

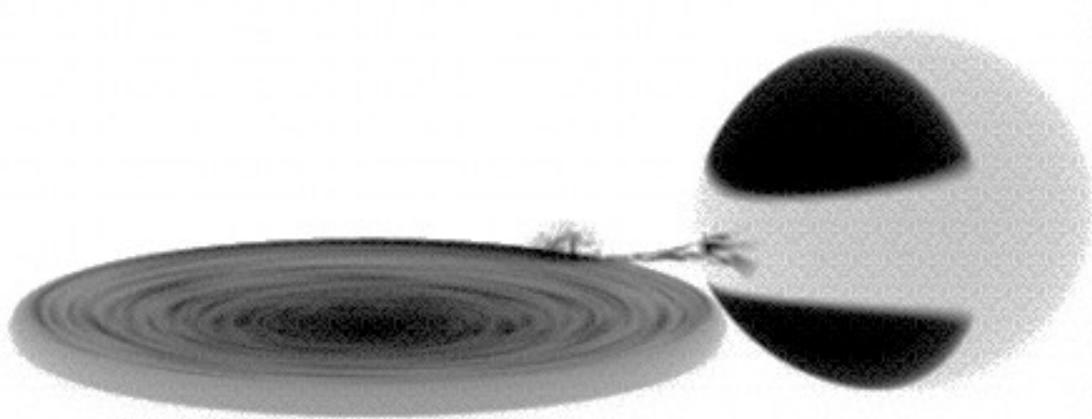
*А.В.Мещеряков (ИКИ РАН), С.С.Цыганков (ИКИ РАН), И.М.Хамитов (TUG)*

Структура аккреционных дисков с облучением в Рентгеновских Новых: первые результаты наблюдений системы Орел X-1 летом 2013 года.



Space Research Institute (IKI), Moscow, Russia

# LMXB



**Close binary system**

**Optical companion:  $M \leq 1 M_{\odot}$**

**Roche lobe accretion  
through L1 point**

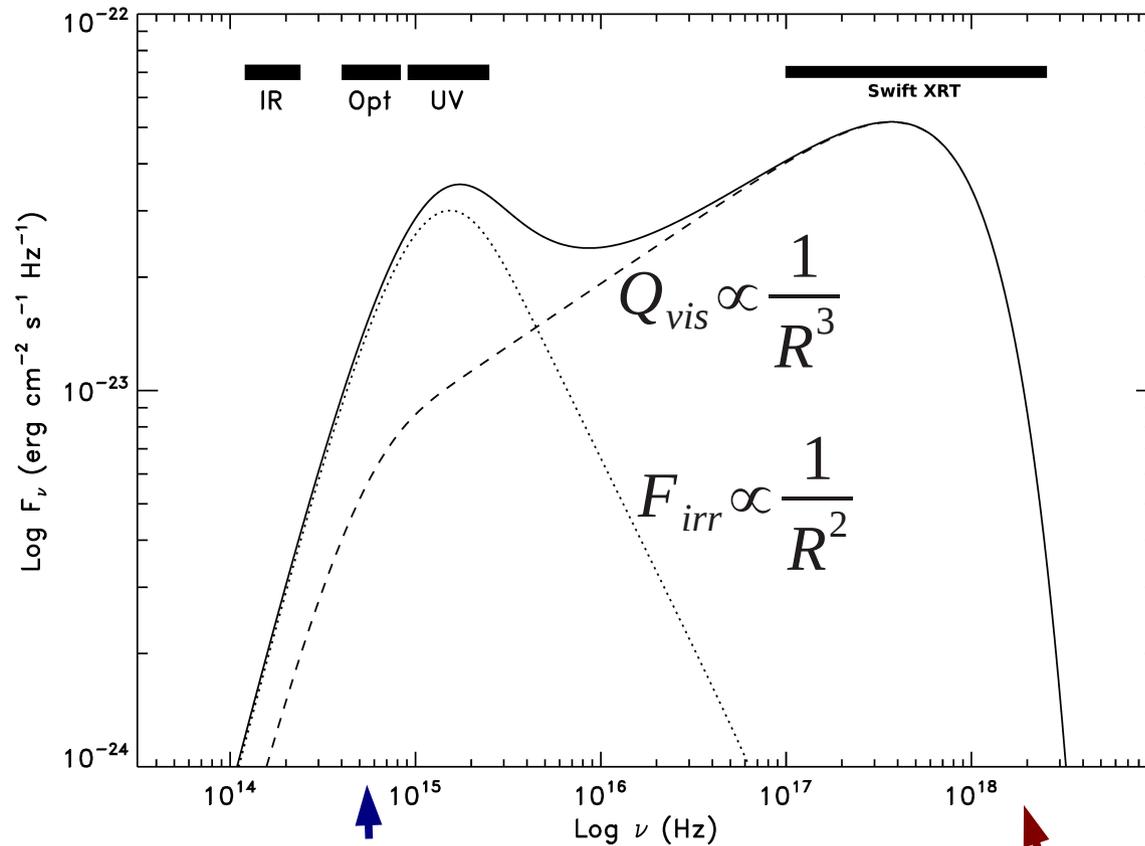
**+**

**NS/BH , accretion disc**

## **Viscous accretion disc in LMXB:**

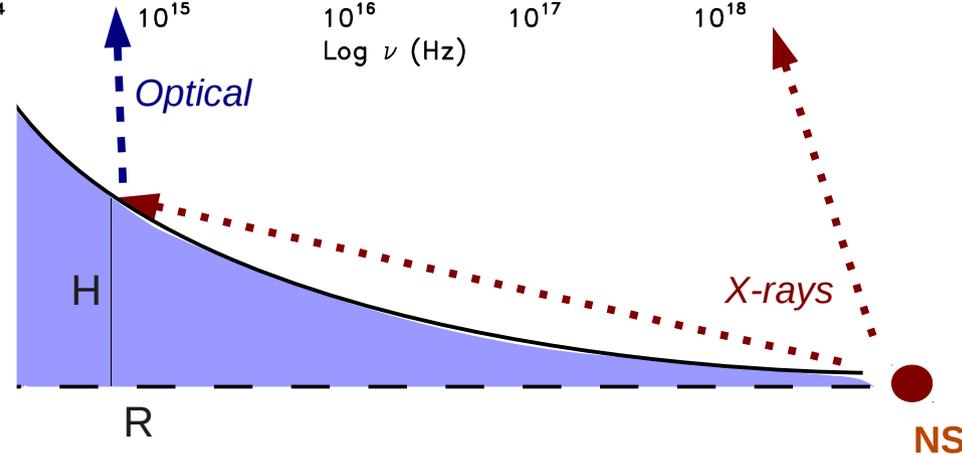
- Transfer mass inward to the central source
- Transfer angular momentum outward
- Radiate away gravitation energy (from X-rays to IR)
- Near NS/BH – bright X-ray source
- Outer parts of accretion disc – dominate LMXB optical luminosity

# Спектр излучения аккреционного диска с облучением в LMXB

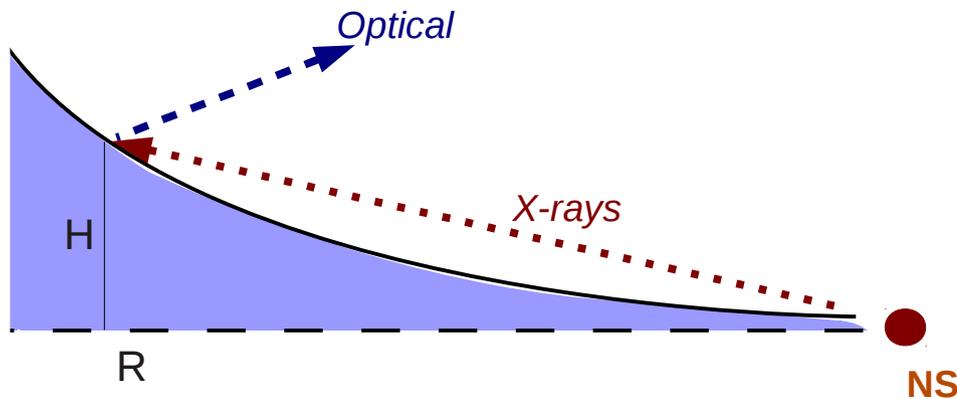


## Стандартный аккреционный диск

- $H/R \ll 1$
- Оптически толстый
- Вязкость :  $\alpha$ -параметр (Шакура & Сюняев '73)
- Мультичёрнотельный спектр



# Модель прямого облучения стандартного диска



X-rays from central source  
Illuminate outer disk at grazing angles!

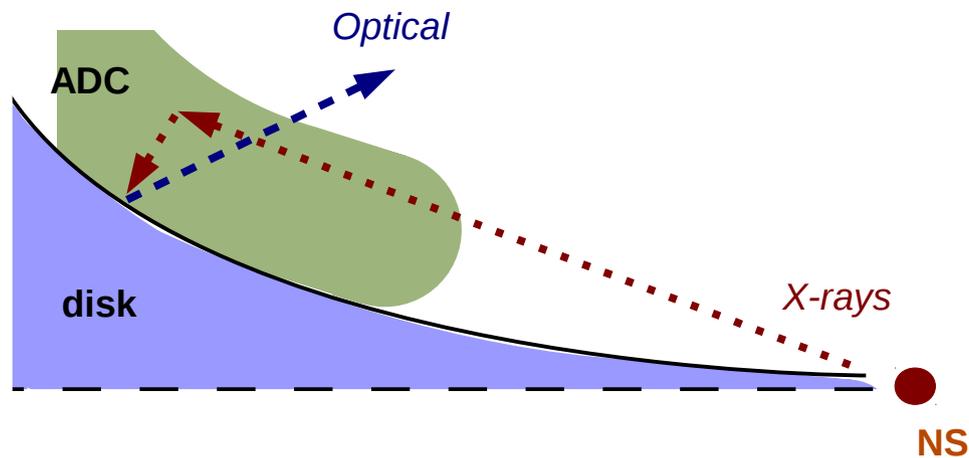
## Issues:

- Grazing soft X-rays heat only disk skin  $\tau < 1$ : evaporation, no static equilibrium
- No direct illumination of cold outer disc due to self-shielding effect  
(see e.g. *Dubus et al. 1999, MNRAS, 303, 139*)  
- *confront optical observations of LMXBs*
- Disc height and irradiation degree estimates from observations  
(see e.g. *de Jong et al. 1996 A&A, 314, 484; Suleimanov et. al. 2008 A&A, 491, 267*)  
- *2-3 times higher than expected for a standard disc*
- Possible problems with stable accretion in long-period persistent LMXB (Cyg X-2, GX 13+1) ?

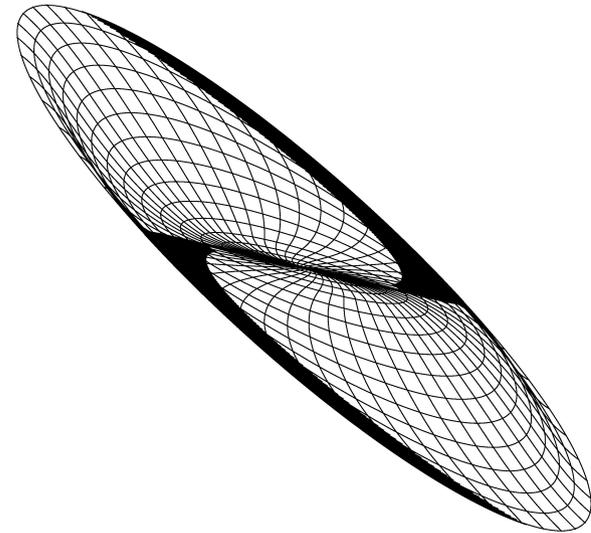
***Need for a more sophisticated models!***

# Possible models to enhance disc irradiation in LMXB

## Non-direct transfer of X-rays to the disc through ADC (Accretion Disc Corona)



## Increase disc irradiation due to Irradiation driven warps



Disc atmosphere is directly seen in edge-on LMXBs:

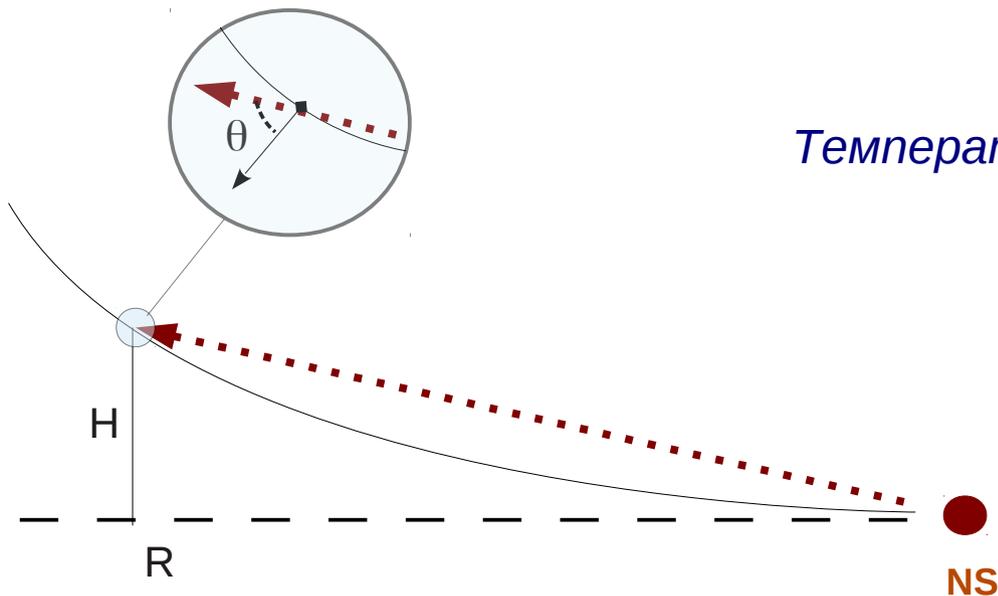
- ADC-sources, like 4U1822-37
  - X-ray continuum and lines emission
- “dippers” and eclipsing systems, like EXO 0748-676
  - X-ray lines in absorption

Superorbital periods due to disc precession:

- Her X-1, Cyg X-2 (?)
- not found for the majority of low-luminosity LMXBs

# Ограничения на степень облучения аккреционного диска из наблюдений

# Степень облучения аккреционного диска (случай прямого облучение диска центральным источником)



Температура фотосферы диска:

$$\sigma T_{ph}^4 = Q_{vis} + \frac{L_X}{4\pi R^2} C$$

вязкий нагрев :  $Q_{vis} \propto \frac{1}{R^3}$

$$C = \zeta f_{th} \cos \theta$$

$$C = \zeta f_{th} (n-1) \frac{H}{R}$$

$\zeta$  – фактор анизотропии излучения  
 $f_{th}$  – доля излучения переработанного в диске  
 $n$  – кривизна поверхности  
 $\frac{H}{R}$  – толщина диска  $H \propto R^n$

# Оптическая и ИК светимость аккреционного диска LMXB — вязкий нагрев

Планковский спектр:  $B_\lambda(T) \propto T^b$

$$L_{disk} \propto B_\lambda(T_d) R_d^2$$

$$\sigma T_d^4 \propto \frac{\dot{M}_d}{R_d^3}$$

$$\dot{M}_d(t) \rightarrow \dot{M}(t+t_{vis}) \propto L_X$$

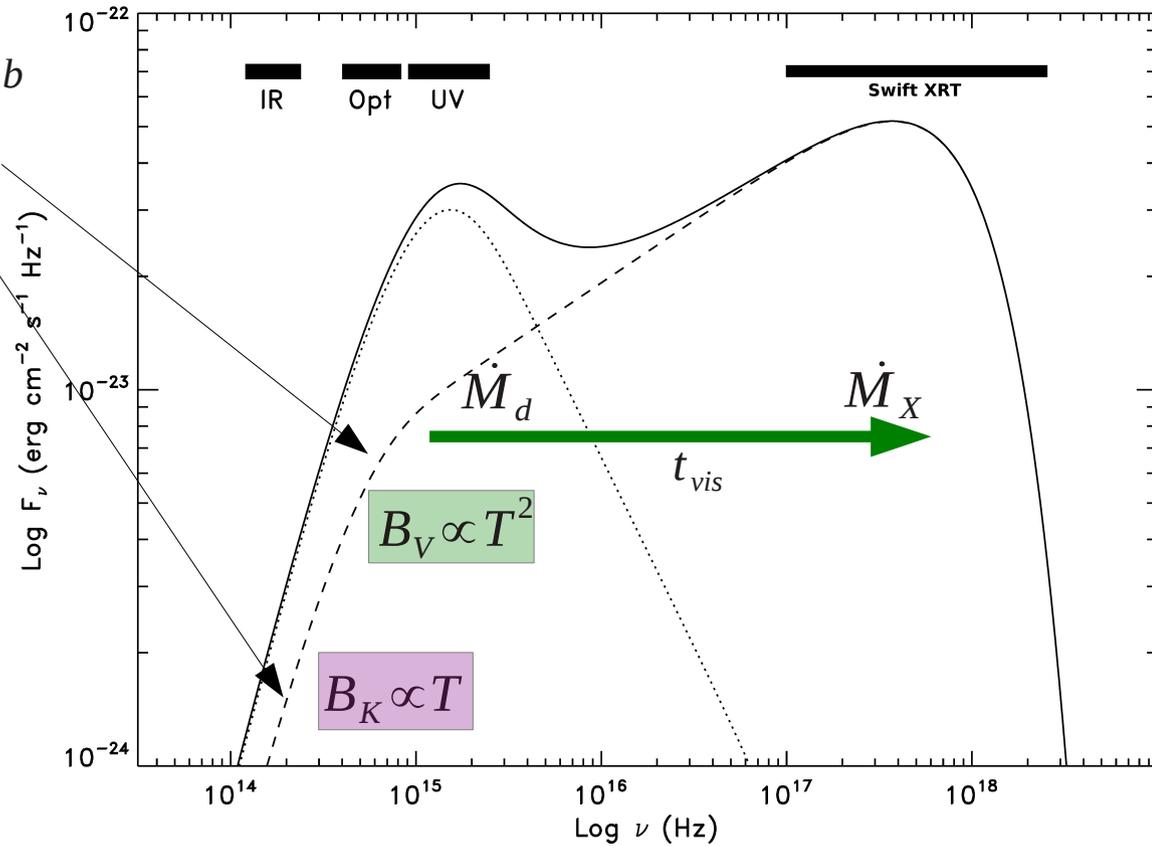
$$L_{disk} \propto T^b R_d^2 \propto L_X^{b/4} R_d^{2-b \frac{3}{4}}$$

$$R_d \propto a \propto P_{orb}^{2/3}$$

Ожидаемая корреляция между оптической/ИК и рентгеновской светимостью LMXB на временах  $t \gg t_{vis}$ :

$$L_V \propto L_X^{1/2} P_{orb}^{1/3}$$

$$L_K \propto L_X^{1/4} P_{orb}^{5/6}$$



**Запаздывание рентгеновского излучения на время перемещения вещества в диске:**

$$t_{vis} = \frac{1}{3\pi\alpha} \left( \frac{H_d}{R_d} \right)^{-2} \frac{R_d^{3/2}}{\sqrt{GM_1}} \sim \text{дни}$$

# Оптическая и ИК светимость аккреционного диска LMXB - переработка рентгеновского излучения

Планковский спектр:  $B_\lambda(T) \propto T^b$

$b \approx 2$  – оптический диапазон (V-фильтр)  
 $b \rightarrow 1$  - ИК-диапазон

$$L_{disk} \propto B_\lambda(T) R_d^2$$

$$\sigma T^4 = \frac{L_X}{4\pi R_d^2} C$$

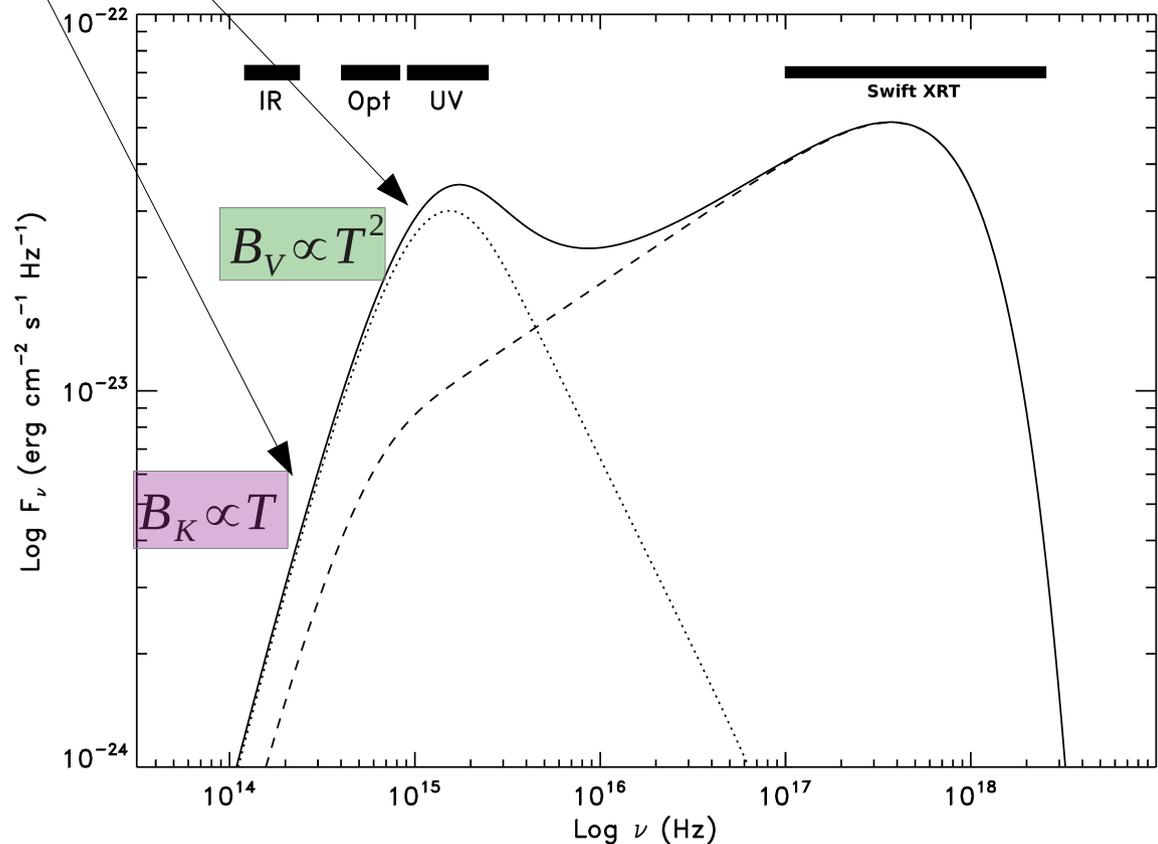
$$L_{disk} \propto T^b R_d^2 \propto L_X^{b/4} R_d^{2-\frac{b}{2}} C^{b/4}$$

$$C = \text{const} \quad R_d \propto a \propto P_{orb}^{2/3}$$

Ожидаемая корреляция между оптической/ИК и рентгеновской светимостью LMXB:

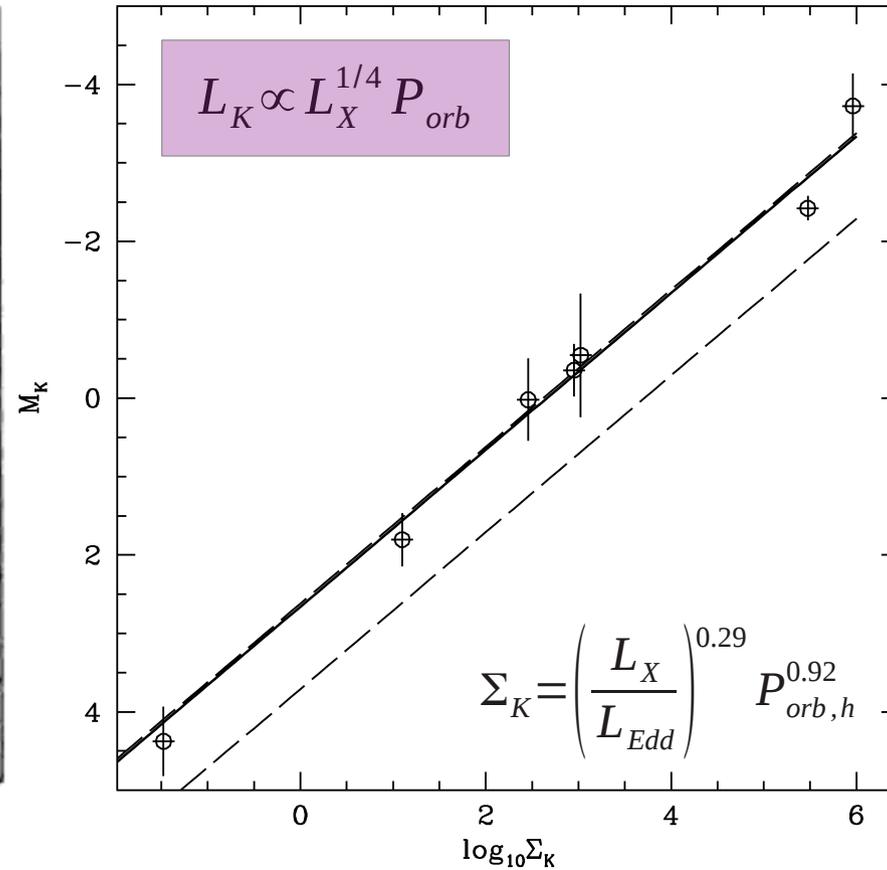
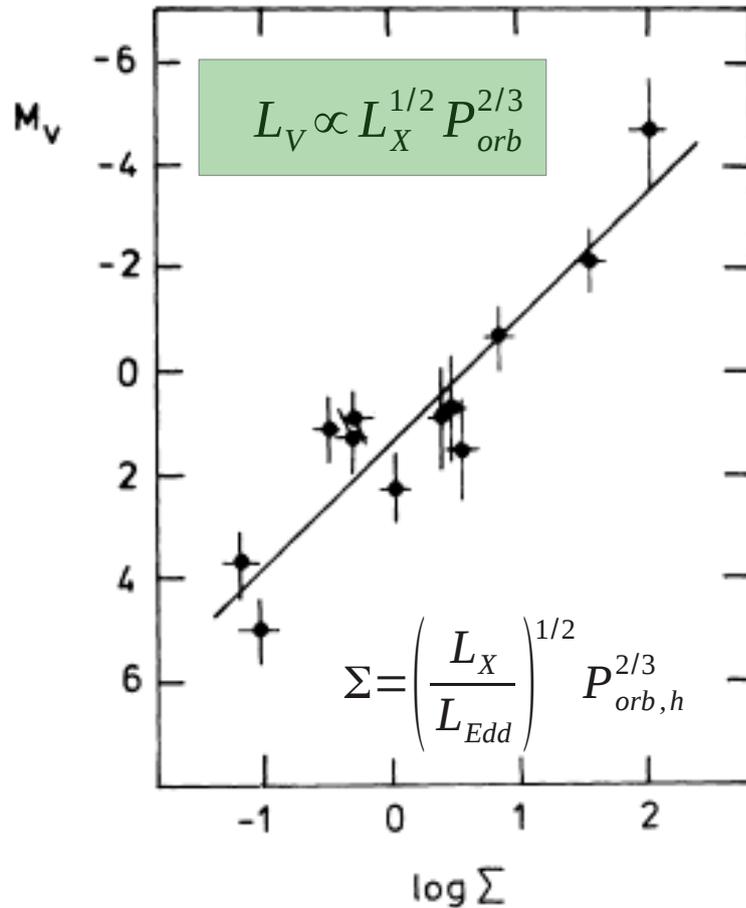
$$L_V \propto L_X^{1/2} P_{orb}^{2/3}$$

$$L_K \propto L_X^{1/4} P_{orb}$$



# Наблюдаемая корреляция оптической/ИК и рентгеновской светимости в постоянных ЛМХВ

van Paradijs & McClintock (1996)  
A&A 290,133



Revnitsev, Zolotuhin & Meshcheryakov (2012)  
MNRAS 421, 2846

## Качественный вывод:

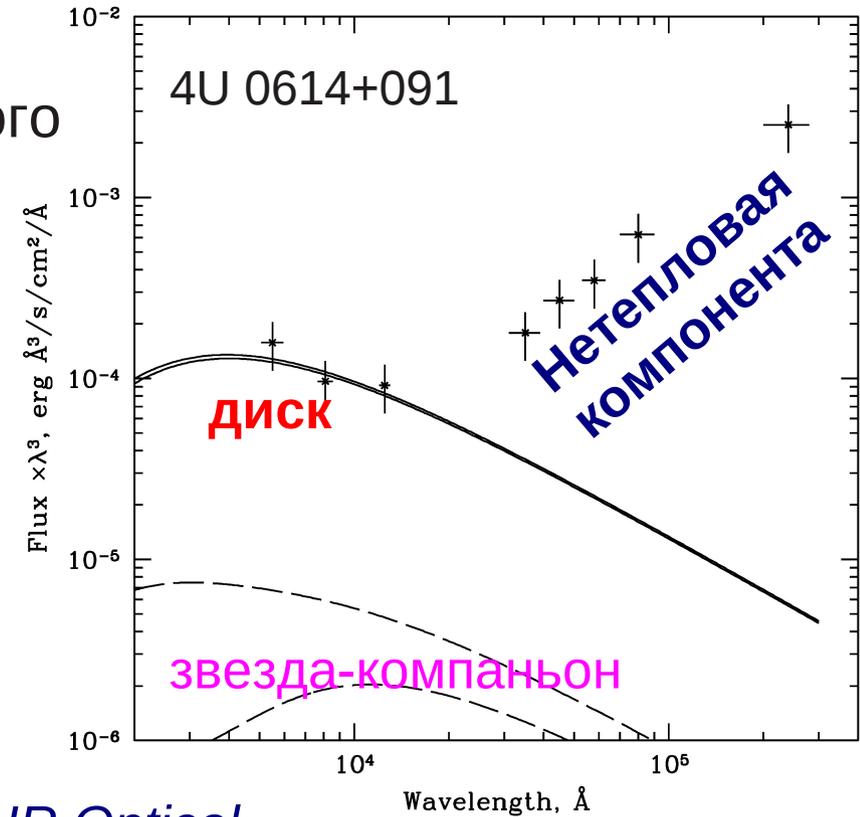
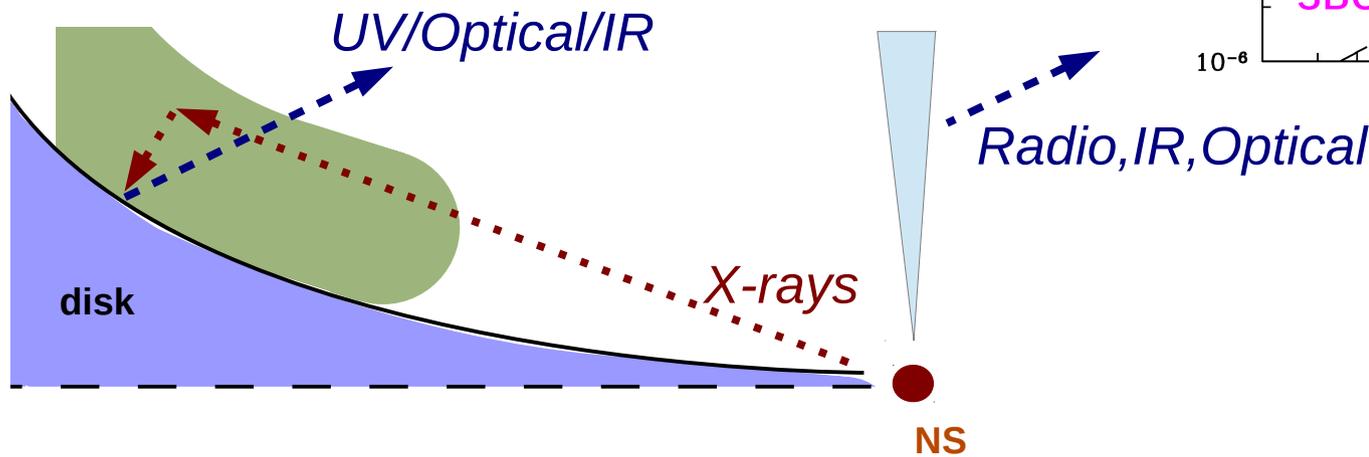
Переработка рентгеновского излучения в аккреционном диске – основной источник оптической светимости маломассивных рентгеновских двойных систем.

# Вклад нетеплового излучения (джета) в оптическую/ИК светимость LMXB

Корреляция оптического/ИК и рентгеновского излучения для нетепловой компоненты:

$$L_{jet} \propto L_X^{1.4}$$

Migliari & Fender (2006)  
MNRAS 366, 79



# Корреляция оптической/ИК и рентгеновской светимости в LMXB: теоретические ожидания

## Тепловая компонента:

	V-фильтр	ИК	
• Вязкий нагрев диска	$L_V \propto L_X^{1/2} R_d^{1/2}$	$L_K \propto L_X^{1/4} R_d^{5/4}$	Задержка $L_{V,K} - L_X$
• Переработка рентгеновского излучения	$L_V \propto L_X^{1/2} R_d C^{1/2}$	$L_K \propto L_X^{1/4} R_d^{3/2} C^{1/4}$	

## Оценка степени облучения диска в различных моделях:

$$C \propto R_d^{1/8} L_X^{3/20} \approx const$$

стандартный диск без короны  
(Шакура и Сюняев 1973)

$$C \propto L_X^{0.3} R_d^{0.21} \sim const$$

диск+стационарная корона  
(Jimenez-Garate, Raymond & Liedahl 2002)

$$C \propto \tau_c \propto L_X$$

диск+нестационарная корона  
(тепловой ветер Woods et al. 1996)

## Нетепловая компонента:

$$L_{jet} \propto L_X^{1.4}$$

Magliari & Fender (2006)

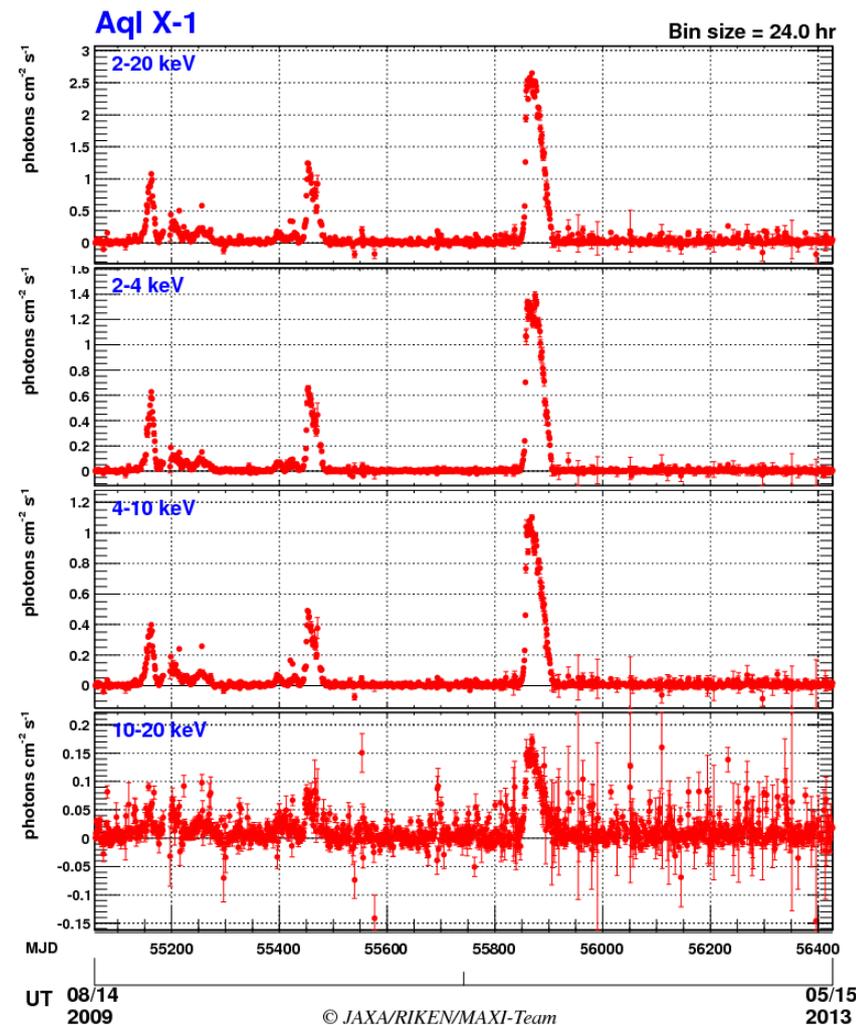
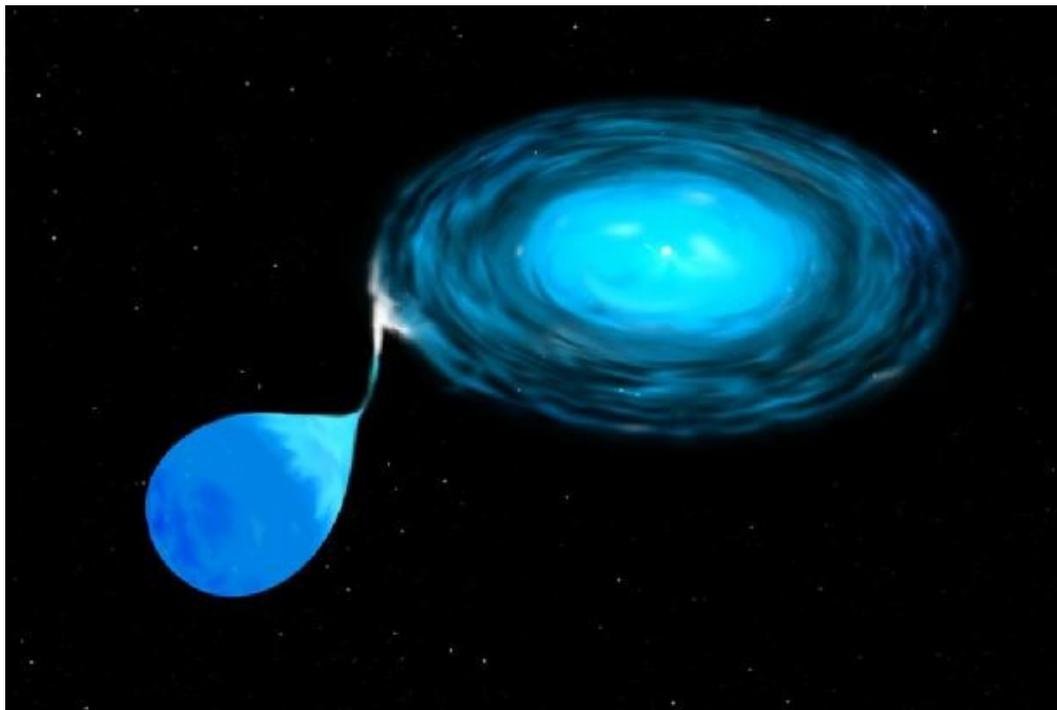
Рентгеновские Новые – наилучший объект для определения степени облучения диска из корреляции УФ/оптической/ИК и рентгеновской светимости в LMXB:

Во время вспышки  $L_x$  меняется на 4 порядка!!

# Наблюдения АqI X-1

Июнь-август 2013 г.

# Рентгеновская Новая Aql X-1



- Орбитальный период:  $P_{\text{orb}} = 18.97$  часа
- Барстер 1 типа – система с нейтронной звездой
- Оптический компаньон:  $m_V \approx 21.6^{\text{mag}}$  (спокойное состояние) ..  $16^{\text{mag}}$  (вспышка)
- Регулярные вспышки каждые  $\approx 12$  мес

Расстояние:  $\sim 2.5$  кпк

# Оптический/УФ/ИК мониторинг вспышки AqI X-1

Регулярные оптические наблюдения: с апреля 2013 года  
(к предполагаемому моменту новой вспышки)

## Цели программы наблюдений:

- Детектирование момента начала аккреционной вспышки (в оптическом диапазоне)
- Информирование научного сообщества об ожидаемой вспышке в рентгеновском диапазоне, ранний рентгеновский мониторинг вспышки
- Получение оптической кривой блеска источника во время вспышки, одновременно с рентгеновскими наблюдениями объекта обсерваториями MAXI, Swift.

# Оптический мониторинг AqI X-1



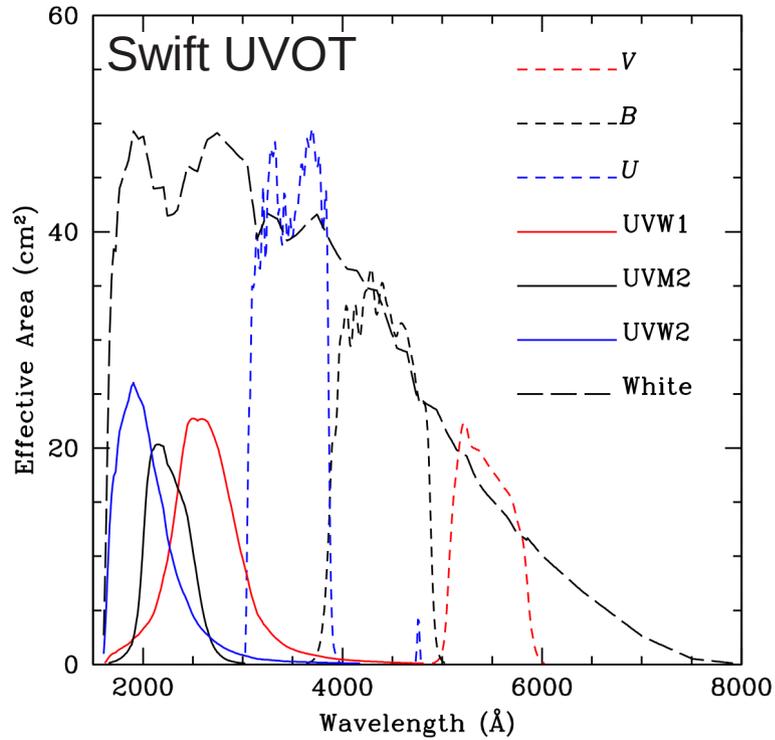
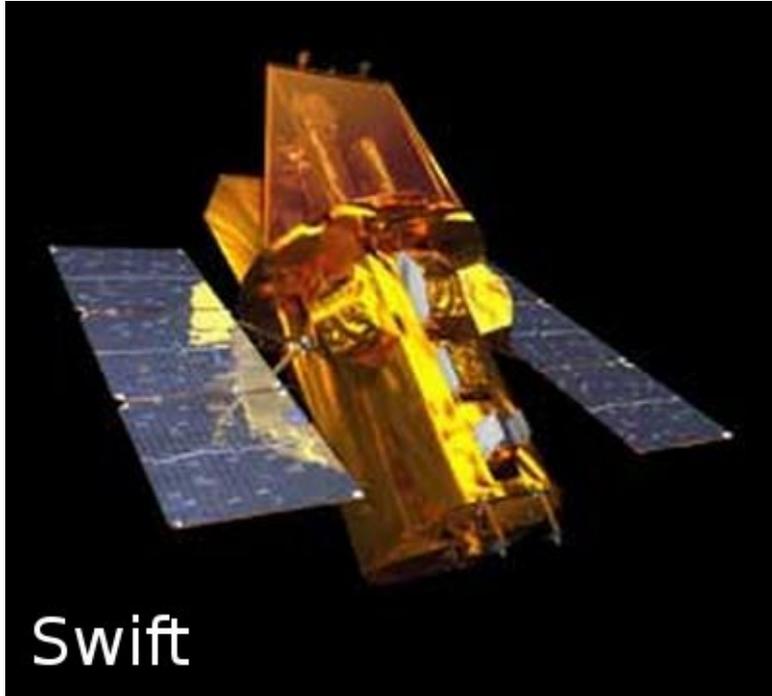
1.6-м АЗТ-33ИК  
(пос. Монды, респ.  
Бурятия)



1-м Цейсс-1000,  
CAO РАН



# Рентгеновский, УФ, ИК мониторинг вспышки Aq1 X-1



Одновременные  
рентгеновские-  
УФ-оптические  
наблюдения:

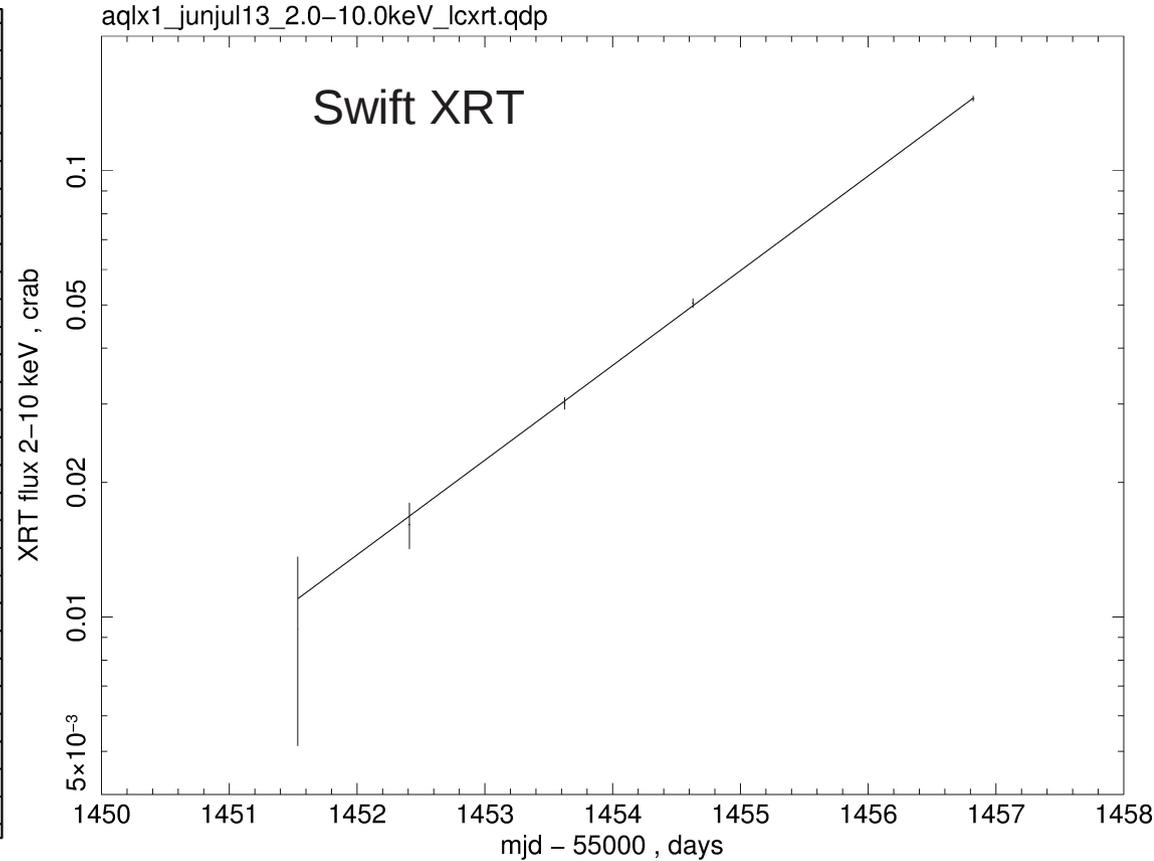
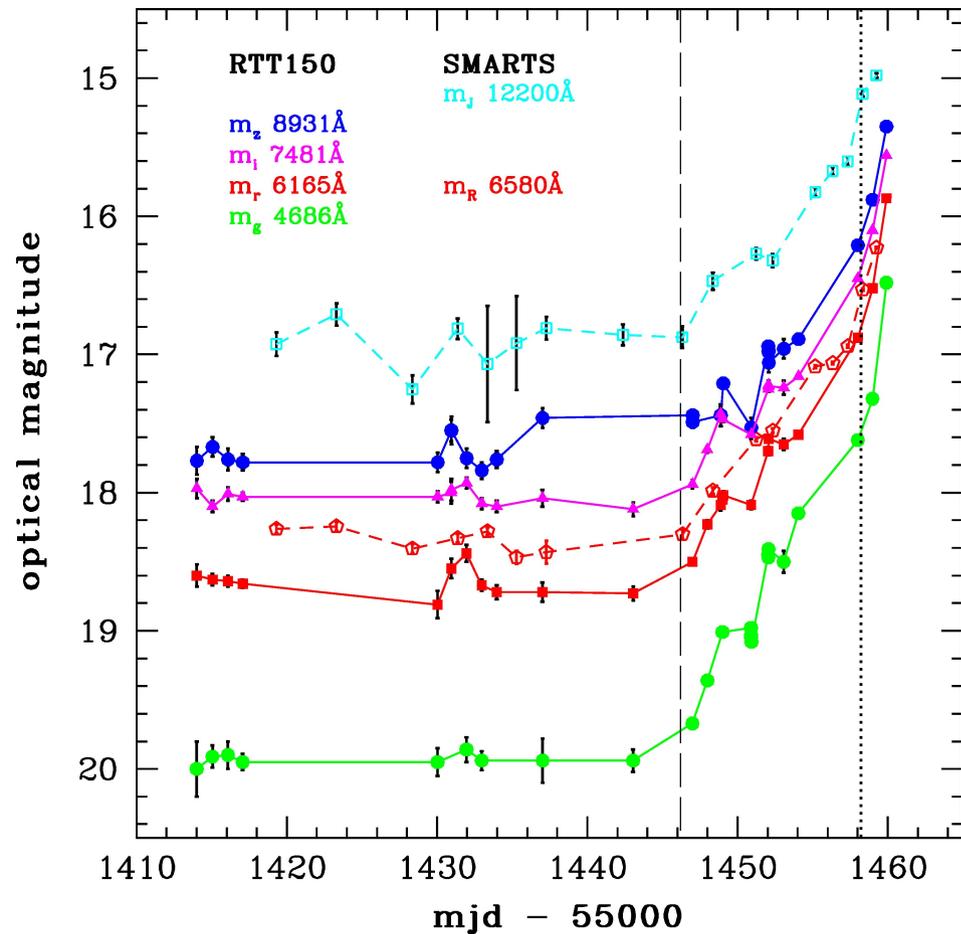
38 наведений  
7.06-22.08.2013  
50 000 сек

X-rays



Кривые  
блеска  
в J и R  
фильтрах

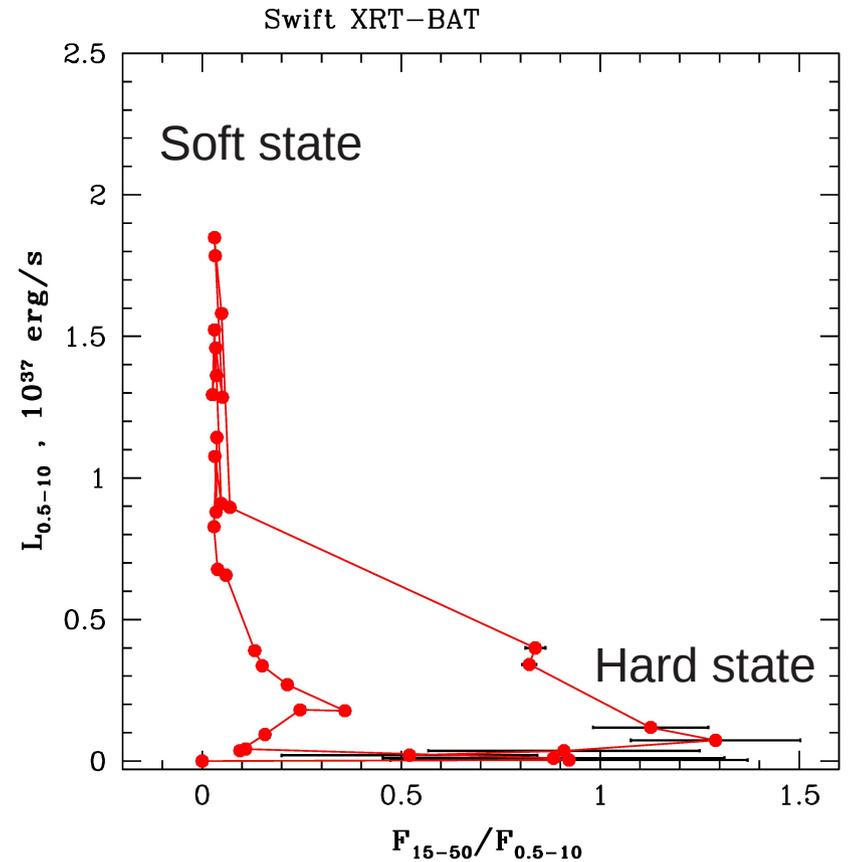
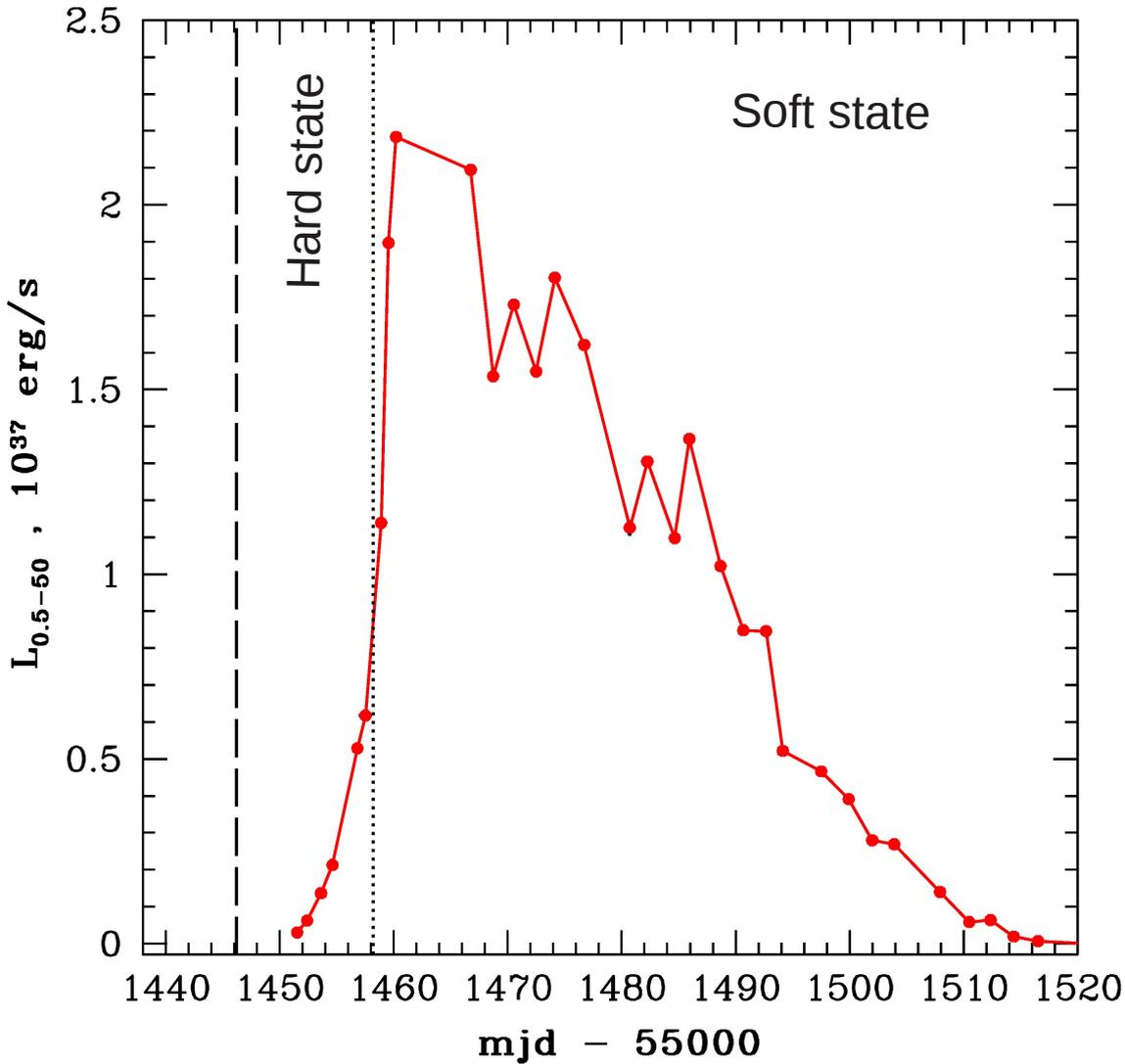
# Детектирование ранней фазы аккреционной вспышки в оптическом и рентгеновском диапазонах



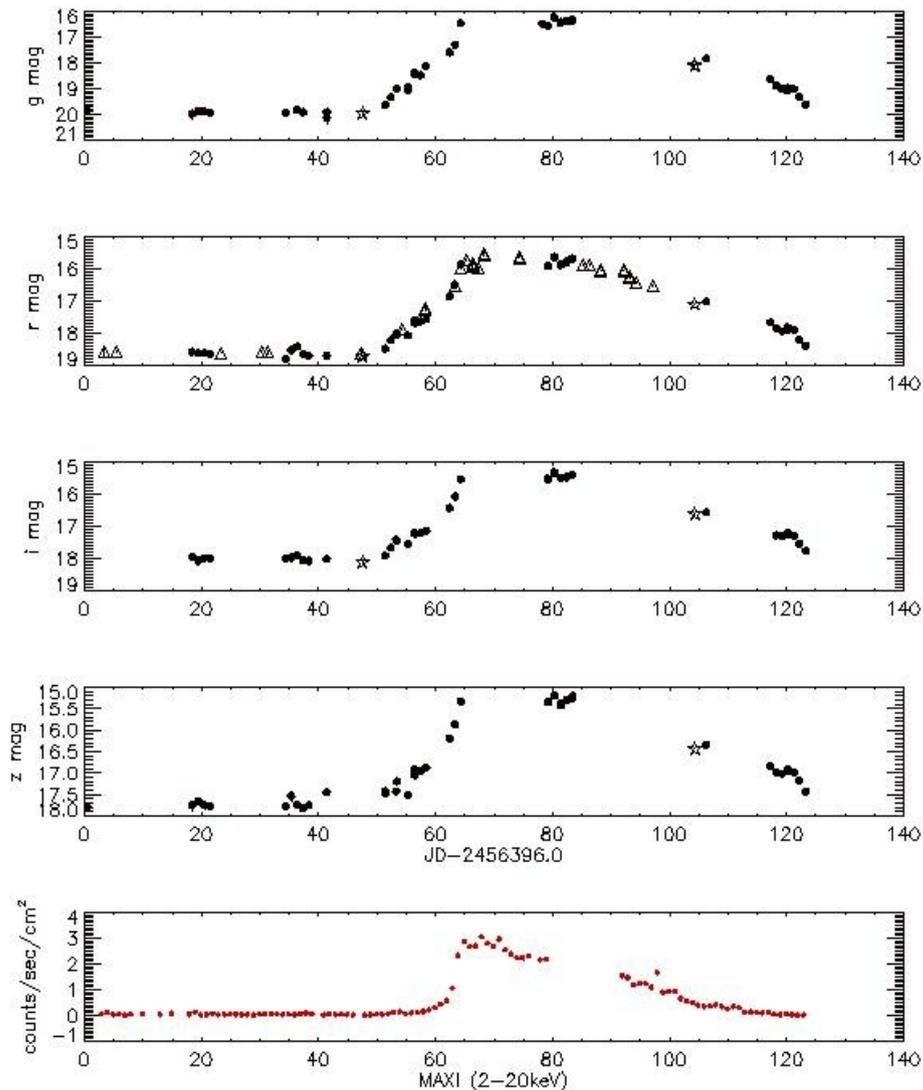
- 3 июня 2013 г. - начало оптической вспышки (RTT150)
- 8 июня 2013 г. обсерватория Swift зафиксировала начало роста рентгеновской светимости Aql X-1.

# Рентгеновская кривая блеска и диаграмма цвет-светимость во время вспышки

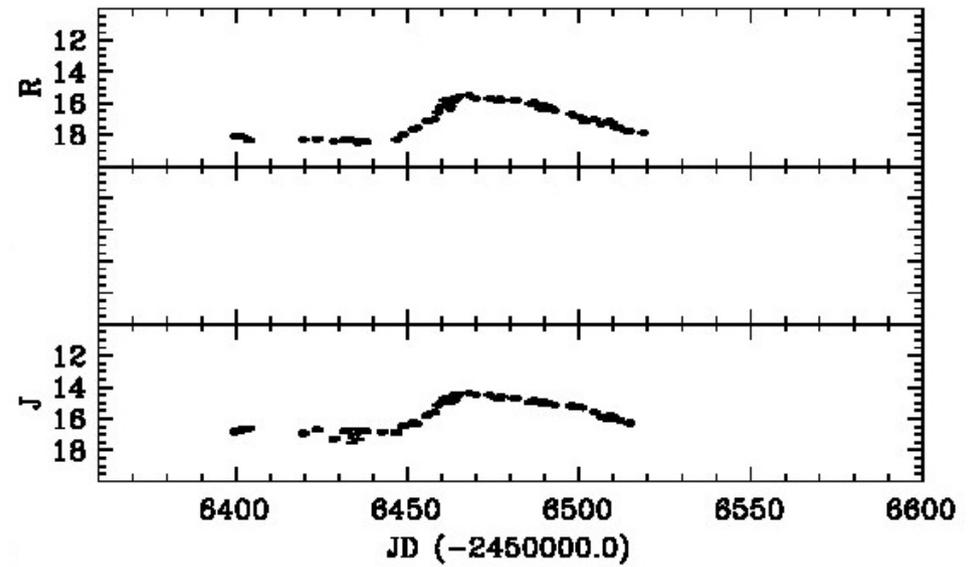
Swift XRT/BAT



# Кривые блеска Aql X-1 во время вспышки



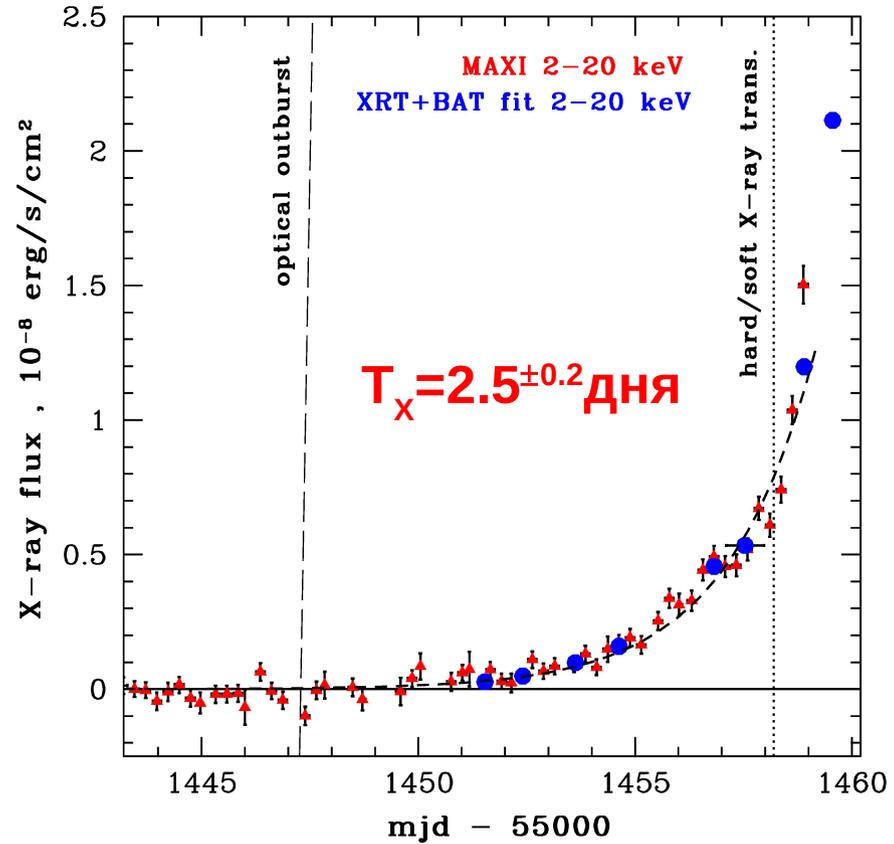
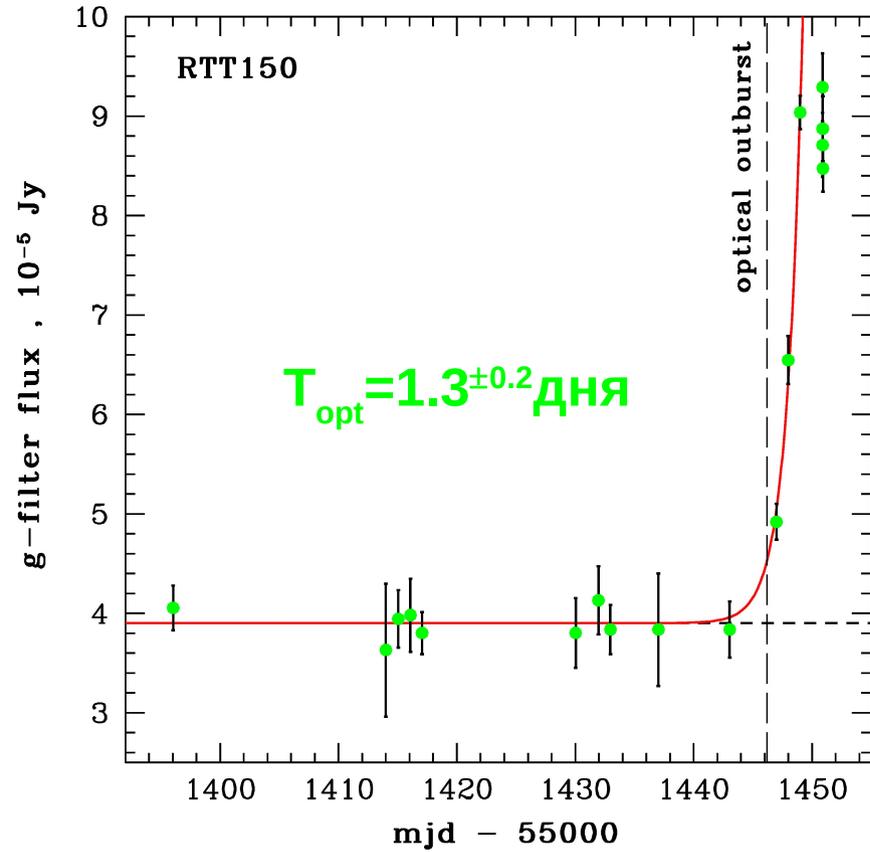
SMARTS



<http://www.astro.yale.edu/smarts/xrb/home.php>

# Результаты наблюдений AqI X-1

# Характерное время роста оптического и рентгеновского потоков в начале вспышки



$$F_{opt, X} \propto e^{t/T}$$

Экспоненциальный рост потока в оптическом и рентгеновском диапазонах.

$T_{opt} < T_x$  : первичная оптическая вспышка не связана с переработкой рентгеновского излучения

# Корреляция УФ/оптической/ИК и рентгеновской светимости во вспышке Aql X-1 (после максимума)

1) Корреляция на больших рентгеновских светимостях после максимума:

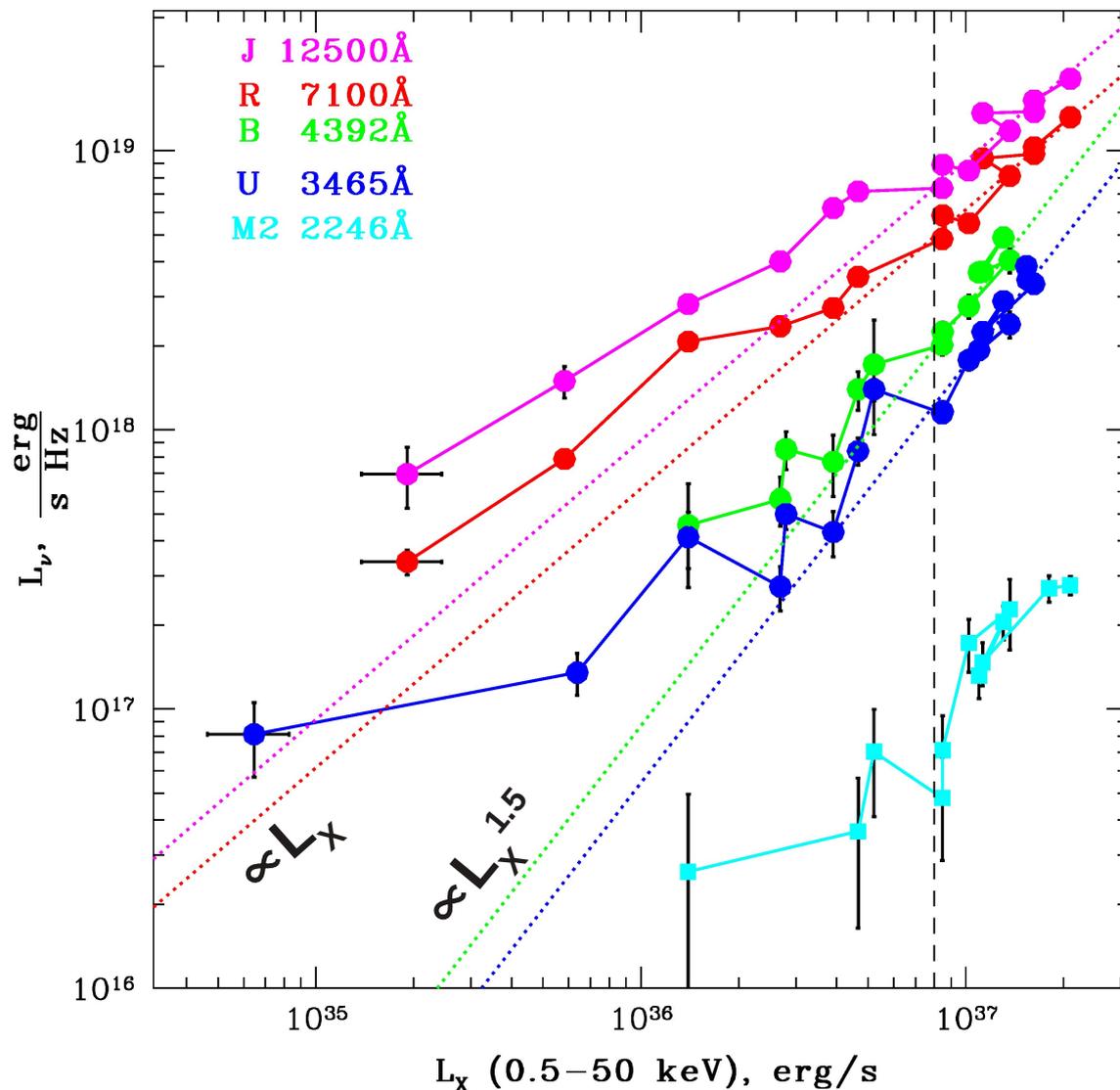
$L_X = 8..25 \times 10^{36}$  эрг/с:

**J,R** :  $L_\nu \propto L_X$

**B,U** :  $L_\nu \propto L_X^{1.5}$

2) На меньших рентгеновских светимостях  $L_X < 8 \times 10^{36}$  эрг/с наблюдается более пологий спад и сильный разброс точек в фильтре U

Вязкий нагрев диска > облучения??



# Изменение внешнего радиуса горячей зоны диска во время вспышки Рентгеновской Новой под контролем облучения

$T_H \approx 8000\text{K}$  – температура ионизации водорода

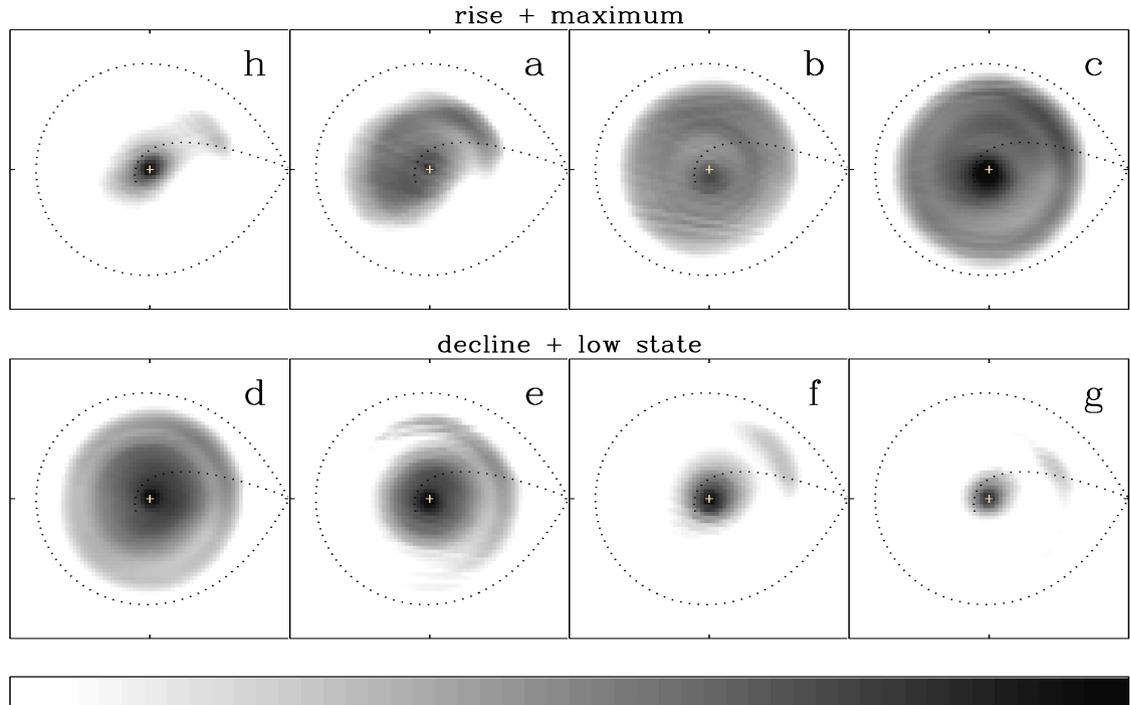
$$L_{disk} \propto B_\lambda(T_H) R_H^2$$

$$\sigma T_H^4 = \frac{L_X}{4\pi R_H^2} C$$

$$R_H \propto \sqrt{L_X C}$$

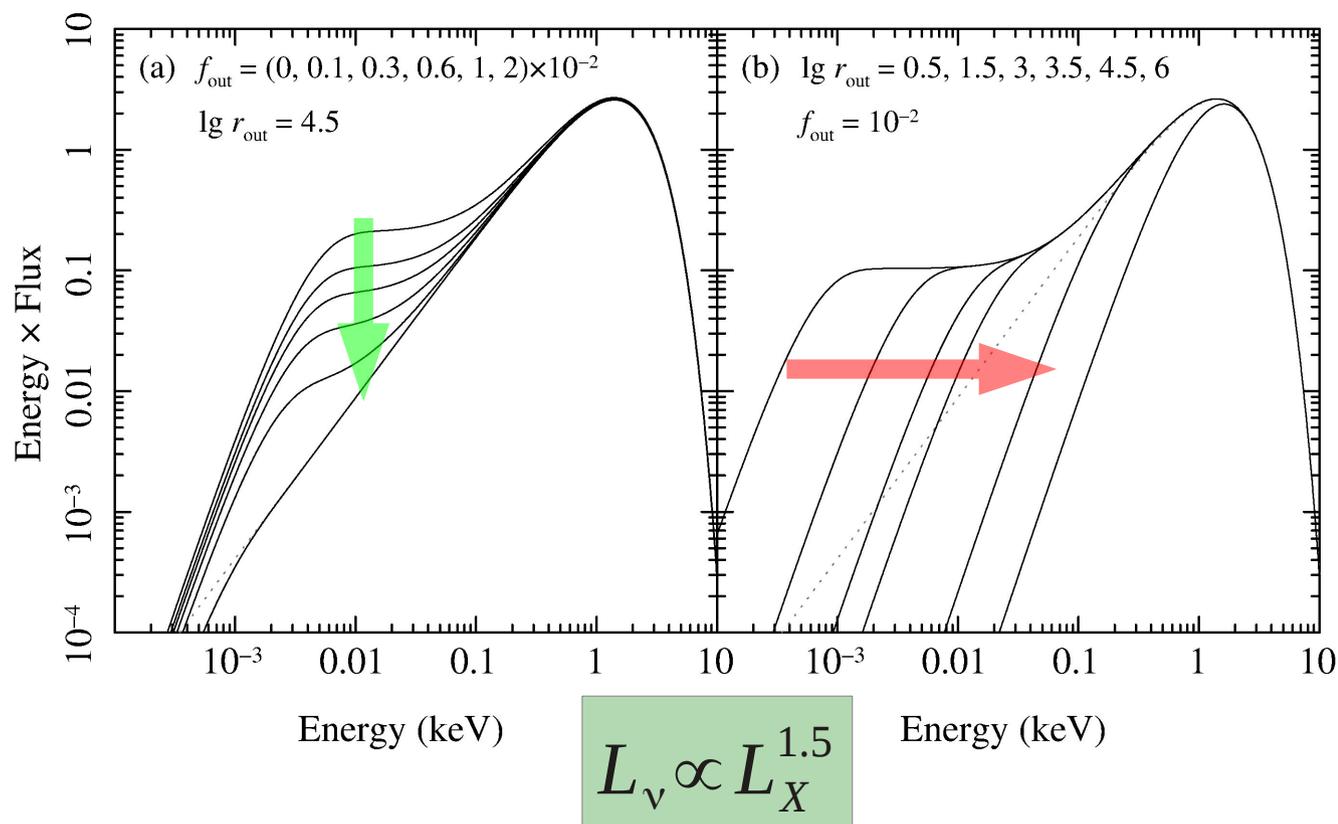
$$C \approx const$$

$$L_v \propto L_X$$



Пример распространения по аккреционному диску во время вспышки теплового фронта ионизации водорода в CV EX Dra (Baptista & Catalan 2001 MNRAS 324, 599)

# Эволюция спектра аккреционного диска при изменении степени облучения и внешнего радиуса диска



DISKIR  
 Gierlinski 2009

Более крутой наклон корреляции оптической и рентгеновской светимости в голубых фильтрах (B,U) по сравнению с красными фильтрами (J,R) может объясняться изменением степени облучения диска в течение вспышки при одновременном уменьшении радиуса горячей зоны диска.

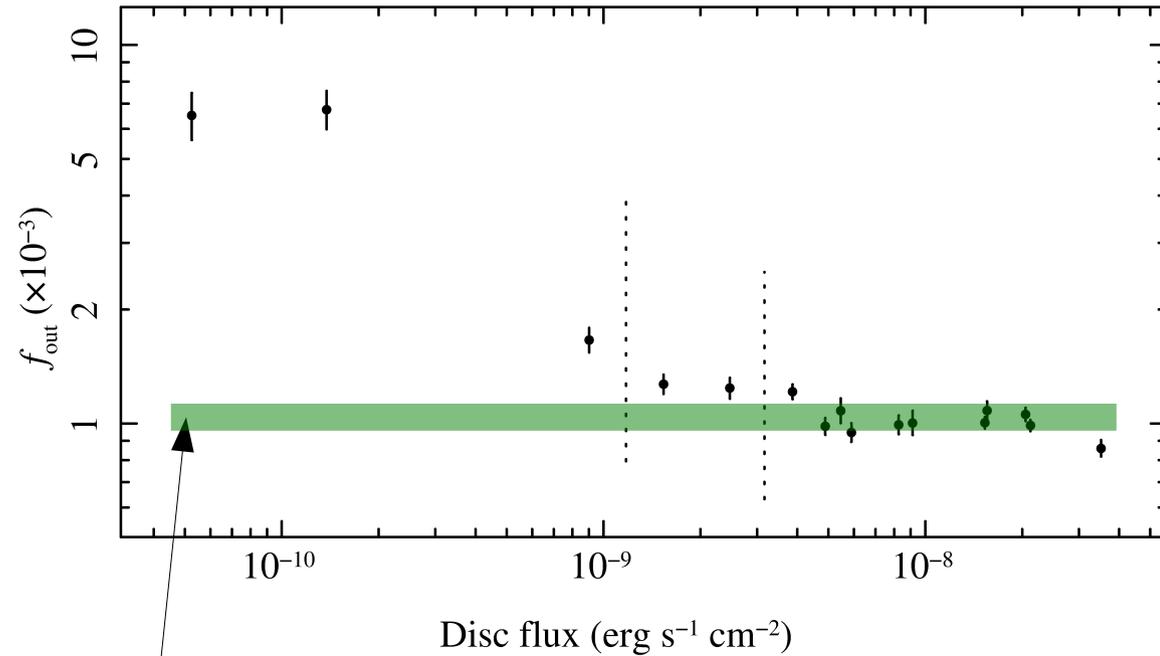
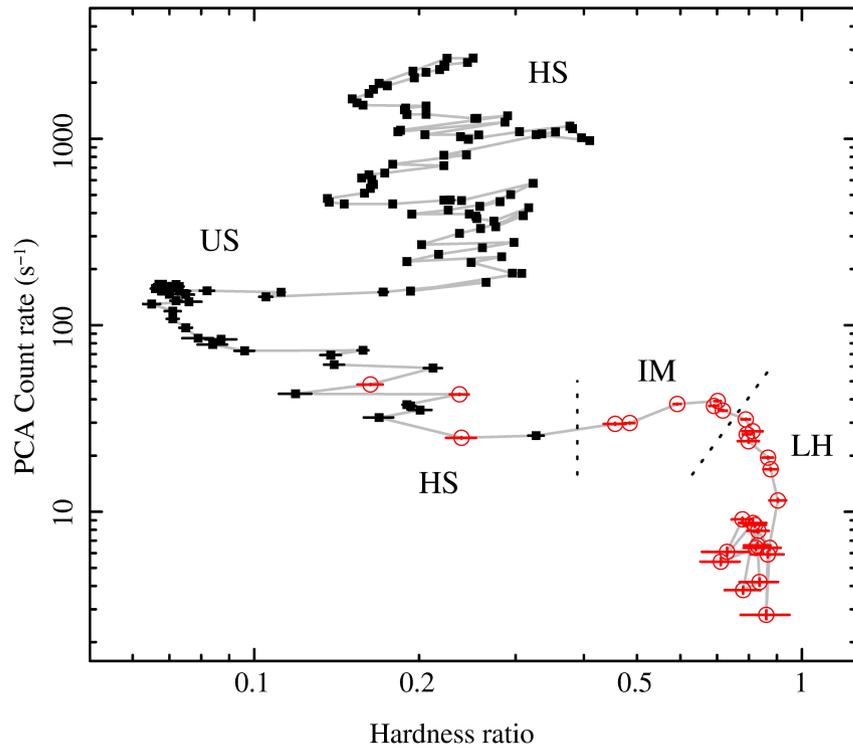
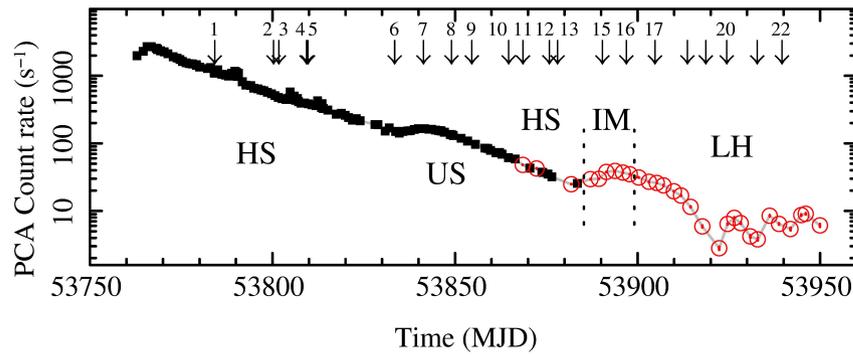
# Выводы

- В докладе представлены первые результаты одновременных рентгеновских/УФ/оптических/ИК наблюдений ярчайшей за последние 10 лет вспышки Рентгеновской новой в системе Aql X-1 в июне-августе 2013 года.
- Наблюдения вспышки Aql X-1 орбитальными инструментами Swift и MAXI проводились одновременно с кампанией наземных оптических/ИК наблюдений на нескольких малых телескопах 1.5-м RTT150, 1.6-м АЗТ-3ЗИК, 1.3-м SMARTS, 1-м Цейсс-1000.
- Одним из наиболее интересных результатов наблюдений стала регистрация раннего этапа аккреционного всплеска в оптическом диапазоне на 4 дня раньше рентгеновской вспышки. Оптическая светимость в начале вспышки растет в 2 раза быстрее рентгеновской, первичная оптическая вспышка не связана с переработкой рентгеновского излучения.
- Используя длинную серию одновременных рентгеновских и УФ наблюдений приборами XRT и UVOT обсерватории Swift, а также данные оптического наземного мониторинга, мы построили зависимость светимости источника в УФ, оптическом, ИК диапазонах от рентгеновской светимости во время вспышки.
- Для рентгеновских светимостей  $L_x > 8 \times 10^{36} \text{ эрг/с}$  зависимость имеет вид:  $L_v \propto L_x$  (J и R фильтры) и  $L_v \propto L_x^{1.5}$  (B и U фильтры), что указывает на уменьшение в размерах горячей зоны диска во время вспышки под контролем облучения при одновременном изменении степени облучения диска.
- На меньших рентгеновских светимостях  $L_x < 8 \times 10^{36} \text{ эрг/с}$  наблюдается более пологий спад, а также, сильный разброс точек в фильтре U, что может указывать на уменьшение вклада облучения в нагрев аккреционного диска на поздних этапах вспышки рентгеновского транзиента.

Спасибо за внимание!

# Disk irradiation during strong luminosity changes in X-ray Nova XTE J1817-330 accretion outburst

Gierlinski et al. (2009) MNRAS, 392, 1106



$\times 10$  changes in X-ray luminosity should provide substantial changes in atmosphere height and disc irradiation degree !!!

Observed irradiation degree remains almost constant!