

Рентгеновские новые с черными дырами: наблюдения на Кавказской Горной обсерватории ГАИШ МГУ.

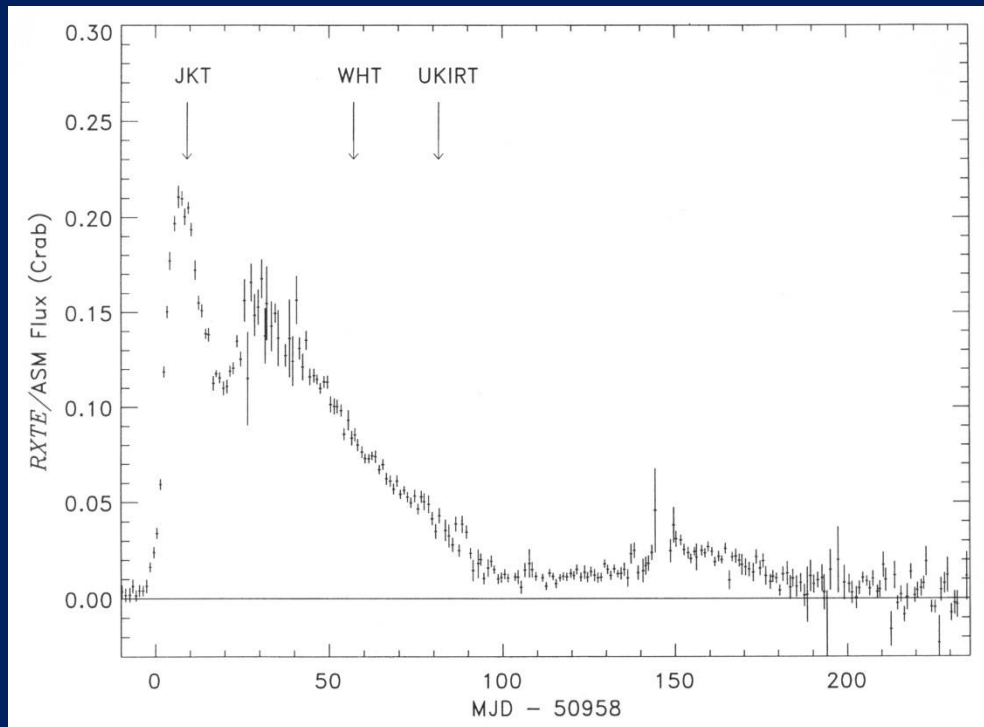
А.М.Черепашук

(ГАИШ МГУ)

- 60 лет тому назад, в 1964 году Я.Б.Зельдович и Е.Е.Салпитер опубликовали фундаментальные работы по несферической аккреции вещества на черные дыры (ЧД). Это положило начало наблюдательным исследованиям ЧД. В нашем докладе мы расскажем об исследованиях транзиентных маломассивных рентгеновских двойных систем с ЧД – рентгеновских новых.

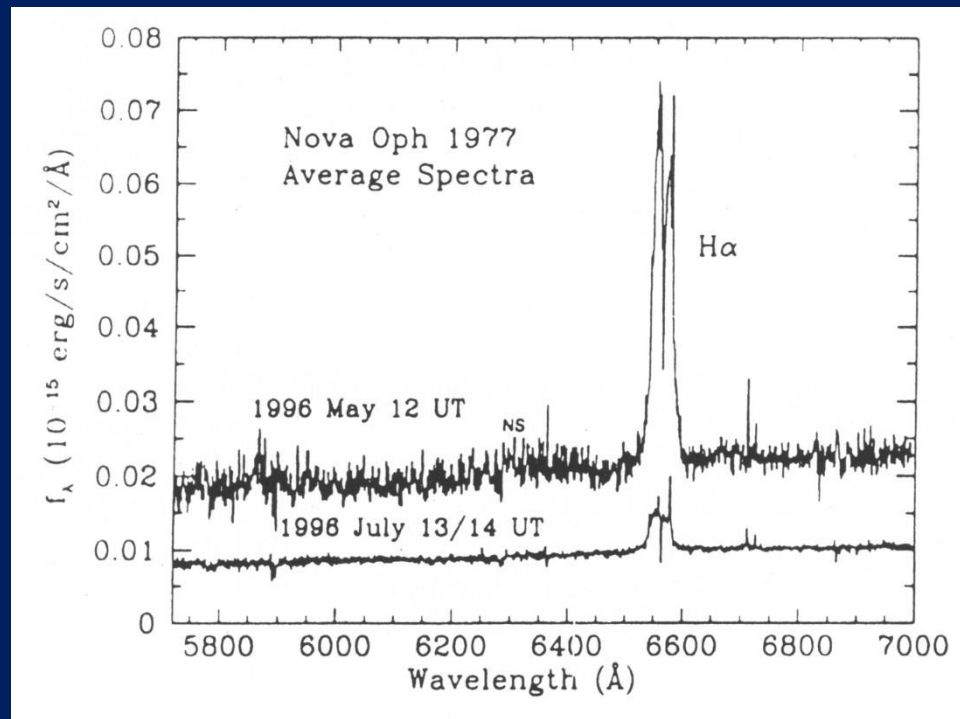
- Рентгеновские новые: маломассивная ($M = 0.3 \div 3 M_{\odot}$) оптическая К-М-А звезда-донор вещества, заполняющая свою полость Роша и релятивистский объект (нейтронная звезда (НЗ) или черная дыра (ЧД)), вокруг которого сформировался диск.
- Орбитальные периоды: от $\sim 0^d.2$ (GROJ0422+32, XTEJ1118+480) до $\sim 33^d$ (GRS1915+105).

- Раз в несколько лет в рентгеновских новых происходит эпизодическое увеличение рентгеновской светимости на фактор $10^2 \div 10^6$ (L_x — до 10^{39} эрг/с), со временем подъема светимости в несколько дней и последующим экспоненциальным спадом на временах порядка нескольких десятков дней. Неустойчивости в диске.



Рентгеновская кривая блеска транзientной рентгеновской двойной системы XTEJ2012+381, полученная группой RXTE/ASM (Hynes et al., 1998). Минивспышка произошла примерно через 145 суток после первого детектирования этого транзиента на RXTE (Remillard et al., 1998).

- В спокойном состоянии рентгеновская светимость рентгеновских новых **весьма мала**: $L_x \cong 10^{30} \div 10^{33}$ эрг/с. При этом в оптическом спектре двойной системы наблюдаются мощные и широкие двугорбые линии излучения водорода, гелия и т.п., свидетельствующие о наличии вокруг релятивистского объекта вращающегося диска.



- То есть диск вокруг релятивистского объекта существует, а рентгеновское излучение ничтожно мало.

Гипотезы:

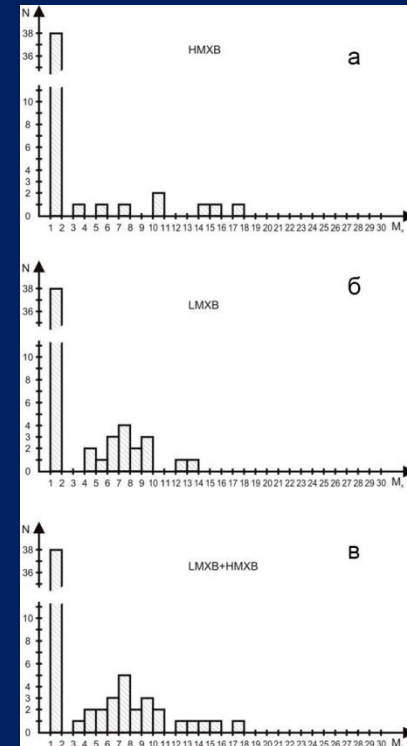
Адвекционно-доминированный диск,
ламинарный диск — накопитель, диск с мощным
ветром, уносящим вещество от релятивистского
объекта и т.п.

Нерешенная проблема.

- Свыше $2/3$ черных дыр до последнего времени было открыто в маломассивных рентгеновских двойных (время ядерной эволюции маломассивной звезды в ~ 1000 раз длиннее, чем массивной, поэтому открыть ЧД в маломассивной рентгеновской двойной более вероятно, чем в массивной).
- Начиная с 2015 года "пальма первенства" в открытиях ЧД перешла к гравитационно-волновой астрономии.

■ Тем не менее, исследования рентгеновских двойных систем, особенно рентгеновских новых с ЧД, не потеряли своей актуальности:

1. Продолжение накопления информации о массах звездных ЧД, выяснение природы провала масс ЧД в диапазоне $3 - 5 M_{\odot}$.



2. Выяснение причины ничтожно малой рентгеновской светимости диска вокруг ЧД в спокойном состоянии.

3. Изучение явлений нестационарности в рентгеновских новых с ЧД во время спокойной стадии.

■ В спокойном состоянии в рентгеновских новых светит в основном маломассивная звезда позднего спектрального класса, вклад оптического диска вокруг ЧД составляет $\sim 10 - 50\%$. Поэтому наблюдения рентгеновских новых в спокойном состоянии (слабые объекты с $V = 18 - 23$ зв.вел.) представляют собой трудную задачу. Наши наблюдения демонстрируют предельные возможности 2.5-метрового телескопа КГО ГАИШ МГУ.

- На 2.5-метровом телескопе КГО и 1.25-метровом телескопе Крымской станции ГАИШ ведется программа оптических и ИК фотометрических наблюдений рентгеновских новых с ЧД в спокойном состоянии.
- Мы расскажем о результатах исследований трех систем этого типа: XTEJ1118+480 (KVUMa), A0620-00 (V616Mon) и GROJ0422+32 (V518Per).

Система: ХТЕJ1118+480 (KVUMa)

■ (K7 – M0) V + BH, $p \cong 0^d.17$,
$$f_v(m) = \frac{m_x \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} = 6.1 M_{\odot}$$

$Z \cong 1.7$ кпк (Кик от взрыва сверхновой)

$V_{\min} \cong 19^m$.

■ Оптические наблюдения **ноябрь 2017** и **июнь, ноябрь 2018** гг.: 1,25-м телескоп Крымской станции ГАИШ, без фильтров, $\lambda_{\text{эф}} = 6400 \text{ \AA} (4300 - 8300 \text{ \AA})$

■ ИК наблюдения (**декабрь 2017- апрель 2018**): 2.5-м телескоп КГО ГАИШ МГУ, фильтры **J** ($\lambda_{\text{эф}} \cong 12500 \text{ \AA}$) и **K** ($\lambda_{\text{эф}} \cong 22000 \text{ \AA}$). ИК – камера ASTRONIRCAM.

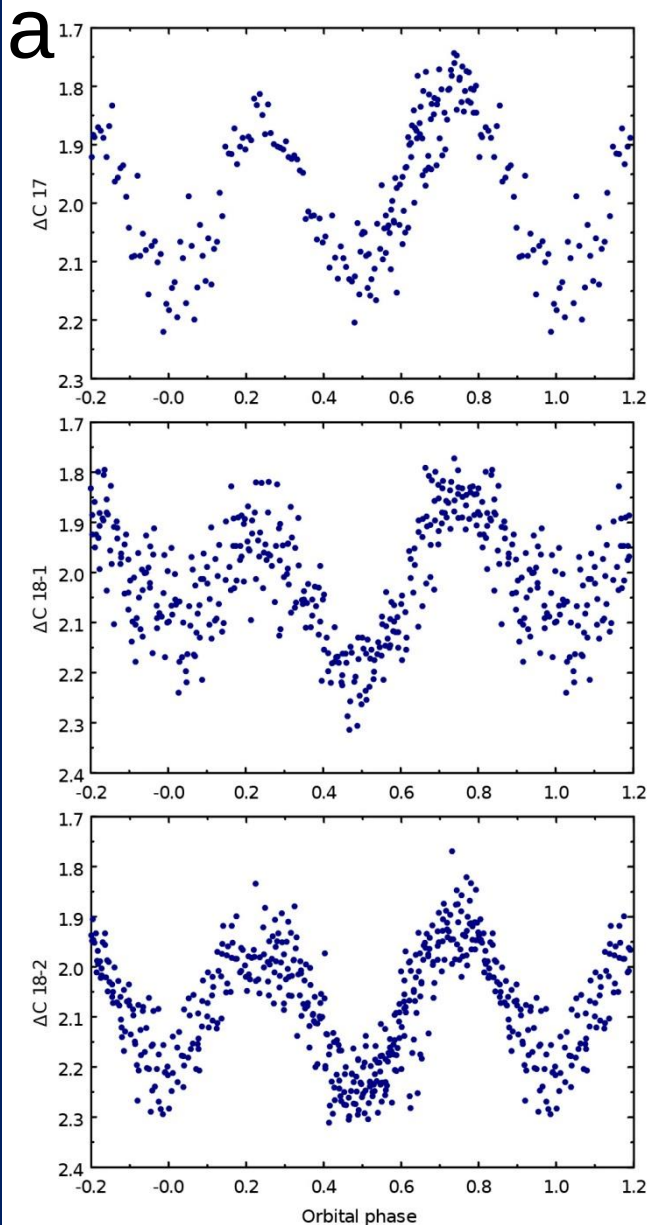


Figure 2a. Average phase optical light curves of KV UMa obtained during the season (see Table 1). The data were convolved using Ephemeris 1.

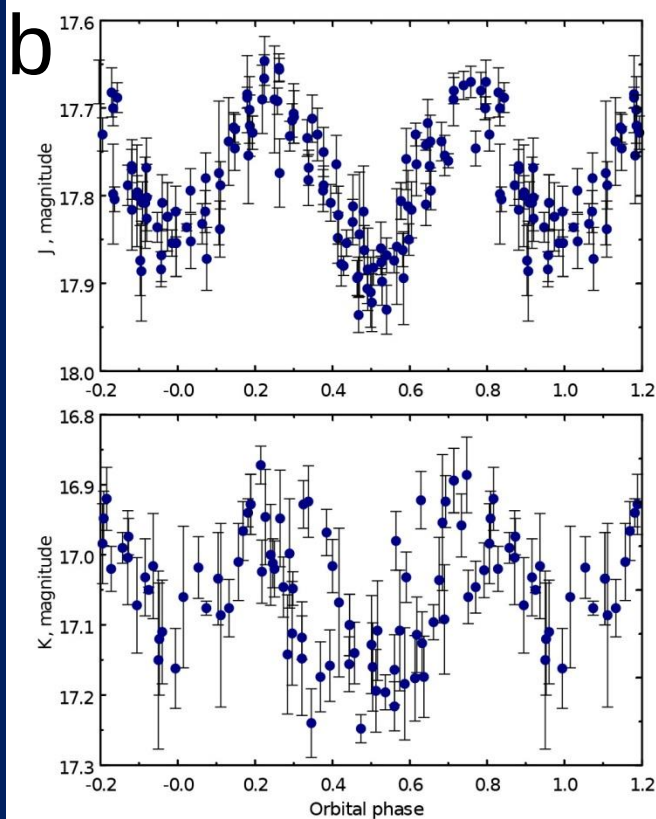


Figure 2b. Average IR phase light curves of KV UMa obtained during the season (see Table 1). The data were convolved using Ephemeris 1.

Свертка оптических (а) и ИК (б) наблюдений KVUMa с орбитальным периодом.
Cherepashchuk et al., 2019, MNRAS 490, 3287.

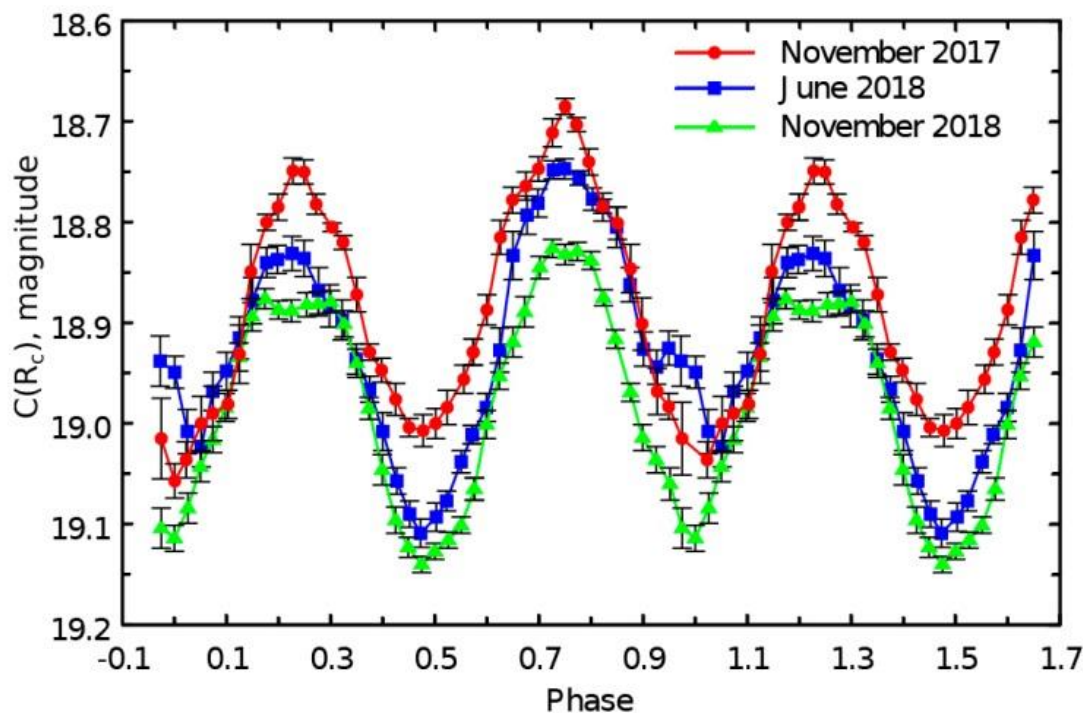
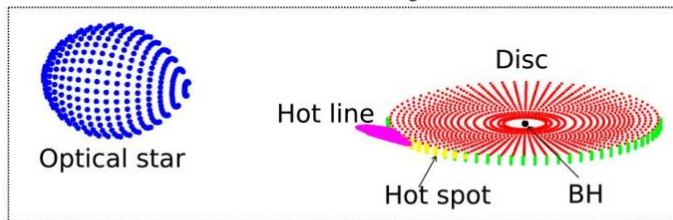
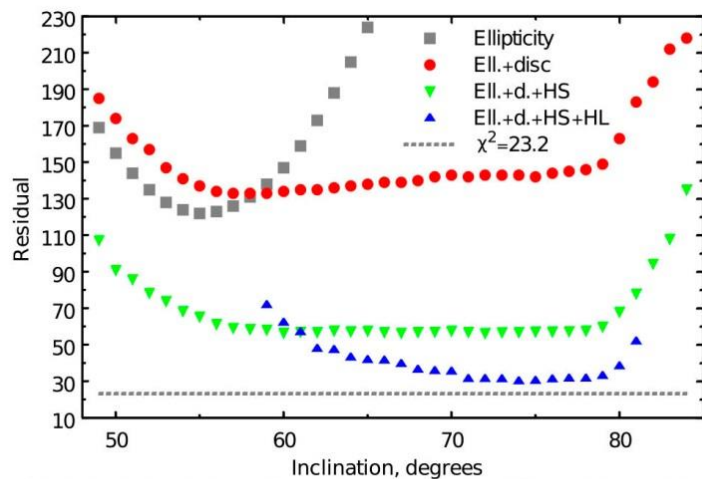


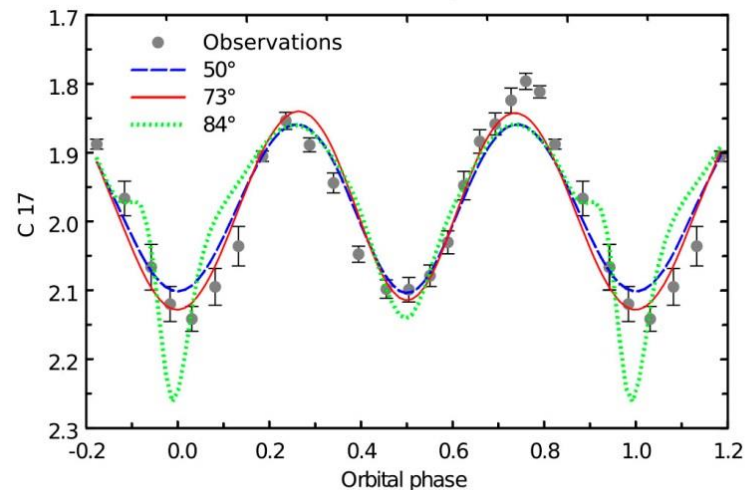
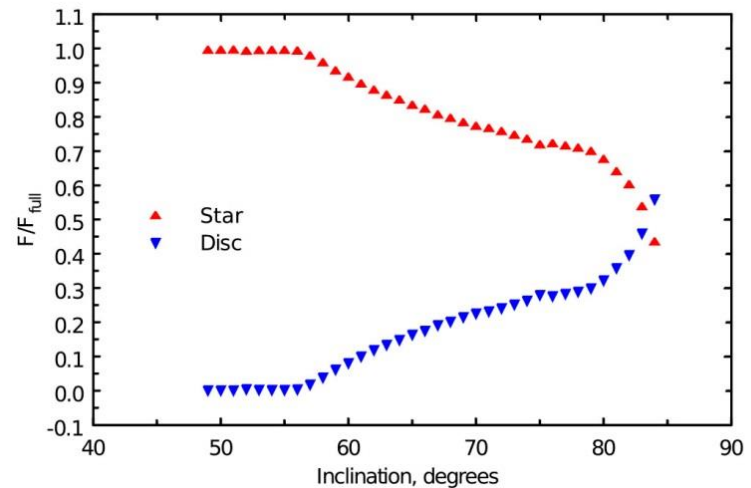
Figure 3. Average phase curves of KV UMa in the integral light. About ~ 1000 individual measurements were used. An error in an individual observation in integral light was $0.025^m \div 0.030^m$ (in average).

Оптические
кривые
блеска в
разные эпохи.



The adequacy test for models for the *C17* light curve. The upper panel presents the dependences of the residual on the inclination of the orbit i that are minimal over all other parameters, $q = 37$: ‘ell’ is a ‘purely’ ellipsoidal model – there is no disc with an interaction region; ‘ell+disc’ is a model with an ellipsoidal donor star and a disc without a hotspot or a hot line; ‘ell+disc+HS’ is a model with an ellipticity effect and with a disc with a hotspot; ‘ell+disc+HS+HL’ is a model that includes the effect of an ellipsoidal star, an accretion disc around a black hole with a hotspot and a hot line. The horizontal line corresponds to the critical value $\chi^2_{n-m,0.01}$ within the 1 per cent confidence level. The bottom panel presents a schematic picture of the model used.

XTE J1118+480 = KV Uma



An output of the model ‘ellipticity effect plus disc without hotspot or hot line’ for the average optical light curve *C17* (2017 November) and $q = 37$ (see Fig. 5). The upper panel shows the contribution of the star and the disc to the total system luminosity depending on the inclination i . The lower panel shows the average light curve (dots) and optimal theoretical curves for $i = 50^\circ, 73^\circ, 84^\circ$. For $i = 50^\circ$ the disc contribution is zero. For $i = 84^\circ$ the contribution is maximal (≈ 55 per cent): the disc is eclipsed by the donor star.

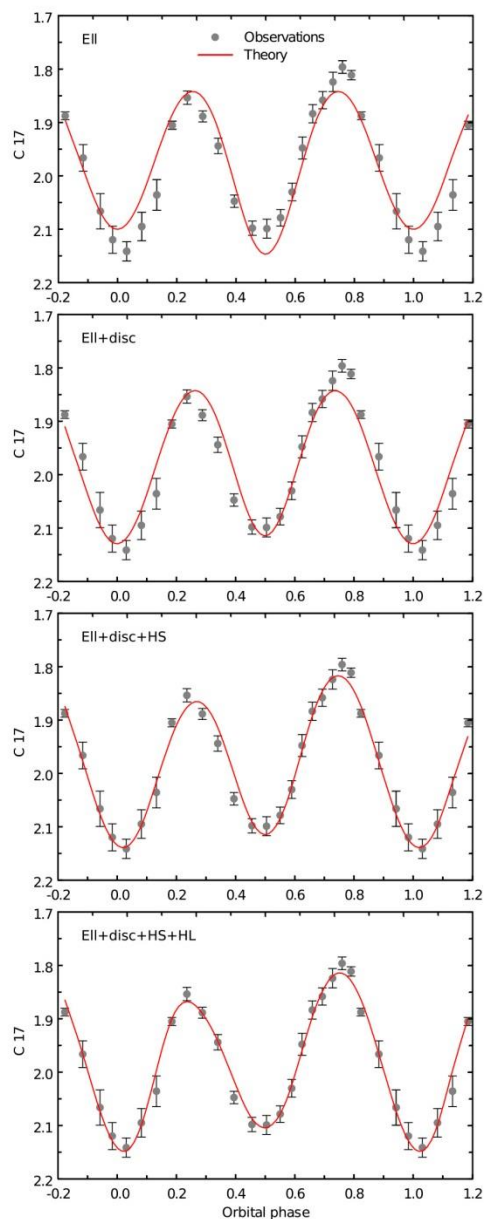
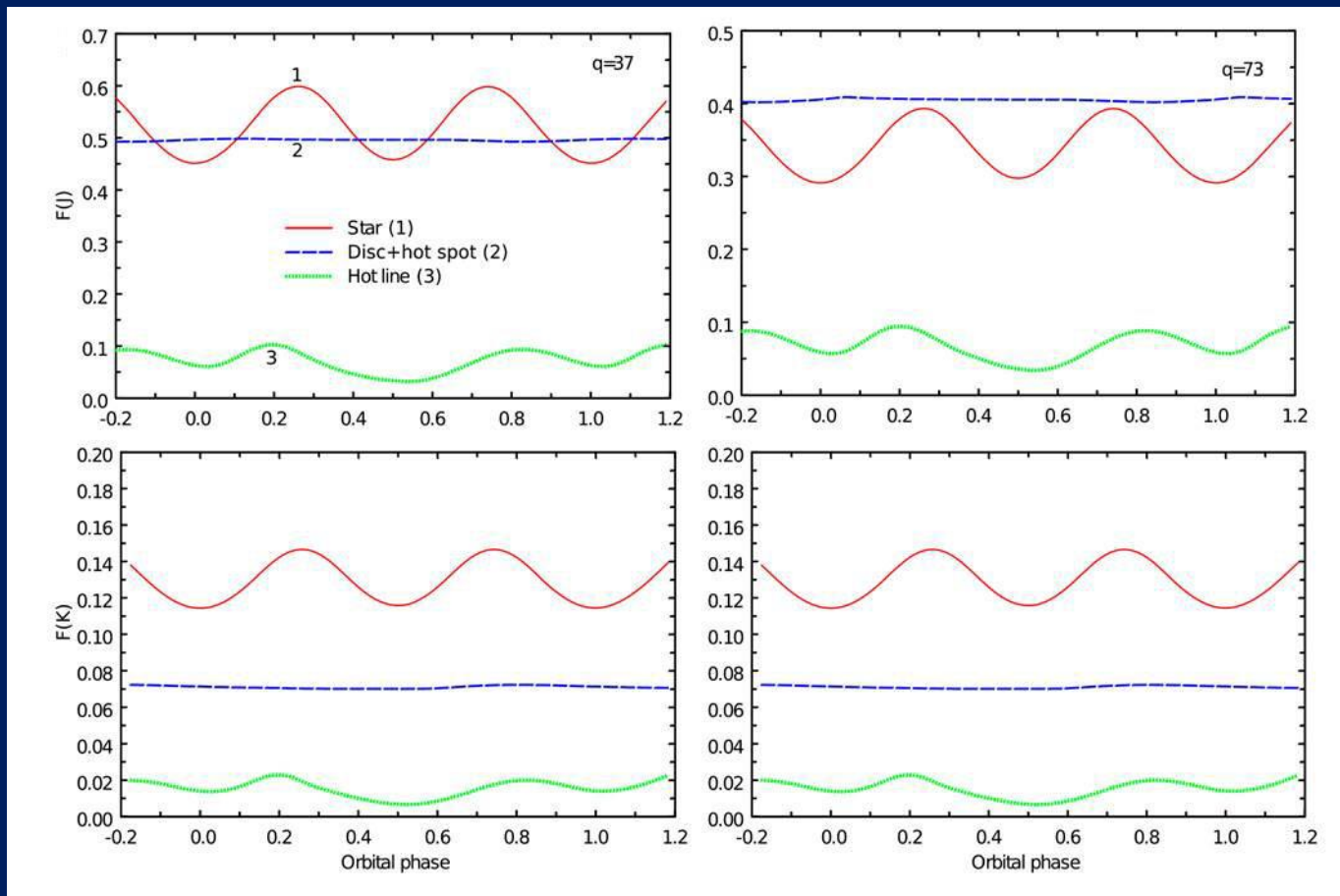


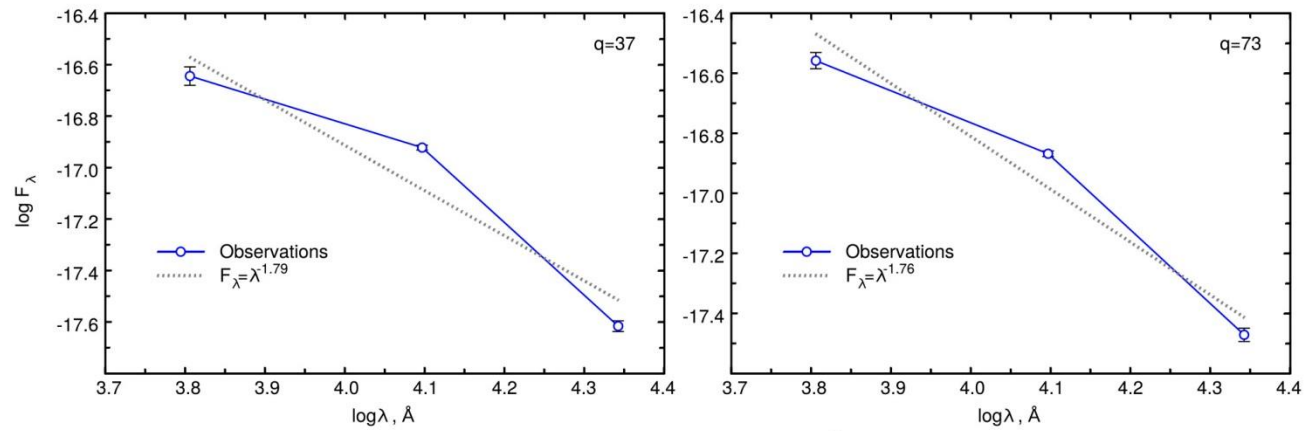
Figure 7. An illustration for residuals from Fig. 5. The average optical light curve of KV UMa (2017 November) is shown along with optimal theoretical light curves that correspond to four models of the system: 'ell' ($i = 55^\circ$), 'ell+disc' ($i = 57^\circ$), 'ell+disc+HS' ($i = 67^\circ$), 'ell+disc+HS+HL' ($i = 74^\circ$).

Средние ИК кривые
блеска с наложенными
теоретическими кривыми
блеска.

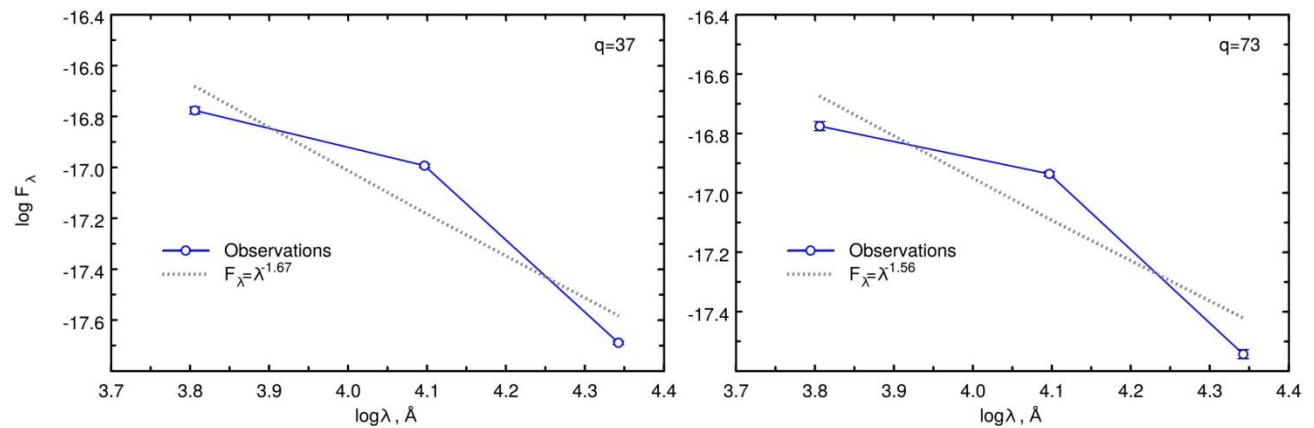


Вклад различных компонент системы в суммарной блеск системы, восстановленный из анализа наблюдаемых кривых блеска.

$$F_{\lambda} \sim \lambda^{-(1.6 \div 1.8)}$$



Spectra of the non-stellar component in the range $\lambda = 6400\text{--}22\,000 \text{\AA}$ for $q = 37$ (left) and $q = 73$ (right).



Spectra of the radiation of the accretion disc with the hotspot for $q = 37$ (left) and $q = 73$ (right).

Спектр незвездной компоненты в системе KVUMa, восстановленный из интерпретации оптических и ИК кривых блеска ($\lambda = 6400 \div 22000 \text{\AA}$)

- Из интерпретации кривых блеска:

$$M_{\text{BH}} = f_v(M) \left(1 + \frac{1}{q} \right)^2 \frac{1}{\sin^3 i} ; q = M_x / M_v .$$

$$i = 74^\circ \pm 4^\circ, M_{\text{BH}} = 7.1 \div 7.2, M_v = 0.10 \div 0.20.$$

Система: A0620-00 (V616Mon)

■ (K5) V + BH, $p \cong 0^d.32$,
$$f_v(m) = \frac{m_x^3 \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} = 2.7 M_{\odot},$$

$M_v = 0.40 M_{\odot}$, $M_x \cong 6.6 M_{\odot}$.

$V \cong 18^m$.

■ Оптические наблюдения (2015 – 2017 гг.): 1,25-м телескоп Крымской станции ГАИШ.

Белый свет ($\lambda_{\text{эф}} = 6400 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 4300 \div 8300 \text{ \AA}$)

■ ИК наблюдения (2016 – 2017 гг.): 2.5-м телескоп КГО ГАИШ МГУ, ИК Камера ASTRONIRCAM, фильтры J ($\lambda_{\text{эф}} \cong 12500 \text{ \AA}$) и K ($\lambda_{\text{эф}} \cong 22000 \text{ \AA}$).

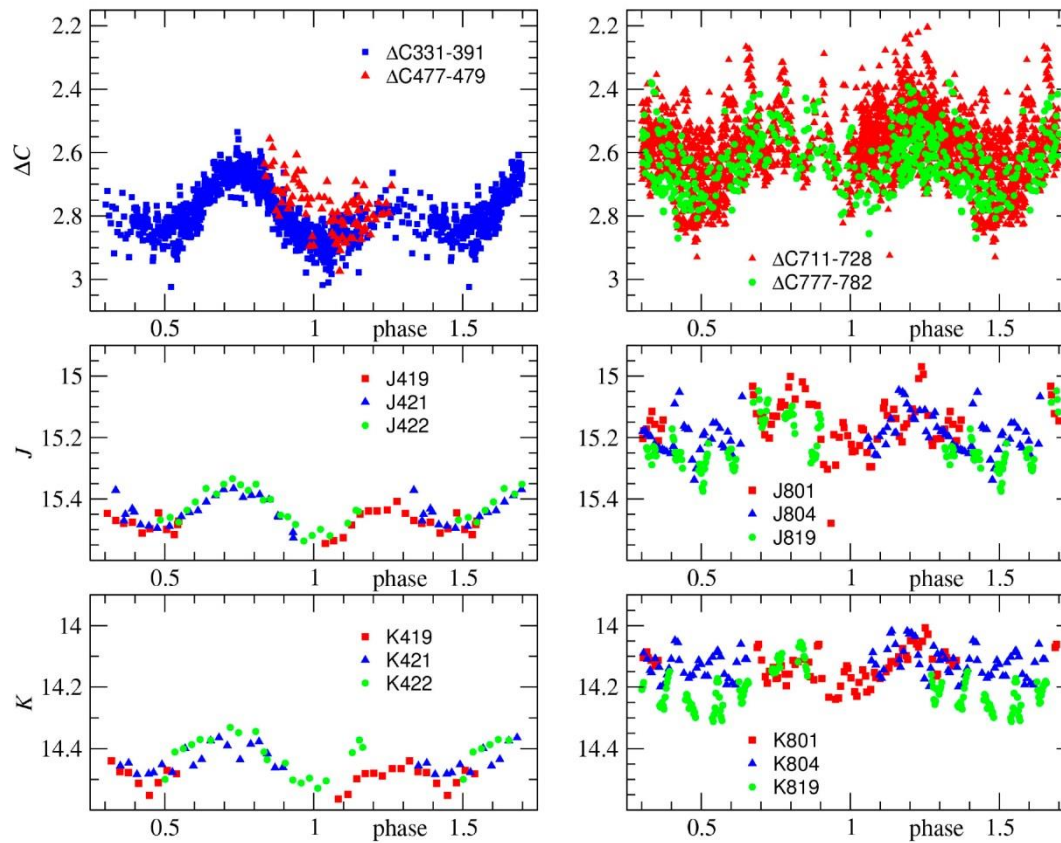
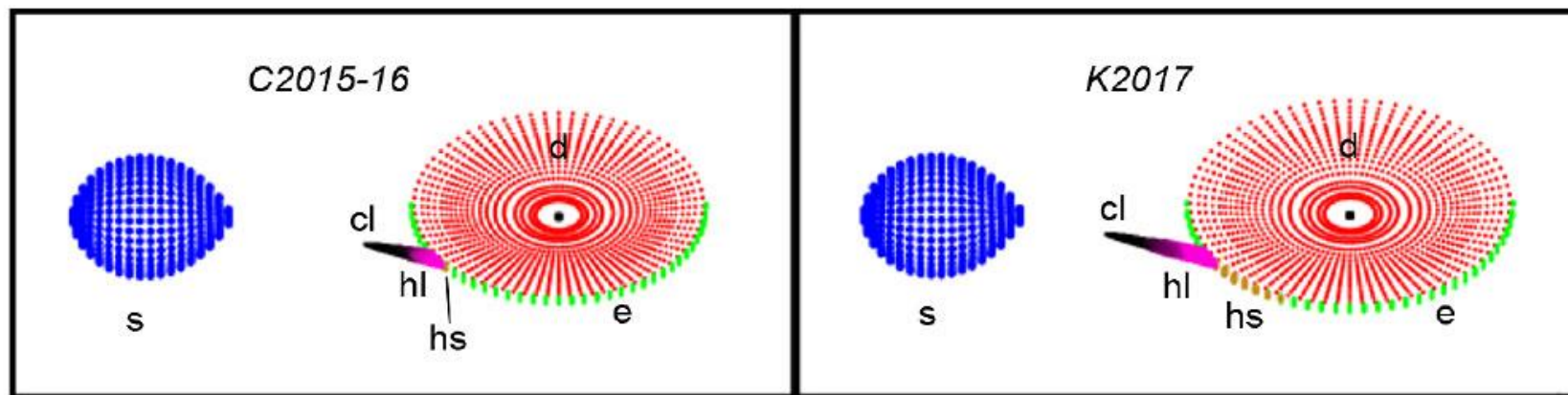


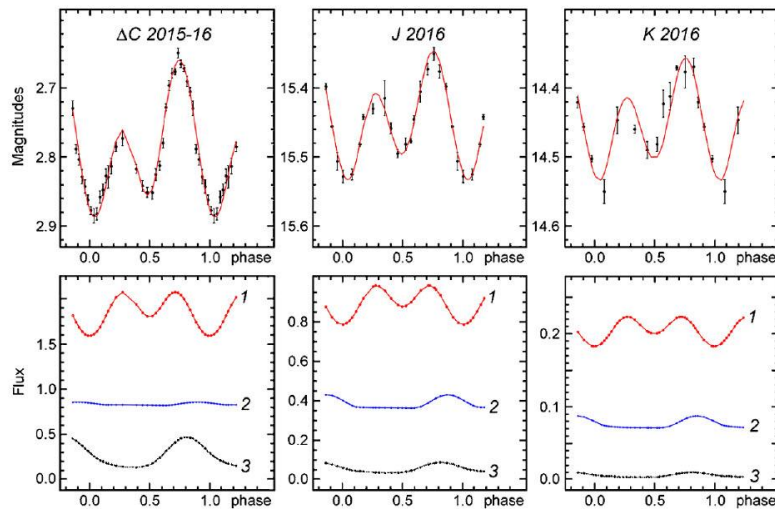
Figure 2. Photometric data on A0620-00 for the passive (2015–2016, left) and active (2016–2017, right) states folded with the orbital period. From top to bottom: ‘Clear filter’, and J and K bands. Different symbols refer to the data obtained during different nights (see Table 1).

Свертка оптических (вверху) и ИК наблюдений (внизу) A0620-00 с орбитальным периодом $p \cong 0^d.32$ для пассивной стадии системы (2015 – 2016 гг., слева) и для активной стадии (2016 – 2017 гг., справа). Cherepashchuk et al., 2019 MNRAS 483, 1067.

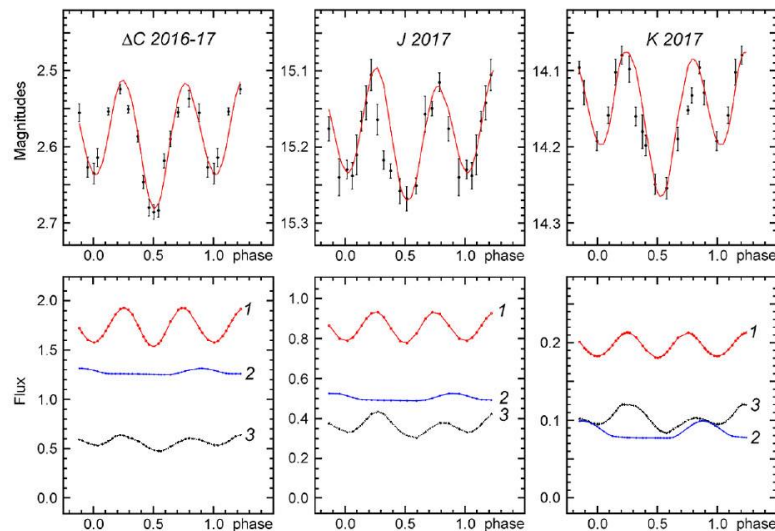


Plot showing a schematic representation of the A0620—00 system at an orbital phase of 0.75, as it appears in the model with an HL having the parameters from Table 3, being in the passive (left; the *C* band) and active (right; the *K* band) state. Different symbols depict the optical star (s), the internal (paraboloidal) part of the disc (d), the edge of the disc (e), the hotspot (hs), and the heated (hl), and cool (cl) parts of the HL.

- Математическая модель системы A0620-00 в оптическом диапазоне (слева) и ИК (справа) диапазонах.



The model with an HL. Passive state. Designations are the same as in Fig. 3. Here (3) is the HL luminosity.



The model with an HL. Active state. Designations are the same as in Fig. 3. Here (3) is the HL luminosity.

- Средние кривые блеска A0620-00 с наложенными на них оптимальными теоретическими кривыми для **пассивной** стадии (**вверху**) и **активной** стадии (**внизу**). Показан также вклад каждой из компонент в общую светимость системы.

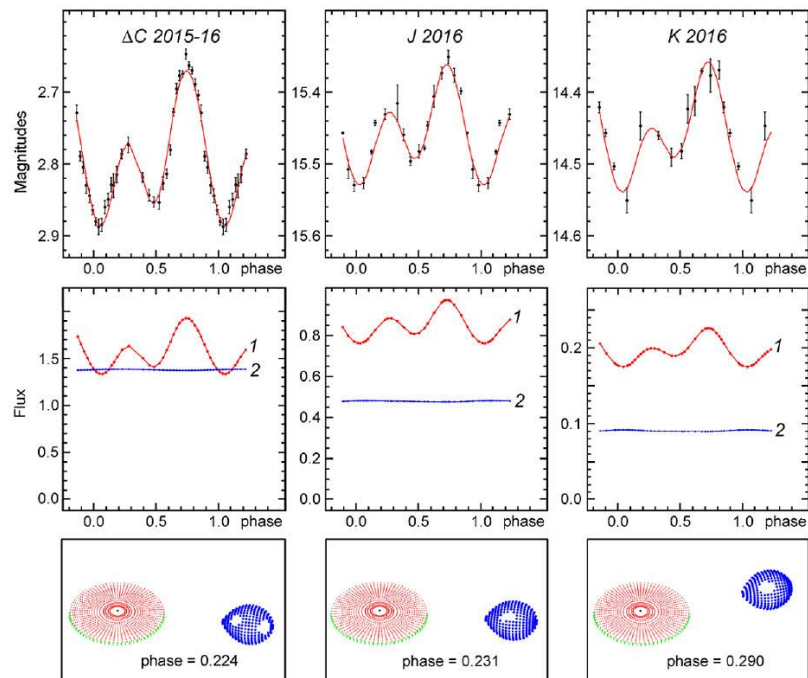


Figure 3. The spotted model of the passive-state A0620—00 system. Top panel shows the mean observed light curves (not corrected for interstellar extinction; points) and the simulated light curves. Middle panel represents the contribution of different components to the total light: donor star (1) and accretion disc (2). Bottom panel renders the model of the system at different orbital phases.

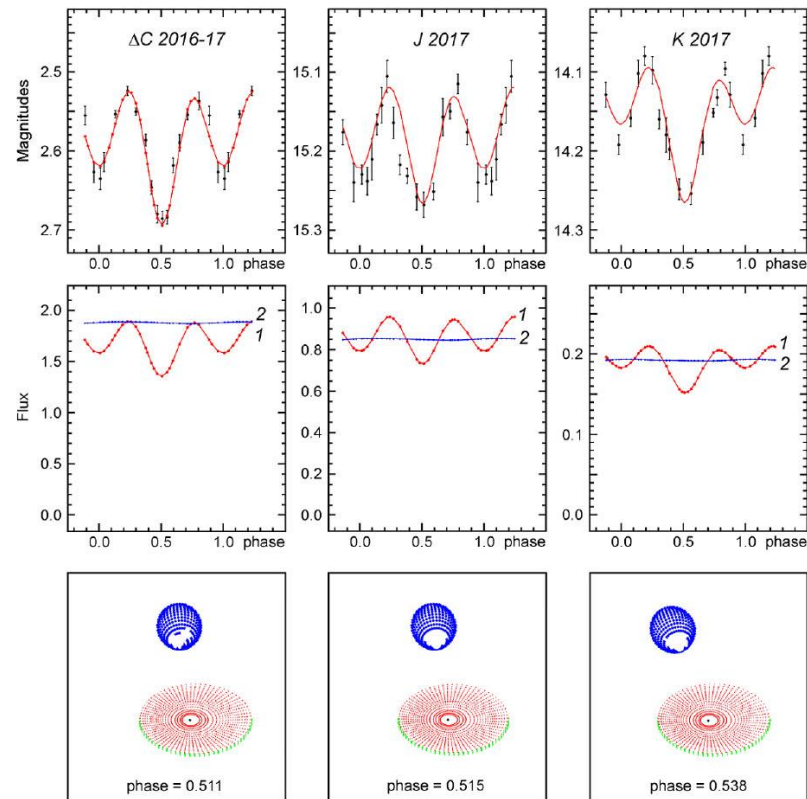
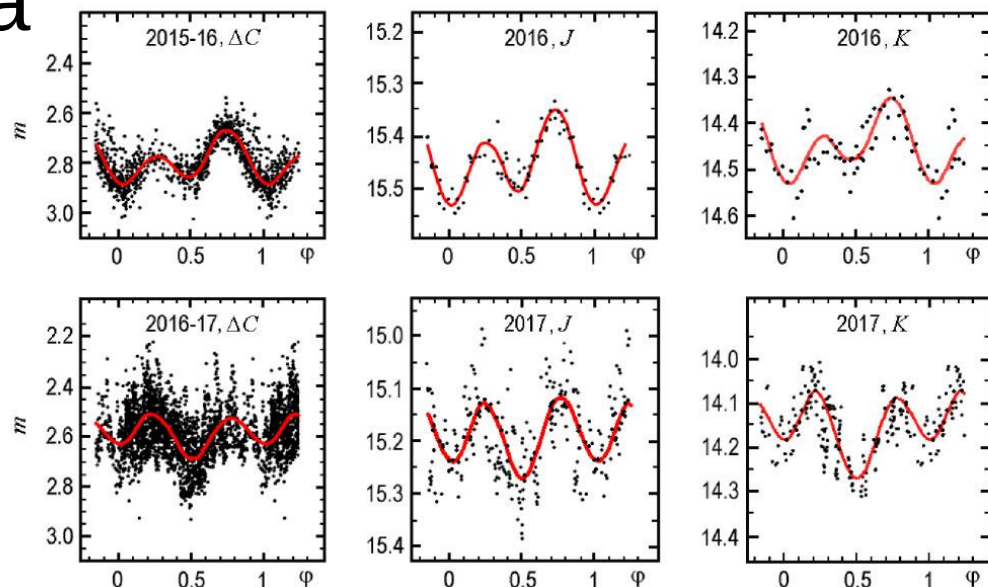


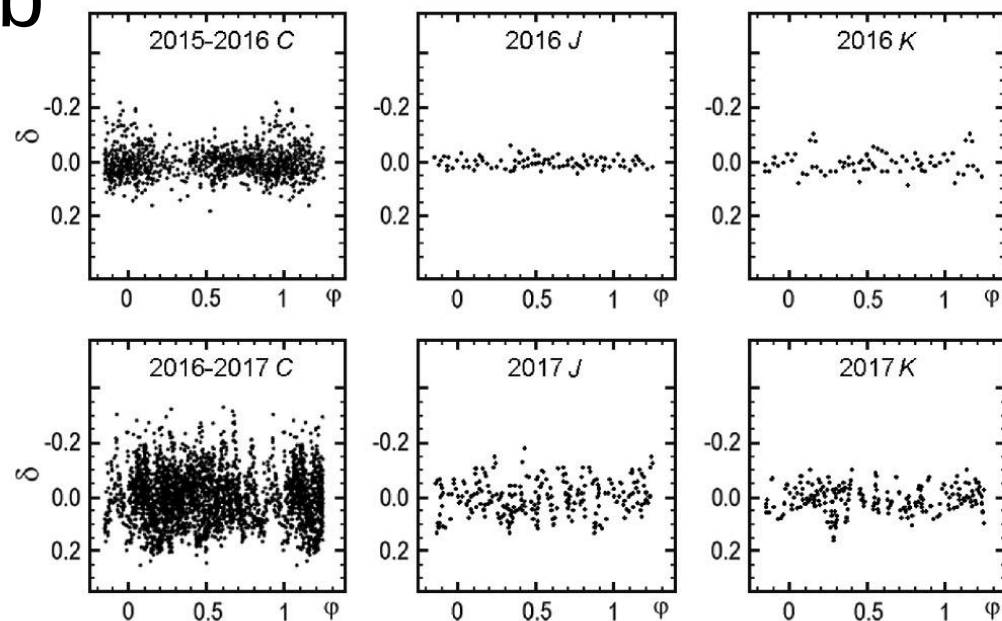
Figure 4. The spotted model of the active-state A0620—00 system. Panels and designations are the same as in Fig. 3.

- Модель оптической звезды с темными пятнами.
Пассивная стадия (слева) и активная стадия (справа).

a



b



■ Фликеринг

a- Наблюдаемые и теоретические кривые блеска A0620-00 в пассивной стадии (вверху) и в активной стадии (внизу).

b- Разности между наблюдаемыми и теоретическими кривыми блеска для пассивной стадии (вверху) и активной стадии (внизу).

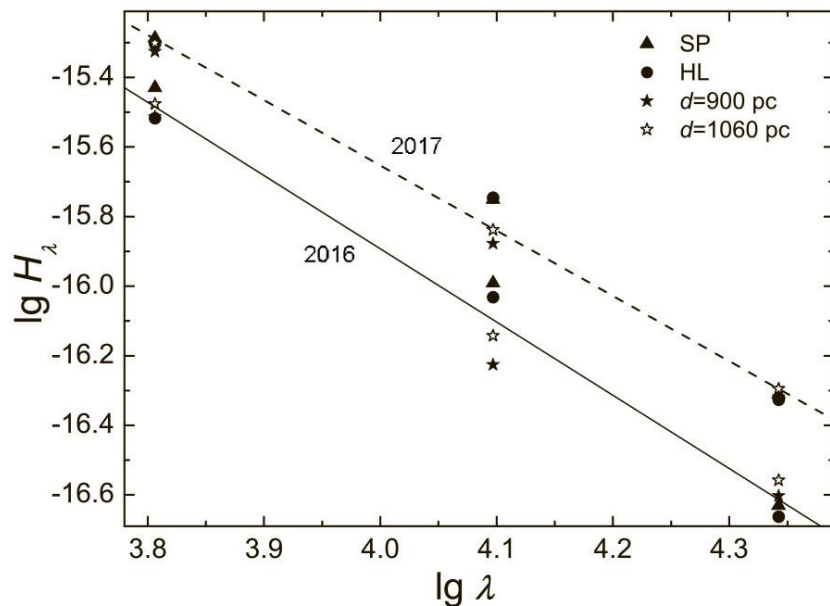


Figure 8. Restored spectra of the non-stellar component in the passive and active states in log-log scale. Triangles represent the spotted model (case a), circles – the HL model (case b), and filled and open stars – models with a $T = 4\,400$ K optical star and $d = 900$ and 1060 pc, respectively. Lines represent least-squares fits with slopes -2.13 for the passive (solid) and -1.85 for the active (dashed) state.

- Спектр незвездной компоненты в системе A0620-00 в диапазоне $6400 \div 22000 \text{ \AA}$ для активной (2017 г.) и пассивной (2016 г.) стадий
 $F_\lambda \sim \lambda^{-(2.13 \pm 0.1)}$ — пассивная стадия
 $F_\lambda \sim \lambda^{-(1.85 \pm 0.1)}$ — активная стадия
- Абсолютная среднеквадратичная амплитуда фликеринга для пассивной и активной стадий $\Delta F_\lambda \sim \lambda^{-2.36}$.
- Средний блеск системы A0620-00 в активной стадии возрастает на $0^m.2 \div 0^m.3$ по сравнению с пассивной стадией (порядка амплитуды регулярной орбитальной переменности блеска).

Параметры системы A0620-00:

$$i = 51^\circ, M_v \cong 0.4 M_\odot, M_{\text{BH}} \cong 7 M_\odot$$

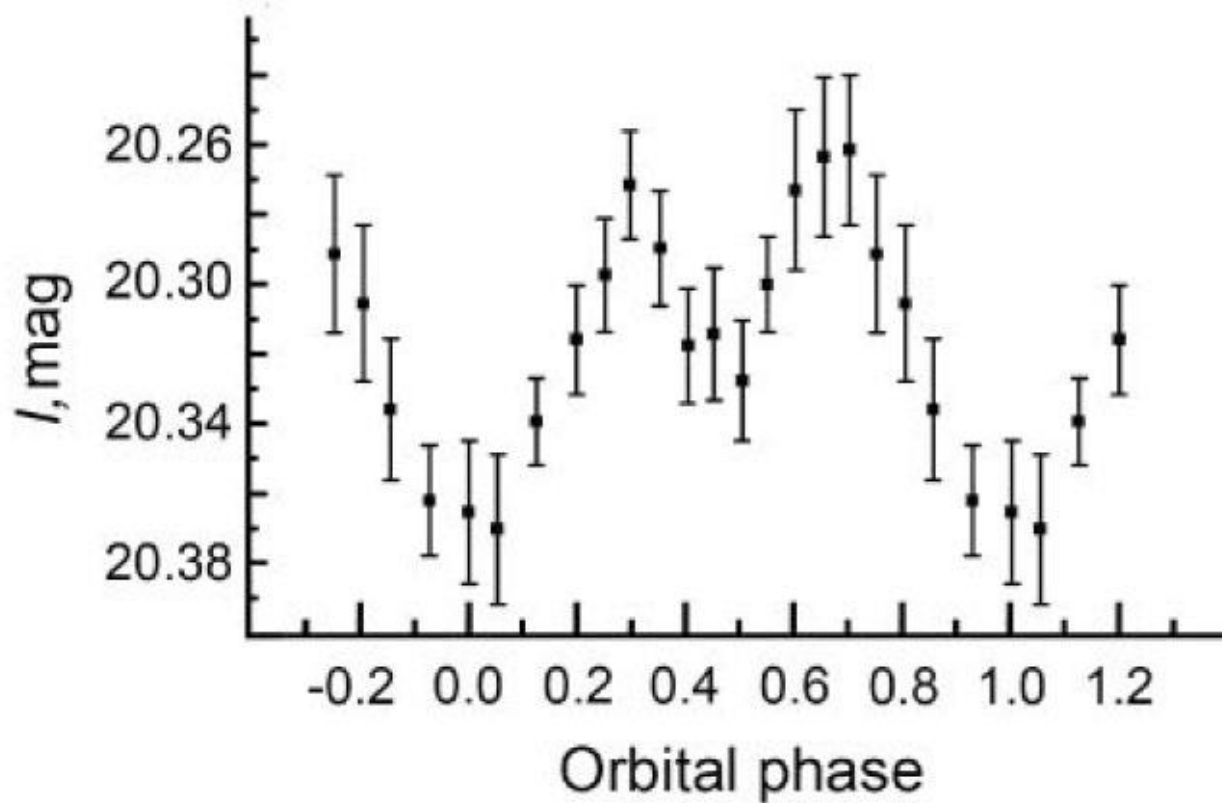
Система: GROJ0422+32 (V518Per)

- M2V + BH, $p \cong 0^d.21$ $f_v(m) = \frac{m_x^3 \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} \cong 1.2 M_{\odot}.$

$$M_v = 0.4 M_{\odot}, M_x \cong 4 M_{\odot}.$$

$$V \cong 22^m.4.$$

- Наблюдения на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ в одном фильтре I ($\lambda = 8830 \text{ \AA}$).



- Средняя орбитальная кривая блеска V518Per в фильтре I. [Cherepashchuk, 2024, MNRAS 531, 4917.](#)

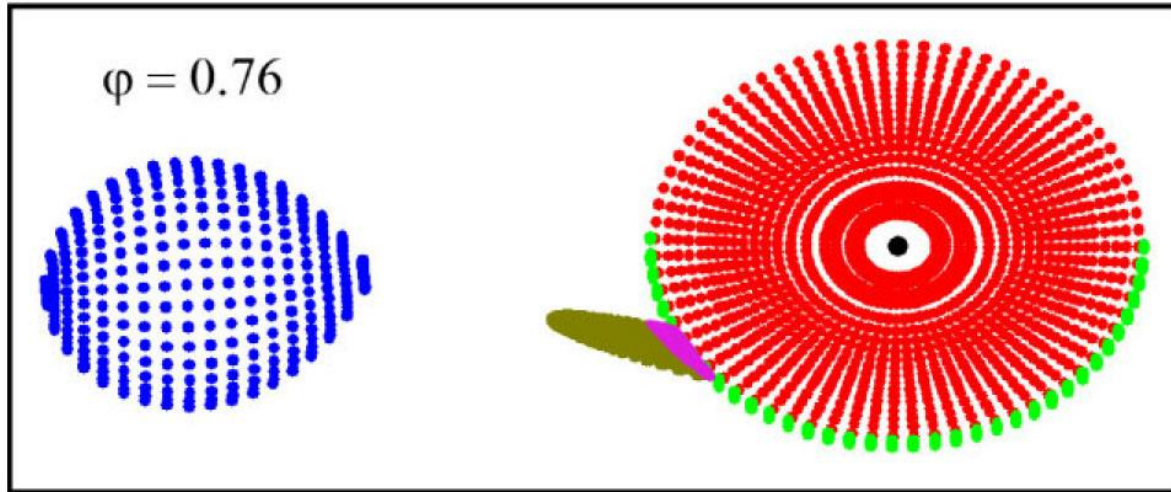
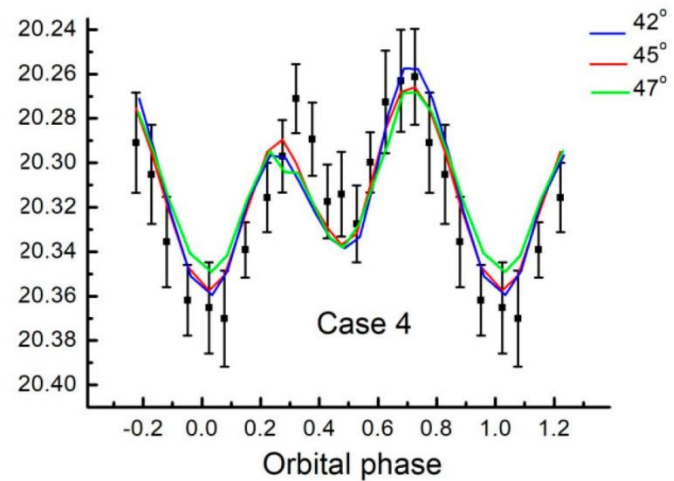
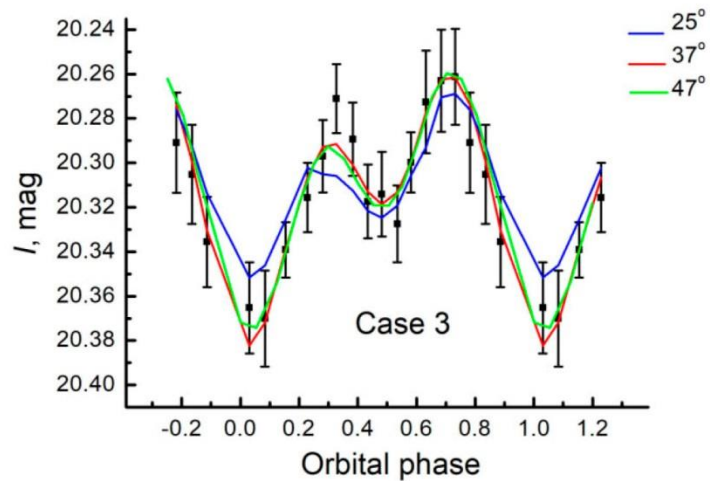
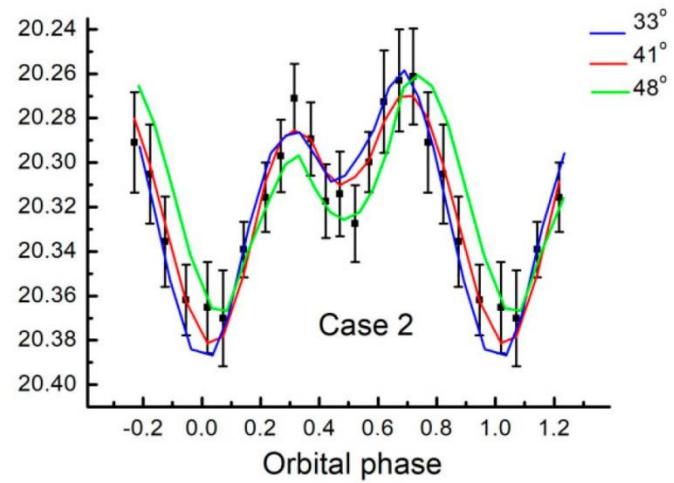
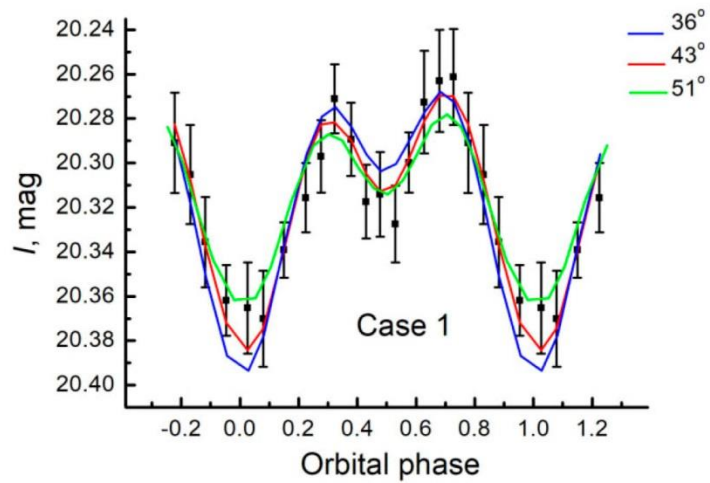


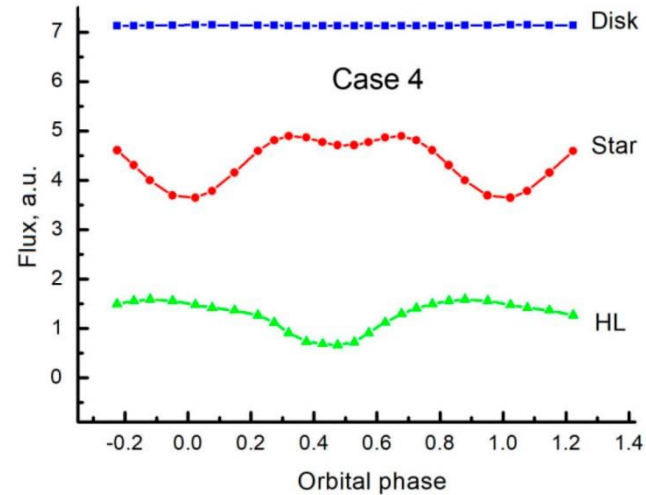
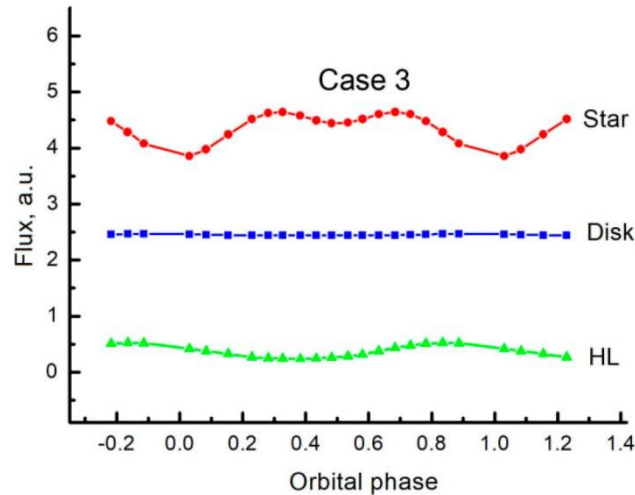
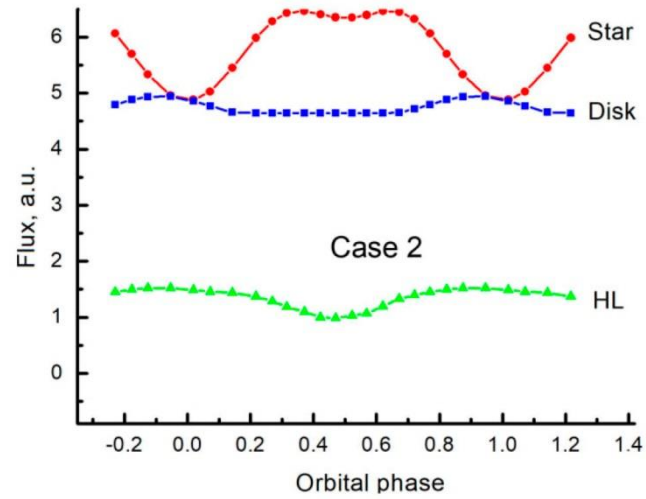
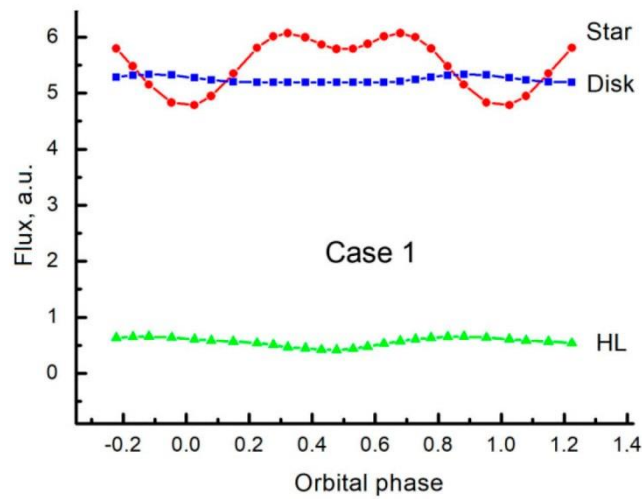
Figure 5. Schematic representation of the GRO J0422 + 32 system for the mass ratio $q = 14$ and orbital inclination $i = 35^\circ$ (the remaining model parameters see in Table 3) as it could be observed at the orbital phase $\varphi = 0.76$. Three model components contributing to the optical emission are seen in the figure: the donor star (blue), the accretion disc (red), and the hot line (swamp green). Bright green marks the projection of the disc side surface on to the picture plane, purple marks the hostspot. The binary is rotating counter-clockwise.

- Математическая модель системы V518Per.



The observed orbital light curve together with the synthetic light curves for different considered temperatures T_1 and mass ratios q (see Table 3 and the caption of Fig. 7). The red lines denote the models with the best-fitting values of the orbital inclination i while the blue and green curves denote models with boundary values of i corresponding to the critical level of the fit statistic.

- Наблюдаемая средняя кривая блеска V518Per с наложенными на нее теоретическими кривыми блеска.



Model light curves decomposed into contributions of individual system components: the accretion disc (blue), the donor star (red), and the hot line/hotspot (green) for the four considered cases. The fluxes are in arbitrary units.

- Модельные кривые блеска, разложенные на компоненты для различных значений параметров системы.

Найденные параметры системы GROJ0422+32 (V518Per):

$$i = 33^\circ \div 49^\circ, M_V = (0.47 \pm 0.21) M_\odot, \\ M_{BH} = (6.5 \pm 2.9) M_\odot.$$

- Этот диапазон масс M_{BH} в пределах ошибки перекрывается с провалом $(2 - 5) M_\odot$ в распределении масс ЧД, но близок к верхней границе этого провала $5M_\odot$. В работе [Gelino and Harrison \(2003\)](#) было получено значение $M_{BH} = (3.97 \pm 0.95) M_\odot$ и был сделан вывод, что ЧД в системе V518Per точно попадает в провал $2 \div 5 M_\odot$. Наши новые данные приводят к более осторожному выводу.

Резюме

- Наши ИК наблюдения рентгеновских новых в спокойном состоянии продемонстрировали эффективность работы 2.5-м телескопа КГО по слабым объектам в ИК диапазоне.
- Получены уточненные оценки масс ЧД.
- Получены спектры адвекционно-доминированного (?) диска вокруг ЧД в диапазоне $6400 \div 22000 \text{ \AA}$. Спектр степенной $F_\lambda \sim \lambda^{-\alpha}$, где $\alpha \cong 2$.

- Показано, что хотя в спокойном состоянии рентгеновских новых рентгеновская светимость диска вокруг ЧД очень мала, в них происходят бурные нестационарные процессы.
- Изучен характер ИК иррегулярной переменности этих систем для их высокого и низкого состояния.

- Наблюдаемый спектр диска в диапазоне $6500 \div 22000 \text{ \AA}$:

$$F(\lambda) \sim \lambda^{-2}$$

- Спектр черного тела (Рэлей Джинс):

$$F(\lambda) \sim \lambda^{-4}$$

- Спектр синхротрона ($\delta \cong 2$ в спектре релятивистских электронов):

$$F(\lambda) \sim \lambda^{-1.5}$$

- Спектр аккреционного диска (Шакура и Сюняев, 1973):

$$F(\lambda) \sim \nu^{1/3} \sim \lambda^{-2.3}$$

- $F(\lambda) \sim \lambda^{-2}$ соответствует излучению диска с гравитационным энерговыделением плюс возможный вклад синхротронного излучения от релятивистских джетов (Russell et al., 2016 – обнаружение линейной поляризации ИК излучения от A0620-00 в спокойном состоянии).

Спасибо за внимание!