



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ



Институт по астрономия с национална астрономическа обсерватория

Владислав Драгомиров Марчев

Изследване на симбиотични звезди

Автореферат

за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР“

Област на висше образование 4. Природни науки, математика и
информатика

Професионално направление 4.1 Физически науки

Астрофизика и звездна астрономия

Научен ръководител: проф. дфн Радослав Костадинов Заманов

**София
2025**

Съдържание:

Увод.....	3
1. Изчисляване на междузвездното поглъщане към симбиотични звезди	11
2. Проследяване темпа на акреция по многоцветни фотометрични наблюдения MWC560	17
3. Проследяване еволюцията на темпа на акреция между две избухвания на повторната нова RS Oph.....	22
4. Темп на акреция и суперактивно състояние на симбиотичната повторната нова T CrB 28	
5. Оценка на радиуса на акреционния диск по спектралния наблюдения на T CrB	36
6. Основни резултати	44
7. Публикации по темата на дисертацията.....	46
Благодарности	47
Литература.....	47

Увод

Дисертацията е посветена на изследване на симбиотични звезди. Тези обекти съдържат в себе си голям набор от астрофизични явления и процеси, което ги прави актуални в последните 80 години. Изучаването на тези обекти, техните механизми на взаимодействие и еволюция помага за по-доброто разбиране на самите физични феномени, които те притежават, и класифицирането измежду различните видове двойни системи. Процесът по обмен на маса между донор и акретор е основополагащ, и играе важна роля за еволюцията на тези звезди. От самите акреционни процеси зависи дали ще се достигнат необходимите условия за избухване от тип нова и повторна нова, както и тяхната кратковременна и дълговременна фотометрична и спектрална променливост. Основните инструменти, използвани в този труд за изследването на симбиотичните звезди, са именно тяхна фотометрична и спектрална променливост, еволюираща във времето. За целта са използвани наблюдения, направени с наличната апаратура на Националната астрономическа обсерватория „Рожен“ и обсерваторията на Шуменски университет „Епископ Константин Преславски“ (авторски наблюдения), наблюдения на колеги, работещи по променливи звезди от научния колектив, както и на съавтори в публикациите ни по темата. Използвани са и публично достъпни данни от източници като AAVSO и цитирания на предишни публикации за отделните обекти. Основните звезди, изследвани в този труд, са MWC 560, RS Oph, T CrB и други симбиотични като 4U 1954+319 и ZZ CMi. Дисертацията съдържа увод, обща част, специална част, основни резултати, публикации по темата, заключение, литература, и 3(три) приложения.

Симбиотичните звезди са взаимодействащи двойни системи, състоящи се от еволюирал гигант, трансфериращ маса към горещ и ярък компактен обект - бяло джудже, неутронна звезда, субджудже или звезда на Главната последователност. Съществуват различни класификации, но като става дума за донора на маса, те могат да са S, D, D' и S + IR тип. Различията са: за S тип – хладния компонент е червен гигант, при D тип - той е пулсираща променлива тип Мира, заобиколена от оптически плътна прахова обвивка, заради която се наблюдава инфрачервен експес, при D' донора на маса е по-ранен спектрален клас- жълт гигант, а S + IR също е с червен гигант, но показва инфрачервен експес (Akraś et al. 2019). При конфигурации с Мира, двойната система има по-големи орбитални периоди и двата компонента са доста отдалечени, като за система от взаимодействащи двойни звезди. Това е така, заради големия радиус на донора (Мира). Като цяло симбиотичните звезди имат орбитални периоди в порядъка от стотици дни до години. Взаимодействащите звезди са заобиколени от ярка и богата околосвездна среда. Това се дължи на присъствието на еволюирал гигант, губещ огромно количество маса и наличието на горещ компонент, богат на йонизирани фотони, често излъчвани от собствения му вятър (Mikołajewska 2012). Имайки предвид високата активност на средата, може да се очаква разнообразие от региони с висока йонизация, както и неутрални такива; региони на формиране на прах; акреционни и декреционни дискове; взаимодействащи ветрове и джетове. Такива комплексни структури с богато разнообразие правят симбиотичните звезди интересни за изследване. На практика те са едни отлични лаборатории, където могат да бъдат разучени различните аспекти на взаимодействие и еволюция на двойните звездни системи. Те включват в себе си много важни следи от късните етапи на еволюция на двойни системи с ниска до средна маса.

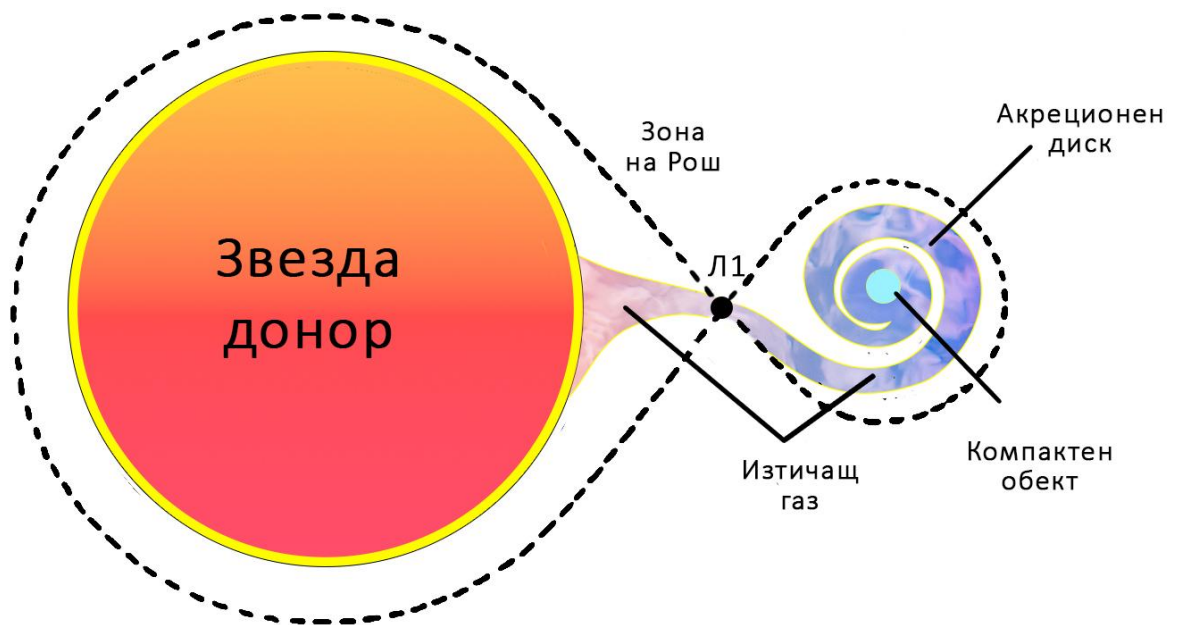
Сред учените, изследващи симбиотичните звезди, няма консенсус за точните параметри и признаци, които биха дефинирали една система като симбиотична или не. Въпреки това е прието, че двойна система, където компактният обект – предимно бяло джудже - акретира вещество с темп по-голям от $10^{-9} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ от звезда донор със сравнително ниска маса, се нарича симбиотична звезда. Типичният спектър на симбиотична звезда съдържа следните характеристики: ивици на поглъщане на титаниев окис (TiO) и неутрални метали, червен континуум - типичен за наличието на червен гигант, син континуум с емисии на Балмеровите линии H_{α} , H_{β} , H_{γ} и скок в емисията, дължащ се на горещия компонент, както и силни емисионни линии на високо йонизирани компоненти, като He I, He II, [O III] и други, които са типични обикновено за планетарни мъглявини. Типичен спектър на две симбиотични звезди е показан на Фиг. 1.



Фиг. 1. Типичен спектър на симбиотични звезди (CI Cyg и AG Dra) в оптичния и ултравиолетов диапазон, с ясно изразени ивици на поглъщане на титаниеви окиси и емисии на H_{α} , H_{β} , H_{γ} , He I, He II, O III и Fe VII (Mikołajewska 2003).

Едновременното наличие в един обект на характеристики на нискотемпературни абсорбция и емисия, която обуславя високо енергетични и възбудени състояния, говори, че тези обекти са част от двойна система. В случая, когато компактният обект е неутронна звезда, се нарича симбиотична рентгенова двойна (Yungelson et al., 2019). В 74% от случаите, донорът на маса е нормално еволюирал гигант от спектрален клас M, но в някои случаи може да бъде и жълт гигант от клас G или K. При симбиотичните звезди се наблюдава емисия в близката инфрачервена област на спектъра, отговарящ на студена звездна фотосфера ($3500\sim 4000K$), като те са класифицирани като S-тип и орбитални периоди между 500 и 1000 дни (Mikołajewska, 2003, 2007; Mikołajewska, 2010; Mikołajewska, 2012). При останалите 13% или D-тип, където донорът е променлива звезда тип Мира, се наблюдава топла оптически плътна прахова обвивка, която в комбинация с почервенената Мира-променлива, създава условия за близка инфрачервена емисия и 3.5% D'-тип (Akras et al. 2019). Те са с орбитални периоди между 300-600 дни (Gromadzki & Mikołajewska, 2009).

При симбиотичните системи темпът на акреция е достатъчен за да поддържа стабилно ядрено горене на повърхността на бялото джудже, което води и до излъчване на меки рентгенови лъчи. При повечето симбиотични звезди физичният механизъм на трансфер на маса се дължи главно на гравитационно-фокусиран вятър от червения гигант към компактният обект и в по-малко случаи на прехвърляне на вещество през Лагранжиановата точка L1, при запълнена зона на Рош. На Фиг. 2 е представена схематично една симбиотична двойна звезда с червен гигант и бяло джудже, при която се осъществява пренос на маса от донора към компактният обект през L1. Тази природа на обектите ги прави важни за разбирането на механизмите за трансфер на маса при широки двойни звезди с дълги орбитални периоди (от 100 дни до 100 години). Симбиотичните звезди с висок темп на акреция са смятани за подходящи кандидати за прародители на Свръхнови от тип Ia (Di Stefano, 2010b; Iłkiewicz et al., 2019).



Фиг. 2. Схематична илюстрация на двойна звездна система със звезда донор на маса, акреционен диск и компактен обект. Тук трансферът на маса се случва през Л1 при почти запълнена зона на Рош.

Акрецията е процес на пренос на вещество, при който звезда донор губи маса за сметка на компактна звезда, която увеличава масата си. Този процес е универсален, както за млади звездни обекти, така и за бели джуджета, неутронни звезди, черни дупки и свръхмасивни черни дупки (Scaringi et al. 2015). Почти винаги върхлитащото вещество носи със себе си допълнителен въртящ момент и това води до формирането на диск, който постепенно носи маса към вътрешността, и в крайна сметка достига повърхността на компактния обект. В повечето случаи този поток на вещество не е ламинарен и постоянен, а е доста променлив, заради изключително активната среда, в която се случва. Налични са кратковременни изменения и флуктуации, нестабилности, които водят до промяна в количеството акретирало вещество. Това от своя страна води и до бързи изменения в лъчевите криви в оптичния и ултравиолетовия диапазон. Тези бързи флуктуации се наричат фликеринг- апериодични изменения в блясъка от порядъка на няколко секунди до минути и дори часове, с амплитуда, варираща от няколко хилядни до десетки величини. Вариациите са обикновено по-ярки и по-сини, горещите акреционни региони доминират в късите дължини на вълната. В честотно пространство фликерингът показва червен шум в енергийния спектър (приблизително $P(f) \propto f^{-\alpha}$, $\alpha \sim 1 - 2$) и често връзка rms–flux, при която амплитудата на вариациите расте с потока — признак за мултипликативни (разпространяващи се) флуктуации в акреционния поток. Физическият произход на фликеринга може да се дължи на турбуленции в акреционния диск, разпространяващи се флуктуации, които са възбудени от локални промени във визкозитета и плътността на различни радиуси в диска. Те се разпространяват винаги към

вътрешността и компактният обект. Самият граничен слой между диска и повърхността на бялото джудже е място, където се отделя голямо количество енергия. Когато тези изменения в темпа на акреция достигнат граничния слой, това води до бързи и ярки вариации, най- силно забележими в ултравиолетовия диапазон. Друг важен елемент от морфологията на диска при прилив на маса през L1 е мястото, където потокът вещество, идващ от гиганта, срещне повърхността на диска. Върхлитащата маса идва с различен въртящ момент от този на външните слоеве на диска и това води до отделяне на значително количество енергия. Всяка промяна в плътността на потока, преминаващ през L1, неминуемо ще доведе до промяна в светимостта на горещото петно в зоната на контакт. Съществуват и други механизми, които могат да доведат до фликеринг, като например при магнитни джуджета. Акретиралото вещество е отведено по магнитните силови линии до полюсите на джуджето и бърза промяна в магнитното поле ще доведе до промяна в количеството маса, достигащо полюсите, и съответно промяна в кривата на блясъка. Въпреки, че фликерингът е сравнително често срещан астрофизичен феномен, той се забелязва рядко при симбиотичните звезди (Sokoloski, Bildsten & Ho 2001; Gromadzki et al. 2006; Stoyanov 2012). От около 300 известни симбиотични звезди (Akras et al. 2019) само при 12 обекта е детектирана такава бърза променливост в блясъка - фликеринг (списък може да бъде видян в Zamanov et al. 2021).

Известни са различни видове акретиращи двойни системи с компактен обект. Те се различават по тяхната композиция, състав, активност в различни области на спектъра и физическа природа на акрецията. Важно е да бъдат разгледани различните видове такива обекти, за да се направят паралели и отсеят техните сходства и различия, и така бъдещи обекти да бъдат класифицирани по-точно. Например Катаклизмичните променливи са тесни двойни системи с периоди от няколко часа до няколко дни, за разлика от симбиотичните, които са с периоди от стотици дни до години. При Катаклизмичните също имаме бяло джудже за компактен обект, но донорът на маса е нискомасова звезда на Главната последователност, в контраст с масивен червен гигант при симбиотичните. Механизмът на трансфер на маса между компоненти при Катаклизмичните е главно заради запълнената зона на Рош и през L1, докато при повечето симбиотични, той е поради акреция от вятъра на гиганта, и по-рядко от запълнена зона на Рош. Катаклизмичните звезди са най-многобройният и най-добре изученият вид взаимодействащи двойни системи. Въпреки че са известни няколко хиляди такива звезди, е установено, че тяхната популация е ограничена в обем (Pala et al., 2020; Inight et al., 2021).

Най-важните примери за Катаклизмични променливи звезди дават ключови наблюдателни ограничения върху теорията на еволюцията и формирането им, но те далеч не са толкова многобройни, за да успеят да дадат ясна статистическа картина. По-голямата част от Катаклизмичните променливи са немагнитни (Pala et al., 2020) и от тези немагнитни по-голямата част са Джуджета Нови. Някои Симбиотични звезди наподобяват Джуджета Нови. Тези Нови претърпяват периодични избухвания, поради термално-визкозни нестабилности в техните акреционни дискове (Namey et al., 1998; Lasota, 2001). Всички Катаклизмични променливи са и източници на рентгеново лъчение, докато при Симбиотичните това далеч не е задължително, и най- вече се забелязва в областта на мекото рентгеново излъчване. В случая на немагнитни, рентгеновото лъчение се формира в транзитния регион между акреционния диск и бялото джудже. С други думи, това е граничният регион, където се отделя приблизително половината от цялата

излъчена енергия на диска (Patterson & Raymond, 1985a,b). Това е така за всички Симбиотични и Катаклизмични звезди. При магнитните променливи звезди, материята акретира върху бялото джудже по канали, създадени от магнитните силови линии. Тези канали започват там, където материята от вторичната звезда (донор) бива уловена от магнитното поле на джуджето и продължава до самата му повърхност на полюсите, където завършват магнитните силови линии. Акреционният поток е със свръхзвукова скорост, когато достигне региона, близък до повърхността на джуджето. Това създава шокова област. Материята в пост-шоковия регион, който е между шоковата област и повърхността на джуджето, е компресирана и загрята до температури десетки килоелектрон волта (keVs). Спирачното лъчение от пост-шоковия регион е отговорно за по-голяма част от рентгеновото лъчение при магнитните Катаклизмични променливи (Mukai, 2017; Belloni et al., 2021). Когато акретиралото вещество върху повърхността на бялото джудже (главно водород) достигне критична плътност и температура, тогава започва термоядрена реакция и горене на водородната обвивка. Тогава се наблюдава избухване от типа Нова. С избухването се наблюдава и загуба на акретиралата маса върху бялото джудже, като така то остава със сравнително постоянна маса в рамките на повторния нова-цикъл (Yaron et al., 2005). Процесът по трансфер на маса при Катаклизмичните променливи е воден главно от загубата на орбитален въртящ момент. Въпреки това такива двойни системи се състоят от звезда донор на Главната последователност, запълнила зоната на Рош и близка, но с малко по-висока маса от акретора - бяло джудже. Трансферът на маса е в термалната времева скала. Сходна е ситуацията и при Симбиотичните, но там донорът на маса е еволюирал червен гигант. Сравнявайки темпът на акреция, при Катаклизмичните той може да надвишава стойности от порядъка на $\sim 10^{-7} - 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, в зависимост от масата на бялото джудже, на повърхността на което акретираният материал може да гори стабилно (Nomoto et al., 2007). Докато при Симбиотичните, той е с порядък или два по-нисък. При някои системи не се наблюдават избухвания от тип Нова и съответната загуба на маса от бялото джудже. Системите, които имат масивно бяло джудже, се смятат за кандидати за Свръхнови от тип Ia (Di Stefano, 2010a). Постоянното горене на водород на повърхността на бялото джудже създава ефективна температура по-ниска и от порядъка на 100 eV, създава и рентгенова емисия в диапазона 0.01 – 2 eV. Бели джуджета в близки двойни системи със стабилно горяща водородна обвивка се наричат супермеки рентгенови двойни. Първите две такива са открити през осемдесетте години на миналия век (Long et al., 1981), а десетилетие по-късно е открита и още една (Trümper et al., 1991). В днешни дни има данни за повече от 100 такива системи в Млечния път, Магелановите облаци и други галактики, но броят и общото рентгеново лъчение са крайно недостатъчни, за да отчетат пълния брой наблюдавани Свръхнови от тип Ia (Gilfanov & Bogdan, 2010; Galiullin & Gilfanov, 2021). Едно от обясненията за сравнително ниската детектирана емисия на меки рентгенови лъчи и малкото на брой двойни системи с такова лъчение е, че междузвездната материя може да поглъща мекия рентгенов поток (Nielsen et al., 2013).

Темпът на акреция и неговата еволюция са определящи за състоянието на двойните звездни системи при наличието на трансфер на маса. Именно затова, една от основните задачи на този труд е да бъде определен темпът на акреция и разработването на методика за неговата оценка по многоцветни фотометрични наблюдения. Точността на тази оценка може да бъде значително подобрена, когато се направят корекции за поглъщането на междузвездната екстинкция към обекта и изваждане на приносът на

гиганта в симбиотичната двойка. Темпът на акреция е тясно свързан със светимостта, температурата и радиуса на излъчващия обект. Глобалните параметри на системата, като орбитален период, разстояние до обекта, наклон на орбитата и масите на компонентите, са необходими за определянето му. За да може да бъде използван този метод, са необходими фотометрични данни в поне два съседни филтъра, събрани в една и съща нощ и при еднакви условия. Методът разчита на голямо количество данни за да има необходимата точност и на последователно и продължително наблюдение на обекта, за да може да се проследи еволюцията във времето на темпа на акреция и останалите параметри.

Процедурата по определяне на темпа на акреция може да се прилага както за филтрите B и V, така и за U R I, като се вземат предвид различните нулеви дължини на вълната и се работи със съседни филтри за определяне на цвета. Следните шест стъпки демонстрират самата процедура:

1. От наблюдаваната звездна величина на системата изваждаме приноса на гиганта, като първо превръщаме двете звездни величини - на гиганта и общата - в потоци, след това ги вадим една от друга, и превръщаме получения поток обратно в звездна величина. Важно е да се отбележи, че се използват калибрирането на Rodrigo et al. (2012): за обикновен Бесел B филтър - ефективна дължина на вълната $4371.07 \text{ \AA}$ и нулева звездна величина $6.13 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$, и за обикновен Бесел V филтър - ефективна дължина на вълната $5477.7 \text{ \AA}$ и нулева звездна величина $3.63 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$.
2. С получените фотометрични стойности за горещата компонента правим корекция за междוזвездното почервяване и получаваме B_0 , V_0 и $(B-V)_0$.
3. Определяне на ефективната температура T_{eff} , използвайки апроксимация на абсолютно черно тяло и получените стойности за цвета $(B-V)_0$ в предишната точка. Таблица 18 в Strayzis (1992) е направена линейна апроксимация между дадените таблични данни и изчисления цвят.
4. Определяне на ефективния радиус R_{eff} на горещата компонента по вече известните разстояние d , B_0 , V_0 . За целта е използван код написан от проф. Заманов, който е представен в Приложение 1.
5. Определяне на оптичната светимост по формулата:

$$L = 4\pi R_{\text{eff}}^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

6. Определяне темпът на акреция по формулата, където G е гравитационната константа, M_{wd} е масата на джуджето, M_a е темпът на акреция и R_{wd} е радиусът на джуджето:

$$L = \frac{1}{2} G \frac{M_{\text{wd}} M_a}{R_{\text{wd}}}$$

Важно е да се спомене, че горното уравнение е валидно при направеното предположение, че светимостта на диска е точно половината от цялата светимост на акретиращото вещество. Другата половина се излъчва в ултравиолетовия и рентгенов диапазон от граничния слой между акреционния диск и бялото джудже (повече информация може да бъде намерена в глава 6 от Frank et al. 2012).

Главният източник на неточност в този метод идва от определянето на звездната величина на червения гигант при изваждането му от общата стойност на двойната

система. Затова точното определяне на класа светимост на гиганта е изключително важно за подобряване на метода. Подходът, при който успяваме да отделим двете компоненти и да изчислим отделните приноси към общата светимост, както и спектралния им клас, и техните маса и радиус поотделно, ни дава възможност да придобием по-добра представа за процесите в цялата система, и да оценяваме и проследяваме еволюцията на параметрите и процесите в системата. По-доброто разбиране и изучаване на феномените, които демонстрират Симбиотичните двойни звезди, като трансфер на маса, джетове, акреционни и декреционни дискове, избухвания тип Нова, фликеринг и други, разширява разбирането ни за тези обекти, както и за всички други астрофизични проявления на тези феномени.

1. Изчисляване на междузвездното поглъщане към симбиотични звезди

За да оценим междузвездното поглъщане ще използваме абсорбционните характеристики на звездни спектри, наречени дифузни ивици на поглъщане (ДИП) diffuse interstellar bands (DIBs). Наблюдават се приблизително 400 такива ивици, както в ултравиолетовата област, така и във видимата и инфрачервени области (Sarre 2006, Fan et al. 2019). Физическият произход на тази абсорбция най-вероятно се дължи на облаци от газ по посоката на наблюдение, съдържащи големи молекули на въглерода C_{60}^{+} - He_n (Spieler et al. 2017), прави лабораторни симулации с газ, съдържащ дълги вериги на въглерода при наличието на хелиеви радикали. Те показват много сходни характеристики на формата и големината на тези ивици на поглъщане с наблюдаваните в междузвездното пространство. Друго изследване показва, че не само дълги молекули на въглерода C_2 (Elyajouri et al. 2018) могат да създават условия за такива ивици на поглъщане в наблюдаваните спектри. Имайки предвид, че има повече от 400 познати такива ивици, тяхната физична природа варира значително и за съжаление не е изследвана напълно и в детайли, но повечето изследователи са на мнение, че общото са молекулни и атомни вибрационни линии на абсорбция на различните елементи, съдържащи се в газово-прахови облаци.

Няколко примера за абсорбционни характеристики на междузвездното пространство са представени на Фиг. 3, Фиг. 4 и Фиг. 5. Най-ярко изразените характеристики в случая са на NaD1 и NaD2 линиите. На Фиг. 3 в горния панел съм начертал NaD1 и NaD2 заедно с KI7699 линията, а в долния панел DIB5780 и DIB6613. Сравнявайки профилите се вижда, че част от NaD линиите имат произход, свързан с околосвездното вещество, а не с междузвездното пространство по линията на наблюдение. Затова аз използвам дифузните ивици на поглъщане за определяне на характеристиките на междузвездното пространство.

Междузвездно почервяване E_{B-V}

Има директна връзка между силата на ДИП и междузвездното поглъщане, или почервяване. За да пресметна E_{B-V} измервам еквивалентната ширина на избрани ДИП-ове и следвам уравненията, дадени от Puspitarini, Lallement & Chen (2013):

$$E_{B-V} = 2.3W_{5780} + 0.0086, \quad (1)$$

$$E_{B-V} = 6.3W_{5797} + 0.0203, \quad (2)$$

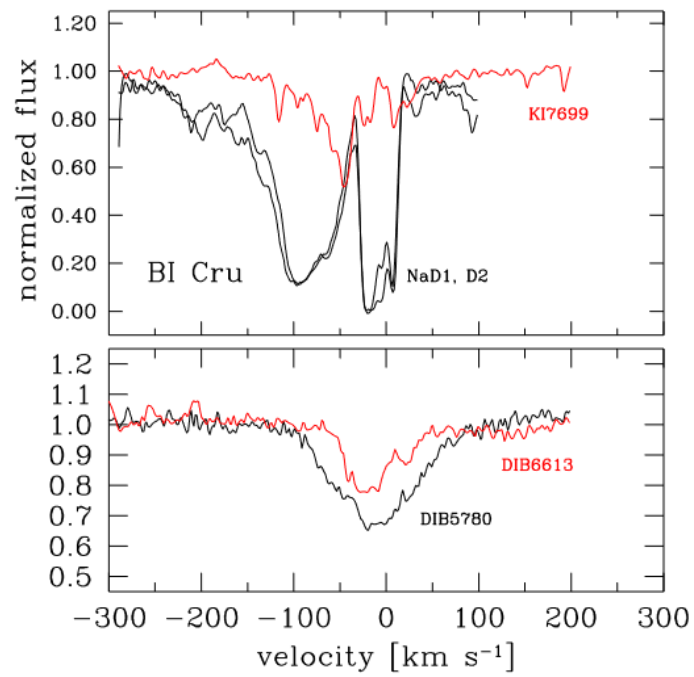
$$E_{B-V} = 5.1W_{6613} + 0.0008. \quad (3)$$

Тези уравнения се отнасят за еквивалентната ширина на ДИП $\lambda 5780.38$, ДИП $\lambda 5797.06$ и ДИП $\lambda 6613.62$; респективно W_{5780} , W_{5797} и W_{6613} . Единиците на W са в ангстръми, а на E са в звездни величини. Избрани са именно тези характеристики и ДИП-ове, защото те са ясно видими в спектъра на избраните симбиотични звезди, и могат да ни дадат най-точна оценка. Произходът на ДИП 5780 и неговата големина се свързва с плътността на атомния водород по посока на лъча, а на ДИП 5797 с плътността на молекулярния водород (Weselak 2019). Докато за ДИП 6613 се смята, че е пропорционален на плътността на молекулата на Ca II и H I (Sonnentrucker et al. 1999).

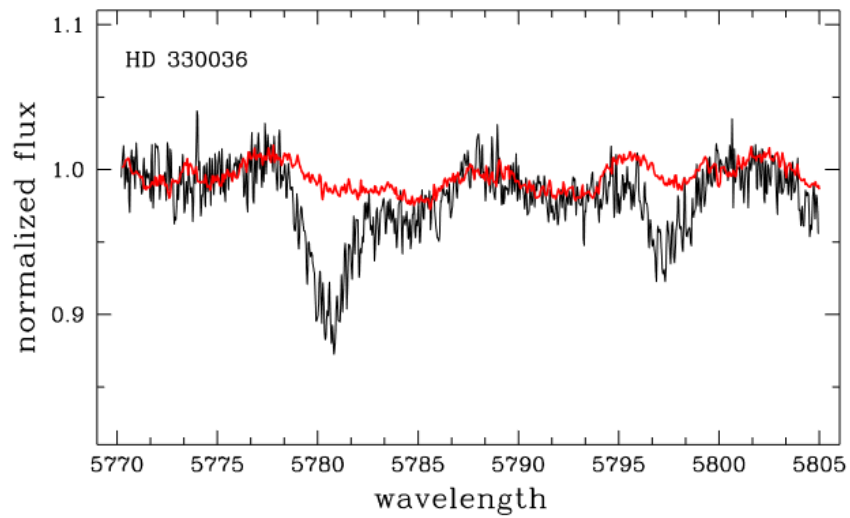
За всеки от обектите измервам еквивалентната ширина на трите ДИП-а, но за да е по-точно апроксимирам спектъра на червения гигант в и около самите ДИП-ове със спектр от подобен тип, взет от архива ELODIE (Moultaka et al. 2004,) и полеви звезди по диаграмата на Hertzsprung – Russell (Bagnulo et al. 2003).

На Фиг. 4 с тъмна плътна линия е изобразен спектърът на HD 330036 и е сравнен с този на ярък гигант HD 432 (β Cas, F2III) в червено. Спектърът на β Cas е разширен за да се вземе предвид бързата ротация на гиганта HD 330036. На тази фигура се демонстрира възможността да се постави континуума при сравнение с полеви гигант и така да се измери по-точно еквивалентната ширина на ДИП 5780 и ДИП 5797, използвани в уравнение (1) и (2).

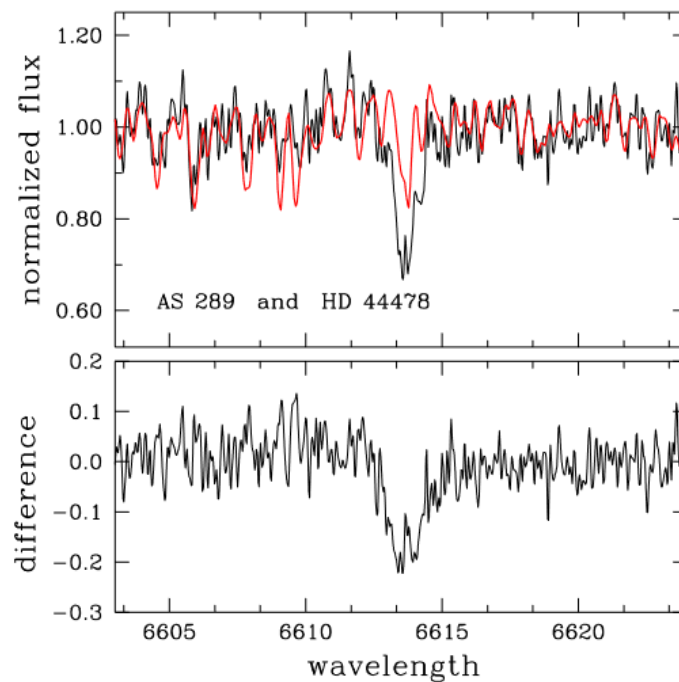
На Фиг. 5 е начертан спектърът на AS 289 заедно с този на яркият червен гигант HD 44478 (μ Gem, M3IIIab). Тази фигура илюстрира как можем да получим по-точна стойност за еквивалентната ширина при изваждането на приноса на червения гигант към ивицата на ДИП 6613.



Фиг. 3. Междувездни ивици на поглъщане в спектъра на BI Cru – NaD1, NaD2, KI7699, DIB 6613 и DIB 5780.



Фиг. 4. Спектърът на HD 330036 (черна линия), сравнен със спектъра на HD 432 (червена линия, спектърът е разширен). Сравнението дава възможност да се измери по-точно еквивалентната ширина на DIB 5780 и DIB 5797.



Фиг. 5. Спектърът на AS 289 (черна линия), сравнен със спектъра на HD 44478 (червена линия). Долният панел показва разликата между двата.

В Таблица 1. са дадени имената, обектите, модифицираният Юлиански ден, както е посочен в хедърите на .fits файловете, и спектралният тип на студения компонент. Последната колона е сложена за проверка, на нея е изобразена горната граница на екстинкция по посока на обекта през нашата Галактика, като се има предвид всички регистрирани прахови облаци в тази посока. Данните за това са взети от IRSA: Galactic Reddening and Extinction Calculator в NASA/IPAC Extragalactic Database (NED), който се оперира от Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Този калкулатор използва галактически карти на почервяването, за да определи пълната стойност на почервяването в конкретна посока на наблюдение, и е базиран на резултатите от Schlegel, Finkbeiner & Davis (1998) и Schlafly & Finkbeiner (2011).

Таблица 1. Имена на обектите, датата на наблюдение, спектралният тип на хладния компонент и горната граница на почервяването (данни от IRSA).

No:	object	MJD	spec.type	upper limit of E_{B-V}
1	AS 289	53161.3071	M3.5 III	2.44 - 2.84
2	BI Cru	53107.2002	M2/3 III	5.78 - 6.72
3	HD 330036	53107.2882	F5 III	1.06 - 1.23
4	V2756 Sgr	53164.3968	M4 III	0.27 - 0.31
5	V2905 Sgr	53184.0858	M3 III	0.27 - 0.32
6	V417 Cen	53107.2548	F6V-G9Ib	7.63 - 8.87
7	PN Sa 3-22	53402.2405	M4.5 III	0.81 - 0.94

Резултатите са обобщени в Таблица 2., където са дадени от ляво на дясно: имената на обектите, изчислената стойност на E_{B-V} за всеки ДИП, респективно W_{5780} , W_{5797} и W_{6613} , и последната колона е средната стойност за E_{B-V} .

Таблица 2. Еквивалентните ширини на ДИП в [Å] и калкулираното E_{B-V} (звездни величини) на симбиотичните звезди. На таблицата са дадени имената на обектите, еквивалентната ширина на ДИП-а и пресметната стойност за E_{B-V} , където последната колона дава средната стойност от всички изчислени за конкретния обект.

No:	object	$W_{5780} E_{B-V}$ DIB $\lambda 5780$ [Å] [mag]	$W_{5797} E_{B-V}$ DIB $\lambda 5797$ [Å] [mag]	$W_{6613} E_{B-V}$ DIB $\lambda 6613$ [Å] [mag]	E_{B-V} mean [mag]
1	AS 289	0.576 1.33	—	0.240 1.22	1.28 ± 0.07
2	BI Cru	0.697 1.61	0.250 1.60	0.288 1.47	1.55 ± 0.10
3	HD 330036	0.265 0.62	0.109 0.71	0.110 0.56	0.63 ± 0.10
4	V2756 Sgr	0.141 0.33	—	—	0.33 ± 0.05
5	V2905 Sgr	0.146 0.34	—	0.050 0.26	0.30 ± 0.05
6	V417 Cen	0.674 1.56	0.263 1.68	0.272 1.39	1.52 ± 0.10
7	PN Sa 3-22	0.360 0.84	0.125 0.81	0.154 0.79	0.81 ± 0.10

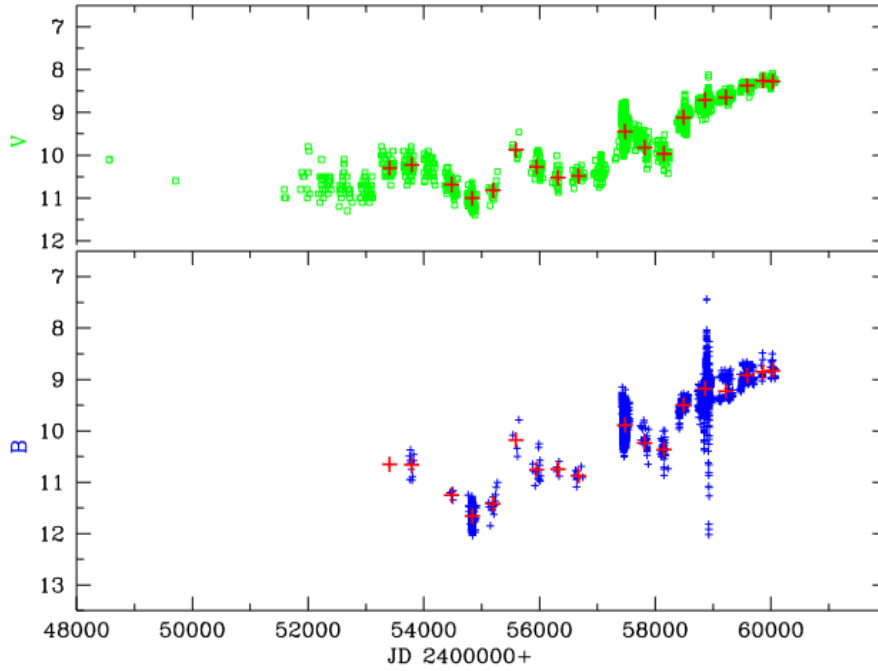
Като референция за горната възможна граница на почервяване се използва E_{B-V} през Млечния път по посока на наблюдателния лъч. IRSA пресмята екстинкцията през цялата галактика в дадено направление и затова тя е лимита. В някои от случаите всичките облаци от прах се намират между нас и обекта, и поради това се получава стойност близка до максималната възможна. В други случаи (пример AS 289, BI Cru and V417 Cen) голяма част от тези облаци се намират зад обекта и затова резултатите са значително по-ниски от максималната стойност.

В тази глава беше представен метод за пресмятане на междузвездната екстинкция (почервявяване) на симбиотични звезди на база на спектрални измервания на Дифузни Ивици на Поглъщане. Методът е естествено подобрение на вече познат такъв, като са включени допълнителни корекции, вземащи предвид спектралния клас за по-добро определяне на континуума и изваждане на приноса на самия гигант. Седем обекта бяха изследвани и получените стойности бяха сравнени с предишни измервания, както и проверени спрямо горна граница на стойността за почервявяване. Точното определяне на междузвездната екстинкция е ключово за по-нататъшната оценка и пресмятане на темпа на акреция при симбиотичните звезди.

2. Проследяване темпа на акреция по многоцветни фотометрични наблюдения MWC560

MWC560 или V694 Mon е първо идентифицирана, като емисионен обект от Merrill & Burwell (1943) при спектроскопски изследвания на обсерваторията Mount Wilson. Спектроскопски наблюдения на обекта през 1984 показват, че това не е обикновена симбиотична звезда, при нея се наблюдава абсорбция достигаща до -3000 km s^{-1} в H β и други Балмерови линии (Bond et al. 1984). От направените спектри между Януари и Март на НАО „Рожен“, Tomov et al. (1990a) успява да измери поток със скорост $6000 - 7000 \text{ km s}^{-1}$, като ясно са разграничени абсорбцията от емисията, и прави предположение, че тази абсорбция се дължи на джет по посока на наблюдателния лъч. Този поток вероятно е високо-колимиран, зареден с бариони джет (Schmid et al. 2001) или вятър от полярните региони (Lucy, Knigge & Sokoloski 2018). MWC560 се смята за нерелативистичен аналог на квазарите, защото притежава колимиран силен поток (джет), оптичните емисионни линии (Балмерови линии и линии на FeII) са подобни на тези на квазари с ниско червено отместване (Zamanov & Marziani 2002) и абсорбционните приличат на тези на квазари с широки абсорбционни линии (Lucy et al. 2018). Орбиталният ѝ период е първо измерен $P_{orb} = 1931 \pm 162 \text{ d}$ (Gromadzki et al. 2007), въпреки, че Munari et al. (2016) изчислява доста по-краткия $P_{orb} \approx 330.8 \text{ d}$.

Използвани са наблюдателни данни от публично достъпната база данни за променливи звезди AAVSO, както и данни от Tomov et al. (1990b) и Zamanov et al. (2020). На Фиг. 6 са представени данните за V филтър (горна част - зелено) и B филтър (долна част - синьо). С червените плюсове са представени средните стойности за конкретния наблюдателен сезон. Поради произхода на данните, а именно, че те не са направени при едни и същи условия, и една и съща точност, се налага осредняване по сезони. Бяха направени и изчисления за всяка нощ поотделно, в която има поне по едно наблюдение в двата филтъра, но това даде огромна неточност в крайните резултати, и затова се прибегна до осредняването. В Таблица 3 са представени фотометричните данни, които са използвани за тази работа, както и финалните резултати.

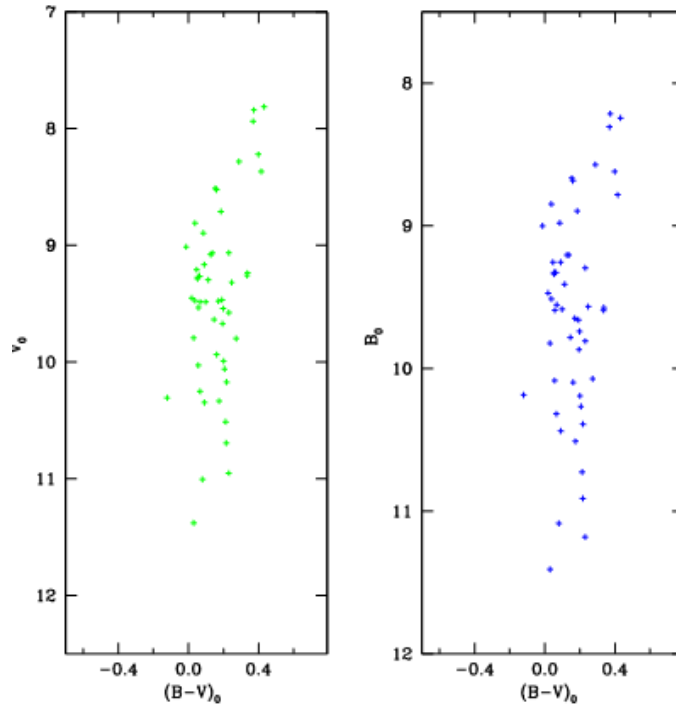


Фиг. 6. Криви на блясъка за периода от 1987 до 2023 на MWC560 по данни от AAVSO в В и V филтри. С червените плюсове са показани средните стойности за всеки наблюдателен сезон.

За да определим точно звездната величина на горещия компонент в отделните филтри е необходимо да отчетем междузвездната екстинкция и да извадим приноса на гиганта. Направено е предположението, че гигантът остава непроменлив и са взети звездните величини $m_V = 12.25$ и $m_B = 13.94$ (секция 3 Zamanov et al. 2020). Относно екстинкцията, тя е пресметната $E(B - V) = 0.15 \text{ mag}$ от характеристиките на спектъра при 2200 ангстрьома Schmid et al. (2001). Имайки предвид абсорбцията при NaD и ограничението на горната граница от количеството прахови облаци по линия на наблюдение, може да се заключи, че екстинкцията е $0.1 < E(B - V) < 0.2$ (Lucy et al. 2020). Определена е екстинкцията в отделните филтри В и V по закона за средната екстинкция (уравнение 1, 3a и 3b в Cardelli, Clayton, & Mathis 1989), респективно $A_B = 0.620$ и $A_V = 0.468$. Разстоянието до MWC560 е взето $d = 2217 \text{ pc}$ по модела Bailer-Jones (2021) от Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al. 2018). Взети са следните параметри на бялото джудже на MWC560- маса $M_{wd} = 0.9 M_{\odot}$, радиус $R_{wd} = 6221 \text{ km}$ (Zamanov et al. 2011).

Пресметнатите стойности за всеки от параметрите при съответната наблюдателна точка са представени в Таблица 3. Първите 3 колони са съответно Юлианският ден, измерените или осреднени стойности за В и V, четвъртата колона е цветът на горещата компонента, която се използва за определяне на ефективната температура в колона пет. Шестата колона е пресметнатия ефективен радиус в единици Слънчеви радиуси, а седмата е светимостта в единици Слънчева светимост. В осмата колона са дадени измерените темпове на акреция в единици $10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Визуално тези данни са представени във Фиг. 8, където те се представят от ляво на дясно в реда, в който са

получени $(B - V)_0, T_{eff}, R_{eff}, L, M_a$. Вижда се, че светимостта в оптичния диапазон варира в границите от 800 до 3000 $L_\odot$, а темпът на акреция между 5 и 20 в единици $10^{-7} M_\odot yr^{-1}$. Пресметнатите грешки са съответно $\Delta T_{eff} = \pm 500K$, $\Delta R_{eff} = \pm 6 - 8\%$ и $\Delta L = \pm 4\%$. Грешката на светимостта е по-малка, защото грешките на радиуса и температурата се компенсират една друга до известна степен, допринасяйки в различни посоки. Главната неточност при ΔM_a идва от направените предположения за връзката между светимостта и темпа на акреция и може да стигне до 1.5 пъти.



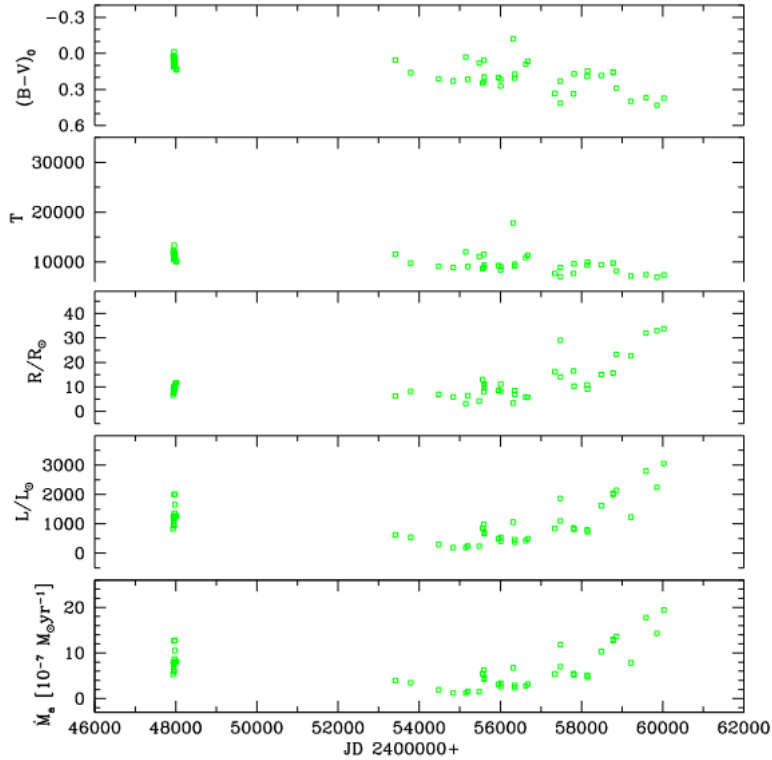
Фиг. 7. Диаграма цвят-величина на горещия компонент на MWC 560 с отчетена междузвездна екстинкция. В левия панел е представен V_0 към $(B - V)_0$, а в десния B_0 към $(B - V)_0$.

На представената диаграма цвят-величина (Фиг. 7), $(B - V)_0$ е в границите между 0.0 и 0.4, което отговаря на абсолютно черно тяло с температура от 7000K до 13000K. Има само една точка, която е изключение (JD 2456319), която най-вероятно е необичайно състояние, грешка при наблюдателните данни, и/или грешка при ваденето на приноса на гиганта.

Светимостта на горещата компонента на MWC560 е в диапазона от 200 до 3000 $L_\odot$. Светимостите на горещите компоненти на 18 други симбиотични звезди са определени, използвайки IUE (International Ultraviolet Explorer) спектри от Muerset et al. (1991). Тук получените резултати за MWC560 са сходни с тези за AG Peg, Z And, SY Mus, AX Per, V443 Her (Таблица 5 от Muerset et al. 1991).

Пресметнатият темп на акреция върху бялото джудже на MWC560 е в границите $1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$. Това е значително по-високо (два порядъка) от очаквания темп на акреция при катаклизмичните променливи звезди $10^{-11} - 10^{-8} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ (Таблица 5 в Pala et al. 2022). Най-вероятно това се дължи на факта, че донорът на маса при катаклизмичните звезди е червено джудже, което снабдява с по-малко материал компактният обект от двойката си, отколкото червеният гигант донор в MWC560 прави.

В заключение искам да кажа, че бяха анализирани фотометрични наблюдателни данни в В и V филтри на симбиотичната джетова звезда MWC560 за периода 1990- 2023. С тези данни бяха определени светимостта и темпа на акреция усреднени за определения наблюдателен сезон, за който има достъпна многоцветна фотометрия. Това бе направено, като първо бе определен цветът $(B - V)_0$ в диапазона от 0 до 0.4, отговарящ на ефективна температура от 7000 – 13000 K, а след това и светимостта варираща между 200 – 3000 $L_{\odot}$. Приемайки масата на джуджето за $0.9 M_{\odot}$ и разстоянието до обекта за 2217 pc, беше определен темпът на акреция в границите $1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$.



Фиг. 8. Еволюция на горещия компонент на MWC560. От горе надолу са представени $(B - V)_0$ с отчетена екстинкция, ефективна температура $T[K]$, ефективен радиус в слънчеви радиуси $R/R_{\odot}$, светимост в слънчеви светимости $L/L_{\odot}$, и темп на акреция $\dot{M}_a [10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$.

Таблица 3. Получените параметри на горещата компонента на симбиотичната звезда MWC560. В колоните от ляво надясно са дадени Юлианският ден (JD) с обозначени източниците на - ^a Tomov et al. 1990, ^b AAVSO данни, ^c Zamanov et al. 2021; звездните величини на B и V; пресметната стойност за $(B - V)_0$; ефективната температура; ефективният радиус; оптичната светимост и темпът на акреция.

JD	B [mag]	V [mag]	B-V ₀	T _{eff} [K]	R _{eff} [R _☉]	L/L _☉	$\dot{M}_a$ [10 ⁻⁷ M _☉ yr ⁻¹]
2400000+							
47930 ^a	9.823	9.793	0.0294	12018	6.7	829	5.27
47946 ^a	9.338	9.286	0.0517	11605	8.8	1250	7.94
47947 ^a	9.554	9.486	0.0678	11313	8.2	1000	6.35
47948 ^a	9.512	9.475	0.0378	11858	7.8	1088	6.91
47950 ^a	9.471	9.452	0.0190	12330	7.5	1179	7.49
47953 ^a	9.410	9.297	0.1126	10498	9.9	1073	6.82
47954 ^a	9.256	9.166	0.0902	10905	10.0	1273	8.09
47955 ^a	9.328	9.264	0.0635	11391	9.1	1239	7.87
47960 ^a	9.001	9.014	-0.0133	13299	8.4	1994	12.67
47964 ^a	9.585	9.486	0.0988	10749	8.8	930	5.91
47969 ^a	9.256	9.209	0.0465	11700	9.0	1359	8.63
47974 ^a	9.328	9.275	0.0525	11591	8.8	1260	8.00
47982 ^a	8.980	8.896	0.0844	11011	11.2	1655	10.51
47983 ^a	8.848	8.810	0.0376	11862	10.6	2007	12.75
48008 ^a	9.205	9.079	0.1260	10255	11.3	1275	8.10
48016 ^a	9.205	9.068	0.1368	10058	11.7	1260	8.00
53411 ^b	10.084	10.028	0.0561	11525	6.3	624	3.96
53789 ^b	10.098	9.937	0.1611	9736	8.2	543	3.45
54480 ^b	10.726	10.513	0.2124	9095	7.0	297	1.88
54839 ^b	11.181	10.952	0.2297	8879	5.9	194	1.23
55149 ^c	11.408	11.378	0.0303	11995	3.2	192	1.22
55198 ^b	10.911	10.694	0.2162	9048	6.4	250	1.59
55480 ^c	11.086	11.006	0.0801	11089	4.2	239	1.52
55559 ^c	9.566	9.319	0.2469	8664	13.0	854	5.43
55593 ^b	9.591	9.534	0.0573	11504	7.9	981	6.23
55602 ^c	9.808	9.577	0.2309	8864	11.1	686	4.36
55603 ^c	9.867	9.672	0.1948	9315	9.9	659	4.19
55604 ^c	9.740	9.543	0.1977	9279	10.5	740	4.70
55949 ^b	10.192	9.992	0.2002	9248	8.6	488	3.10
56007 ^c	10.072	9.800	0.2726	8342	11.1	535	3.40
56009 ^c	10.390	10.172	0.2179	9026	8.2	403	2.56
56319 ^b	10.186	10.307	-0.1211	17839	3.4	1062	6.75
56354 ^c	10.266	10.061	0.2058	9178	8.4	454	2.88
56356 ^c	10.510	10.335	0.1751	9561	7.0	369	2.34
56625 ^c	10.438	10.347	0.0914	10884	5.8	428	2.72
56675 ^b	10.318	10.252	0.0658	11349	5.8	496	3.15
57344 ^c	9.592	9.258	0.3342	7715	16.3	843	5.36
57478 ^b	9.295	9.065	0.2303	8871	14.1	1101	6.99
57480 ^c	8.783	8.368	0.4153	7039	29.1	1863	11.83
57806 ^c	9.574	9.238	0.3367	7694	16.5	858	5.45
57816 ^b	9.649	9.478	0.1712	9610	10.3	816	5.19
58142 ^c	9.660	9.468	0.1918	9352	10.8	799	5.07
58151 ^b	9.782	9.637	0.1457	9929	9.2	734	4.66
58491 ^b	8.897	8.712	0.1849	9439	15.1	1620	10.29
58778 ^c	8.666	8.512	0.1540	9825	15.6	2042	12.97
58781 ^c	8.684	8.524	0.1604	9745	15.7	1999	12.70
58858 ^b	8.571	8.283	0.2882	8148	23.2	2136	13.57
59221 ^b	8.620	8.221	0.3986	7178	22.7	1230	7.81
59589 ^b	8.307	7.938	0.3687	7427	32.0	2797	17.77
59860 ^b	8.244	7.813	0.4312	6930	33.0	2246	14.27
60032 ^b	8.214	7.841	0.3731	7391	33.8	3054	19.40

3. Проследяване еволюцията на темпа на акреция между две избухвания на повторната нова RS Oph

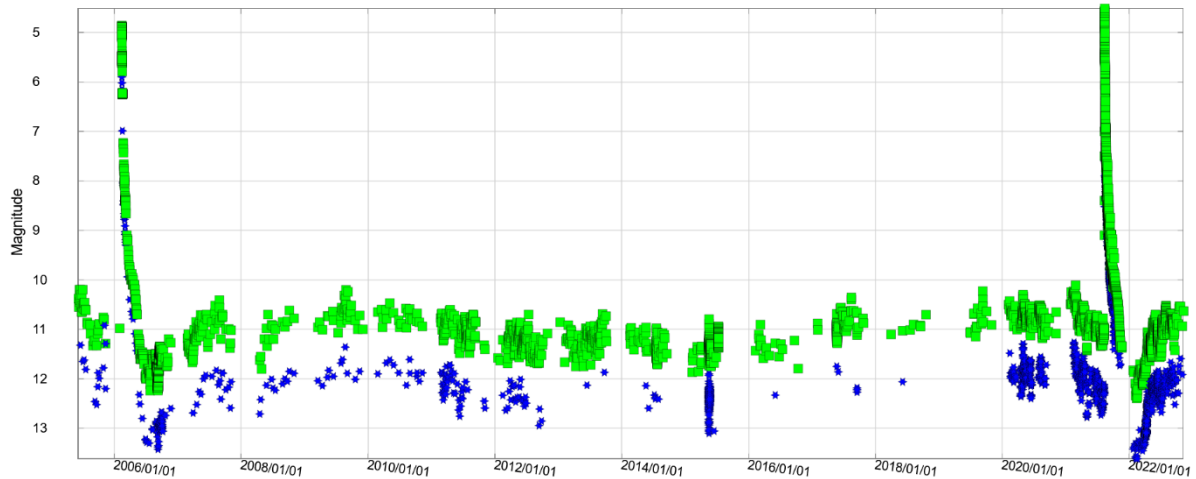
До тук беше използван методът за проследяване еволюцията на параметрите на горещата компонента на MWC560 по многоцветна фотометрия. Както вече беше споменато този метод разчита на голямо количество наблюдения за дълъг период от време. За съжаление тази звезда няма много публично достъпни наблюдения за дълъг период от време и затова интерес представлява използването на тази методология за по-популярни симбиотични двойни звезди. Една такава е RS Oph, която е известна повторна нова звезда. Тя претърпява нова-избухване на всеки 15-20 години. По време на избухването яркостта на обекта скача от $V \sim 11$ до $V \approx 4.8$ mag. Последното избухване е регистрирано на 8-ми Август 2021 г. а предходното през 2006 г. Най-вероятно нова-избухванията при тази звезда се дължат на термоядрен синтез от повърхността на компакния обект (Starrfield 2008), въпреки че други автори предлагат хипотезата избухването да се дължи на енергията, отделена при промяна на темпа на акреция върху бялото джудже, подобно на избухвания на джуджета нови, но в по-голям мащаб (King & Pringle 2009; Alexander et al. 2011). Интересното тук е, че използвайки същите методи, може да се получи оценка за необходимото количество акретирано вещество за избухването на повторната нова. Това става като се проследи темпът на акреция между двете избухвания и се изчисли акумулиралото се вещество върху компакния обект.

RS Oph се състои от бяло джудже с маса $1.2 - 1.4 M_{\odot}$, близка до лимита на Chandrasekhar и K4-M0 червен гигант - със сравнително ниска маса $0.68 - 0.80 M_{\odot}$ (отношение на масите $q = M_{RG}/M_{WD} = 0.59 \pm 0.05$), и орбитален период $453.6 \pm 0.3 d$ (Brandi et al. 2009; Mikołajewska & Shara 2017). Междузвездното поглъщане до системата и звездната величина на гиганта са определени $E(B - V) = 0.69 \pm 0.07$, $m_V = 12.46$ и $m_B = 12.46$, съответно в V и B (Zamanov et. al 2018). За процедурата по определяне темпа на акреция е необходим и радиусът на бялото джудже. Той лесно може да бъде получен от известното съотношение маса-радиус на Eggleton (Verbunt & Rappaport 1988), получената стойност е $R_{WD} = 2296 km$.

$$\frac{R_{wd}}{R_{\odot}} = 0.0114 \left[\left(\frac{M_{wd}}{M_{ch}} \right)^{-2/3} - \left(\frac{M_{wd}}{M_{ch}} \right)^{2/3} \right]^{1/2} \times \left[1 + 3.5 \left(\frac{M_{wd}}{M_p} \right)^{-2/3} + \left(\frac{M_{wd}}{M_p} \right)^{2/3} \right]^{-2/3}$$

Където M_{ch} е лимита на Chandrasekhar масата на бяло джудже, $1.44 M_{\odot}$, и M_p е константа, чиято числова стойност е $0.00057 M_{\odot}$.

Фотометричните данни в В и V филтър са взети отново от AAVSO, като отново е направено осредняване по наблюдателния сезон за повишаване на точността, използвано за MWC560. Разгледани са 14-те сезона между последните две избухвания на звездата 2006-2021 г. (Фиг. 9), за да се определи изменението на параметрите в един цикъл на Нова избухване. Използвани са и по-точни данни, събрани с 50/70см Schmidt и 60см телескопи на НАО „Рожен“ за същия период, като са отделени 19 нощи с фотометрия за В и V, но има и данни от 8 нощи с трифилтърна фотометрия U, В и V. Многоцветните данни с висока точност от НАО „Рожен“ дават възможност за проверка на резултатите от публичния регистър AAVSO.



Фиг. 9. Фотометрични наблюдения на RS Orh за периода между последните две избухвания в В и V филтри от AAVSO.

В Таблица 7 са представени получените резултати за наблюдателните сезони между две избухвания на RS Orh по данни от AAVSO. Във втората колона е показан полученият цвят $(B - V)_0$ на горещата компонента, като предварително е изваден приносът на хладния гигант и междузвездната екстинкция. Третата и четвъртата колони представят ефективните температура и радиус на диска, а в петата колона неговата светимост. В последната колона е даден темпът на акреция и как той се изменя между двете избухвания. Виждат се две точки, които очевидно се отклоняват от останалите и навярно това се дължи на много малкия брой измервания за В в този сезон. Респективно тези точки имат много висока грешка, но няма да бъдат споменавани повече в анализ, а поради ниската си научна стойност. Ефективната температура на горещата компонента е в границите $7500 - 11000\text{K}$ с грешка $\Delta T_{eff} = \pm 600$. Ефективният радиус е в границите от $9 - 23 R_{\odot}$, с грешка $\Delta R_{\odot} = \pm 8 - 10\%$ и светимостта е $370 - 1300 L_{\odot}$, с грешка $\Delta L_{\odot} = \pm 6 - 8\%$. Финално са получени следните стойности за темпа на акреция $1.4 \leq \dot{M}_a \leq 2.5 [10^{-7} M_{\odot} \text{yr}^{-1}]$.

Таблица 7. Определяне на темпа на акреция по B и V с данни от AAVSO

Наблюдателен сезон	$(B - V)_0$	T_{eff} [K]	R_{eff} [$R_{\odot}$]	L [$L_{\odot}$]	M_a [$solar/yr \times 10^7$]
2007	0.14	10036	11	889	2.0
2008	0.13	10182	11	912	1.9
2009	0.35	7550	23	328	2.4
2010	0.24	8750	17	513	2.4
2011	0.26	8525	15	556	1.7
2012	0.18	9512	11	866	1.4
2013	0.08	11164	9	1224	1.8
2014	-0.05	14520	6	2449	2.2
2015	0.09	10982	9	1276	1.5
2016	-0.06	14790	6	2494	2.4
2017	0.17	9662	13	755	2.0
2018	0.23	8888	15	597	1.9
2019	0.31	7958	20	395	2.3
2020	0.35	7575	21	368	2.0

В Таблица 8 са представени получените резултати за параметрите на системата в същия период, изчислени по данни, събрани с висока точност от телескопите на НАО „Рожен“. Това дава възможност за проверка на точността на данните от AAVSO при сравняване на резултатите. Правейки паралел виждаме, че температурата варира от 8100K до 11200K, което е практически идентично с получената по-рано стойност. Същото се получава и за радиуса, който е между $8 - 22 R_{\odot}$, както и за светимост и темп на акреция: $400 - 1300 L_{\odot}$ и $1.1 \leq M_a \leq 3.4 [10^{-7} M_{\odot} yr^{-1}]$. Разликите в получените резултате с данни от AAVSO и тези, получени с наблюдения от НАО „Рожен“, са в рамките на грешката. Можем да заключим, че ползването на данни от AAVSO при осредняване за наблюдателен сезон, дава един много добър резултат.

Таблица 8. Определяне темпа на акреция по В и V филтри с данни от НАО „Рожен“

Date	$(B - V)_0$	T_{eff} [K]	R_{eff} [$R_{\odot}$]	L [$L_{\odot}$]	M_a [$solar/yr \times 10^7$]
2009.06.15	0.20	9250	15	605	2.4
2010.04.30	0.29	8125	21	390	2.7
2010.05.01	0.25	8625	22	400	3.6
2012.04.27	0.24	8750	15	587	1.8
2012.06.13	0.15	9875	10	1028	1.2
2012.07.18	0.10	10727	8	1424	1.1
2012.08.16	0.12	10364	8	1337	1.0
2013.07.02	0.15	9875	11	863	1.7
2013.07.10	0.07	11273	10	1119	2.3
2013.08.12	0.15	9875	12	832	1.9
2013.08.13	0.18	9500	10	950	1.1
2013.09.05	0.30	8286	17	479	2.0
2013.09.06	0.28	8250	18	469	2.0
2016.07.26	0.156	9800	11	893	1.6
2016.07.28	0.071	11255	9	1267	1.8
2017.03.29	0.097	10782	11	1007	2.2
2017.05.28	0.070	11273	9	1296	1.7
2017.06.26	0.047	11691	11	1029	3.4
2017.07.19	0.089	10927	12	879	3.1
2017.09.14	0.095	10818	13	845	3.1

Използваният метод в този труд за определяне на гореспоменатите параметри на системата се основава на цвета на горещия компонент. Това дава възможност същото изчисление да бъде направено и с наблюдения в U и B. Така се получава $(U - B)_0$, $T_{(U-B)}$, $R_{(U-B)}$, $L_{(U-B)}$, и темпът на акреция $M_a(U - B)$. Таблица 9 сравнява получените

параметри на системата по цвета ($B - V$) с тези, получени по цвета ($U - B$). Лесно може да бъде заключено, че изчисленията по двата метода дават доста близки резултати. Реално разминаване извън рамките на грешката има само при една точка, което може да бъде отдадено да неточност при наблюдателните данни. Резултатите от Таблица 9 дават уверение, че този метод за определяне на темпа на акреция дава смислени резултати с научна стойност. Освен като проверка на получените резултати, многоцветната фотометрия ни дава и възможност да повишим точността на изчисленията, като бихме могли да усредним стойностите за всеки параметър, получени от различните цветове. Това заключение дава насока за работа в бъдеще, където е много ценно да се извършват фотометрични наблюдения в повече филтри и така да бъдат определяни параметрите на системата много по-точно. Също така повишаване честотата на наблюденията ни дава много по-добра разделителна способност във времето, за да проследим тяхната еволюция.

Таблица 9. Сравнение между параметрите, определени от цвета $(B - V)_0$ и $(U - B)_0$ - по данни от НАО „Рожен“.

Date	$(U - B)_0$	$(B - V)_0$	$T_{(U-B)}$ [K]	$T_{(B-V)}$ [K]	$R_{(U-B)}$ [$R_\odot$]	$R_{(B-V)}$ [$R_\odot$]	$L_{(U-B)}$ [$L_\odot$]	$L_{(B-V)}$ [$L_\odot$]	$\dot{M}_a(U - B)$ [$\text{solar}/\text{yr} \times 10^7$]	$\dot{M}_a(B - V)$ [$\text{solar}/\text{yr} \times 10^7$]
2012.04.27	-0.71	0.24	9800	8750	12.14	14.91	1219	1169	1.91	1.83
2012.06.13	-0.62	0.15	9083	9875	11.15	9.61	758	787	1.19	1.23
2012.07.18	-0.77	0.10	11146	10727	7.10	7.54	697	674	1.09	1.05
2012.08.16	-0.72	0.12	9900	10364	8.37	7.75	603	621	0.94	0.97
2013.08.12	-0.77	0.15	11146	9875	9.75	11.87	1315	1202	2.06	1.88
2013.08.13	-0.79	0.18	11390	9500	7.42	10.00	832	730	1.30	1.14
2016.07.26	-0.62	0.16	9083	9800	17.85	10.97	1945	995	3.04	1.56
2016.07.28	-0.57	0.07	8667	11255	15.77	8.88	1259	1135	1.97	1.77

Цялата идея да се проследи еволюцията на темпа на акреция между последните две избухвания на Rs Oph е да бъде направена оценка за необходимото количество акретирало вещество при конкретните параметри на системата, което е необходимо да се натрупа върху компакния обект, за да се стигне до критичната маса, при която термоядрената реакция ще се запали и системата ще претърпи избухване като Нова. Силата на избухването се определя от налягането между обвивката и основата, и то се дава по следната формула:

$$P_{ce} = \frac{GM_{wd}}{4\pi R_{wd}^4} \Delta M_a$$

Където P_{ce} е налягането между обвивката и основата, G е гравитационната константа, M_{wd} и R_{wd} са съответно масата и радиуса на бялото джудже, а ΔM_a е количеството акретирало вещество. Критичното налягане, необходимо да запали Нова избухване, е дадено от (Fujimoto 1982, MacDonald 1983) и е оценено на $P_{ce} \sim 10^{19} \sim 10^{20} \text{ dyn cm}^{-2}$. След като бяха определени средните стойности за темпа на акреция за всеки наблюдателен сезон между последните две избухвания, ще ги сумирам, за да получа цялата акретирала маса, необходима да запали Нова.

$$\Delta M_a = 3.01 \times 10^{-6} M_{\odot}$$

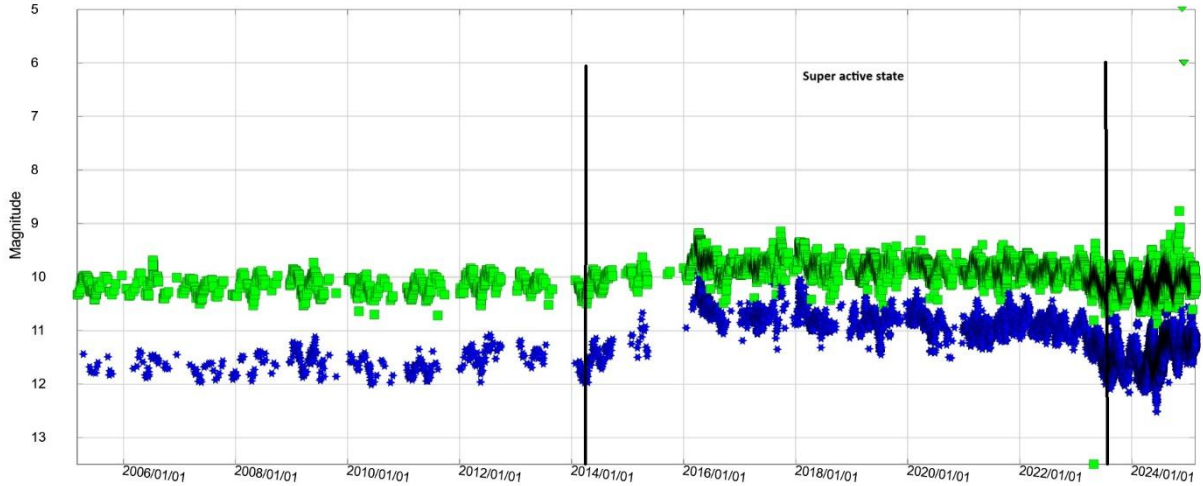
Замествайки получената стойност в горната формула, за критичното налягане се получава:

$$P_{ce} = 3.06 \times 10^{19} \text{ dyn cm}^2$$

Полученият резултат е в много добро съответствие с теоретичния.

4. Темп на акреция и суперактивно състояние на симбиотичната повторната нова T CrB

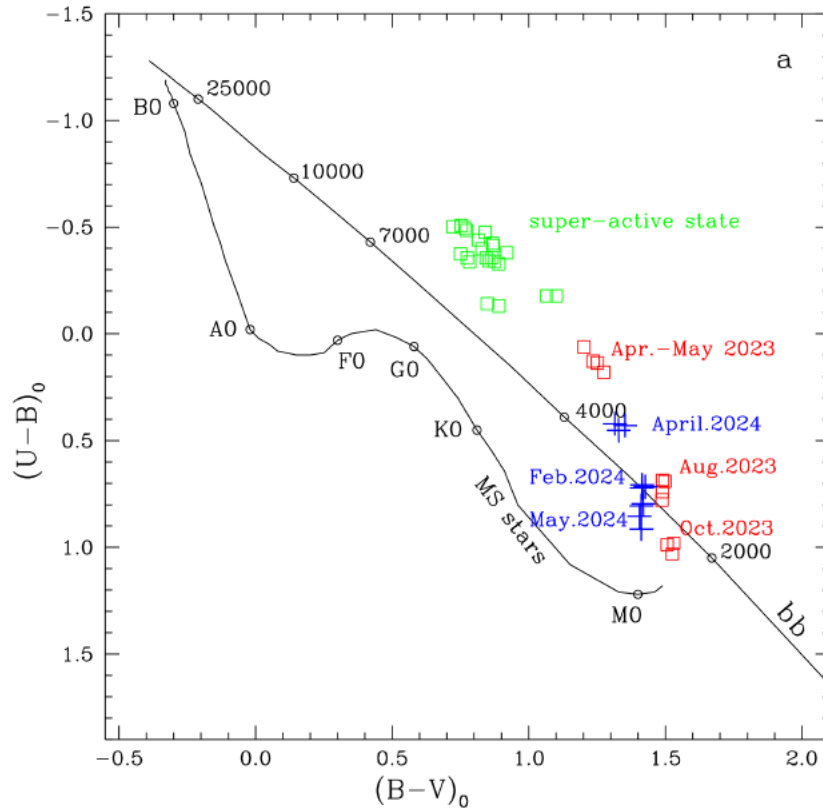
T Coronae Borealis (HD 143454) е най- известната повторна Нова звезда със регистрирани избухвания през 1866 г. и 1946 г. със звездна величина, достигащ максимална стойност 2 звездни величини, правейки я най-ярката Нова. Тя има приблизителен период от 80 години между избухванията, като най-старите регистрирани такива вероятно са от 1217 и 1787 г. (Schaefer 2023a). Следващото такова събитие се очаква да настъпи най- късно до края на 2026 г. (Schaefer 2023b; Maslennikova et al. 2023) и вероятното наличие на плътен вятър от червения гигант (споменат по-долу) ще доведе до шокови взаимодействия, когато материята изхвърлена от избухването, достигне вятъра, както се наблюдава и при повторната нова RS Oph (Bode & Kahn 1985). T CrB представлява голям интерес за международната астрономическа общност, в момента обектът е редовно наблюдаван и следен в практически всички диапазони на електромагнитния спектър - от радио до гама. Голям скок в разбирането на природата на звездата прави Sanford (1949) откривайки, че радиалната скорост на М гигантът има периодична променливост от 230.5 дни. Следващото многозначимо откритие прави Selvelli et al. (1992), когато използвайки IUE спектри, идентифицира, че горещата компонента е акретиращо бяло джудже. В тази двойна система елипсоиден червен гигант запълва зоната си на Рош и трансферира маса през вътрешната Лангранжианова точка L1. Този тип Нова звезди често още са наричани повторни симбиотични Нови (Bode 2010; Shore et al. 2011). Наистина T CrB притежава характеристики на три типа взаимодействия двойни звезди: повторни нови, симбиотични звезди и катаклизмични променливи. Това я прави важен обект при изследването и разбирането на астрофизичните явления акреция, нестабилности в диска и нова избухвания. От 2016 до 2023 г. звездата е в така-нареченото суперактивно състояние (Munari et al. 2016; Munari 2023), което се характеризира с повишена стойност на средната яркост, наличието на силни и дълбоко йонизирани емисионни линии (HeII4686, [OIII]4959, 5007, [NeIII]3869, etc.), и забележим мек рентгенов компонент (Zhekov & Tomov 2019). На Фиг. 10 е представена В и V фотометрия от AAVSO за последните 20 години на T CrB, където ясно се вижда това суперактивно състояние.



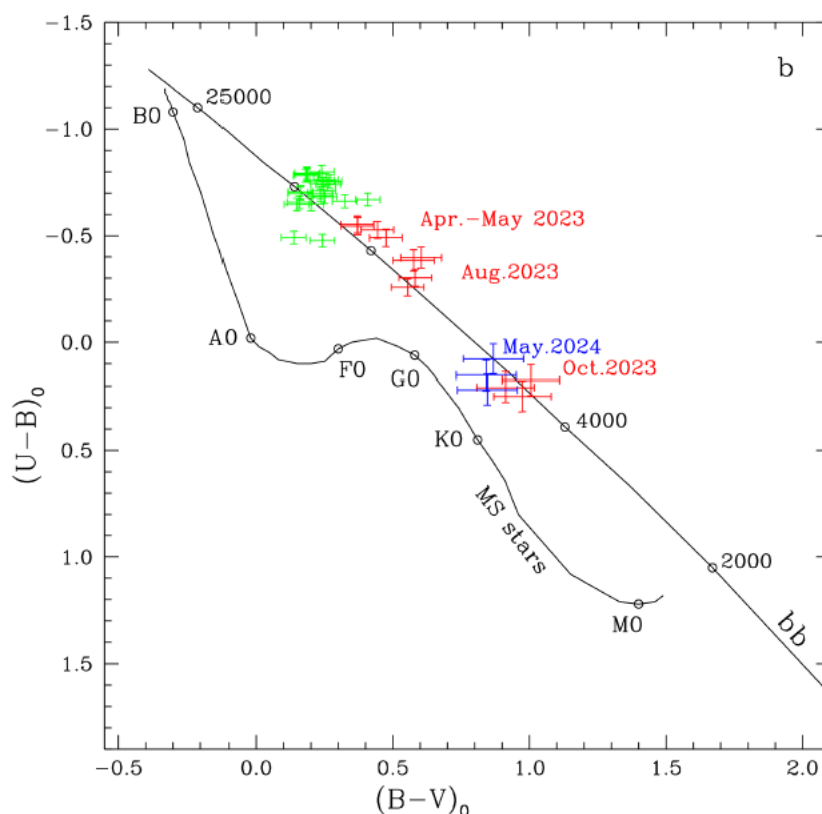
Фиг. 10. Фотометрични данни в В (сини символи) и V (зелени символи) филтри на Т CrB за последните 20 години от базата данни на AAVSO. Черните плътни линии показват границите на суперактивното състояние 2014-2023 г.

За параметрите на системата се приемат следните стойности: орбитален период 227.5687 дни, T_0 (HJD) 2,447,918.62 (Fekel et al. 2000), маса на бялото джудже $M_{wd} = 1.37 \pm 0.13 M_{\odot}$, а радиусът му $R_{wd} = 2018 \text{ km}$ е пресметнат по формулата на Eggleton за връзката между радиус и маса при белите джуджета, както в предната глава. Масата на червения гигант се приема за $M_{rg} = 1.12 \pm 0.23 M_{\odot}$, както и наклон на орбитата $i = 67^{\circ}.5$ (Stanishev et al. 2004). Това са формално дефинираните грешки, но горната граница на масата на бялото джудже се дава от лимита на Чандрасекар. За разстоянието до системата ще бъде използвано $d = 914 \text{ pc}$ (Schaefer 2022), което е близко до това, дадено от (Bailer-Jones et al. 2021) по Gaia EDR3 (Gaia Collaboration et al. 2021) $d = 890 \text{ pc}$. За между звездната екстинкция ще се използва $E(B - V) = 0.07$ (Nikolov 2022), като стойността е съвместима с галактическата карта на прахови облаци и почервявяване, дадена от Schlegel et al. (1998) и с Schlafly & Finkbeiner (2011), които дават $E(B - V) \leq 0.071$, използвайки калкулатора за екстинкция NASA/NED. Спектралният клас и класът светимост на червения гигант са определени от Kenyon & Fernandez-Castro (1987) е като M4 III, анализирайки забележимите абсорбционни характеристики на червения спектър ($\lambda\lambda 5500 - 8600 \text{ \AA}$). По-късно Keyes & Preblich (2004) определя червения гигант като M4.4 Ib – II. Базирано на спектри от близката инфрачервена област ($7900 - 9300 \text{ \AA}$) $\text{\AA}$, Zhu et al. (1999) го определя като M3.8 III. Mürset & Schmid (1999) също, използвайки близки инфрачервени спектри, определя спектрален клас M4.5.

Фотометрични UBV наблюдения на 21 нощи са направени в период между 2016 и 2024 г. със следните телескопи- 50/70см, 1.5м и 2.0м RCC всичките в Националната астрономическа обсерватория „Рожен“. Звездите използвани за сравнение са от листа на Henden & Munari (2006).



Фиг. 11. Двухцветна диаграма на $(U - B)_0$ по ординатата срещу $(B - V)_0$, по абсцисата, за периода 2016-2024 г. на Т CrB, след отчитане на междузвездното почервяване. Със зелено е отбелязан периодът на суперактивно състояние между 2016-2022 г., както и абсолютно черно тяло (bb), и звездите от главната последователност (MS stars).



Фиг. 12. Двувънвна диаграма $(U - B)_0$ срещу $(B - V)_0$ на горещата компонента (изваден червения гигант) на Т CrB. Със зелено е отбелязан периодът на суперактивно състояние между 2016-2022 г., както и абсолютно черно тяло (bb) и звездите от главната последователност (MS stars)

На Фиг. 11 е изобразена представената двувънвна диаграма на Т CrB $(U - B)_0$ срещу $(B - V)_0$ с типична грешка $\pm 0.01 \text{ mag}$. На Фиг. 12 са представени същите наблюдателни данни, но след изваждане на приноса на хладния компонент, тоест това е само горещата компонента на двойната система. Двете непрекъснати линии са съответно: абсолютно черно тяло и звезди от главната последователност (взети от Schmidt-Kaler 1982), като те са сложени за сравнение. На Фиг. 11 се вижда, че по време на суперактивното състояние на системата (зелените символи), цветовете са $(U - B)_0 = -0.36 \pm 0.11$ и $(B - V)_0 = 0.85 \pm 0.09$ съответно, докато през 2023 г. тя е значително по-червена $(U - B)_0 = 0.1$, $(B - V)_0 = 1.2$ (Април- Май) и с тенденция да става все по-червена - $(U - B)_0 = 0.7$, $(B - V)_0 = 1.5$ (Август), $(U - B)_0 = 1.5$, $(B - V)_0 = 1.5$ (Октомври). През 2024 г. се наблюдава запазване на сходни стойности като от края на 2023 г. и тенденцията на почервяване спира.

Използвайки параметрите на системата, споменати по-рано $d = 914 \text{ pc}$, $V = 10.37$ и $E(B - V) = 0.07$, се пресмята абсолютната звездна величина във V по формулата $M_V = V_0 - 5 \log_{10}(d)$, където V_0 е големината с отчетена екстинкция. В ниско състояние системата има $M_V \approx +0.4$, което е по-слабо от очакваното $M_V \approx -0.6$ за типична M4III звезда по Straizys & Kuriliene (1981), въпреки това получената стойност е по-близка до

клас светимост III, отколкото очакваната $-3 \geq M_V \geq -6$ за класове I-II, или $M_V \approx 10$ за клас V. За целите на това изследване ще се приема, че студеният компонент е звезда със спектрален клас и клас светимост M4 III, елипсоидална променливост $V_0 = 10.16 - 0.2 \cos 4\pi\phi$ и цветове $U - B_0 = 1.65$ и $B - V_0 = 1.63$, които отговарят на M4.5 III гигант (Schmidt-Kaler 1982)..

Таблица 10 дава наблюдателните данни и пресметнатите параметри, като колоните от ляво надясно дават, нощта на наблюдение, Юлиановият ден, орбиталната фаза, цветовете $(U - B)_0$ и $(B - V)_0$ след корекция за екстинкцията, ефективната температура и радиус, светимост и темп на акреция. Всичките тези стойности са на горещия компонент. Грешките при определяне на цветовете зависят главно от изваждането на хладния компонент и са $\Delta(U - B)_0 = \pm 0.03$, $\Delta(B - V)_0 = \pm 0.06$ - при високо състояние на системата, и два пъти по-големи - при ниско състояние. Те се транслират в грешка при температурата $\Delta T_{eff} \leq 700K$, а при светимостта от порядъка на $\pm 7\%$ - при високо състояние и два пъти повече - при ниско състояние.

Фокусирайки се върху Фиг. 12 представяща горещата компонента, можем да забележим, че по време на суперактивната фаза цветовете варират около стойностите

$(U - B)_0 = 0.70 \pm 0.08$ и $(B - V)_0 = 0.23 \pm 0.06$ и средна температура през този период 2016-2021 е $9400 \pm 600K$. С края на суперактивното състояние системата започва да става постепенно по-червена и нейната ефективна температура пада от $9400K$ до $\approx 5000K$. Светимостта в оптичния диапазон на горещата компонента е в границите $40 - 110L_\odot$ по време на суперактивната фаза и след края ѝ, драстично намалява до $20 - 25L_\odot$ през Април-Май 2023г., и до $8 - 9L_\odot$ - през Август 2023 г.. За темпа на акреция средната стойност по време на суперактивното състояние е получен $M_a \approx 2 \times 10^{-8} M_\odot yr^{-1}$ и максимална стойност $M_a \approx 4 \times 10^{-8} M_\odot yr^{-1}$ (с доста висока грешка от ± 30). Ако приемем, че геометрият размер на граничната зона между повърхността на бялото джудже и акреционният диск е равна или два пъти размера на радиуса на самото джудже (Bruch & Duschl 1993), тогава това би увеличило цялата акреция двойно. Ако пък бъде приета малко по-ниска маса за бялото джудже $M_{wd} = 1.2M_\odot$, както при (Belczynski & Mikolajewska 1998), то радиусът би бил $R_{wd} = 3859km$ и акреция - приблизително два пъти по-голяма.

Таблица 10. Темп на акреция, светимост, ефективен радиус, ефективна температура, и коригиран цвят за екстинкцията на Т CrB, пресметнати по наблюдателни данни от телескопите на НАО „Рожен“ за периода 2016-2024 г.

Нощ	JD	orb.phase	U_0	$(U - B)_0$	$(B - V)_0$	T_{eff} [K]	R_{eff} [$R_{\odot}$]	L [$L_{\odot}$]	$\dot{M}_a$ [$10^{-8} M_{\odot} yr^{-1}$]
2016-02-07	57425.584	0.768	9.946	-0.800	0.240	10012	2.44	53.8	1.90
2016-04-01	57479.584	0.005	9.462	-0.647	0.201	9131	3.70	85.4	3.02
2016-04-03	57481.576	0.014	9.137	-0.740	0.263	9322	4.11	114.5	4.05
2017-02-23	57807.593	0.447	10.083	-0.491	0.137	8762	3.05	49.1	1.74
2017-02-24	57808.569	0.451	10.083	-0.477	0.242	8044	3.73	52.3	1.85
2017-03-28	57841.460	0.595	9.941	-0.697	0.161	9675	2.63	54.2	1.92
2017-03-28	57841.499	0.596	9.900	-0.704	0.162	9710	2.66	56.2	1.99
2017-04-26	57870.479	0.723	9.981	-0.711	0.245	9232	2.85	52.8	1.87
2017-04-27	57870.542	0.723	9.900	-0.743	0.245	9462	2.80	56.5	2.00
2018-01-24	58142.635	0.919	9.451	-0.793	0.185	10292	2.91	85.0	3.01
2018-01-24	58142.663	0.919	9.492	-0.787	0.187	10224	2.89	81.8	2.89
2018-01-24	58142.684	0.919	9.531	-0.782	0.181	10217	2.84	78.9	2.79
2018-04-14	58223.499	0.274	10.084	-0.759	0.240	9639	2.48	47.5	1.68
2018-04-15	58223.555	0.274	10.050	-0.762	0.255	9572	2.55	49.1	1.74
2018-07-06	58306.354	0.638	9.834	-0.656	0.158	9452	2.90	60.0	2.12
2018-07-06	58306.388	0.638	9.890	-0.646	0.148	9456	2.82	57.0	2.02
2020-04-16	58955.520	0.491	10.337	-0.661	0.324	8494	2.91	39.6	1.40
2020-04-16	58955.585	0.491	10.355	-0.669	0.408	8191	3.15	40.1	1.42
2021-01-20	59234.645	0.717	10.206	-0.682	0.250	9030	2.69	43.2	1.53
2021-01-20	59234.667	0.718	10.133	-0.700	0.234	9236	2.65	45.9	1.62
2021-01-20	59234.695	0.718	10.173	-0.688	0.235	9159	2.65	44.3	1.57

2022-07-23	59784.277	0.133	9.984	-0.754	0.268	9418	2.72	52.3	1.85
2023-04-28	60063.347	0.359	11.201	-0.490	0.475	7059	3.14	22.0	0.78
2023-04-28	60063.454	0.359	11.067	-0.527	0.444	7298	3.05	23.7	0.84
2023-05-24	60089.347	0.473	11.078	-0.553	0.370	7682	2.65	21.9	0.78
2023-05-24	60089.402	0.473	11.180	-0.545	0.371	7647	2.56	20.1	0.71
2023-08-11	60168.393	0.821	12.533	-0.384	0.576	6385	2.28	7.8	0.28
2023-08-11	60168.395	0.821	12.556	-0.397	0.604	6354	2.29	7.7	0.27
2023-08-25	60182.292	0.882	12.526	-0.258	0.554	6103	2.64	8.7	0.31
2023-08-25	60182.361	0.882	12.466	-0.303	0.582	6143	2.66	9.0	0.32
2023-10-14	60232.218	0.101	12.661	0.206	0.913	4500	a		
2023-10-19	60237.197	0.123	12.727	0.174	1.005	4400	a		
2023-10-20	60238.201	0.127	12.819	0.248	0.974	4400	a		

a- Данните са с много висока грешка заради ниската яркост на обекта.

Белите джуджета при симбиотичните повторни нови, като Т CrB, акумулират повечето от необходимата маса за запалване при спорадични високи състояния (Luna et al. 2020). Намеци за подобни епизодични състояния са забелязани от Nelson et al. (2011) в рентгенови данни на симбиотичната повторна нова RS Oph. В края на 2014 г. Т CrB влиза в суперактивно състояние, което има максимум през април 2016 г. и приключва в средата на 2023 г. (Munari et al. 2016; Munari 2023). Іkiewicz et al.(2023) показва, че суперактивното състояние на Т CrB в подобно на суперизбухване, наблюдавано при джуджета Нови от типа SU UMa.

Установено е, че в ранните етапи (Февруари-Април 2016 г.) на суперактивното състояние горещата компонента на Т CrB има светимост между $50 - 110L_{\odot}$ и остава сравнително високо $\approx 40 - 50L_{\odot}$ до 2022. През Април-Май 2023 г. намалява до $20 - 25L_{\odot}$ и в края на суперактивното състояние Август 2023 г. пада до $8 - 9L_{\odot}$. С намаляване на светимостта горещата компонентта става по-червена и ефективната температура също намалява. Ето някои възможни обяснения за причините, поради които оптичната светимост намалява в Т CrB:

1. Намаляване на темпа на акреция, дължащо се на изразходване количеството акумулирана маса в акреционния диск и настъпване на нова фаза на акумулиране.
2. Червеният гигант в системата е трансферирал огромно количество материя през периода 2014-2023 г. и се е свил, което води до намаляване на трансфериращата се маса през L1.

3. Schaefer et al. (2023) предлага, че това намаляване на светимостта може да се счита като спад преди избухване и това може да се счита за сигнал за предстояща Нова в близките месеци, до 1 година. Този спад може да бъде свързан с формирането на плътна, близка до критичната маса обвивка около бялото джудже (Zamanov et al. 2024).

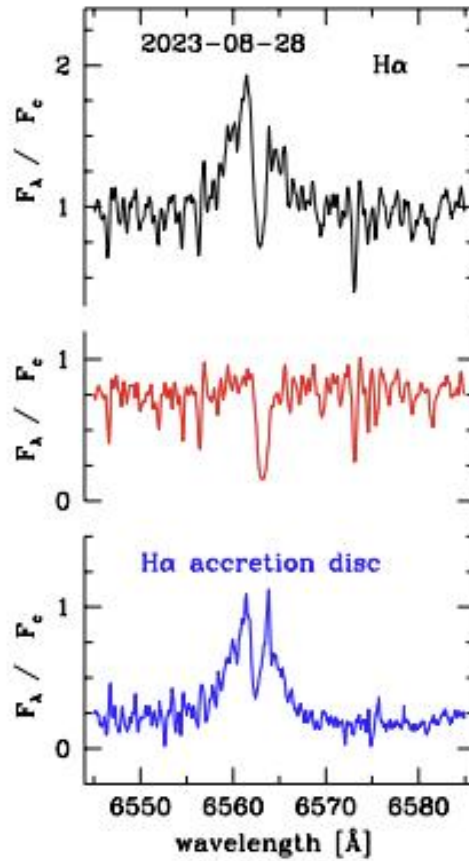
Акреционният диск при симбиотичните повторни Нови може да бъде разглеждан като резервоар на маса, съдържащ до $10^{-6}M_{\odot}$, Wynn (2008). Тази маса акретира върху бялото джудже на няколко етапа, свързани с ярки избухвания на големия диск. През останалото време дискът е сравнително хладен и основното количество маса акретира по време на активните горещи периоди на диска, свързани с избухванията. Физичната причина за тези избухвания може да бъде термално-вискозна нестабилност в диска. Резултатите, получени в този труд за суперактивната фаза на Т СгВ (2016-2023), са в добро съответствие с тази хипотеза. Ако се наблюдава Нова избухване в близките 12 месеца, това би било индикация, че едно суперактивно състояние (дисково избухване от типа SU Uma) може да е достатъчно да запали термоядрена реакция.

Цялото количество акретирала маса между 2014-2023 е $2 \times 10^{-7}M_{\odot}$, което е значително количество ($\sim 30\%$) от необходимото за запалване на термоядрен взрив $5 \times 10^{-7}M_{\odot} - 1.6 \times 10^{-6}M_{\odot}$ (José et al. 2020; Shara et al. 2018). Дали тази маса е достатъчна да запали Нова избухване предстои да се разбере в следващите месеци.

5. Оценка на радиуса на акреционния диск по спектралния наблюдения на T CrB

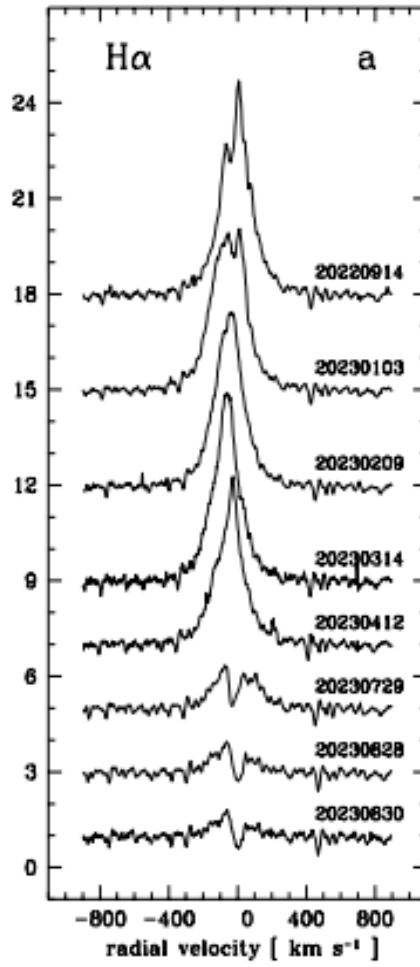
В предишната глава беше проследена еволюцията на горещия компонент на повторната нова и симбиотична звезда T CrB (HD 143454, NOVA CrB 1946, NOVA CrB 1866), използвайки UVV фотометрия. Беше разгледано суперактивното ѝ състояние и потенциалната му връзка с предстоящото избухване. В тази глава се прави оценка на радиуса на акреционния диск, но само по спектроскопски наблюдения, за да се направи сравнение на двата подхода и провери точността. Duschl (1986) определя външния радиус на акреционния диск на симбиотични системи да е в диапазона $40 - 50R_{\odot}$. Leedjarv et al. (1994), пресмята външния радиус на акреционния диск на симбиотичната звезда CH Cyg да е приблизително $\sim 66R_{\odot}$. Robinson et al. (1994), намира приемливи апроксимации за спектри с висока резолюция на 3 симбиотични звезди при хипотезата, че двупиковият профил произлиза от акреционен диск и така определя външния радиус на диска на T CrB $\approx 38R_{\odot}$, на CH Cyg $\approx 120R_{\odot}$ и AG Dra $\approx 19R_{\odot}$. При тези калкулации обаче, не е отделен приносът на гиганта в общия спектър и точно с това се различава методиката на този труд.

Получени са 73 оптични спектъра на T CrB в рамките на 23 нощи. Наблюденията са извършени с 2.0-метровия телескоп на Националната астрономическа обсерватория на „Рожен“ в RC система с Ешелe спектрограф (Bonev et al. 2017). След обработката на всеки спектър е измерена еквивалентната ширина на линията H_{α} при типична грешка от порядъка на $\pm 5\%$. Спектърът на червения гигант HD134807, използван от Stanishev et al. (2004) е изваден за да остане само този на акреционния диск. Двупиковият профил на линията се вижда и преди изваждането на червения гигант, но става значително по-ясно след това и позволява точното измерване на разстоянието между двата пика. Пример за една от нощите може да бъде видян на Фиг. 13.

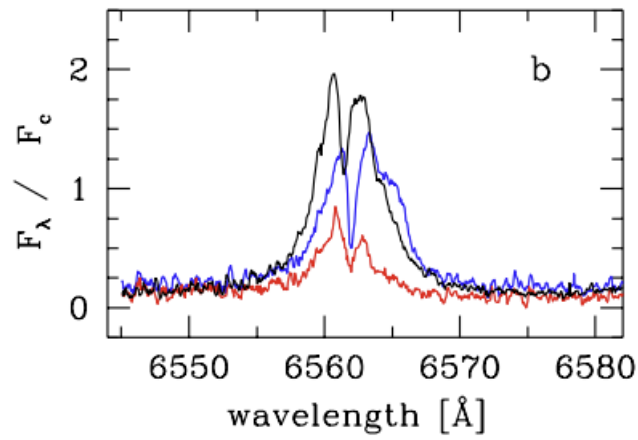


Фиг. 13. H_{α} емисионна линия на Т CrV от 2023-08-28 (черна линия). Спектър на червения гигант HD134807 (червена линия) и H_{α} дупикова емисия на акреционния диск (синя линия).

Изменението на профила на емисионната линия H_{α} на Т CrV може да се види във Фиг. 14, а във Фиг. 15 е представена само горещата компонента, след изваждане на гиганта. Спектърът е нормализиран към локалния континуум и константа е добавена към всеки от тях за по-ясна визуална репрезентация.



Фиг. 14. Изменение на профила на $H\alpha$ емисионна линия на Т CrB в 8 наблюдателни нощи.



Фиг. 15. Профил на $H\alpha$ емисионна линия на акреционния диск на Т CrB в 3 наблюдателни нощи. Синята линия е 2023-07-29, червената е 2023-10-23 и черната е 2024-01-23.

Спектралните данни и резултати са представени в Таблица 11, където от ляво надясно са дадени началото на наблюденията, продължителността и броя експозиции в минути, еквивалентната ширина на H_α , разстоянието между пиковите Δv за всеки спектър, което е определено след фитиране с гаусиан по метода, показан в Zamanov et al. (2023b).

От 2016 до Март 2023 г., Т CrB е в суперактивно състояние (Munari et al. 2016; Munari 2023), характерно с висока средна яркост и наличие на високо йонизирани емисионни линии (HeII4686, [OIII]4959, 5007, [NeIII]3869, т.н.), както и меко рентгеново лъчение (Zhekov & Tomov 2019). Спектроскопските наблюдения в този труд са извършени след края на суперактивното състояние.

През периода от Септември 2022 до Април 2023 г. емисията на H_α е силна с еквивалентна ширина $EW(H_\alpha)$ в диапазона $20 \text{ \AA} - 30 \text{ \AA}$. Това се дължи отчасти на по-ярката гореща компонента, но главно на повишената йонизация във вятъра на гиганта. Така приносът на акреционния диск е сравнително малък спрямо йонизирания вятър (Munari 2023). Това също се наблюдава и при наблюдения в радио-диапазона, които показват, че по време на суперактивното състояние има повишена емисия в радиочестотите. Физичното обяснение на тези ефекти е, че се наблюдава оптически плътно термално спирачно лъчение от фотойонизиран източник и повишена йонизация на вятъра, поради високият темп на акреция (Linford et al. 2019; Zamanov et al. 2023a). След края на суперактивното състояние еквивалентната ширина на $EW(H_\alpha)$ намалява до $11 \text{ \AA}$ през Юни 2023 г. и $7 \text{ \AA}$ през Юли 2023 г., чак до минималната наблюдавана от $2 \text{ \AA}$ в периода Август-Октомври 2023 г. Двупиковият профил се наблюдава само в периода от Юли 2023 до Януари 2024 г.

За последващите изчисления са приети следните параметри на Т CrB - орбитален период 227.5687 дни (Fekel et al. 2000), маса на бялото джудже $1.37 \pm 0.13 M_\odot$, маса на червения гигант $1.12 \pm 0.23 M_\odot$, ъгъл на наклона спрямо зрителния лъч $i = 67^\circ.5$ (Stanishev et al. 2004) и нула ексцентрицитет (Kenyon & Garcia 1986).

Двупиковият профил на H_α показва наличието на диск (Horne & Marsh 1986), като двата пика са почти равни по интензитет и са симетрични. За целите на това изследване се прави предположението за Кеплеров акреционен диск около бялото джудже. С това предположение разстоянието между двата пика (Δv) може да бъде отнесено към външния радиус на излъчващия диск (R_{disc}), като (Huang 1972):

$$\Delta v = 2 \sin i \sqrt{G M_{wd} / R_{disc}}$$

Където G е гравитационната константа, M_{wd} е масата на бялото джудже и i е ъгълът на наклона на оста на диска спрямо лъча на наблюдение. Всички наблюдателни данни, изчисления и резултати са представени в Таблица 11. За периода от Юли 2023 до Януари 2024 г. са измерени разстоянията на двупиковия профил и стойностите са в диапазона $90 < \Delta v < 120 \text{ km s}^{-1}$, със средна стойност $\Delta v = 102 \pm 12 \text{ km s}^{-1}$. Използвайки горната зависимост, се определя размера на H_α радиуса на диска в границите $62 < R_{disc} < 111 R_\odot$, със средна стойност $R_{disc} = 89 \pm 19 R_\odot$ и минимална стойност през Август 2023 г. $R_{disc} \approx 63 R_\odot$. Подробните данни за всеки спектър с двупиков профил са

показани в Таблица 12. На база на тези данни е създадена хистограма на разпределението на радиуса, представена на Фиг. 16.

Таблица 11. Спектрални измервания на Т CrB.

date-obs	phase	exp.time [min]	EW(H α) [Å]	Δv_a [km s $^{-1}$]	R_{disc} [$R_\odot$]
2022-09-14 17:41	0.365	60	28.2		
2023-01-04 02:57	0.855	60	28.4		
2023-01-07 03:00	0.868	60	30.4		
2023-02-10 00:58	0.017	60	24.9		
2023-03-14 22:53	0.162	3x15	24.8		
2023-03-29 21:58	0.228	60	28.8		
2023-04-12 21:02	0.289	60	20.9		
2023-06-07 20:23	0.535	60	10.9		
2023-07-29 19:35	0.763	9x15	6.8	103.7 ± 4	83.2 ± 6
2023-07-30 18:48	0.767	6x15	7.2	102.1 ± 2	85.6 ± 4
2023-08-28 19:11	0.895	7x15	3.0	117.8 ± 3	64.4 ± 4
2023-08-29 18:37	0.899	10x15	3.2	118.4 ± 2	63.7 ± 3
2023-08-30 17:51	0.904	13x15	2.1	118.9 ± 3	63.2 ± 3
2023-08-31 19:31	0.908	3x15	2.4	120.1 ± 3	61.9 ± 3
2023-10-23 16:37	0.140	2x30	1.5	89.7 ± 2	110.8 ± 4
2023-12-25 02:51	0.415	2x45	3.5	96.6 ± 3	95.6 ± 4
2023-12-26 02:44	0.419	4x25	6.4	89.9 ± 5	111.1 ± 8
2023-12-27 02:45	0.424	1x50	4.1	90.2 ± 7	109.7 ± 8
2023-12-28 02:44	0.428	1x60	4.2	98.9 ± 7	91.2 ± 8
2024-01-22 03:00	0.542	1x30	7.3	94.8 ± 7	99.2 ± 8
2024-01-23 01:52	0.542	6x20	8.9	90.9 ± 2	108.0 ± 3

С помощта на 3-тият закон на Кеплер лесно се изчислява разстоянието между двете компоненти на Т CrB $a = 212.6 R_\odot$. Лагранжиановата точка Л1 се намира на разстояние $111 R_\odot$ от бялото джудже и така по формулата на (Eggleton 1983) се определя радиусът на зоната на Рош:

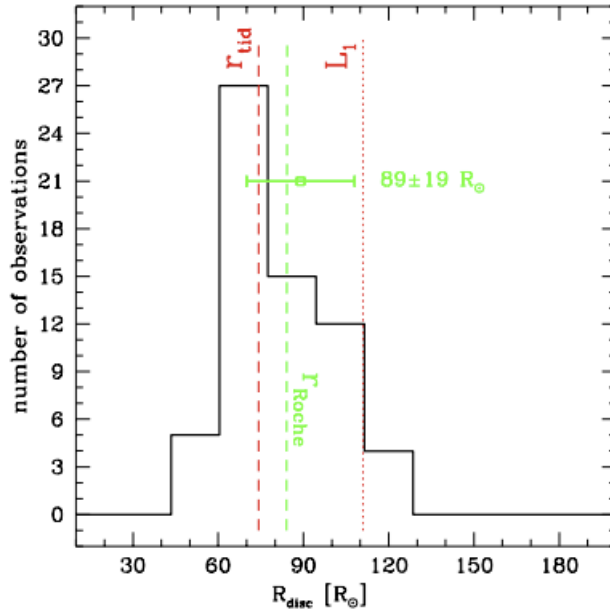
$$r_{Roche}/a = (0.49q^{2/3})/[0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})]$$

Където $q = M_1/M_2$ е отношението на масите. С горната формула и $q = 1.22$ се получава $r_{Roche}/a = 0.396$ и радиус на зоната на Рош на бялото джудже от $84.3 R_\odot$, което означава, че средният размер на диска за периода Юли 2023 – Януари 2024 г. е равен на размера на зоната на Рош на бялото джудже.

Друг важен параметър е радиусът на приливни взаимодействия, който зависи от отношението на масите и се дава от полиномиалната апроксимация (Smak 2020):

$$r_{tid}/r_{Roche} = 0.830 + 0.860p - 4.974p^2 + 12.410p^3 - 14.842p^4 + 6.903p^5$$

Където $p = M_2/M_1$, използвайки тази формула се получава $r_{tid}/r_{Roche} = 0.880$ и $r_{tid} = 74.2 R_\odot$. Тези стойности са илюстрирани на Фиг. 23.



Фиг. 16. Хистограма на радиуса на H_{α} излъчващия диск на T CrB. Със зелена прекъснатата линия е показана зоната на Рош, с червените точки точката Л1 на Лагранж, с червената линия r_{tid} , и средната стойност на радиуса $R_d = 89 \pm 19 R_{\odot}$.

В зависимост от орбиталния период и разстоянието между компактният обект и донора на маса при симбиотичните звезди, акрецията върху горещия компонент може да се случва посредством гравитационно прихващане на бавния междузвезден вятър, идващ от гиганта- Bondi-Hoyle-Littleton (Bondi & Hoyle 1944), преливане на вятър през зоната на Рош-wind Roche-lobe overflow (WRLOF) (Mohamed & Podsiadlowski 2012), или преливане през Л1, когато зоната на Рош е запълнена.

При голяма част от С-тип симбиотичните звезди се наблюдава модулация на лъчевите криви с период половината на орбиталния. Такива модуляции са видими във оптичната и близката инфрачервена област на спектъра и се дължат на елипсоидни вариации на донора на маса (Mikolajewska 2003; Yudin et al. 2005; Rutkowski et al. 2007). Елипсоидни модуляции в В, V, R и I филтри са видими и в гиганта на T CrB (Munari et al. 2016). В ситуация на пренос на маса от гигант, изпълнил зоната си на Рош и разтеглен от приливни сили, се очаква формирането на акреционен диск, подобен на този при катаклизмичните променливи. Така поведението на T CrB наподобява това на джудже нова, но с доста голям орбитален период, приличащо на SU UMa джудже нова (Ilkiewicz et al. 2023).

На Фиг. 16 има ясно изразен пик на разпределението на R_{disc} . Smak (2020) предлага, че външният радиус на диск в случай на трансфер на маса от запълнена зона на Рош се контролира от приливни въртящи моменти, които възпират диска да се разширява отвъд приливния радиус r_{tid} . Това изследване е в потвърждение на тези аргументи, вижда се, че $R_{disc} \approx r_{tid}$, както и тенденцията размерът на диска да бъде ограничен при определени радиуси (e.g. Coe et al. 2006). По всичко изглежда, че

приливните въртящи моменти оказват сериозно влияние при процеса на трансфер на маса от запълване на зоната на Рош. Въпреки това, част от получените резултати показват и радиуси по-големи от r_{tid} , дори доближаващи се до Лангранжиановата точка Л1. Самият факт, че $R_{disc} \approx r_{tid}$ показва, че ограничаващ фактор на размера на диска при Т CrB е зоната на Рош. Това би означавало, че не е наличен ясно изразен поток през Л1, а по-скоро масата, изтичаща оттам, директно се влива във външните слоеве на акреционния диск.

Накратко за 73 обработени спектъра Т CrB са получени стойности за външния радиус на диска $62 < R_{disc} < 111 R_{\odot}$, със средна стойност $R_{disc} = 89 \pm 19 R_{\odot}$, в периода Юли 2023 – Януари 2024 г., благодарение на двупиковият характер на емисионната линия H_{α} . Потвърждава се ролята на приливните въртящи моменти в ограничаване на размера на диска, но основният фактор е размерът на зоната на Рош.

Таблица 12. Т CrB, радиус на H_{α} излъчващия диск. В колоните са дадени старта на експозицията във формат YYYY-MM-DD HH:SS, експозицията в минути, измереното разстояние между пиковите и пресметнатият радиус на излъчващия диск.

date-obs	exp-time	Δv_a	R_{disc}	date-obs	expos.	Δv_a	R_{disc}
	[min]	[km s ⁻¹]	[$R_\odot$]		[min]	[km s ⁻¹]	[$R_\odot$]
2023-07-29 19:35	15	95.5	97.7	2023-08-31 19:31	15	123.1	58.8
2023-07-29 19:50	15	103.7	82.9	2023-08-31 19:47	15	119.2	62.8
2023-07-29 20:06	15	103.8	82.8	2023-08-31 20:03	15	118.1	64.0
2023-07-29 20:22	15	103.7	83.0	2023-10-23 16:37	30	90.6	108.8
2023-07-29 20:38	15	104.8	81.3	2023-10-23 17:08	30	88.9	112.8
2023-07-29 20:53	15	102.9	84.3	2023-12-25 02:51	45	95.7	97.5
2023-07-29 21:09	15	105.3	80.5	2023-12-25 03:37	45	97.6	93.7
2023-07-29 21:24	15	108.1	76.3	2023-12-26 02:44	25	96.8	95.3
2023-07-29 21:40	15	105.4	80.4	2023-12-26 03:09	25	90.9	107.9
2023-07-30 18:48	15	104.4	81.9	2023-12-26 03:36	25	86.4	119.4
2023-07-30 19:04	15	101.4	86.7	2023-12-26 04:02	25	85.6	121.8
2023-07-30 19:20	15	102.3	85.2	2023-12-27 02:45	50	90.2	109.7
2023-07-30 19:38	15	103.6	83.1	2023-12-28 02:44	60	98.9	91.2
2023-07-30 19:54	15	99.2	90.7	2024-01-22 03:00	30	94.8	99.2
2023-07-30 20:18	15	101.9	85.9	2024-01-23 01:52	20	89.7	110.9
2023-08-28 19:11	15	115.1	67.3	2024-01-23 02:13	20	89.3	111.8
2023-08-28 19:27	15	116.3	65.9	2024-01-23 02:34	20	91.7	106.2
2023-08-28 19:44	15	122.3	59.7	2024-01-23 02:54	20	92.1	105.2
2023-08-28 19:59	15	118.0	64.1	2024-01-23 03:15	20	90.6	108.8
2023-08-28 20:15	15	114.3	68.3	2024-01-23 03:36	20	92.0	105.4
2023-08-28 20:31	15	121.5	60.5				
2023-08-28 20:48	15	116.8	65.3				
2023-08-29 18:37	15	117.9	64.1				
2023-08-29 18:53	15	117.8	64.3				
2023-08-29 19:09	15	119.1	62.9				
2023-08-29 19:24	15	122.0	59.9				
2023-08-29 19:40	15	114.8	67.7				
2023-08-29 19:58	15	119.8	62.2				
2023-08-29 20:13	15	118.3	63.7				
2023-08-29 20:29	15	118.8	63.2				
2023-08-29 20:46	15	118.3	63.8				
2023-08-29 21:02	15	116.9	65.2				
2023-08-30 17:51	15	119.7	62.3				
2023-08-30 18:07	15	121.3	60.7				
2023-08-30 18:22	15	120.9	61.0				
2023-08-30 18:38	15	115.2	67.2				
2023-08-30 18:53	15	115.1	67.4				
2023-08-30 19:09	15	120.5	61.4				
2023-08-30 19:24	15	115.5	66.9				
2023-08-30 19:40	15	117.4	64.7				
2023-08-30 19:55	15	119.7	62.3				
2023-08-30 20:11	15	124.3	57.7				
2023-08-30 20:27	15	118.3	63.7				

6. Основни резултати

Междувездната екстинкция към набор от симбиотични звезди е пресметната чрез спектрални измервания на най-силно изразените Дифузни ивици на поглъщане DIB5780, DIB5797 и DIB6613. Методът е осъвършенстван, като са включени допълнителни корекции, вземащи предвид спектралния клас за по-добро определяне на континуума и изваждане на приноса на самия гигант. Получените стойности са сравнени с предишни измервания, както и проверени спрямо горна граница на стойността за почервяване. Точното определяне на междувездната екстинкция е ключово за по-нататъшната оценка и пресмятане на темпа на акреция при симбиотичните звезди.

Използвайки фотометрични данни за В и V от AAVSO, е проследена еволюцията на параметрите на MWC 560, където $(B - V)_0$ е в границите между 0.0 и 0.4, а ефективната температура е от 7000K до 13000K. Светимостта на горещата компонента е в диапазона от 200 до 3000 $L_{\odot}$. Пресметнатият темп на акреция върху бялото джудже на MWC560 е в границите $1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6} M_{\odot} yr^{-1}$. Направени са изчисления по същата методология, използвайки фотометрични наблюдения от НАО „Рожен“ и резултатите са близки с тези по данните от AAVSO (за същия наблюдателен сезон). Това показва, че фотометричните данни от AAVSO са с добра точност и са надеждни при осредняване.

Разгледан е периодът между последните две избухвания на Симбиотичната повторна нова RS Oph 2006 - 2021. Използвайки многоцветна фотометрия от AAVSO за този период, са получени T_{eff} , R_{eff} , L на горещия компонент на двойната система, като е отделен от общата светимост приносът на червения гигант. Тези стойности са сравнени с получени по същия метод, но използвайки фотометрични данни и за U филтър. Сравнението показва доста близки резултати и това е доказателство за добрата точност на използвания метод. Сумата на отделните стойности акретирала маса за всеки наблюдателен сезон дава цялата количество акретирало вещество между двете избухвания, което е необходимо за запалване на Новата. За оценка на метода е пресметнато критичното налягане и то е в теоретичните граници. Това показва, че при налични многоцветни фотометрични наблюдения може да се направи оценка за следващото избухване на повторна Нова звезда на база на темпа на акреция и критичното налягане, акумулирало се върху компактния обект.

Използвайки многоцветни фотометрични данни за Т CrB, е проследена еволюцията на светимостта, радиусът и темпът на акреция на горещата компонента. В ранните етапи на суперактивното състояние, горещата компонента на Т CrB има светимост между 50 – 110 $L_{\odot}$ и остава сравнително високо $\approx 40 - 50L_{\odot}$ до 2022 г. През Април-Май 2023 г. намалява до 20 – 25 $L_{\odot}$ и в края на суперактивното състояние Август 2023 г. пада до 8 – 9 $L_{\odot}$. С намалянето на светимостта горещата компонентта става по-червена и ефективната температура също намалява. Излизането от суперактивното състояние може да се дължи на изразходване на количеството акумулирана маса в акреционния диск, което намалява темпа на акреция и настъпване на нова фаза на акумулиране в диска. Друга възможна хипотеза е, че червеният гигант се е свил заради повишеното количество трансферирана маса по време на суперактивното състояние и това води до намаляване на количеството вещество, изтичащо през Л1. Дискът може да

съдържа маса от порядъка на $10^{-6} M_{\odot}$, тази маса акретира върху бялото джудже на няколко етапа, свързани с ярки избухвания на големия диск. През останалото време дискът е сравнително хладен и основното количество маса акретира по време на активните горещи периоди на диска, свързани с избухванията. Пресметнато е количеството маса, акретирало по време на суперактивната фаза на Т СгВ между 2016-2023г. и то е $2 \times 10^{-7} M_{\odot}$. Това е значително количество ($\sim 30\%$) от необходимото за запалване на термоядрен взрив $5 \times 10^{-7} M_{\odot} - 1.6 \times 10^{-6} M_{\odot}$. Този факт подсказва, че се очаква нова избухване в близките 12-24 месеца.

По спектрални наблюдения е пресметнат радиусът на горещата компонента на Т СгВ за периода Юли 2023 – Януари 2024 г., благодарение на двупиковия характер на емисионната линия H_{α} . Резултатите са в границите $62 < R_{disc} < 111 R_{\odot}$, със средна стойност $R_{disc} = 89 \pm 19 R_{\odot}$ и са доста близки с резултатите, пресметнати по метода, използващ многоцветна фотометрия. Потвърждава се ролята на приливните въртящи моменти в ограничаване на размера на диска, но основният фактор е размерът на зоната на Рош.

7. Публикации по темата на дисертацията

Резултатите от дисертацията са отразени в следните публикации в азбучен ред:

1. Marchev, D.; **Marchev, V.**; Borisov, B.; Popov, V.; Atanasova, T.; Yordanova, G, **Multicolour photometry of MWC560 for the last observation season**, April 2024, The Astronomer's Telegram, No. 16566
2. Marchev, D.; Stoyanov, K.; **Marchev, V.**; Zamanov, R.; Borisov, B.; Vasileva, D.; Atanasova, T.; Pavlova, N., **For optical flickering in symbiotic star MWC 560**, November 2022, Acta Scientifica Naturalis, Volume 9, Issue 3, pp.1-9
3. Marchev, D.; Yordanova, G.; Pavlova, N.; **Marchev, V.**; Zamanov, R., **MWC 560 remains in high state**, February 2023, The Astronomer's Telegram, No. 15906
4. **Marchev, V.**; Marchev, D., **Recent photometry of Recurrent Nova T CrB**, May 2023, The Astronomer's Telegram, No. 16028
5. **Marchev, V.**; Zamanov, R.; Marchev, D., **Weak H-alpha emission from the recurrent nova T CrB**, August 2023, The Astronomer's Telegram, No. 16214
6. **Marchev, V. D.**; Zamanov, R. K., **Mass accretion rate in the jet-driving symbiotic binary MWC 560**, February 2024, Bulgarian Astronomical Journal, Vol. 40, p. 85
7. Zamanov, R.; Boeva, S.; Latev, G. Y.; Semkov, E.; Minev, M.; Kostov, A.; Bode, M. F.; **Marchev, V.**; Marchev, D., **Accretion in the recurrent nova T CrB: Linking the superactive state to the predicted outburst**, December 2023, Astronomy & Astrophysics, Volume 680, id.L18, 4 pp
8. Zamanov, R.; Marchev, D.; **Marchev, V.**; Spassov, B.; Stoyanov, K., **The symbiotic star MWC 560 - optical flickering still missing**, December 2020, The Astronomer's Telegram, No. 14239
9. Zamanov, R.; **Marchev, V.**; Marchev, D.; Atanasova, T.; Pavlova, N., **Re-appearance of optical flickering from RS Oph**, April 2022, The Astronomer's Telegram, No. 15330
10. Zamanov, R.; Stoyanov, K.; **Marchev, V.**; Marchev, D.; Atanasova, T.; Pavlova, N., **The optical flickering from MWC 560 is still missing**, October 2021, The Astronomer's Telegram, No. 14988
11. Zamanov, R.; Stoyanov, K. A.; Latev, G.; Marti, J.; Takey, A.; Elhosseiny, E. G.; Christova, M. D.; Minev, M.; Vujčić, V.; Moyseev, M.; **Marchev, V.**, **Luminosity Class of the Symbiotic Stars 4U1954+319 and ZZ CMi**, June 2024, Serbian Astronomical Journal, vol. 208, pp. 41-46
12. Zamanov, R. K.; **Marchev, V. D.**; Stoyanov, K. A., **Interstellar extinction toward symbiotic stars**, February 2021, Bulgarian Astronomical Journal, Vol. 34, p. 3
13. Zamanov, R. K.; Stoyanov, K. A.; **Marchev, V.**; Minev, M.; Marchev, D.; Moyseev, M.; Martí, J.; Bode, M. F.; Konstantinova-Antova, R.; Stefanov, S., **Size of the accretion disc in the recurrent nova T CrB**, July 2024, Astronomische Nachrichten, Volume 345, Issue , article id. e20240036

Благодарности

На първо място дължа признателност и благодарности на научния ми ръководител проф. д-р Радослав Заманов, както за всичко, на което ме е научил, така и за подкрепата по време на обучението ми. Той има съществена роля във всички наши общи публикации и научни трудове. Благодарен съм, че ми показва начина си на работа и професионалната си етика, които са пример за мен. Изключително съм благодарен на целия екип на Астрономическата обсерватория на Шуменския университет, начело с проф. Драгомир Марчев, те ми предоставиха достъп до дистанционно-управляемите 40см и 60см телескопи и заедно извършихме по-голямата част от фотометричните наблюдения, използвани в този труд. Дължа благодарност и на целия научен колектив, който работи по променливи двойни звезди и извърши наблюденията на обектите в тази дисертация: Кирил Стоянов, Светлана Боева, Янко Николов и Георги Латев. Специални благодарности на проф. Евгени Семков и проф. Бойко Михов за помощта, която ми оказаха като директори на Института по Астрономия и НАО „Рожен“, както и на цялата администрация и персонал, които поддържат материалната база и осигуряват необходимото, за да функционират съоръженията, и това аз и други като мен, да могат да извършват наблюдения и да представят резултатите си на научни форуми. Благодарен съм на операторите на двуметровия телескоп за дългите наблюдателни нощи и всички наблюдения, които съм успял да получа. Благодарен съм на Милен Минев за техническата помощ, която е оказвал всеки път, когато възникнат проблеми на терен. Истински съм благодарен на съпругата ми Людмила Марчева, която е била с мен през цялото време на моята научна кариера и ме е подкрепяла във всяко едно начинание.

Литература

- Alexander, R. D., Wynn, G. A., King, A. R., & Pringle, J. E. 2011, MNRAS, 418, 2576
- Ando, K., Fukuda, N., Sato, B. et al., 2021, PASJ, 73, L37
- Bagnulo, S., Jehin, E., Ledoux, C., Cabanac, R., Melo, C., Gilmozzi, R., ESO Paranal Science
- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., et al. 2021, AJ, 161, 147
- Belczynski, K.; Mikolajewska, J., May 1998, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 296, Issue 1, pp. 77-84.
- Belloni, Diogo; Schreiber, Matthias R.; Salaris, Maurizio; Maccarone, Thomas J.; Zorotovic, Monica, July 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 505, Issue 1, pp.L74-L78
- Bode, M. F., February 2010, Astronomische Nachrichten, vol. 331, issue 2, pp. 160-168

- Bode, M. F.; Kahn, F. D. , November 1985, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 217, 205-215 (1985)
- Bond, H. E., Pier, J., Pilachowski, C., et al. 1984, BAAS
- Bondi, H., & Hoyle, F. 1944, MNRAS, 104, 273.
- Bonev, T., Markov, H., Tomov, T., et al. 2017, Bulgarian Astronomical Journal, 26, 67
- Brandi E., Quiroga C., Mikołajewska J., Ferrer O. E., García L. G., 2009, A&A, 497, 815
- Bruch, A.; Duschl, W. J. , August 1993, Astronomy and Astrophysics, Vol. 275, p. 219-226
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, ApJ, 345, 245
- Coe, M. J., Reig, P., McBride, V. A., Galache, J. L., & Fabregat, J. 2006, MNRAS, 368, 447
- Di Stefano, R., March 2010, The Astrophysical Journal, Volume 712, Issue 1, pp. 728-733
- Di Stefano, R., August 2010, The Astrophysical Journal, Volume 719, Issue 1, pp. 474-482
- Duschl, W. J. 1986, A&A, 163, 61.
- Eggleton, P. P. 1983, ApJ, 268, 368.
- Elyajouri, M., Lallement, R., Cox, N. L. J., et al., 2018, A&A, 616, A143
- Fekel, Francis C.; Joyce, Richard R.; Hinkle, Kenneth H.; Skrutskie, Michael F. , March 2000, The Astronomical Journal, Volume 119, Issue 3, pp. 1375-1388.
- Frank, J., King, A., Reine, D., 2012, Accretion Power in Astrophysics, Cambridge University Press
- Fujimoto, M. Y., June 1982, Astrophysical Journal, Part 1, vol. 257, June 15, 1982, p. 752-779.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2021, A&A, 649, A1
- Galiullin, I.; Gilfanov, M., February 2021, Astronomy & Astrophysics, Volume 646, id.A85, 19 pp.
- Gilfanov, M.; Bogdán, Á., February 2010, Nature, Volume 463, Issue 7283, pp. 924-925
- Gromadzki, M.; Mikołajewska, J.; Whitelock, P.; Marang, F. , June 2009, Acta Astronomica, vol 59, no 2, p. 169-191
- Gromadzki, M., Mikołajewska, J., Whitelock, P. A., et al. 2007, A&A, 463, 703
- Hameury, J.; Menou, Kr.; Dubus, G.; Lasota, J.; Hure, J., August 1998, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 298, Issue 4, pp. 1048-1060
- Henden, A.; Munari, U. , October 2006, Astronomy and Astrophysics, Volume 458, Issue 1, October IV 2006, pp.339-340
- Horne, K., & Marsh, T. R. 1986, MNRAS, 218, 761.
- Huang, S.-S. 1972, ApJ, 171, 549

- Ikiewicz, Krystian; Mikołajewska, Joanna; Stoyanov, Kiril A., August 2023, The Astrophysical Journal Letters, Volume 953, Issue 1, id.L7, 5 pp.
- Ikiewicz, Krystian; Mikołajewska, Joanna; Belczyński, Krzysztof; Wiktorowicz, Grzegorz; Karczmarek, Paulina, June 2019, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 485, Issue 4, p.5468-547
- José, Jordi; Shore, Steven N.; Casanova, Jordi, February 2020, Astronomy & Astrophysics, Volume 634, id.A5, 8 pp.
- K. Inight, Boris T. Gänsicke, E. Breedt, T. R. Marsh, A. F. Pala and R. Raddi, June 2021, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 504, Issue 2, pp.2420-2442
- Kenyon, S. J., & Garcia, M. R. 1986, AJ, 91, 125.
- Kenyon, Scott J. ; Fernandez-Castro, Telmo, April 1987, Astronomical Journal v.93, p.938
- King, A. R., & Pringle, J. E. 2009, MNRAS, 397, L51
- Lasota, Jean-Pierre, June 2001, New Astronomy Reviews, Volume 45, Issue 7, p. 449-508
- Leedjarv, L., Mikołajewski, M., & Tomov, T. 1994, A&A, 287, 543.
- Linford, J. D., Chomiuk, L., Sokoloski, J. L. et al. 2019, ApJ, 884, 8.
- Long et al., 1981
- Lucy, A. B., Knigge, C., & Sokoloski, J. L. 2018, MNRAS, 478, 568
- Lucy, A. B., Sokoloski, J. L., Munari, U., et al., 2020, MNRAS, 492, 3107
- Luna, Gerardo J. M.; Sokoloski, J. L.; Mukai, Koji; M. Kuin, N. Paul, October 2020, The Astrophysical Journal Letters, Volume 902, Issue 1, id.L14, 3 pp
- MacDonald, J., April 1983, Astrophysical Journal, Vol. 267, p. 732-746.
- Maslennikova, N. A.; Tatarnikov, A. M.; Tatarnikova, A. A.; Dodin, A. V.; Shenavrin, V. I.; Burlak, M. A.; Zheltoukhov, S. G.; Strakhov, I. A., October 2023, Astronomy Letters, Volume 49, Issue 9, p.501-515
- Merrill, P. W. & Burwell, C. G. 1943, ApJ, 98, 153
- Mikołajewska, J, November 2010, eprint arXiv:1011.5657
- Mikołajewska, J. 2007, Baltic Astronomy, 16, 1
- Mikołajewska, J., 2012, Baltic Astronomy, 21, 5
- Mikołajewska, J. , 2003, Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution, ASP Conference Proceedings, Vol. 303. Held 27-31 May 2002 at Isaac Newton Group of Telescopes, La Palma, Spain. Edited by R. L. M. Corradi, R. Mikołajewska and T. J. Mahoney. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2003. ISBN: 1-58381-152-4, p.9
- Mikołajewska, J., Acker, A., & Stenholm, B., 1997, A&A, 327, 191
- Mikołajewska J., Shara M. M., 2017, ApJ, 847, 99

- Mohamed, S., & Podsiadlowski, P. 2012, *Baltic Astronomy*, 21, 88.
- Moultaka, J., Ilovaisky, S. A., Prugniel, P., Soubiran, C., 2004, *PASP*, 116, 693
- Muerset, U., Nussbaumer, H., Schmid, H. M., & Vogel, M., 1991, *A&A*, 248, 458
- Mukai, K., June 2017, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, Volume 129, Issue 976, pp. 062001
- Munari, U. , November 2023, *Research Notes of the AAS*, Volume 7, Issue 11, id.251
- Munari, U.; Dallaporta, S.; Cherini, G. , August 2016, *New Astronomy*, Volume 47, p. 7-15.
- Nelson, T., Mukai, K., Orio, M., Luna, G. J. M., & Sokoloski, J. L. 2011, *ApJ*, 737, 7
- Nielsen, Mikkel T. B. ; Dominik, Carsten ; Nelemans, Gijs, January 2013, *Binary Paths to Type Ia Supernovae Explosions*, *Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium*, Volume 281, p. 140-14
- Nikolov, Y. , November 2022, *New Astronomy*, Volume 97, article id. 101859
- Nomoto, Ken'ichi; Saio, Hideyuki; Kato, Mariko; Hachisu, Izumi, July 2007, *The Astrophysical Journal*, Volume 663, Issue 2, pp. 1269-1276
- Pala, A. F.; Gänsicke, B. T.; Breedt, E.; Knigge, C.; Hermes, J. J.; Gentile Fusillo, N. P.; Hollands, M. A.; Naylor, T.; Pelisoli, I.; Schreiber, M. R.; Toonen, S.; Aungwerojwit, A.; Cukanovaite, E.; Dennihy, E.; Manser, C. J.; Pretorius, M. L.; Scaringi, S.; Toloza, O., May 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 494, Issue 3, pp.3799-3827
- Pala, A. F. ; Gänsicke, B. T. ; Belloni, D. et al., March 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 510, Issue 4, pp.6110-6132
- Patterson, J.; Raymond, J. C., May 1985, *Astrophysical Journal*, Vol. 292, p. 535-549
- Puspitarini, L., Lallement, R.; Chen, H. -C., 2013, *A&A* 555, A25
- Robinson, K., Bode, M. F., Skopal, A., Ivison, R. J., & Meaburn, J. 1994, *MNRAS*, 269, 1.
- Rodrigo, C., Solano, E., Bayo, A. 2018, *IVOA Working Draft* 15 October 2012
- Rutkowski, A., Mikolajewska, J., & Whitelock, P. A. 2007, *Baltic Astronomy*, 16, 49
- Sanford, Roscoe F., January 1949, *Astrophysical Journal*, vol. 109, p.81
- Sarre, P. J. 2006, *Journal of Molecular Spectroscopy*, 238, 1
- Scaringi, S., Maccarone, T. J., Kording, E., et al., 2015, *Science Advances*, 1, e1500686
- Schaefer, B. E., Kloppenborg, B., Waagen, E. O., & Observers, T. A. 2023, *The Astronomer's Telegram*, 16107, 1
- Schaefer, Bradley E. December 2022, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 517, Issue 4, pp.6150-6169
- Schaefer, Bradley E., September 2023b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 524, Issue 2, pp.3146-3165

- Schaefer, Bradley E., November 2023a, *Journal for the History of Astronomy*, Volume 54, Issue 4, p.436-455
- Schlegel, David J.; Finkbeiner, Douglas P.; Davis, Marc, June 1998, *The Astrophysical Journal*, Volume 500, Issue 2, pp. 525-553.
- Schlafly, Edward F.; Finkbeiner, Douglas P. , August 2011, *The Astrophysical Journal*, Volume 737, Issue 2, article id. 103, 13 pp.
- Schmidt-Kaler, T. 1982, *Landolt-Börnstein 2013 Group VI Astronomy and Astrophysics*, Volume 2B, Stars and Star Clusters (Berlin: Springer-Verlag), 1
- Schmid, H. M., Kaufer, A., Camenzind, M., et al., 2001, *A&A*, 377, 206
- Shenavrin, V. I., Taranova, O. G., & Nadzhip, A. E. 2011, *Astronomy Reports*, 55, 31
- Shara, Michael M.; Prialnik, Dina; Hillman, Yael; Kovetz, Attay, June 2018, *The Astrophysical Journal*, Volume 860, Issue 2, article id. 110, 11 pp.
- Shore, S. N.; Wahlgren, G. M.; Augusteijn, T.; Liimets, T.; Page, K. L.; Osborne, J. P.; Beardmore, A. P.; Koubsky, P.; Šlechta, M.; Votruba, V., March 2011, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 527, id.A98, 15 pp.
- Smak, J. 2020, *Acta Astron.*, 70, 313
- Sokoloski, J. L., Bildsten, L., & Ho, W. C. G., 2001, *MNRAS*, 326, 553
- Sonnentrucker, P., Foing, B. H., Breitfellner, M., Ehrenfreund, P., 1999, *A&A*, 346, 936
- Spieler, S., Kuhn, M., Postler, J., et al., 2017, *ApJ*, 846, 168
- Starrfield, S. 2008, *RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon*, 401, 4
- Stanishev, V.; Zamanov, R.; Tomov, N.; Marziani, P. , February 2004, *Astronomy and Astrophysics*, v.415, p.609-616
- Straizys, V. & Kuriliene, G. 1981, *Ap&SS*, 80, 353
- Taranova, O. G. & Shenavrin, V. I. 2001, *Astronomy Letters*, 27, 338
- Tomov, T., Kolev, D., Georgiev, L., et al. 1990a, *Nature*, 346, 637
- Tomov, T., Kolev, D., Ivanov, M., et al. 1996, *A&AS*, 116, 1
- Tomov, T., Zamanov, R., Antov, A., Georgiev, L., 1990b, *IBVS* 3466
- Trümper, J.; Hasinger, G.; Aschenbach, B.; Bräuninger, H.; Briel, U. G.; Burkert, W.; Fink, H.; Pfeffermann, E.; Pietsch, W.; Predehl, P.; Schmitt, J. H. M. M.; Voges, W.; Zimmermann, U.; Beuermann, K., February 1991, *Nature*, Volume 349, Issue 6310, pp. 579-583
- Verbunt, Frank; Rappaport, Saul, September 1988, *Astrophysical Journal* v.332, p.193
- Weselak, T., 2019, *A&A*, 625, A55
- Wynn, G. , December 2008, *RS Ophiuchi (2006) and the Recurrent Nova Phenomenon ASP Conference Series*, Vol. 401, proceedings of the conference held 12-14 June, 2007, at

- Keele University, Keele, United Kingdom. Edited by A. Evans, M. F. Bode, T. J. O'Brien, and M. J. Darnley. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2008., p.73
- Yaron, O.; Prialnik, D.; Shara, M. M.; Kovetz, A., April 2005, *The Astrophysical Journal*, Volume 623, Issue 1, pp. 398-410
- Yudin, B. F., Shenavrin, V. I., Kolotilov, E. A., Tatarnikova, A. A., & Tatarnikov, A. M. 2005, *Astronomy Reports*, 49, 232.
- Yungelson, Lev R.; Kuranov, Alexandre G.; Postnov, Konstantin A. , May 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 485, Issue 1, p.851-860
- Zamanov, R. & Marziani, P. 2002, *ApJ*, 571, L77
- Zamanov, R. et al. 2020, *ATel*, #14239
- Zamanov, R. et al. 2021, *ATel.*, #14988
- Zamanov, R., Gomboc, A., & Latev, G. 2011, *Bulgarian Astronomical Journal*, 16, 18
- Zamanov, R. K., Boeva, S., Latev, G. Y., et al., 2018, *MNRAS*, Volume 480, Issue 1, p.1363-1371
- Zamanov, R. K., Boeva, S., Stoyanov, K. A., et al., 2020, *Astronomische Nachrichten*, 341, 430
- Zamanov, R. K., Marchev, V., Marti, J., & Latev, G. Y. 2024, *Bulgarian Journal of Physics*, arXiv:2308.04104
- Zamanov, Radoslav K.; Stoyanov, Kiril A.; Stefanov, Stefan Y.; Bode, Michael F.; Minev, Milen S., June 2023b, *Astronomische Nachrichten*, Volume 344, Issue 5, article id. e20230022
- Zamanov, R.; Boeva, S.; Latev, G. Y.; Semkov, E.; Minev, M.; Kostov, A.; Bode, M. F.; Marchev, V.; Marchev, D., December 2023a, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 680, id.L18, 4 pp
- Zhekov, Svetozar A.; Tomov, Toma V. , October 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 489, Issue 2, p.2930-2940