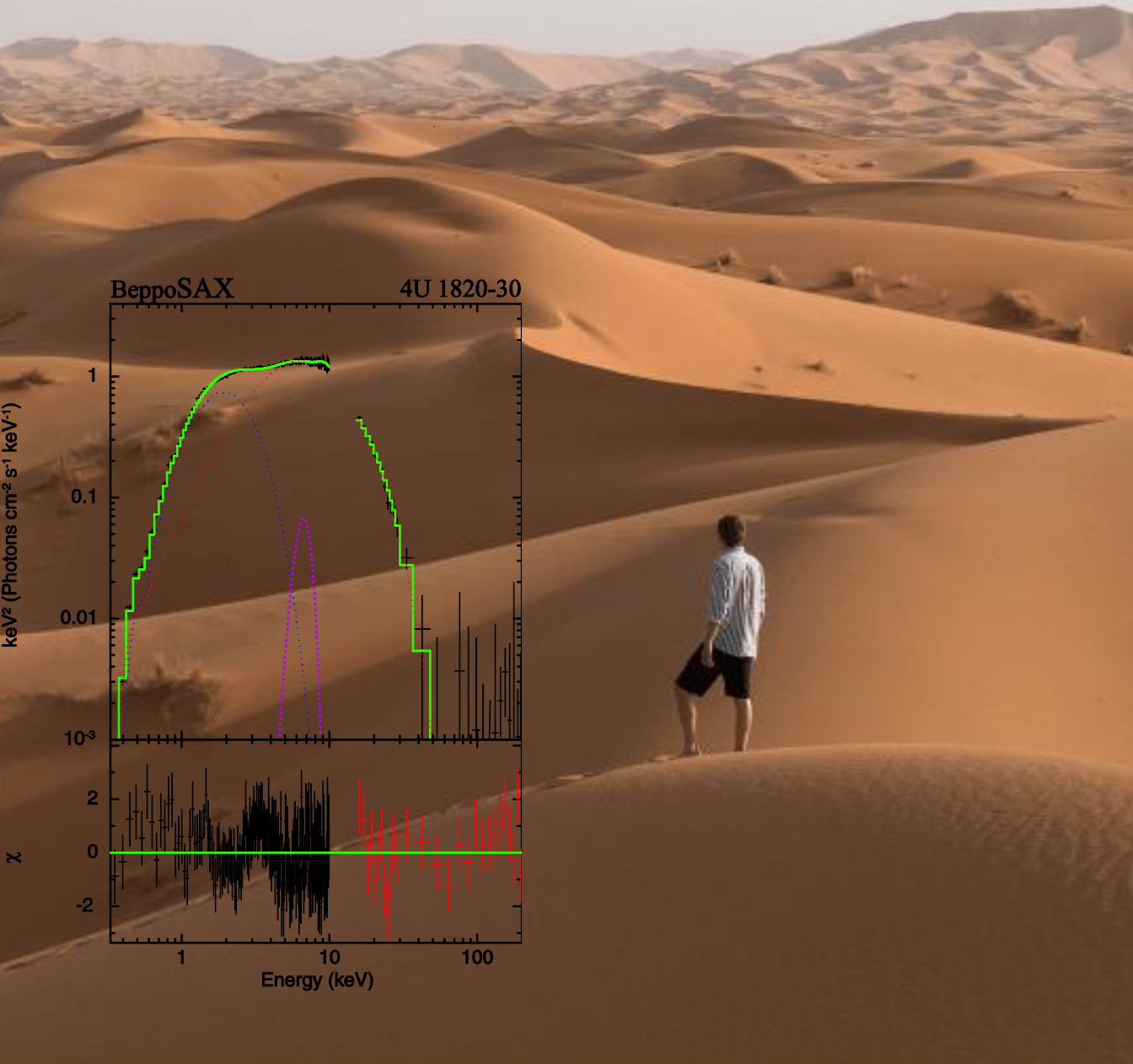
Оценка массы ЧД в 3C 454.3 методом
скалирования $\sim 3 \times 10^9 M_{\odot}$

Titarchuk, Seifina, Chekhtmann & Ocampo, A&A, 2020, 633, A73

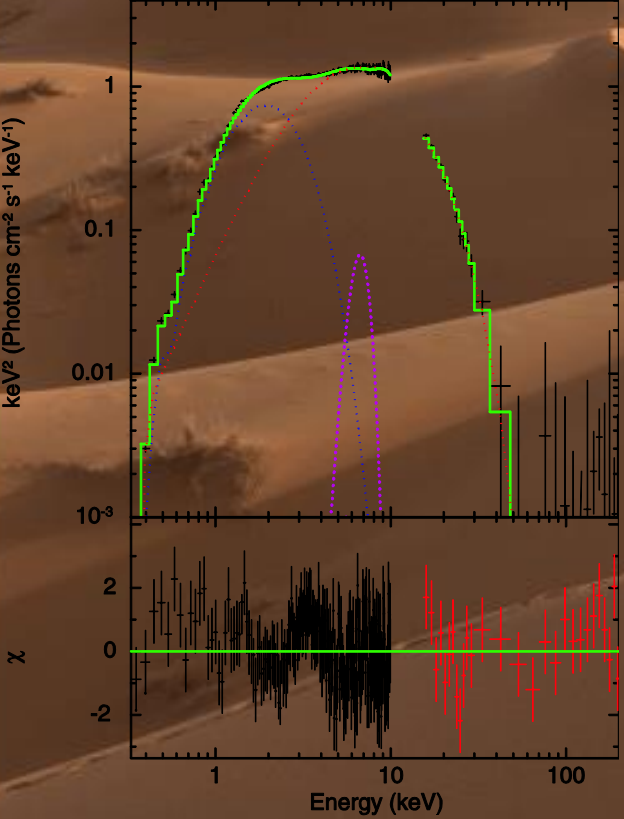




XSPEC



BeppoSAX 4U 1820-30





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

