

АВТОРСКА СПРАВКА ЗА НАУЧНИТЕ ПРИНОСИ

на
гл. ас. д-р Георги Йорданов Латев

Конкурс за заемане на академична длъжност „доцент” в Институт по
астрономия с Национална астрономическа обсерватория - БАН

на тема:

„Бърза променливост при катаклизмични и симбиотични звезди“

Катаклизмичните и симбиотичните звезди представляват сложни двойни звездни системи, в които материята от едната компонента попада (посредством акреция) върху повърхността на компактния обект – най-често бяло джудже. Те са изключително важни "космически" лаборатории за изследване на акреционните процеси и физиката на взаимодействието при тесните двойни системи. По-конкретно симбиотичните звезди са и потенциални предшественици на избухванията на свръхнови от тип Ia. Изучаването на последните е важно за определяне на разстоянията във Вселената (и нейните мащаби) и прякото въздействие на тяхното върху живите организми на Земята и евентуално обитаеми извънслънчеви планети.

Изследването на бързата променливост при катаклизмични и симбиотични звезди е от ключово значение за разбирането на фундаментални астрофизични процеси, свързани с акумулирането на материя, преноса на маса и ъглов момент и нестабилностите в акреционните дискове – механизми, които действат не само в компактни двойни системи, но и в мащабни структури като активните галактични ядра.

Особено ценен диагностичен инструмент при тези обекти е бързата фотометрична променливост, известна като фликеринг (*flickering*) – стохастични колебания в блясъка на системата с амплитуди от около няколко стотни до над една звездна величина и протичащи във времеви скали от секунди до десетки минути. Изследването на фликеринга предоставя пряка информация за вътрешната структура и динамика на акреционния диск, условията в граничния слой между диска и компактния обект, както и за нестабилностите в акреционния поток.

Друга категория бърза променливост са т.нар квази-периодични осцилации (QPOs) и наблюдаваните бързи повишавания на блясъка с около 1 - 2 звездни величини, протичащи във времеви скали от порядъка на 5-10 min и обобщени с понятието *фелъринг*.

QPOs са проява на краткопериодична променливост детектирана/наблюдавана основно в системи с по-висок темп на пренос на вещество през диска, като се счита, че възникват в неговите по-вътрешните части. Те протичат във времеви скали от секунди до няколко минути и могат да съществуват в рамките на няколко орбитални цикъла на катаклизмичните променливи. Силно нестабилни са и могат да променят своите амплитуди и периоди в рамките на наблюдателната нощ (сесия). По тази причина техните пикове в периодограмата са доста широки. Тяхното присъствие и променливост в периодите може да се интерпретира като придвижване на отделни кондензати/уплътнения на материя на различни орбити в акреционните дискове и последващата им дисипация (съпроводена с отделяне на енергия) в т.нар. граничен слой - преходна зона между вътрешния ръб на акреционния диск и повърхността на бялото джудже, от където се генерира повече от 50% от излъчването при катаклизмичните звездни системи.

Резултатите от изследванията на бързите вариации в кривите на блясъка на скатаклизмичните и симбиотичните звезди, както и на "братовчедите" на катаклизмичните променливи - рентгеновите двойни с малка маса, където (където акретор е не бяло джудже, а неутронна звезда) допринасят за по-доброто разбиране на енергетичните процеси в двойните системи и за построяване на емпирични връзки между параметрите на фликеринга и основните параметри на системата – маса на акретиращия обект, темп на акреция, геометрия и структура на диска.

1. В изследването (обозначено в таблицата за минималните изисквания като B5) - "*Flickering of accreting white dwarfs: the remarkable amplitude - flux relation and disc viscosity.*", Zamanov, R. K., Boeva, S., **Latev, G.**, Sokoloski, J. L., Stoyanov, K. A., Genkov, V., Tsvetkova, S. V., Tomov, T., Antov, A., Bode, M. F., **2016**, MNRAS, 457, 10 е проучена емпиричната връзка между различните амплитуди (пълна, ефективна (σ_{rms}) и нормирана ефективна) на *фликеринг* на изследваните обекти и техния среден поток на излъчване в различни фотометрични фази. Изследвана е и пряката възможност за определяне на параметъра на вискозитет (в допускането за α -диск по параметризацията на Shakura & Sunyaev 1973) на акреционния диск. При анализа на общо над 200 криви на блясъка за 5 акретиращи бели джуджета в катаклизмичните системи KR Aur, V425 Cas, V794 Aql, MV Lyr и TT Ari и за още 4 симбиотични системи - T CrB, RS Oph, MWC 560 и CN Cyg е получена впечатляваща линейна зависимост между пълната ΔF (*peak-to-peak*) амплитуда на вариация и средния поток F_{av} , както и между ефективната σ_{rms} амплитуда и средния поток на излъчване - F_{av} . Точните уравнения на връзките са както следва: $\Delta F = 0.36 (\pm 0.05) F_{av}$ и $\sigma_{rms} = 0.086 (\pm 0.011) F_{av}$ като и в двата случая коефициентите на корелация са над 0.96, а нивото на значимост на корелацията е $p \sim 10^{-28}$. Подобни линейни връзка са детектирани и по-рано при отделни катаклизмични системи - за MV Lyr по анализ на данните от космическия телескоп Kepler (Scaringi et al. 2012) както и за системите - V1504 Cyg и KIC8751494 (Van de Sande, Scaringi & Knigge 2015). За първи път обаче в нашето

изследване тези зависимости са обобщени за общо 9 системи показващи фликеринг-променливост и то за значително голям диапазон от нива на средния поток - F_{av} , обхващащи повече от 5 порядъка ($\sim$ от 10^{-16} до 10^{-11} erg/cm²/s/A). Линейната зависимост между ефективната амплитуда на вариация (σ_{rms}) и средния поток F_{av} известна в литературата като "*rms-flux relation*" изглежда е валидна за широк клас космически обекти и времеви скали на променливост. Тя е открита за първи път при анализа на данни за излъчването на галатичния източник Cygnus X-1 (двойна система, в която вероятния акретор на вещество е масивна черна дупка) и за акретиращия милисекунден пулсар SAX J1808.4-3658 (Uttley & McHardy 2001). По-късно е регистрирана и в галактиките тип Seyfert 1 - Markarian 766 (Vaughan et al. 2003) и IRAS 13224-3809 (Gaskell 2004). През 2005 г. такава връзка е детектирана и при изследването на нелинейната рентгенова променливост при отделни рентгенови двойни звезди и активни галактики (Uttley, McHardy & Vaughan 2005). Пет години по-късно, такава зависимост е разкрита и в излъчването на ултраяркия рентгенов източник NGC 5408 X-1 (Heil & Vaughan 2010). В представеното изследване тази връзка е обобщена и за класа на катаклизмичните и симбиотичните променливи звезди, които показват стохастична нелинейна променливост обобщена с понятието *фликеринг*. Трябва да се отбележи, че доколкото катаклизмичните двойни представляват системи, в които донора на вещество е в повечето от случаите червено джудже, а при симбиотичните е главно червен гигант, наличието на непрекъсната линейна зависимост преминаваща от класа на катаклизмичните към симбиотичните с плавен преход (без скокове и "енергетични дупки (gaps)") показва, че тази зависимост е понстоящем валидна за диапазон от темпове на акреция на вещество от 2×10^{-11} M_{sol}/yr (характерна за катаклизмичните променливи) до 2×10^{-7} M_{sol}/yr (типична за симбиотичните звезди). Съществуването на тази зависимост дава възможност за предвиждане на динамиката в акреционния диск при различни нива на средния поток на излъчване. King et al. (2004) показват, че нормираната амплитуда $\langle \sigma_{rms}/F_{av} \rangle$ (което по дефиниция е обобщен коефициент на вариация) може да се използва за определяне на параметъра на вискозитет α на акреционния диск. Прякото прилагане на тази зависимост за класа на катаклизмичните и симбиотичните звезди (разгледани в рамките на това изследване), обаче дава занижени и неправдоподобни стойности на този параметър.

Възможността за непрекъснат обзор, която предлагат съвременните космически и наземни телескопи и мисии като WASP, TESS, ASAS-SN, CRTS, Vera Rubin telescope и др. ще даде шанс за по-задълбочен и детайлен анализ на бързата променливост и за осталаи индивидуални катаклизмични и симбиотични системи. Планираме заедно с останалите колеги в екипа в близко бъдеще да изследваме връзките амплитуда-поток и при катаклизмичните системи - BG Tri, LX Ser, V603 Aql, BZ Cam, широката катаклизмична система GK Per (с орбитален период над 2 денонощия), рентгеновата двойна HZ Her и да продължим мониторинга на симбиотичните - RS Oph, T CrB, MWC 560, CH Cyg, EF Aql. Използвайки и наличните архивни и нови данни, получени с наблюдателната апаратура на НАО Рожен и АО Белоградчик може да изследваме допълнително и евентуалната "цветна"

зависимост на връзките *амплитуда-поток* в различни фотометрични състояния (ниски, високи, междинни) на горепосочените променливи. Индикации за евентуални отклонения от линейната зависимост *амплитуда-поток* съществуват при системата KR Aur, но те трябва да бъдат надеждно потвърдени посредством бъдещ анализ и/или ре-анализ на данните.

2. В проучването (обозначено в таблицата за минималните изисквания като B3) - "*The recurrent nova RS Oph: simultaneous B- and V- band observations of the flickering variability.*", Zamanov, R. K., Boeva, S., **Latev, G. Y.**, Martí, J., Boneva, D., Spassov, B., Nikolov, Y., Bode, M. F., Tsvetkova, S. V., Stoyanov, K. A., MNRAS, **2018**, 480, 1363 е изследвана в детайли стохастичната фликеринг променливост в B и V фотометрични филтри на симбиотината повторно-нова RS Oph регистрирана основно с телескопите на НАО Рожен и АО Белоградчик в почти 10 годишен период от време (от юли 2008 до септември 2017 година). Наблюденията са получени в *синхронен* (едновременно получаване на данните в B и V филтър посредством 2 или повече телескопи) или *квазисинхронен* режим на работа (с редуване - на B и V филтрите на един и същ телескоп). Последните две наблюдателни сесии (през юли и септември 2017 г.) са проведени с 41 cm телескоп на Университета в гр. Хаен, Испания. Определената звездна величина във филтър B на системата, повреме на целия наблюдателен период, се изменя от 11.1 до 13.2 mag, а цветовият индекс (B-V) варира от 0.86 до 1.33. Определянето на физическите параметри на източника на фликеринг е направено посредством метода описан в Глава 2 на "*Определяне на физически параметри на източниците на бърза променливост при избрани катаклизмични и симбиотични звезди*" (Латев, Г. 2016, *Дисертационен труд за присъждане на ОНС "доктор"*) в допускането, че потокът на източника на фликеринг се дефинира за всеки спектрален диапазон (или за конкретните ефективни стойности на дължините на вълната на съответните, в случая, B и V фотометрични филтри) посредством релациите: $F_{fl} = F_{av} - F_{min}$ (Bruch 1992) или $F_{fl} = F_{max} - F_{min} = \Delta F$ (Nelson 2011). И в двата случая е отчетен и премахнат приноса на червения гигант в системата. При относително симетрични криви на блясъка горните две релации водят до практически едни и същи стойности на физическите параметри на източника на фликеринг. Конкретно в рамките на това изследване е получено, че цвета на източника на фликеринг (с отчитане на влиянието на червения гигант и на междוזвездното поглъщане) е $(B-V)_0 = 0.18 \pm 0.12$, ефективната му температура е в граници от $7\,200 < T_{fl} < 18\,900$ K със средна стойност от $T_{fl,av} = 9\,800 \pm 2\,400$ K, а съответния радиус на излъчващата област е в диапазона $1.1 < R_{fl} < 6.7 R_{Sun}$ със средна стойност от $R_{fl,av} = 3.6 \pm 1.4 R_{Sun}$. Посредством средните стойности на параметрите на източника на фликеринг е определена и средната му светимост $L_{fl,av} = 89 \pm 35 L_{Sun}$. Повреме на всички наблюдателни сесии RS Oph показва фликеринг променливост в B филтър с амплитуди от 0.16 до 0.59 mag. Тези вариации протичат във времеви скали от 10 до 80 минути (Georgiev, 2018). Интересно е да се отбележи, че в рамките на проведения анализ е установено, че когато яркостта на горещия компонент в системата нараства, температурата на източника на фликеринг остава приблизително една и съща, а радиуса на източника на

фликеринг нараства. Ако източник на фликеронг при RS Oph е яркото петно в системата (мястото където акреционната струя от звездата донор се сблъсква с външния ръб на акреционния диск), то тогава получените резултати в това изследване показват, че когато яркостта нараства, размерът на горещото петно също нараства. От друга страна, ако източникът на фликеринг е някъде вътре в акреционния диск, той вероятно е локализиран на разстояние $\sim 1 R_{\text{Sun}}$ от повърхността на бялото джудже. Във всички случаи присъствието на фликеринг е пряк индикатор за това, че във времевата рамка на изследването бялото джудже в RS Oph активно натрупва вещество за предстоящото и в действителност случило се през 2021 г. избухване.

Интересна възможност за бъдещо изследване на параметрите на източника на фликеринг при RS Oph е зависимостта между размера (R_{fl}) и температурата (T_{fl}) на самия източник на фликеринг. От определените 28 двойки стойности на двата параметъра (в рамките на цитираното изследване) може да се види, че графичната зависимост между тях наподобява адиабатен процес изразен в (T, V) координати с общо уравнение $TV^{\gamma-1} = \text{const}$, което лесно се трансформира до $TR^{3(\gamma-1)} = \text{const}$ в координати ($T=T_{\text{fl}}, R=R_{\text{fl}}$). Полученият при предварителния анализ показател на адиабатата е $\gamma = 1.1 \pm 0.3$. Съществуването на такава възможност е добре да бъде обоснована теоретично, а дискусията за това предстои. Проучването на подобна възможна връзка между основните параметри на източника на фликеринг е в начален етап и за данните получени за симбиотичната повторно нова T CrB.

3. В изследването (обозначено в таблицата за минималните изисквания като B2) "*Superhumps in the cataclysmic variable BG Triangulum.*" - Stefanov, S. Y., **Latev, G.**, Boeva, S., Moiseev, M, MNRAS, **2022**, 516, 2, 2775 е направен анализ на фотометричната променливост на катаклизмичната променлива - BG Triangulum. За първи път в историята на изследванията на тази звезда са детектирани прояви на т.нар. *суперхъмпове* в кривата на блясъка. Този тип променливост - едва с няколко процента по-дълга или по-кратка от орбиталната променливост на звездата, дава изключителна възможност за определяне на основните физически параметри на двойната система и от части на структурата и геометрията на акреционния диск. Тя е изключително полезна за проучване на цялата динамика на акреционния диск и/или отделни структури в него. В рамките на изследването за първи са детектирани т.нар. отрицателни суперхъмпове в кривата на блясъка на BG Tri, които се наблюдаваха в периода 2019 - 2020 г. Анализирани са данни от телескопите на НАО Рожен, данни от 25 cm Newton телескоп към Школата "Бели брези", Ардино, Кърджали както и данни от космическата мисия - TESS и обзора ASAS-SN. При проведения *Lomb-Scargle* периодограмен анализ на данните се разкри вариация в кривата на блясъка с амплитуди (във фотометричната система UBVRI): $\Delta U=0.30$, $\Delta B = 0.28$, $\Delta V = 0.24$, $\Delta R = 0.22$ и $\Delta I = 0.20$ mag и период $P_{\text{sh}} = 0.1515(2)d$, който се оказва с около 4% по-кратък от получения по-спектрални данни орбитален период $P_{\text{orb}} = 0.1585$ d (Hernandes, Tovmassian & Zharikov 2021). Заедно с тази периодичност бе детектирана и по-дълга такава с период $P_{\text{pr}} = 3.9$ d. Анализът показва, че кратката периодичност се дължи на поява

на т.нар. *негативни (отрицателни) суперхъмпове*, резултат от комбинация между орбиталната променливост и евентуална ретроградна прецесия на възлената линия (нодална прецесия) на изведен от орбиталната равнина акреционен диск. Дългият (*надорбитален/свърхорбитален*) период е именно периодът на тази ретроградна нодална прецесия. Посредством т.нар. *суперхъмп дефицит* дефиниран като $\varepsilon_- = (P_{\text{sh}} - P_{\text{orb}})/P_{\text{orb}}$ и получената теоретична зависимост между неговия модул и отношението на масите q (Wood et al. 2009) е възможно да се определи последното за системата BG Tri. Получената стойност за $|\varepsilon_-|$ е: $|\varepsilon_-| = 0.044(1)$, което води до отношение на масите в двойната система $q = 0.37(2)$. При анализа на данните от космическата мисия WASP, получени през 2006 г. се разкри и присъствието на периодичност с около 9% по-дълга от орбиталния период. Тя беше интерпретирана като евентуално присъствие на *положителен суперхъмп* с период $P_{\text{+sh}} = 0.1727(14)$ d. Съгласно теоретичните модели този тип вариация се дължи на комбинация на орбиталната променливост с периода на т.нар. *апсидална прецесия* - прецесия на апсидната линия на един деформиран елиптичен акреционен диск или деформирани елиптично външни пръстени от него. По аналогия с *суперхъмп дефицита*, тук може да се въведе и се използва т.нар *суперхъмп ексцес*, дефиниран като $\varepsilon_+ = (P_{\text{+sh}} - P_{\text{orb}})/P_{\text{orb}}$. Неговата стойност също зависи от отношението на масите на системата - q и представлява пряка възможност за допълнително независимо определяне на тази стойност. За BG Tri получената стойност за ε_+ е $\varepsilon_+ = 0.090(9)$, което посредством експериментално изведената и табулирана от Kato (2022) зависимост дава $q = 0.40(5)$. Получените независимо една от друга стойности на отношението на масите q са в много добро съответствие с определената по спектрални наблюдения стойност от $q = 0.38$ (Hernandes, Tovmassian & Zharikov 2021). Допълнително беше оценен още и евентуалният наклон на акреционния диск спрямо орбиталната равнина, който в случая за BG Tri се оказа $\delta \approx 3^\circ$. Тази стойност е много близка до получените такива за други изследвани системи, показващи *негативна суперхъмп променливост* (Smak 2009). Използвайки осреднената стойност на отношението на масите, $q = 0.39(3)$ и специални емпирични зависимости валидни за този клас системи (и дискутирани в изследването) е възможно да се определят още и индивидуалните маси на компонентите на двойната система, разстоянието между тях както и т.нар. *радиус на приливно срязване* на акреционния диск. Получените стойности са както следва: $M_1 = 0.97(1)M_{\text{sun}}$, $M_2 = 0.35M_{\text{sun}}$, $a = 1.33R_{\text{sun}}$ и $r_d = 0.58(2)R_{\text{sun}}$. Дори и при инспекция "на око" в кривите на блясъка на BG Tri се забелязва присъствие на т.нар. *квази-периодични осцилации* (QPOs) и фликеринг. Периодограмният анализ на данните за BG Tri разкри присъствието на QPOs с периоди в диапазона 5–25 min. Направено беше преположението, че тези квазипериодичности протичат в т.нар *динамична времева скала*, която съответства на Кеплерово въртене на вещество около бялото джудже в системата. В действителност, вземайки предвид определените по-горе параметри на системата, характерното динамично време за BG Tri се оказа $t_{\text{dyn}} = 14(1)$ min. Това означава, че детектираните квазипериодичности с период 12–14 минути вероятно са свързани с външния ръб на диска или изтичане на вещество от задната страна на диска както предполагат в своето изследване Hernandez et al. (2021). В кривите на блясъка на BG Tri е добре видим и

фликеринга. Неговият анализ е проведен в термините на въведената от Bruch (2021) амплитуда на вариация A_{60} в два отделни наблюдателни сезона - през 2020 г., когато негативният суперхъмп е ясно изразен и през 2021 г., когато последният не се наблюдава. Определени са амплитудите във всички филтри от използваната фотометрична система UBVRI. Както следва да се очаква, амплитудите намаляват от синята към червената област на спектра, но като цяло са на половина по-малки, когато негативният суперхъмп не се наблюдава. Последното вероятно показва, че суперхъмп активността има значителен принос във фликеринг променливостта. Както обобщава и Bruch (2021) и при BG Tri може да се каже, че амплитудите на фликеринг (когато присъства негативния суперхъмп) са подобни на тези наблюдавани в новоподобните катаклизмични променливи от тип VY Scl и съвместими с тези при звездите от тип UX UMa (когато негативния суперхъмп отсъства).

Детектираните положителни суперхъмпове в данните от WASP през 2006 г. изчезват малко след това и все още не е наблюдавана евентуалната им повторна поява. Негативните суперхъмпове от наблюдателните сезони 2019 - 2020 в данните от HAO Рожен, 25 cm Newton телескоп, TESS и ASAS-SN спират да се проявяват малко след средата на 2021 г. и до средата на 2025 г. все още няма индикации за проявата им в кривите на блясъка на системата. Важни задачи в бъдеще ще бъде непрекъснатият наземен и космически (посредством настоящи и бъдещи космически мисии) мониторинг за появата и на двата типа хъмпове. Това е от голямо значение за разбиране на физиката и динамиката на акреционните дискове при системите от този тип, които до 2021 г. бяха само около 3. Присъствието и на двата типа променливост е детектирана при TT Ari (Kraicheva et al. 1999; Belova et al. 2013), AQ Men (Ilkiewicz et al. 2021) и LS Cam (Stefanov 2021; Rawat et al. 2022). С представеното изследване BG Tri стана четвъртата известна до 2021 г. променлива от този тип. Нейн абсолютен "братовчед" е звездата TT Ari, чиято променливост е много подробно изучавана от български астрономи до 2006 г. TT Ari също показва редуване на двата типа променливост и нейният мониторинг заедно с този на BG Tri трябва да продължи и в бъдеще, понеже тези звездни системи имат сходни характеристики и прояви на променливост. Друга интересна задача би било да се търсят знаци в кривите на блясъка за наличието на периода на апсидална прецесия - P_{ap} . До момента той не е пряко открит. Очакваната му стойност е $P_{ap} = 1.93$ d. Амплитудата на променливост на положителния суперхъмп е доста ниска и неговото разкриване в кривата на блясъка (посредством периодограмни анализи) е трудно. В някои системи, обаче е наблюдавано едновременно присъствие и на двата типа променливост - негативни и позитивни (положителни) суперхъмпове. В тези случаи са възможни комбинативни периоди на биене между периодите на положителния и на негативния хъмп. Очакваните честоти са $(2\omega_- - \omega_+)$ и $(2\omega_- + \omega_+)$. Детектирането на периоди съответстващи на тези честоти би било косвено доказателство за съществуването на положителните суперхъмпове заедно с евентуално детектираните негативни такива. Търсенето на периоди при тези честоти в кривите на блясъка на BG Tri не е проведено и това би било интересна задача при бъдещите изследвания.