



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ



Институт по астрономия с национална астрономическа обсерватория

Владислав Драгомиров Марчев

Изследване на симбиотични звезди

ДИСЕРТАЦИЯ

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.....	4
Обща част.....	5
Специална част.....	12
1. Изчисляване на междузвездното поглъщане към симбиотични звезди.....	12
Въведение.....	12
Наблюдения.....	12
Резултати.....	17
Обобщение.....	18
2. Определяни клас светимост на симбиотичните звезди 4U1954+319 и ZZ CMi... ..	19
Въведение.....	19
Наблюдения.....	19
Изчисляване на междузвездната екстинкция за обектите.....	21
Абсолютна звездна величина в V филтър.....	22
Обобщение.....	23
3. Проследяване темпа на акреция по многоцветни фотометрични наблюдения MWC560.....	25
Въведение.....	25
Наблюдения.....	25
Обобщение.....	28
4. Търсене на кратковременна променливост (Фликеринг) при MWC560.....	31
Въведение.....	31
Наблюдения.....	32
Резултати.....	33
Обобщение.....	38
5. Проследяване еволюцията на темпа на акреция между две избухвания на повторната нова RS Oph.....	39
Въведение.....	39
Наблюдателни данни.....	40
Резултати.....	41
Обобщение.....	45
6. Темп на акреция и суперактивно състояние на симбиотичната повторната нова T CrB 46	
Въведение.....	46

Наблюдения.....	48
Резултати.....	49
Обобщение	53
7. Оценка на радиуса на акреционния диск по спектралния наблюдения на T CrB .	55
Въведение	55
Наблюдения.....	55
Резултати.....	58
Обобщение	61
8. Основни резултати	63
9. Публикации по темата на дисертацията.....	65
10. Цитирания	66
11. Участия на конференции.....	71
Благодарности	71
Литература.....	72
Приложения към дисертацията	79
Приложение 1	799
Приложение 2	80
Приложение 3	899

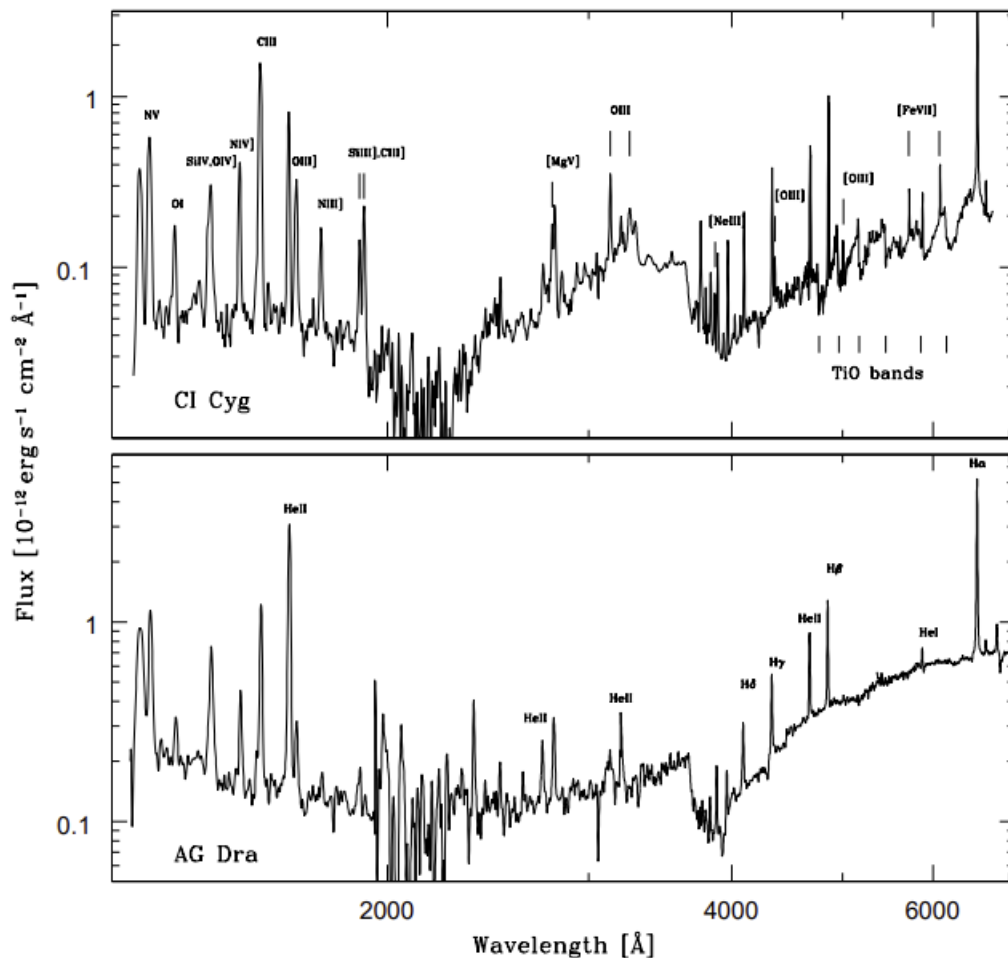
Увод

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.

Обща част

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 ексцес, при D' донора на маса е по-ранен спектрален клас- жълт гигант, а S + IR също е с червен гигант, но показва инфрачервен ексцес (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 йонизиращи 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. Също така могат да бъдат направени много паралели между симбиотичните звезди и други членове от семейството на взаимодействащите двойни системи с еволюирал гигант. Например факт е, че те играят важна роля в разбирането и еволюцията на астрофизични явления като: междувъзвездни джетове, планетарни мъглявини, нови и Свръхнови от тип Ia, източници на супермекко рентгеново лъчение и други. Много от тези явления, касаещи крайните етапи на звездна еволюция, не са добре изучени до момента, но са важни от гледна точка подобряване на нашето разбиране за звездната популация, химическия състав и еволюцията на галактики и извънгалактични обекти.

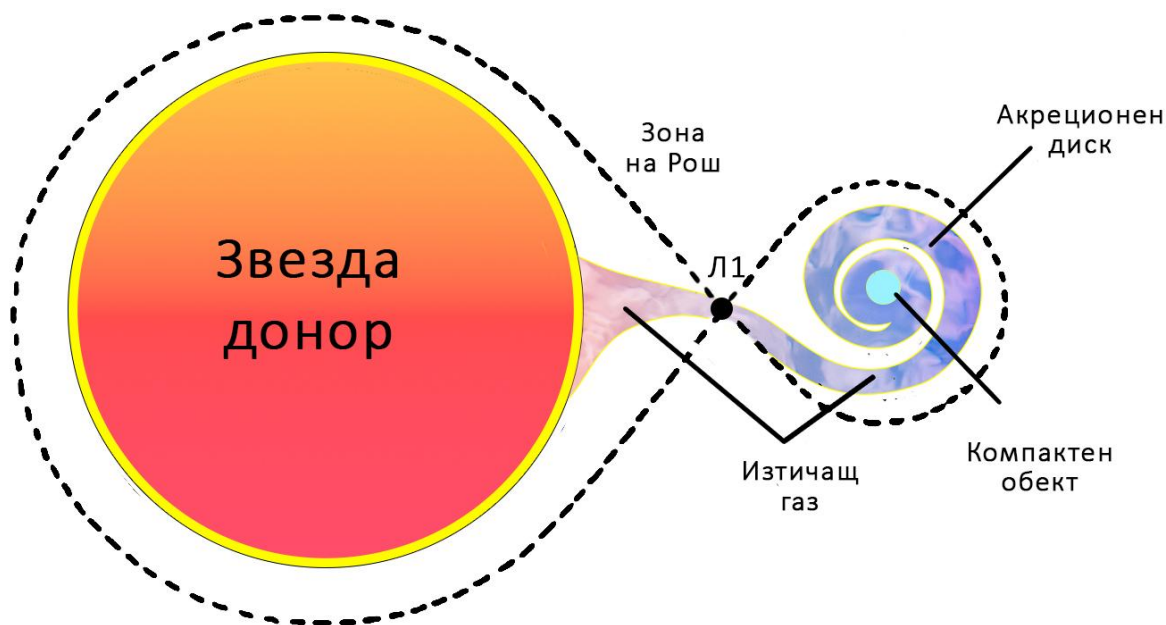
Сред учените, изследващи симбиотичните звезди, няма консенсус за точните параметри и признаци, които биха дефинирали една система като симбиотична или не. Въпреки това е прието, че двойна система, където компактният обект – предимно бяло джудже - акретира вещество с темп по-голям от $10^{-9} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 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 ретнгенова 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 (3500~4000K), 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 компактния обект и в по-малко случаи на прехвърляне на вещество през Лагранжиановата точка L_1 , 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 компактния обект през L_1 . 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 L_1 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 флукутации, нестабилности, които водят до промяна в количеството акретирано вещество. Това от своя страна води и до бързи изменения влъчевите криви в оптичния и ултравиолетовия диапазон. Тези бързи флукутации 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) флукутации в акреционния поток. Физическият произход на фликеринга може да се дължи на турбуленции в акреционния диск, разпространяващи се флукутации, които са възбудени от локални промени във вискозитета 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. Връхлитащата 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 (Hameury 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 шоквата 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 & Bogd'an, 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 Å и нулева звездна величина $6.13 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Å}^{-1}$, и за обикновен Бесел V филтър - ефективна дължина на вълната 5477.7 Å и нулева звездна величина $3.63 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Å}^{-1}$.
2. С получените фотометрични стойности за горещата компонента правим корекция за междузвездното 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:

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

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:

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

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.

Специална част

1. Изчисляване на междузвездното поглъщане към симбиотични звезди

Въведение

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.

В настоящата глава ще демонстрирам процедурата по обработката на спектрите с висока резолюция на някои симбиотични звезди, за да пресметнем междузвездното поглъщане по линията на наблюдение към тях. Тази процедура ще бъде използвана и в по-нататъшните глави за други обекти от подобен тип и правилна оценка на абсолютната им звездна величина.

Наблюдения

Наблюденията са извършени с FEROS при 2.2м телескоп La Silla, European South Observatory (ESO). FEROS е управляван от оптични влакна Echelle спектрограф, даващ висока резолюция от $\lambda/\Delta\lambda = 48000$ и широко покритие по дължи на вълната от 4000 Å до 8900 Å в една експозиция, както и високо количество сигнал (Kaufer et al. 1999). Използвайки камерата $2k \times 4k$ EEV CCD, са получени 39 порядъка на ешел-спектъра. Спектрите са редуцирани със специално пригодения за FEROS софтуер, вграден в системата ESO-MIDAS. 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):

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

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

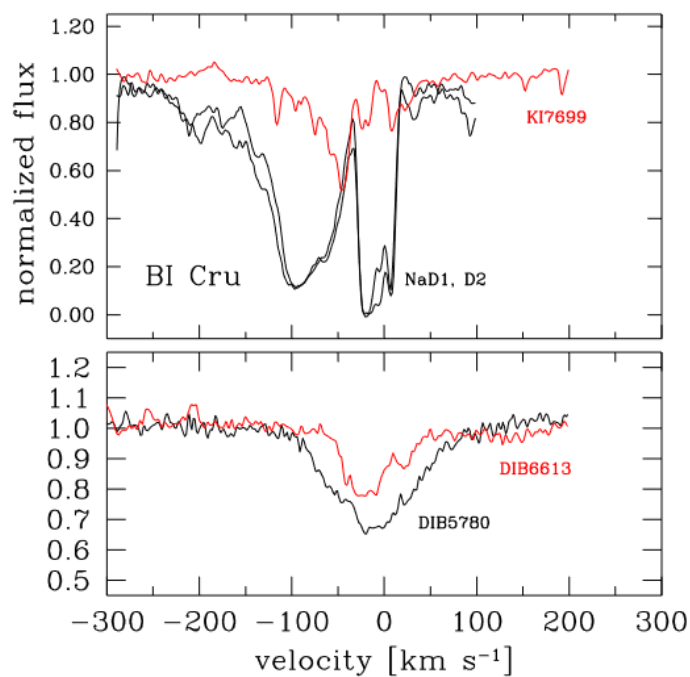
$$E_{B-V} = 5.1W_{6613} + 0.0008. \quad (3)$$

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).

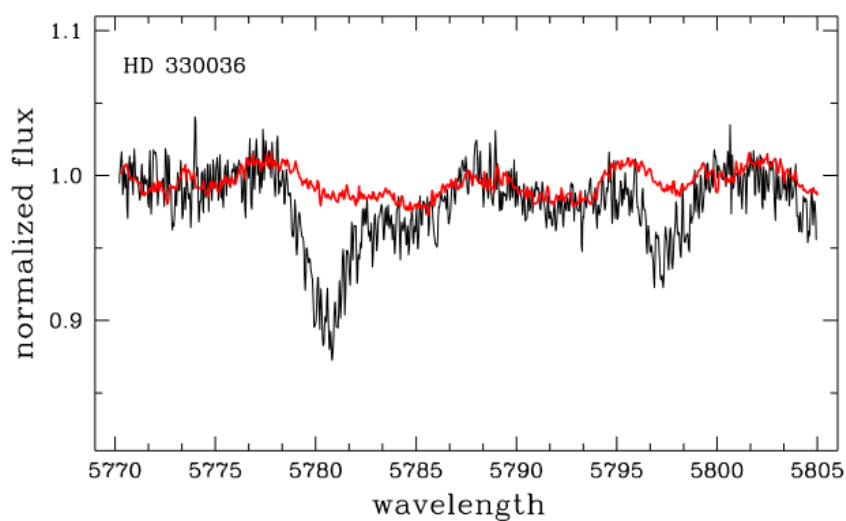
За всеки от обектите измервам еквивалентната ширина на трите ДИП-а, но за да е по-точно апроксимирам спектъра на червения гигант в и около самите ДИП-ове със спектр от подобен тип, взет от архива ELODIE (Moultaka et al. 2004,) и полеви звезди по диаграмата на Hertzsprung – Russell (Bagnulo et al. 2003).

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).

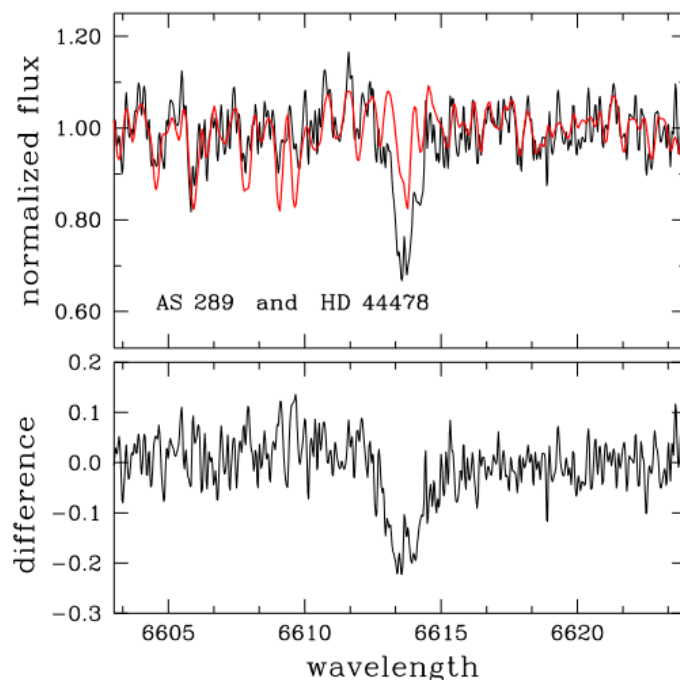
На Фиг. 5 е начертан спектъра на AS 289 заедно с този на яркият червен гигант HD 44478 (μ Gem, M3IIIab). Тази фигура илюстрира как можем да получим по-точна стойност за еквивалентната ширина при изваждането на приноса на червения гигант към ивицата на ДИП 6613.



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

Резултати

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.

AS 289 (V343 Ser): за този обект намирам в литературата стойност $E_{B-V} = 1.18$ (Luna & Costa 2005), а моят резултат е $E_{B-V} = 1.28 \pm 0.07$.

BI Cru (Hen 3-782): тук за референтна стойност се ползва получената от Rossi et al. (1988) $E_{B-V} = 1.5 \pm 0.05$, а моят резултат е $E_{B-V} = 1.6 \pm 0.1$, вижда се, че е доста сходен, но и с по-добра точност.

HD330036 (PN Cn 1-1): този обект е пример за комплексна среда, създадена от симбиотична двойка. При него се наблюдават 3 прахови обвивки около цялата система (Angeloni et al. 2007). Исторически има няколко измервания на екстинкцията към този обект със следните стойности $E_{B-V} = 0.28$ Lutz (1984) и $E_{B-V} = 0.41$ и Bhatt & Mallik (1986), тук полученият резултат е $E_{B-V} = 0.63 \pm 0.10$, който е значително по-висок, но не надвишава позволената горна граница.

V2756 Sgr (AS 293): при този обект имаме само ДИП 5780, но полученият резултат $E_{B-V} = 0.33 \pm 0.05$ е в близко съответствие с този на Luna & Costa (2005) $E_{B-V} = 0.32$ и не надвишава поставения лимит.

V2905 Sgr (AS 299): предишните данни за този обект са съответно $E_{B-V}=0.72\pm0.15$ от Pereira, Landaberry & da Conceicao (1998) и $E_{B-V}=0.43$ на Luna & Costa (2005). Важно е да се спомене, че за този обект спектърът, в сравнение с този на 51 Gem, за SIMBAD, дава M4III спектрален клас, който съответства на V2905 Sgr. В спектърът на звездата от интерес можем лесно да различим двата ДИП-а 5780 и 6613, но липсва ДИП 5797, който е с много ниска амплитуда и не може да бъде използван за целите на това изследване. Крайната измерена стойност е $E_{B-V} = 0.30 \pm 0.05$, а максималната позволена е в границите $E_{B-V} = 0.27 - 0.32$.

V417 Cen (Hen 3-977): за този обект предишно изследване на Stoyanov et al. (2014) дава стойност от $E_{B-V} = 0.95 \pm 0.10$, но това изчисление прави предположението, че линията на KI7699 е непроменлива. Докато сегашното изчисление взема това предвид и дава по-точната стойност от $E_{B-V}=1.52\pm0.10$.

PN Sa 3-22 (също наричан St 2-22) е симбиотична звезда с биполярни джетове, с висока скорост $\approx 1700 \text{ km s}^{-1}$ (Tomov et al. 2017). Предишно изчисление на Mikolajewska, Acker & Stenholm (1997) определя $E_{B-V} = 1.0$, а настоящото направено в този труд, е $E_{B-V} = 0.81 \pm 0.1$. Имайки предвид горната граница от $E_{B-V} = 0.81 - 0.94$, се вижда по-добро сходство, отколкото предишното изчисление.

Обобщение

В тази глава беше представен метод за пресмятане на междузвездната екстинкция (почервяване) 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 почервяване. Точното определяне на междузвездната екстинкция е ключово за по-нататъшната оценка и пресмятане на темпа на акреция при симбиотичните звезди.

2. Определяни клас светимост на симбиотичните звезди 4U1954+319 и ZZ CMi

Въведение

Целта на тази глава е да се определи по-точно класа светимост на известните симбиотични звезди 4U1954+319 и ZZ CMi. Точната оценка на клас светимост дава възможност да се определят параметрите на хладния компонент и приноса му да бъде по-точно отделен от общата светимост на двойната система. Към Януари 2024 SIMBAD Astronomical database (Wenger et al. 2000) ни дава M4/5III за 4U1954+319, позовавайки се на (Masetti et al. 2006) и респективно за ZZ CMi M6I-IIep (Shenavrin et al. 2011). Събрани са спектрални и фотометрични данни за да се определят класовете светимост на тези обекти. Методиката на изчисление може да бъде използвана за други по-малко изследвани симбиотични звезди. Спектърът на симбиотичните звезди е комбинация от емисионни линии на горещия компонент и мъглявината, както и от абсорбционни линии на донора на маса. Известни са два основни механизма за трансфер на маса между компонентите - звезден вятър от гиганта и прилив на вещество през зоната на Рош (Roche-lobe overflow). Акретиращото вещество върху горещата компонента произвежда емисионно лъчение с висока енергия и на практика създава симбиотичния феномен (Mikołajewska 2007).

Наблюдения

Пет оптически спектъра са събрани за 4U1954+319 и два за ZZ CMi с ESpeRo Echelle спектрографа (Bonev et al. 2017) на двуметровия телескоп при Националната астрономическа обсерватория (НАО) „Рожен“, България. Журналът на проведените наблюдения може да бъде видян в Таблица 3, където са дадени: началото на експозицията, нейната продължителност, съотношението сигнал-шум около 6570 Å, измерването на еквивалентната ширина на H α и трите ДИП-а, който използвахме в предишната глава за да определим междузвездното почервяване.

Таблица 3. Спектрални наблюдения на 4U1954+319. В таблицата са дадени датата на извършеното наблюдение (във формат YYYY-MM-DD HH:MM), продължителността на експозицията, съотношението сигнал/шум, и еквивалентната ширина на DIB 5780, DIB 5797, DIB 6613.

object/date	exposure [min]	S/N	EW($H\alpha$) [Å]	EW ₅₇₈₀ [Å]	EW ₅₇₉₇ [Å]	EW ₆₆₁₃ [Å]
4U1954+319						
2015-08-03 23:28	40	42	+1.3	0.31	0.16	0.16
2016-06-18 23:41	40	70	+0.3	0.39	0.22	0.14
2018-04-03 00:06	60	60	+1.4	0.35	0.20	0.14
2018-09-01 20:45	60	75	+1.0	0.28	0.14	0.13
2022-04-12 22:55	60	53	+0.5	0.31	0.14	0.15
ZZ CMi						
2023-12-27 00:34	45	70	-7.8	—	—	—
2024-01-26 18:56	105	45	-4.8	—	—	—

Фотометрични наблюдения във филтрите В и V са извършени от 3 локации, като няколко звезди, намиращи се близко до обектите, са използвани за стандарти, а резултатите са видими в Таблица 4:

1. 1.88м телескоп (Azzam et al. 2010) в Kottamia Astronomical Observatory, Египет.
2. 50/70см Шмид телескоп Националната Астрономическа Обсерватория (НАО) „Рожен“, България.
3. 40см телескоп University of Ja'en Telescope, Испания (Marti et al. 2017).

Таблица 4. BV фотометрия на 4U1954+319 и ZZ CMi. В таблицата са дадени датата на наблюдение (във формат YYYY-MM-DD HH:MM), телескопа, броя експозиции, и звездна величина на В и V с изчислената грешка.

object/date	telescope	N	B	V
4U1954+319				
2023-08-08 18:47	1.88m	3	12.07 ± 0.03	9.93 ± 0.02
2023-12-05 16:32	1.88m	3	12.08 ± 0.01	9.97 ± 0.01
2023-12-06 16:32	1.88m	4	12.09 ± 0.01	9.97 ± 0.01
2024-01-22 18:21	40cm	2		10.05 ± 0.03
ZZ CMi				
2023-12-12 23:19	50/70cm	3	11.04 ± 0.01	9.57 ± 0.01
2023-12-12 23:30	50/70cm	2	11.06 ± 0.01	9.57 ± 0.01
2024-01-22 18:50	40cm	2	11.3 ± 0.1	10.06 ± 0.05

Изчисляване на междувездната екстинкция за обектите

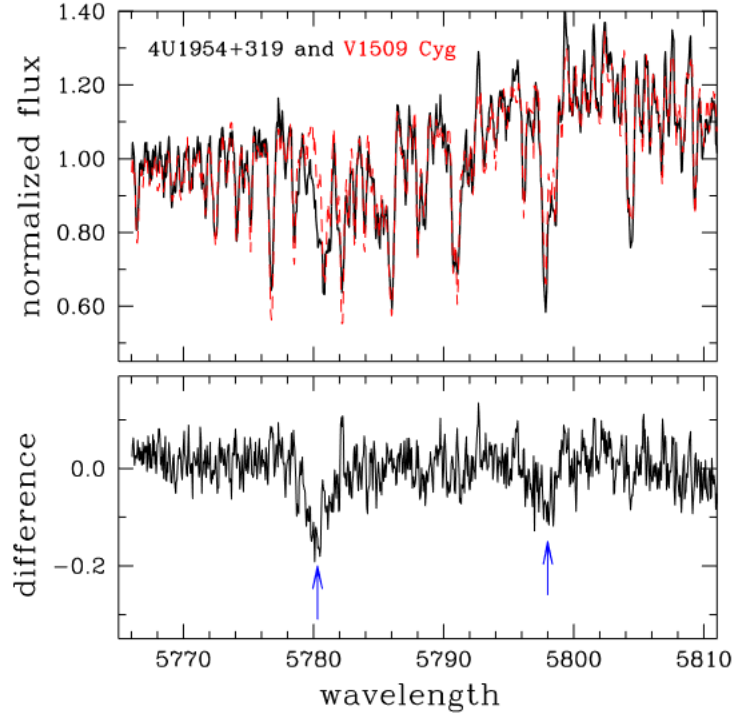
Използвайки вече позната методология от предишната глава, тук ще бъде пресметната междувездната екстинкция до двата обекта. Първо поставяме горната граница и лимит на почервявяването, позовавайки се на NASA/IPAC Galactic Reddening and Extinction Calculator uses the Schlegel, Finkbeiner & Davis(1998), и респективно намираме за 4U1954+319 $E_{B-V} \leq 1.68$ и за ZZ CMi $E_{B-V} \leq 0.04$. След това от спектъра на 4U1954+319 се изважда приноса на червения гигант (в този случай със спектър на V 1509 Cyg, получен в нощта на 26-ти Ноември 2023 при същите условия). Без да извадим приноса на гиганта, не бихме могли да измерим еквивалентната ширина на ДИП-овете, защото те дори не са забележими в оригиналния спектър. На Фиг. 6 се вижда преди и след изваждането. Измерените еквивалентни ширини са показани в Таблица 3, със съответните изчислени грешки $\pm 5\%$ за ДИП 5780, $\pm 7\%$ за ДИП 6613 и $\pm 10\%$ за ДИП 5797. Имайки предвид ниска максимална стойност за ZZ CMi, не се наблюдават ДИП-овете и очаквано нямаме почервявяване при тази звезда. Финално се използват вече познатите от миналата глава уравнения, които свързват еквивалентната ширина с големината на екстинкцията Puspitarini, Lallement & Chen (2013):

$$E(B - V) = 2.3EW_{5780} + 0.0086$$

$$E(B - V) = 5.1EW_{6613} + 0.0008$$

$$E(B - V) = 6.3EW_{5797} + 0.0086$$

Крайният резултат за екстинкцията се получава: за 4U1954+319 $E_{B-V}=0.83\pm 0.09$ и за ZZ CMi $E_{B-V}=0$.



Фиг. 6. Спектър на 4U1954+319 (черна линия) и V1509 (червена линия). Изваждането на червения гигант от спектъра показва наличието на междувъздушни дифузни ивици на поглъщане в спектъра на 4U1954+319. DIB 5780 и DIB 5797 са показани със сини стрелки.

Абсолютна звездна величина в V филтър

Необходимо е да се определи разстоянието до двата обекта и за целта се използва GAIA eDR3 (Gaia Collaboration et al. 2021) модела по Bailer-Jones et al.(2021). Така се получава респективно $d = 3390 \pm 60 \text{ pc}$ до 4U1954+319 и $d = 1240 \pm 20 \text{ pc}$ до ZZ CMi. За да определим абсолютната звездна величина използваме формулата $M_V = m_v - A_V - 5 \log \left(\frac{d}{10} \right)$, където A_V е екстинкцията във филтър V. A_V на своя ръка се определя от зависимостта $A_V = 3.1 E_{B-V}$.

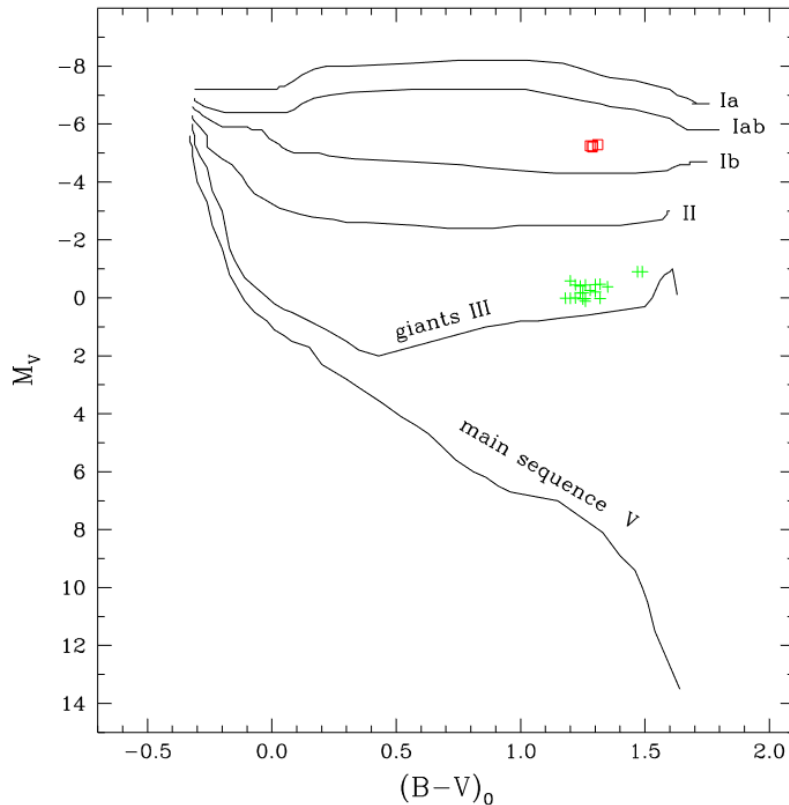
Така използвайки данните от Таблица 4 и APASS DR10 фотометрия ($V=10.01$, $B=12.13$), се получава стойността на абсолютната звездна величина във V филтър на 4U1954+319 $M_V = -5.23 \pm 0.08$.

Същите изчисления на база на стойностите от Таблица 4 и предишни публикувани данни от Zamanov et al. (2021) за ZZ CMi се получава $M_V = -0.27 \pm 0.2$.

На Фиг. 7 е представена диаграмата цвят-величина, където стойностите за $(B - V)_0$ и M_V за различните класове светимост са взети от Schmidt-Kaler (1982) и Straižys & Kuriliene (1981), респективно и така е поставена базата за сравнение (черната непрекъсната линия). Поглеждайки към 4U1954+319 (червените квадрати), виждаме, че

тя се позиционира над клас Ib (супергиганти) и под клас Iab (умерени супергиганти). Докато ZZ CMi се позиционира малко над клас III (гиганти) и под клас II (ярки гиганти).

При симбиотичните звезди потокът във V филтър физически може да се дължи на три възможни източници: хладния гигант, горещата компонента или мъглявината. При тези две звезди, които биват разглеждани, спокойно може да се направи оценката, че главният източник е донорът на маса. Поглеждайки към стойностите на еквивалентната ширина на основната емисионна линия $EW(H_\alpha)$, се вижда, че приносът на останалите източници не е по-голям от 10% за 4U1954+319 и 15% за ZZ CMi. Така финално може да се каже, че донорът на маса при 4U1954+319 е от клас Ib, а този при ZZ CMi е от клас III.



Фиг. 7. Диаграма цвят-величина M_V към $(B - V)_0$, за 4U1954+319 (червени квадрати) и ZZ CMi (зелени плюсове). С черна линия са представени отделните класове светимост за сравнение.

Обобщение

4U1954+319 е част от малка група двойни системи с акретираща неутронна звезда и донор от тип късен гигант (Masetti et al. 2006), наречени симбиотични рентгенови двойни звезди. Тази комбинация от явления се среща рядко и има познати само около десетина такива обекта (Yungelson et al. 2019). 4U 1954+319 е класифицирана от Hinkle et al. (2020) като симбиотична рентгенова двойна звезда със M супергигант и масата на супергиганта е приблизително $\sim 9 M_\odot$. Има още една друга известна такава звезда с донор M супергигант и тя е CXOGC J174528.7-290942 (Gottlieb et al. 2020). Въпреки че,

това е рядка система, тя следва еволюционния трак на типична високомасова рентгенова двойна система (Tauris et al. 2017), произлизайки от две масивни и горещи звезди за прародители. Орбиталният ѝ период все още не е измерен точно, но е оценен от Hinkle et al. (2020) на ≥ 3 год. На база на направените спектрални и фотометрични наблюдения бяха получени за 4U1954+319 $E(B - V) = 0.83 \pm 0.09$, $M_V = -5.23 \pm 0.08$ и клас светимост Ib (супергигант) за донора на маса.

ZZ CMi е симбиотична звезда, състояща се от бяло джудже и червен гигант, с орбитален период ~ 440 дни (Wiecek et al. 2010). Нейната дълго-периодична променливост е първо регистрирана от Tshernova (1949). Taranova & Shenavrin (2001) я класифицират като M4.5-5 III, а по-късно Shenavrin et al. (2011) получава M6 I-IIep. Каталогът GCVS я класифицира като M6 I-IIep на база на Kholopov et al. (1998) и Samus et al. (2017). Оптичният спектър на ZZ CMi е доминиран от червения гигант със слаби и променливи емисионни линии на H α , H β , [OIII], and [Ne III] (Iijima 1984). Фликеринг в U филтър с звездна величина 0.1 и изтичане на поток със скорост около 150 km s⁻¹ са забелязани от Zamanov et al. (2021). ZZ CMi има две рентгенови топлинни компоненти - мека и твърда, което я прави рентгенов източник от тип β/δ (Luna et al. 2013). Някои от пекулиарностите на ZZ CMi се отличават от класическите симбиотични звезди, като например цветовете са по-сини в минимума, и силата на емисионните линии е необичайна $H_\gamma > H_\beta$ (Belczynski et al. 2000). От данните и изчисленията в този труд за ZZ CMi бяха получени $M_V = -0.27 \pm 0.2$, $E(B - V) = 0$ и донор на маса от клас светимост III (гигант).

3. Проследяване темпа на акреция по многоцветни фотометрични наблюдения MWC560

Въведение

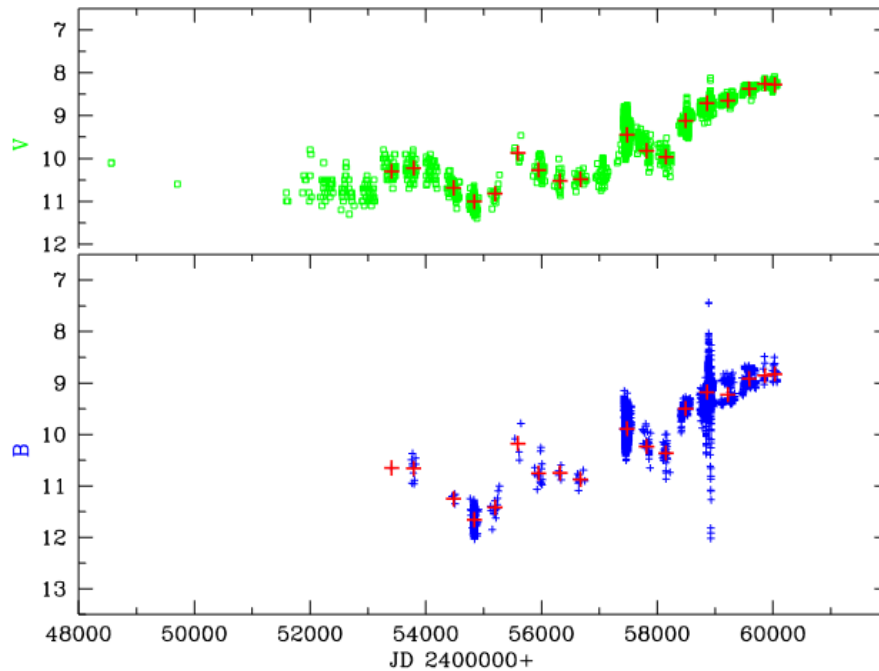
В тази глава ще представя резултатите от използването на вече разгледания метод за определяне на параметрите двойни системи като ефективна температура, ефективен радиус, светимост и темп на акреция на компакния обект. Методът е приложен за симбиотичната звезда MWV560, използвайки данни от многоцветна фотометрия. В предните две глави бяха разгледани методи за определяне на клас светимост и междузвездна екстинкция, които ще бъдат необходими за точното пресмятане на темпа на акреция.

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 $H\beta$ 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 $P_{orb} \approx 330.8 \text{ d}$.

Наблюдения

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. 8 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 прибягна до осредняването. В Таблица 5 са представени фотометричните данни, които са използвани за тази работа, както и финалните резултати.



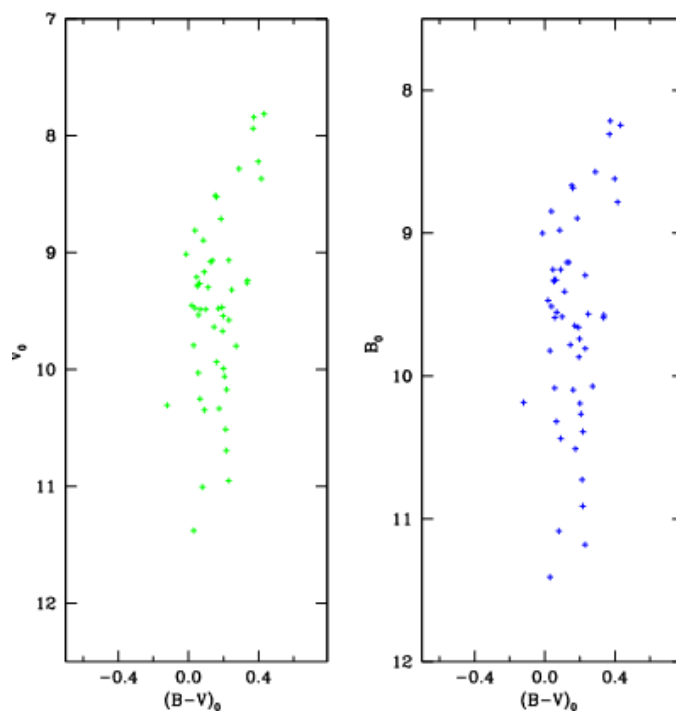
Фиг. 8. Криви на блясъка за периода от 1987 до 2023 на MWC560 по данни от AAVSO в В и V филтри. С червените плусове са показани средните стойности за всеки наблюдателен сезон.

Резултати

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 $M_{wd} = 0.9M_{\odot}$, радиус $R_{wd} = 6221km$ (Zamanov et al. 2011).

Пресметнатите стойности за всеки от параметрите при съответната наблюдателна точка са представени в Таблица 5. Първите 3 колони са съответно Юлианският ден, измерените или осреднени стойности за B 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 $10^{-7}M_{\odot}yr^{-1}$. Визуално тези данни са представени във Фиг. 10, 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. 9. 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 $(B - V)_0$.

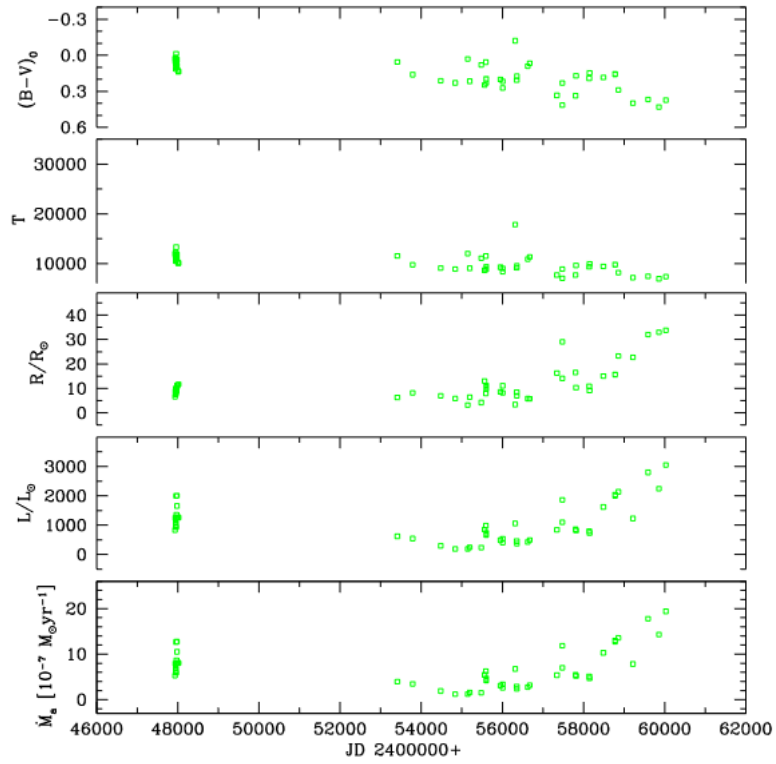
Обобщение

На представената диаграма цвят-величина (Фиг. 9), $(B - V)_0$ 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 B 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. 10. 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 $\dot{M}_a[10^{-7}M_\odot yr^{-1}]$.

Таблица 5. 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

4. Търсене на кратковременна променливост (Фликеринг) при MWC560

Въведение

Наличието на фликеринг при симбиотичните звезди е доказателство за изменение в темпа на акреция. Това ни дава ценна информация за състоянието на обекта и представлява интерес това изследване на този тип звезди. Фликеринг при MWC560 се детектира при всички наблюдения между 1984 и Май 2018 (Lucy et al. 2020 и посочените източници вътре). Променливостта се проявява в U и B филтри с големина от 0.1 до 0.4 mag и квази периодичност от 11 до 160 min (Tomov et al. 1996; Georgiev et al. 2022). Кратковременната променливост не се наблюдава след Октомври 2018 (Marchev et al. 2022, 2023). Правейки паралел с еволюцията на темпа на акреция, се вижда, че фликерингът изчезва при стойности $\geq 1.10 - 6 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Това може да се дължи на едно от следните две предположения: (1) акреционният диск е станал стабилен и няма флуктоации, които да генерират фликеринг, или (2) около акреционния диск се формира обща обвивка, поради по-голямото количество вещество и невъзможността му то да акретира напълно. Върху повърхността на компакния обект се натрупва като „пашкул“, обгръщайки диска, и създава оптически плътна среда, която практически екранира фликеринга.

Много от характеристиките на фликеринга могат да бъдат обяснени с модели, описващи флуктоациите на акреционния диск, където изменения в скоростта на обмен на маса се разпространяват и достигат до компакния обект (Lyubarskii 1997; Kotov et al. 2001, Scaringi et al. 2012). Ако бъде прието, че първата хипотеза е вярна, то тези резултати дават горна граница за стабилност, след която не се наблюдават флуктоации $\approx 1.10 - 6 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

Изчезването на фликеринга при звездата отговаря на светимост на горещата компонента от $1600 L_{\odot}$ и при темп на акреция по-висок от $1 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ не се наблюдава кратковременна променливост.

Наблюдения

Това изследване се базира на фотометрични наблюдения, извършени през двата последователни наблюдателни сезона (2020/2021 и 2021/2022) на MWC560. Тук се проследява наличието или отсъствието на фликеринг на обекта, както и изменения в неговата яркост. Също така се прави и сравнение между спектъра на звездата и звезди от друг тип, с цел да се намерят сходства и да се изясни звездната конфигурация на системата. Дневникът на наблюденията е представен в Таблица 6.

CCD фотометрията, представена тук, е направена с 40см телескоп на Астрономическата обсерватория на Шуменския университет „Епископ Константин Преславски“ (Kjurkchieva et al. 2020). Спектралните наблюдения са извършени с ESPERO Echelle спектрограф (Bonev et al. 2017), монтиран на двуметровия телескоп на НАО „Рожен“.

Звездата е наблюдава 7 нощи в периода 2020-2022 в два филтъра Sloan g' и r' със съответните експозиции: 10 секунди за g' и 5 секунди за r' . Пълната ширина на полудължината на максимума (FWHM) при g' е 3 пиксела, а при r' - 4 пиксела. Извършена е стандартна процедура по обработка на изображенията (коригиране спрямо ток на тъмно и плоско поле), като в случая е използван софтуер MaxImDL 6.2. Използвани са 4 стандартни звезди и техните звездни величини са взети от каталог APASS DR9 (Henden et al. 2015). Използвани са следните две уравнения за трансформиране на данните (Kjurkchieva et al. 2020):

$$r' = r'i + 20.824 + 0.067 \times (g' - r')i$$

$$g' = g'i + 20.669 + 0.107 \times (g' - i')i$$

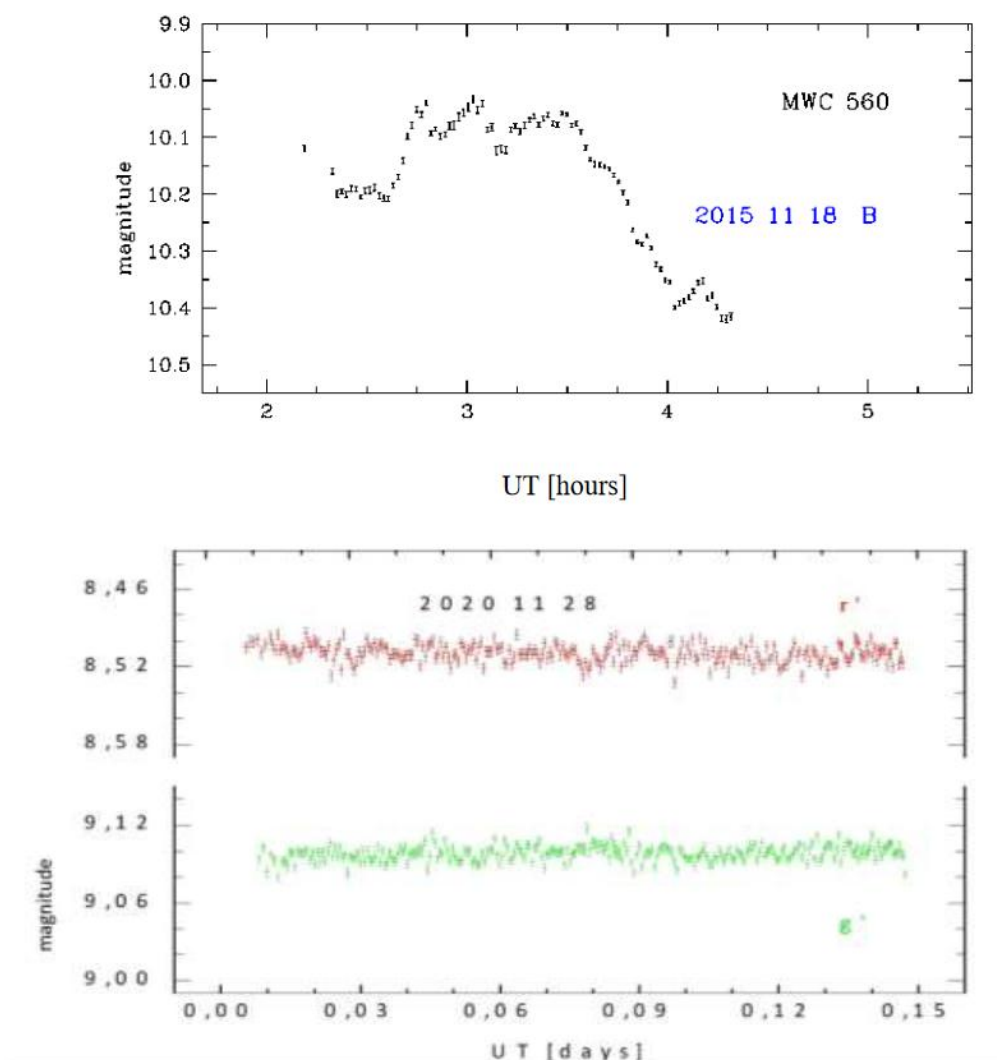
Представено е сравнение на спектъра на MWC560, направен на 6.12.2019, когато звездата вече е във високо състояние и липсва фликеринг, с този на XX Oph, направен на 13.06.2019.

Таблица 6. Дневник на наблюденията с 40см телескоп на Шуменската обсерватория

Date	Band	UT start – UT end hh:mm – hh:mm	N _{pts}	Average [mag]	σ [mag]	Amplitude [mag]
28 November 2020	g'	0:12 – 3:32	263	9.096	0.006	< 0.04
	r'		264	8.490	0.007	
22 February 2021	g'	19:16 – 21:45	363	9.149	0.014	< 0.07
	r'		361	8.54	0.015	< 0.08
25 April 2021	g'	18:30 – 20:01	116	9.072	0.015	< 0.05
	r'		116	8.524	0.011	< 0.06
20 October 2021	g'	0:30 – 2:28	216	8.771	0.011	< 0.05
	r'		214	8.26	0.013	< 0.06
08 February 2022	g'	18:56 – 22:30	307	8.798	0.017	< 0.09
	r'		229	8.351	0.016	< 0.09
10 February 2022	g'	20:10 – 22:44	191	8.786	0.009	< 0.042
	r'	20:13 – 22:23	154	8.337	0.008	< 0.042
11 February 2022	g'	20:30 – 23:10	257	8.801	0.014	< 0.05
	r'		256	8.302	0.035	< 0.11

Резултати

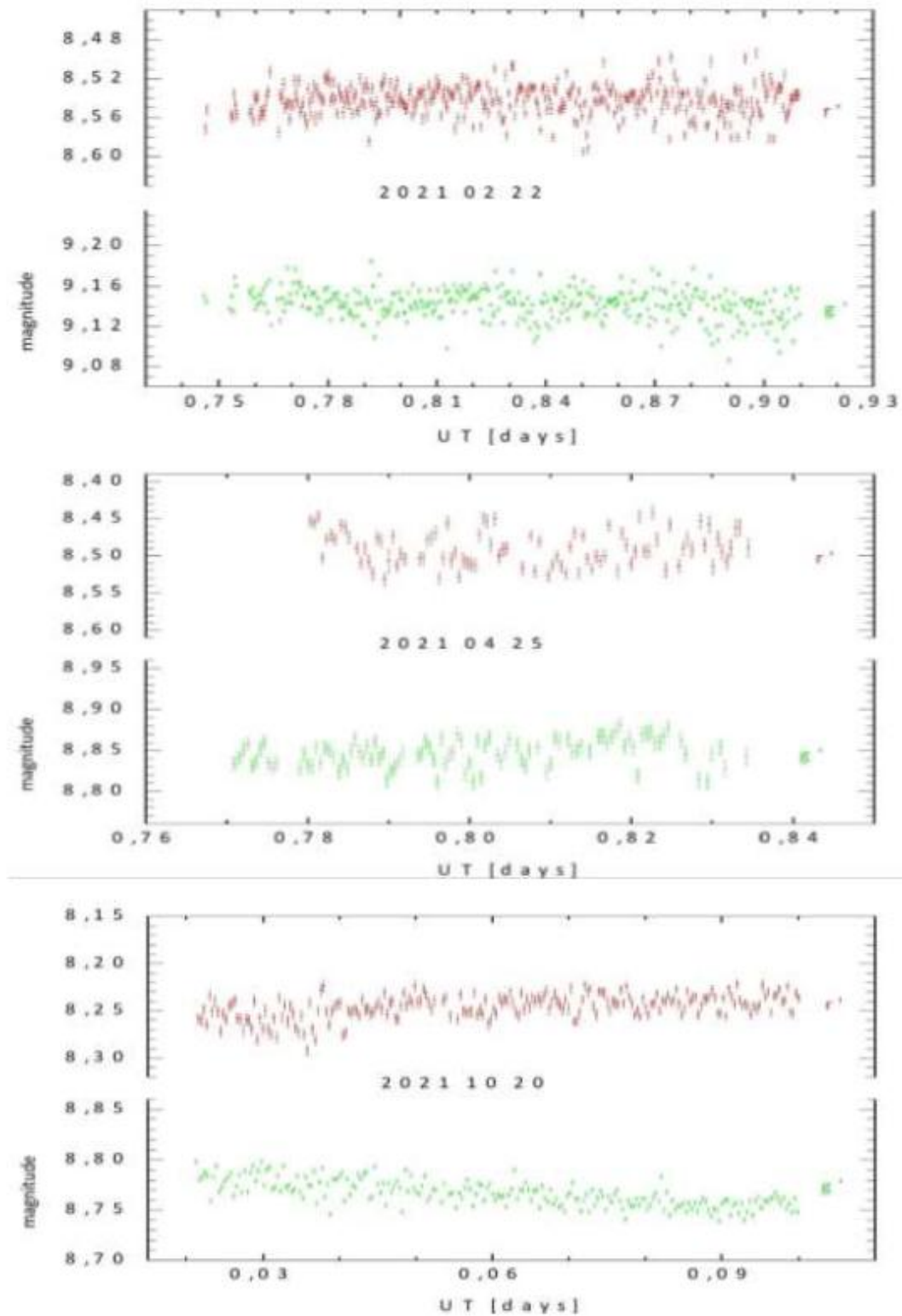
На Фиг. 11 са поставени за сравнение кривите на блясъка на MWC560 от Ноември 2015 и Ноември 2020. Данните от 2015 са получени с 50/70см Шмид телескоп на НАО Рожен и ясно се вижда фликеринг с големина около 0.4 mag. Сравнени с данните от 2020, където се забелязва променливост не по-голяма от 0.04 mag или практически отсъства фликеринг. Изображението потвърждава, че продължава да отсъства фликеринг (Zamanov et al. 2020). По време на наблюденията от 28-ми Ноември 2020 са направени 263 точки в двата филтъра, в продължение на 3.5 часа. Средните стойности са съответно: $g' = 9.096 \pm 0.006$ и $r' = 8.490 \pm 0.007$.



Фиг. 11. Наблюдения на MWC560 при наличието на фликеринг (НАО „Рожен“ 2015) и при отсъствието (Шумен 2020).

На Фиг. 12 са представени 3 нощи фотометрични наблюдения от обсерваторията в Шумен, където продължава да се забелязва отсъствието на фликеринг (Zamanov et al. 2021).

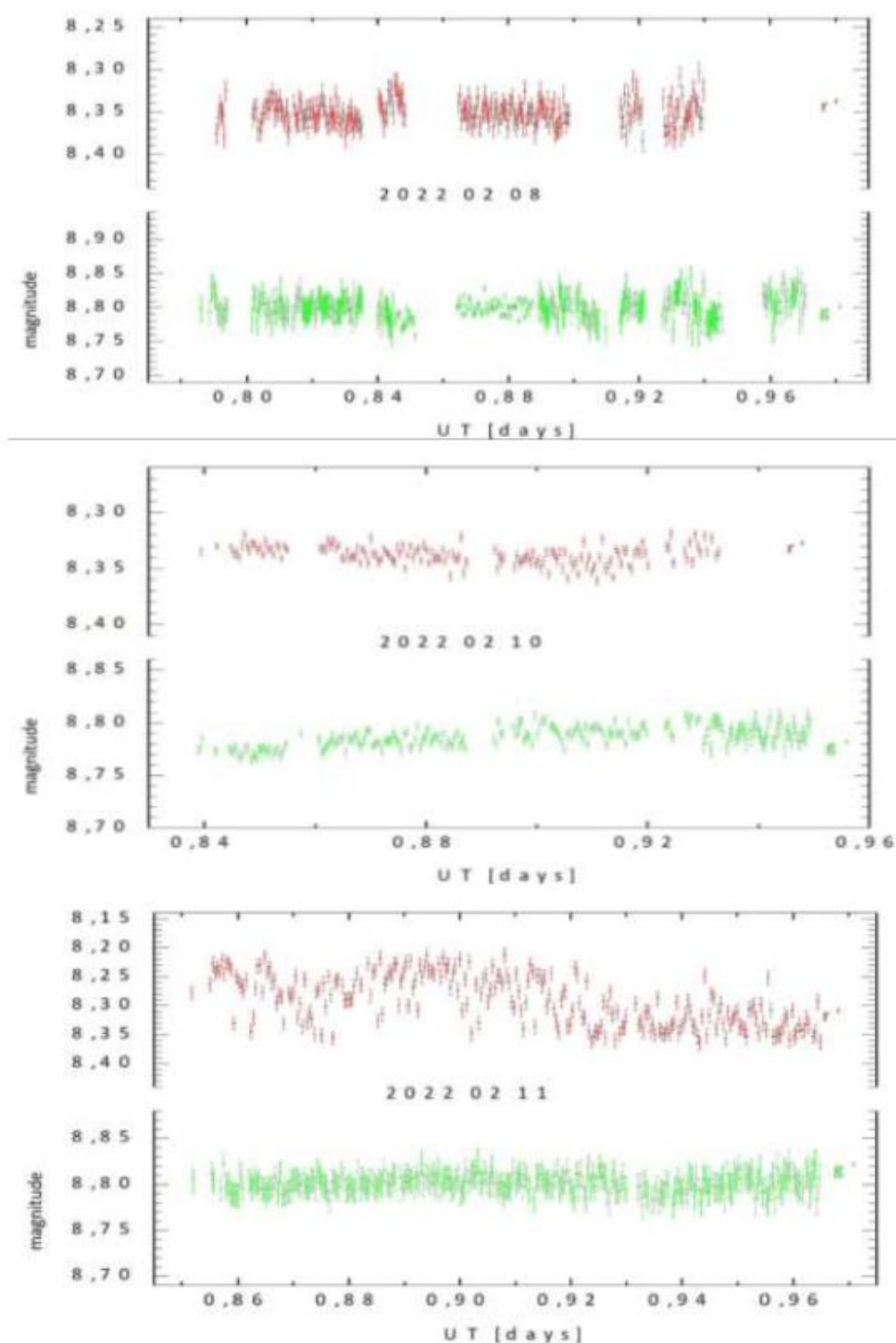
През 2022 г. са проведени още 3 наблюдателни сесии и резултатите са видими на Фиг. 3. При всяка от последователните нощи отсъства фликеринг, но интерес представлява и яркостта на обекта, която остава сравнително висока и постоянна, но малко по-ниска от наблюдавания максимум през Октомври 2021 г. Забелязва се едно продължително високо състояние през 2022 г., което е в съгласие с установеното за период 2018-2021 г. (Kondratyeva et al. 2021).



Фиг. 12. Наблюдения на MWC560, направени през 2021 г.

Периодът на покачваща се яркост на обекта 2016-2020 г. подсказва наличието на разширяваща се обща обвивка около MWC560 (Ando et al. 2021). Образуването на такава

обвивка, както и частичното, или напълно разрушение на акреционния диск са посочени от (Kondratyeva et al. 2021).

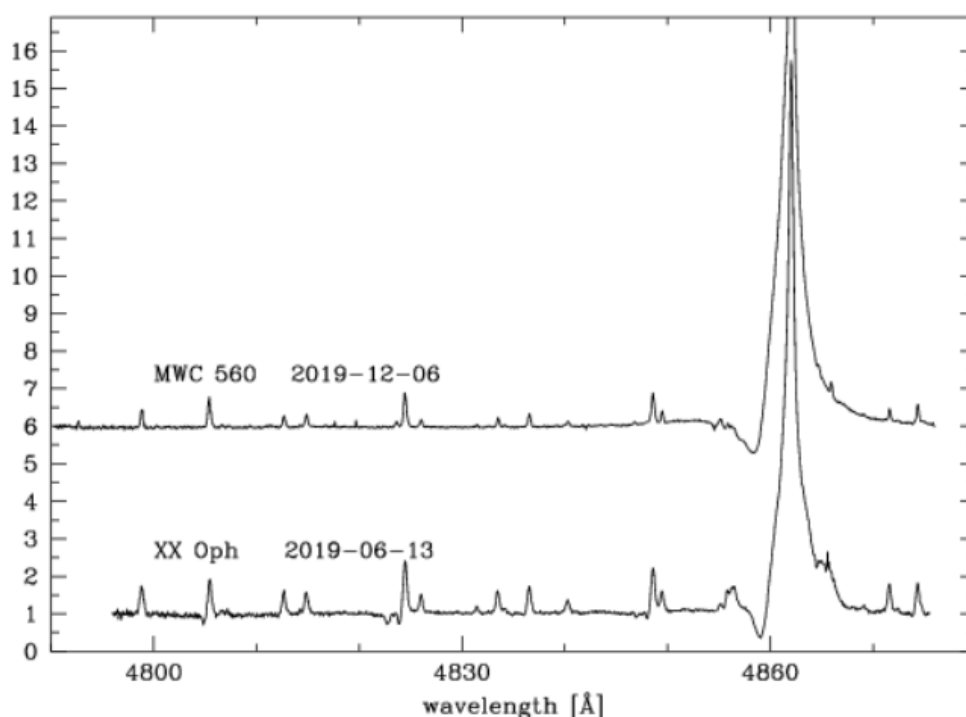


Фиг. 13. Наблюдения на MWC560 през 2022 г.

Изследване на изменение на яркостта на MWC560 за кратък период от време (два месеца) е направено от Munari & Dallaporta (2021). Те докладват връх на яркостта на 27-ми Октомври 2021 г. Спектралните наблюдения, направени през Ноември 2021 г., бързи промени, което е в потвърждение на идеята за обща обвивка (Goranskij et al. 2021).

Фотометричните данни, събрани от Шуменския телескоп, показват максимум на яркостта на 20-ти Октомври 2021 г. с тези стойности $g' = 8.771 \pm 0.011$ и $r' = 8.26 \pm 0.013$, което е в съгласие с представеното от Munari & Dallaporta (2021). Анализ на данните от Февруари 2022 г. показва, че системата все още се намира в сравнително високо състояние, което най-вероятно се дължи на силна обща обвивка.

На Фиг. 14 са сравнени спектрите на MWC560 и XX Oph, получени с двуметровия телескоп на НАО „Рожен“. Вижда се, че те са почти идентични. По времето, когато са получени спектрите, в системата вече отсъства фликеринг и вероятно тя се намира в състояние на формиране на обща обвивка, поради покачения темп на акреция (Goranskij et al. 2018).



Фиг. 14. Сходство между спектрите на MWC560 и XX Oph, получени на НАО „Рожен“

От наблюденията на MWC560 през последните три десетилетия се знае, че тя се състои от He-Мира тип гигант и бяло джужде (Lucy et al. 2020). XX Oph е една от двете звезди, посочени като „железни звезди“ (Bopp & Howell, 1989), заради наличието на линии на желязото във видимата област на спектъра. Няма ясни доказателства за вида на компонентите на XX Oph (Howell et al. 2009). Сходството между спектрите на двете звезди, показано на Фиг. 14, подсказва, че вероятно компонентите на XX Oph са червен гигант и бяло джужде. Върху бялото джужде има силна акреция и системата е обвита в

обща оптически плътна среда. Сходствата могат да бъдат разглеждани и в обратна посока, а именно, че MWC560 се държи като „желязна звезда“.

Обобщение

Извършените наблюдения на MWC560 в рамките на два наблюдателни сезона потвърждават липсата на фликеринг. Яркостта на системата остава висока, с максимум през Октомври 2021 г., потвърдено от Munari (2021). Липсата на фликеринг и повишената яркост най-вероятно се дължат на широка оптически плътна обща обвивка, която екранира флуктоациите на акреционния диск около компактният обект.

От сходствата между спектрите на MWC560 и XX Ori можем да направим предположение, че компонентите на XX Ori са червен гигант и бяло джудже.

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

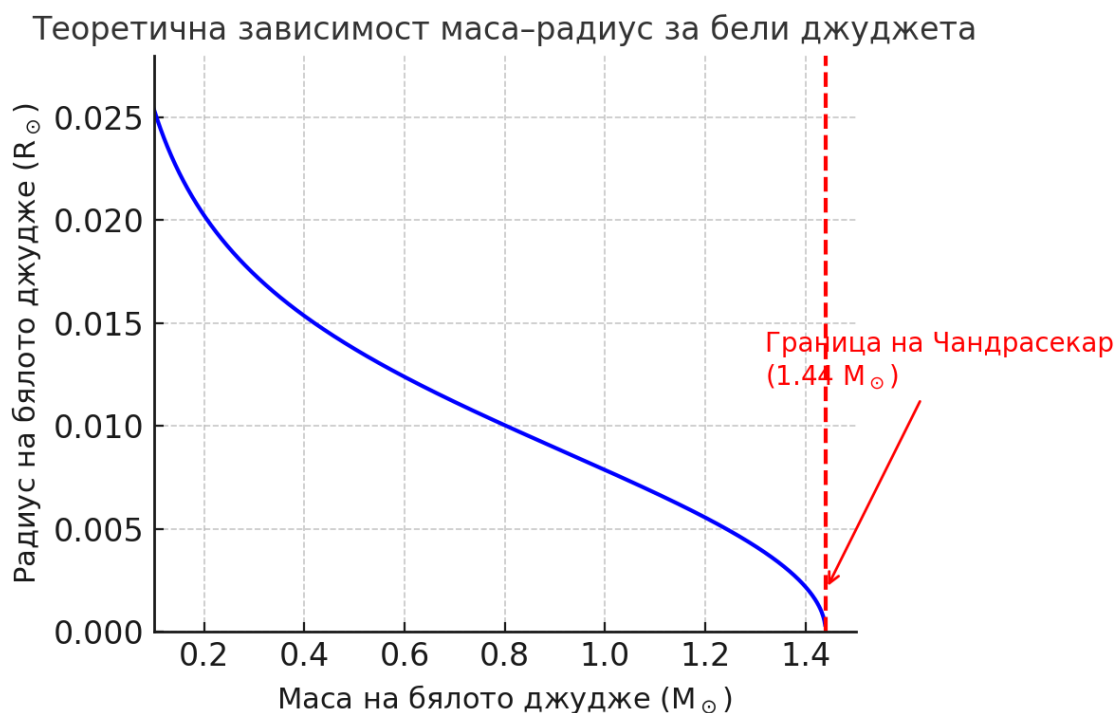
Въведение

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 джуджетата 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). Междוזвездното 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 $R_{WD} = 2296 km$.

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

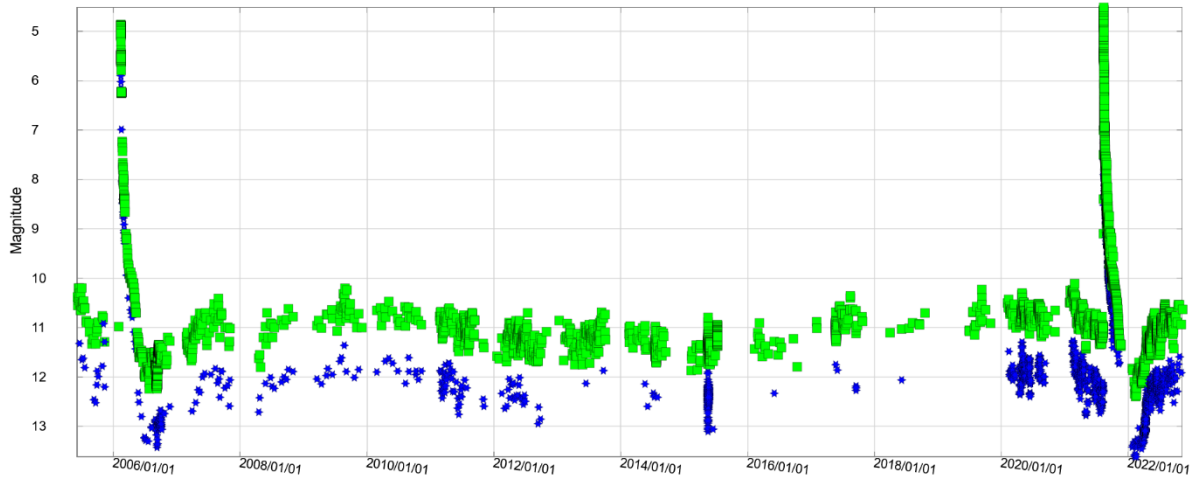
Където M_{ch} е лимита на Chandrasekhar масата на бяло джудже, $1.44 M_{\odot}$, и M_p е константа, чиято числова стойност е $0.00057 M_{\odot}$. Чертеж на тази формула е представен на Фиг. 15.



Фиг. 15. Зависимост между масата и радиуса на бяло джудже.

Наблюдателни данни

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. 16), 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, B и V. Многоцветните данни с висока точност от НАО „Рожен“ дават възможност за проверка на резултатите от публичния регистър AAVSO.



Фиг. 16. Фотометрични наблюдения на RS Orp за периода между последните две избухвания в В и V филтри от AAVSO.

Резултати

В Таблица 7 са представени получените резултати за наблюдателните сезони между две избухвания на RS Orp 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 В 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 В. 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 изчислението, 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]	$R_{(U-B)}$ [$R_\odot$]	$R_{(B-V)}$ [$R_\odot$]	$L_{(U-B)}$ [$L_\odot$]	$L_{(B-V)}$ [$L_\odot$]	$\dot{M}_a(U - B)$ [solar/yr $\times 10^7$]	$\dot{M}_a(B - V)$ [solar/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 компактния 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.

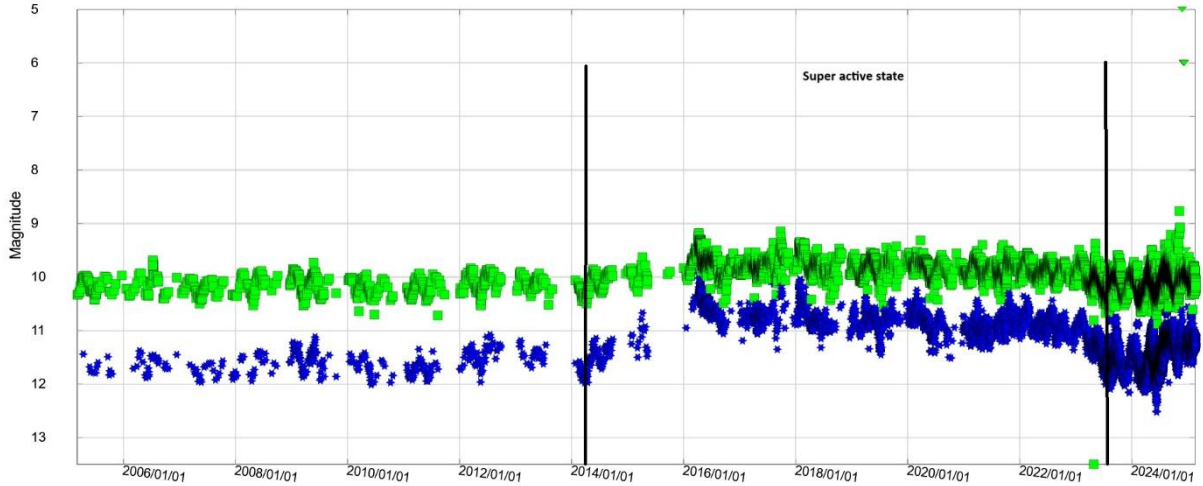
Обобщение

Бяха използвани публично достъпните данни от AAVSO за многоцветна (B и V) фотометрия за периода от 2006 до 2021 г. между двете избухвания на повторната Нова и симбиотична звезда RS Oph. Горещият компонент на двойната система беше отделен от общата светимост, като е изваден приноса на хладния червен гигант. За всеки наблюдателен сезон са усреднени използваните наблюдателни данни и така са получени T_{eff} , R_{eff} , L на горещия компонент и тяхната еволюция в този период. С тези параметри и ползвайки информацията за масата на и радиуса на бялото джудже, е получена средната стойност на темпа на акреция за всеки наблюдателен сезон. Тези стойности са сравнени с получени по същия метод, но използвайки фотометрични данни и за U филтър. Сравнението показва доста близки стойности и това е доказателство за добрата точност на използвания метод. Сумирайки отделните стойности за всеки наблюдателен сезон, се получава цялото количество акретирало вещество между двете избухвания, и с него се определя критичното налягане, което запалва Новата. Полученото критично налягане отговаря доста добре на теоретичните граници и това показва, че това е един добър метод за предсказване на Нова избухвания при налични многоцветни фотометрични наблюдения на обекта в рамките на един цял период на повторната Нова звезда.

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

Въведение

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. 17 е представена В и V фотометрия от AAVSO за последните 20 години на T CrB, където ясно се вижда това суперактивно състояние.

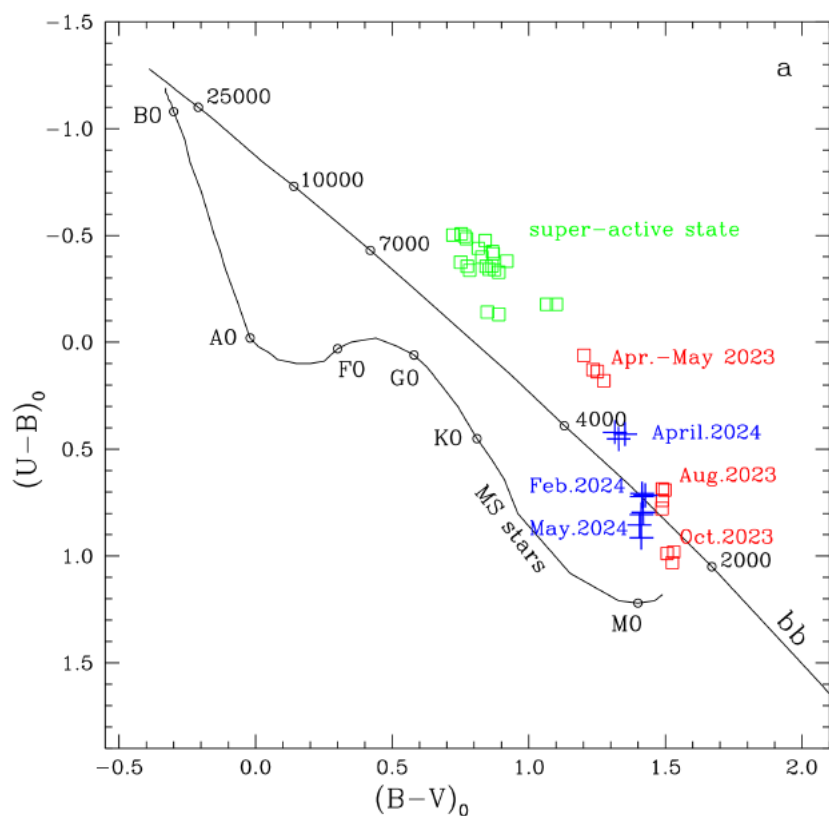


Фиг. 17. Фотометрични данни в В (сини символи) и V (зелени символи) филтри на Т CrB за последните 20 години от базата данни на AAVSO. Черните плътни линии показват границите на суперактивното състояние 2014-2023 г.

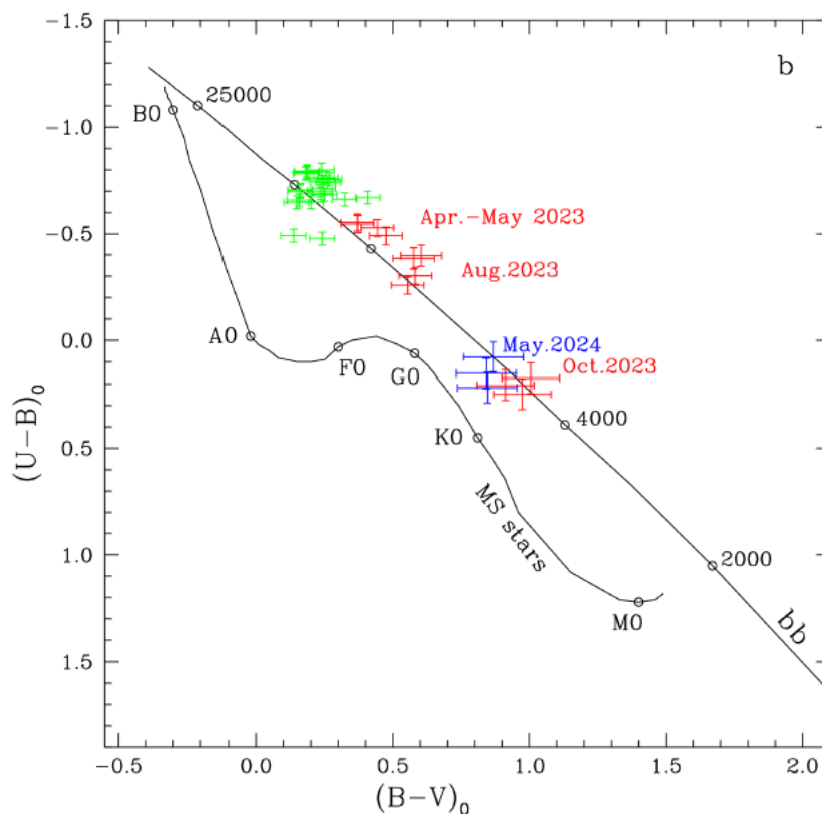
За параметрите на системата се приемат следните стойности: орбитален период 227.5687 дни, T_0 (HJD) 2,447,918.62 (Fekel et al. 2000), маса на бялото джудже $M_{wd} = 1.37 \pm 0.13 M_{\odot}$, а радиусът му $R_{wd} = 2018 \text{ km}$ е пресметнат по формулата на Eggleton за връзката между радиус и маса 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.

Наблюдения

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. 18. Двухцветна диаграма на $(U - B)_0$ по ординатата срещу $(B - V)_0$, по абсцисата, за периода 2016-2024 г. на Т CrV, 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. 19. Двучетна 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).

Резултати

На Фиг. 18 е изобразена представената двучетна диаграма на Т CrB $(U - B)_0$ срещу $(B - V)_0$ с типична грешка $\pm 0.01 \text{ mag}$. На Фиг. 19 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. 18 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 М4III 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 М4 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 М4.5 III гигант (Schmidt-Kaler 1982).

За определяне на светимостта на горещия компонент и темпа на акреция е използвана вече познатата процедура:

1. Наблюдаваната звездна величина U, B, V е коригирана за междузвездната екстинкция и се получават U_0, B_0, V_0 за цялата система.

2. Изваждане приноса на червения гигант, като се преминава от звездна величина към поток и обратно, даден е пример с филтър B , но ситуацията е идентична за U и V :

$$F_{B(sys)} = F_{B0} \times 10^{-\frac{B_{0(sys)}}{2.5}}$$

$$F_{B(g)} = F_{B0} \times 10^{-\frac{B_{0(g)}}{2.5}}$$

$$F_{B(h)} = F_{B(sys)} - F_{B(g)}$$

$$B_{0(h)} = -2.5 \times \log_{10}\left(\frac{F_{B(h)}}{F_{B0}}\right)$$

Където $F_{B(sys)}$ е потокът на цялата система, определен от коригираната звездна величина за конкретния филтър $B_{0(sys)}$, $F_{B(g)}$ е потокът на гиганта, определен от приетата звездна величина в съответния филтър $B_{0(g)}$, $F_{B(h)}$ е потокът на горещата компонента, получен от изваждането на гиганта от системата, $B_{0(h)}$ е звездната величина на горещата компонента, получена от потока и нулевия поток F_{B0} за стандартен Беселов филтър, взет от Rodrigo & Solano (2020).

3. Пресмятане на цветовете $(U - B)_0$ и $(B - V)_0$ на горещия компонент.

4. Получаване на ефективната температура на горещия компонент T_{eff} за двата цвята при апроксимация на абсолютно черно тяло (Таблица 18 Straizys 1992).

5. Определяне на ефективния радиус на горещата компонента, използвайки приетото разстояние до обекта.

6. Определяне на светимостта по формулата:

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

7. Определяне на темпа на акреция по:

$$M_a = \frac{2LR_{wd}}{GM_{wd}\cos i},$$

където M_{wd} и R_{wd} са масата и радиусът на бялото джудже, а i е ъгълът на наклона на орбитата спрямо зрителното поле.

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. 19 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.

Обобщение

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). Iłkiewicz 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 CrB (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.

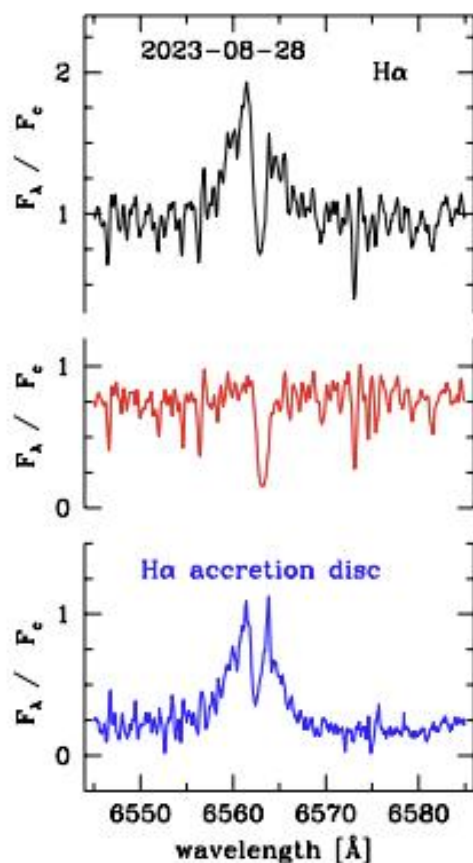
7. Оценка на радиуса на акреционния диск по спектралния наблюдения на T CrB

Въведение

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.

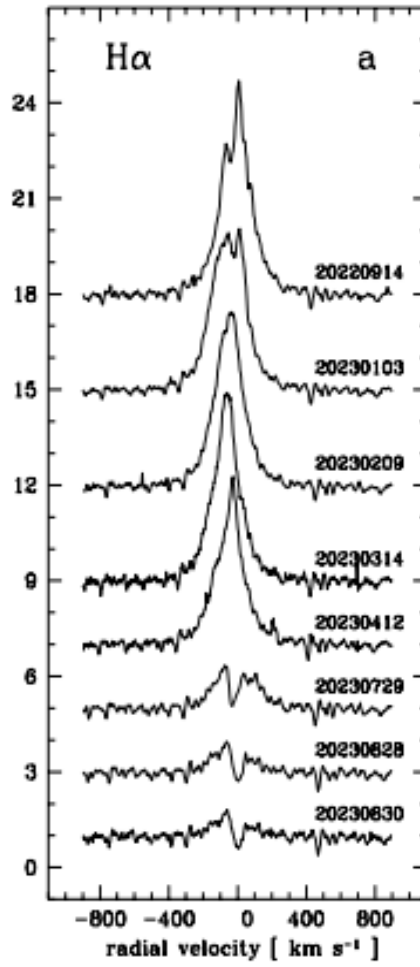
Наблюдения

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 Ешелеле 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. 20.

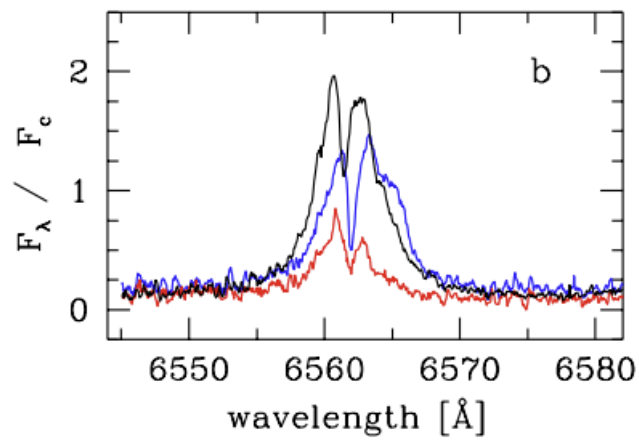


Фиг. 20. H_{α} емисионна линия на Т CrV от 2023-08-28 (черна линия). Спектър на червения гигант HD134807 (червена линия) и H_{α} двупикова емисия на акреционния диск (синя линия).

Изменението на профила на емисионната линия H_{α} на Т CrV може да се види във Фиг. 21, а във Фиг. 22 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. 21. Изменение на профила на $H\alpha$ емисионна линия на Т CrB в 8 наблюдателни нощи.



Фиг. 22. 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).

Резултати

От 2016 до Март 2023 г., T CrB е в суперактивно състояние (Munari et al. 2016; Munari 2023), характерно с висока средна яркост и наличие на високо йонизирани емисионни линии ($\text{HeII}4686$, $[\text{OIII}]4959$, 5007 , $[\text{NeIII}]3869$, 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 T 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 $H\alpha$ 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 дупиков профил са показани в Таблица 12. На база на тези данни е създадена хистограма на разпределението на радиуса, представена на Фиг. 23.

Таблица 11. Спектрални измервания на Т CrB.

date-obs	phase	exp.time [min]	EW($H\alpha$) [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 L1 се намира на разстояние $111 R_{\odot}$ от бялото джудже и така по формулата на (Eggleton 1983) се определя радиусът на зоната на Рош:

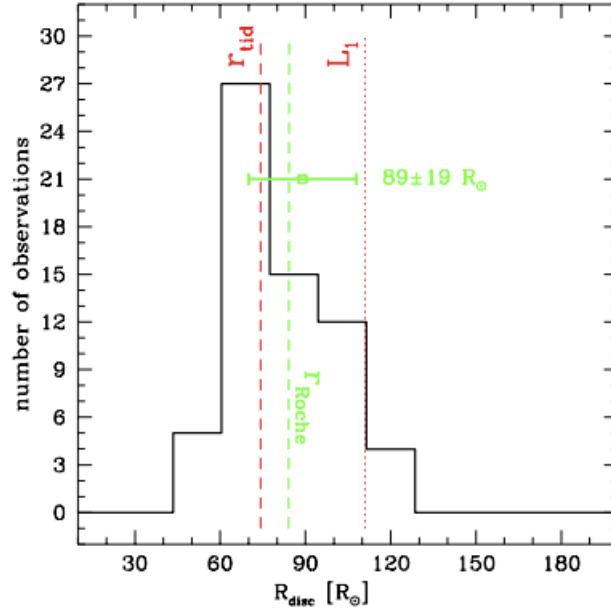
$$r_{Roche}/a = (0.49q^{2/3})/[0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})]$$

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 $r_{tid} = 74.2R_{\odot}$. Тези стойности са илюстрирани на Фиг. 23.



Фиг. 23. Хистограма на радиуса на H_{α} излъчващия диск на Т 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 $R_d = 89 \pm 19R_{\odot}$.

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 налъчевите 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 Т 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 Т CrB наподобява това на джудже нова, но с доста голям орбитален период, приличащо на SU UMa джудже нова (Ilkiewicz et al. 2023).

На Фиг. 23 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 ограничаван при определени радиуси (e.g. Сое 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 CrV 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.

Обобщение

Накратко за 73 обработени спектъра Т CrV 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 CrV, 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				

8. 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.

На база на направените спектрални и фотометрични наблюдения бяха получени за 4U1954+319 $E(B - V) = 0.83 \pm 0.09$, $M_V = -5.23 \pm 0.08$ и клас светимост Ib (супергигант) за донора на маса, а за ZZ CMi бяха получени $M_V = -0.27 \pm 0.2$, $E(B - V) = 0$ и донор на маса от клас светимост III (гигант).

Използвайки фотометрични данни за B 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 $1 \times 10^{-7} - 2 \times 10^{-6} M_\odot \text{yr}^{-1}$. 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.

Проследено е изменението на фликеринг при MWC 560 и неговата липса е свързана с потенциалното образуване на обща обвивка, която екранира явлението от флуктоациите на темпа на акреция.

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 T 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 $50 - 110L_{\odot}$ и остава сравнително високо $\approx 40 - 50L_{\odot}$ до 2022 г. 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 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 CrB 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 CrB 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.

9. Публикации по темата на дисертацията

Резултатите от дисертацията са отразени в следните публикации в хронологичен 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 Reccurent 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

10.Цитирания

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

1. Merc, J.; Beck, P. G.; Mathur, S.; García, R. A., March 2024, Accretion-induced flickering variability among symbiotic stars from space photometry with NASA TESS, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 683, id.A84, 16 pp.

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

2. Romanov, Filipp, April 2022, Detection of brightening and optical flickering of RS Ophiuchi, The Astronomer's Telegram, No. 15339
3. Azzollini, Alessandra; Shore, Steven N.; Paul Kuin, N., May 2022, Spectroscopic Signature of a Re-established Accretion Disk in Symbiotic-like Recurrent Nova RS Ophiuchi, *Research Notes of the AAS*, Volume 6, Issue 5, id.92.
4. Munari, Ulisse; Tabacco, Fulvio, May 2022, Flickering Returns as RS Oph Reestablishes Quiescent Conditions Following its 2021 Nova Outburst, *Research Notes of the AAS*, Volume 6, Issue 5, id.103.
5. Pereyra, A.; Tello, J.; Zevallos, M.; de Almeida, L.; Espinoza, M.; Alvarado, D., May 2022, OAUNI confirmation of optical flickering from RS Oph, The Astronomer's Telegram, No. 15387
6. Lico, R.; Giroletti, M.; Munari, U.; O'Brien, T. J.; Marcote, B.; Williams, D. R. A.; Yang, J.; Veres, P.; Woudt, P., December 2024, High-resolution imaging of the evolving bipolar outflows in symbiotic novae: The case of the RS Ophiuchi 2021 nova outburst, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 692, id.A107, 8 pp.
7. López-Coto, Rubén; Green, David; Méndez-Gallego, Javier; de Oña Wilhelmi, Emma, April 2025, Cosmic ray bubbles from nova super-remnants and their contribution to local cosmic ray spectra, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 696, id.A24, 5 pp.

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. Toalá, Jesús A.; González-Martín, Omaira; Sacchi, Andrea; Vasquez-Torres, Diego A., August 2024, The X-ray rise and fall of the symbiotic recurrent nova system T CrB, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 532, Issue 2, pp.1421-1433

9. He, Guoli; Zhu, Chunhua; Lü, Guoliang; Li, Lin; Guo, Sufen; Liu, Helei; Gao, Jun, October 2024, The Impact of Nova Outbursts on the Chemical Abundance of the Interstellar Medium, *Research in Astronomy and Astrophysics*, Volume 24, Issue 10, id.105007, 14 pp.

10. Stoyanov, K. A.; M. Luna, G. J.; Zamanov, R. K.; İlkiewicz, K.; Nikolov, Y. M.; Moyseev, M.; Minev, M.; Kurtenkov, A.; Stefanov, S. Y., February 2025, Evolution of the optical emission lines and the X-ray emission during the superactive stage of T~CrB, *Bulgarian Astronomical Journal*, Vol. 42, p. 29

11. Wang, Hao; Zhu, Chunhua; Lü, Guoliang; Li, Lin; Liu, Helei; Guo, Sufen; Lu, Xizhen, February 2025, Neutrino luminosity and the energy spectrum of a nova outburst, *Physical Review D*, Volume 111, Issue 4, id.043035, 14 pp.

12. Planquart, L.; Jorissen, A.; Van Winckel, H., February 2025, Resolving the mass transfer in the symbiotic recurrent nova T Coronae Borealis, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 694, id.A85, 15 pp.

13. Munari, U., April 2025, Symbiotic novae, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, vol. 55, no. 3, p. 47-66.

14. Han, Henggeng; Huang, Yang; Wang, Beichuan; Sun, Yongkang; Wang, Cunshi; Li, Zhirui; Jin, Junjie; Sun, Ningchen; Xiao, Kai; He, Min; Gu, Hongrui; Niu, Zexi; Wu, Hong; Liu, Jifeng, April 2025, The Mini-SiTian Array: White Paper, *Research in Astronomy and Astrophysics*, Volume 25, Issue 4, id.044009, 6 pp.

15. Hinkle, Kenneth H.; Nagarajan, Pranav; Fekel, Francis C.; Mikołajewska, Joanna; Straniero, Oscar; Muterspaugh, Matthew W., April 2025, Binary Parameters for the Recurrent Nova T Coronae Borealis, *The Astrophysical Journal*, Volume 983, Issue 1, id.76, 16 pp.

16. José, Jordi; Hernanz, Margarita, June 2025, Hydrodynamic simulations of the recurrent nova T Coronae Borealis: Nucleosynthesis predictions, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 698, id.A251, 21 pp.

17. Merc, Jaroslav; Wyrzykowski, Łukasz; Beck, Paul G.; Mikołajczyk, Przemysław J.; Kotysz, Krzysztof; Zieliński, Paweł; Zola, Staszek; Kurowski, Sebastian; Ogłóza, Waldemar; Drozd, Marek; Galdies, Charles; Hambsch, Franz-Josef; Brincat, Stephen M.; Joachimczyk, Barbara; Bronikowski, Mateusz; Japelj, Jure; Mihelcic, Matej; Carrasco, Josep Manel; Burgaz, Umut; Gurgul, Agnieszka; Bąkowska, Karolina; Hofbauer, Piotr; Szyszka, Krzysztof; Golonka, Jan; Qvam, Jan Kåre Trandem; Zdanavičius, Justas; Pakštienė, Erika; Maskoliūnas, Marius; Čepas, Vytautas; Pylypenko, Uliana; Moździerski, Dawid; Dubois, Franky; Vanaverbeke, Siegfried; Olszewska, Justyna M.; Liakos, Alexios; Stojanović, Milan; Damjanović, Goran; Popowicz, Adam; Marzec, Mateusz; Badura, Magdalena; Gil, Bartosz; Pucek, Alicja; Kowalska, Aleksandra; Szklarz, Mateusz; Kvernadze, Teimuraz; Reguitti, Andrea; Awiphan, Supachai; Dennefeld, Michel; Gazeas, Kosmas, July 2025, Is the symbiotic recurrent nova T CrB late? Recent photometric evolution and comparison with past pre-outburst behaviour, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, Volume 541, Issue 1, pp. L14-L21, 8 pp.

18. Kormpakis, Triantafyllos; Linares, Manuel; José, Jordi, July 2025, Connecting the m-dots: accretion rates and thermonuclear burst recurrence times on neutron stars and white dwarfs, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 540, Issue 3, pp.2305-2320

19. Semkov, E.; Petrov, N.; Minev, M.; Moyseev, M.; Marchev, D.; Ovcharov, E.; Marti, J.; Dimitrova, I. E.; Zamanov, R. K., August 2025, Photometry with the new 1.5-meter telescope of the Rozhen Observatory, eprint arXiv:2508.18752

20. Schlindwein, Wagner; Baptista, Raymundo; Luna, Gerardo Juan Manuel, August 2025, Modeling the High-brightness State of the Recurrent Nova T CrB as an Enhanced Mass-transfer Event, *The Astrophysical Journal*, Volume 989, Issue 1, id.78, 12 pp.,

21. Petry, D.; Sala, G.; El Mellah, I.; Stanke, T.; Greiner, J., September 2025, The pre-eruption state of T CrB as observed with ALMA in 2024, eprint arXiv:2509.05111

22. Munari, U.; Walter, F.; Masetti, N.; Valisa, P.; Dallaporta, S.; Bergamini, A.; Cherini, G.; Frigo, A.; Maitan, A.; Marino, C.; Mazzacurati, G.; Moretti, S.; Tabacco, F.; Tomaselli, S.; Vagnozzi, A.; Ochner, P.; Albanese, I., September 2025, T CrB: Overview of the accretion history, Roche-lobe filling, orbital solution, and radiative modeling, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 701, id.A176, 19 pp.

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

23. Maldonado, Raul F.; Toalá, Jesús A.; Rodríguez-González, Janis B.; Tejeda, Emilio, August 2025, The Impact of Wind Accretion in Evolving Symbiotic Systems, *The Astrophysical Journal*, Volume 989, Issue 1, id.108, 15 pp.

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

24. Boffin, Henri M. J.; Merc, Jaroslav, October 2025, Revisiting symbiotic binaries with interferometry: II. New PIONIER data, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 702, id.A151, 12 pp.

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

25. Toalá, Jesús A.; González-Martín, Omaira; Sacchi, Andrea; Vasquez-Torres, Diego A., August 2024, The X-ray rise and fall of the symbiotic recurrent nova system T CrB, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 532, Issue 2, pp.1421-1433

26. Suleimanov, V. F.; Belyakov, K. V.; Perales, J. M.; Neustroev, V. V., October 2024, Comparison of the disk precession models with the photometric behavior of TT Ari in 2021-2023, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 690, id.A358, 13 pp.

27. Guerrero, M. A.; Vasquez-Torres, D. A.; Rodríguez-González, J. B.; Toalá, J. A.; Ortiz, R., January 2025, Y Gem, a symbiotic star outshone by its asymptotic

giant branch primary component, *Astronomy & Astrophysics*, Volume 693, id.A203, 13 pp.

28. Habtie, Gesesew R.; Das, Ramkrishna, February 2025, Spectroscopic study of the quiescent stages in between the 2006 and 2021 outbursts of RS Ophiuchi, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 537, Issue 2, pp.2046-2060
29. Tejeda, Emilio; Toalá, Jesús A, February 2025, Geometric Correction for Wind Accretion in Binary Systems, *The Astrophysical Journal*, Volume 980, Issue 2, id.226, 14 pp.
30. Maslennikova, N. A.; Tatarnikov, A. M.; Tatarnikova, A. A.; Dodin, A. V.; Shatsky, N. I., March 2025, Study of Nine Symbiotic Star Candidates. Discovery of the Symbiotic Nature of V520 And, *Astrophysical Bulletin*, Volume 80, Issue 1, pp. 58-68
31. Schlindwein, Wagner; Baptista, Raymundo; Luna, Gerardo Juan Manuel, August 2025, Modeling the High-brightness State of the Recurrent Nova T CrB as an Enhanced Mass-transfer Event, *The Astrophysical Journal*, Volume 989, Issue 1, id.78, 12 pp.
32. Maldonado, Raul F.; Toalá, Jesús A.; Rodríguez-González, Janis B.; Tejeda, Emilio, August 2025, The Impact of Wind Accretion in Evolving Symbiotic Systems, *The Astrophysical Journal*, Volume 989, Issue 1, id.108, 15 pp.
33. Petry, D.; Sala, G.; El Mellah, I.; Stanke, T.; Greiner, J., September 2025, The pre-eruption state of T CrB as observed with ALMA in 2024, eprint arXiv:2509.05111
34. Toalá, Jesús A.; Vasquez-Torres, Diego A., October 2025, The Influence of the Accretion Disc Structure on X-ray Spectral States in Symbiotic Binaries, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Advance Access

11.Участия на конференции

Част от резултатите от дисертацията са представени на следните конференции:

1. Доклад на тема "Evolution of the mass accretion rate in symbiotic stars – MWC 560, Rs Oph and T Cr B" Национален форум за съвременни космически изследвания NaFski-V 22-24 Октомври 2024г., София Тех Парк, София, България
2. Доклад на тема "Evolution of the mass accretion rate in symbiotic stars" международна научна конференция 'Symbiotic stars, weird novae, and related embarrassing binaries', 3- 7 Юни 2024г., Прага, Република Чехия
3. Постер на тема "Повторната Нова Т CrB" XVII годишна конференция на Съюза на астрономите в България 9-11 Май 2024г. Шуменски Университет "Епископ Константин Преславски", Шумен, България
4. Доклад на тема “Спектрални и фотометрични наблюдения на Симбиотични звезди” XVI годишна конференция на Съюза на астрономите в България 14-16 Юни 2023г.м, НАОП “Николай Коперник”, Варна, България
5. Доклад на тема "For optical flickering in symbiotic star MWC 560" XIII международна Българо-Сръбска Астрономическа конференция 3-7 Октомври 2022 г., Велинград, България
6. Доклад на семинар на ИА с НАО БАН

Благодарности

На първо място дължа признателност и благодарности на научния ми ръководител проф. дфн 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
- Azzam, Y. A., Ali, G. B., Ismail, H. A., Haroon, A., Selim, I. 2010, Astrophysics and Space Science
- 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., Mikołajewska, J., Munari, U., et al. 2000, A&AS, 146, 407
- Belczynski, K.; Mikołajewska, 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
- Bhatt, H. C., Mallik, D. C. V., 1986, A&A, 168, 248
- 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
- Bopp, B. W. & Howell, S. B. 1989, PASP, 101, 981
- 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
- Corradi, J. Mikołajewska & T.J. Mahoney, ASP Conf. Ser. vol. 303, 9
- 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.
- Georgiev, T. B., Boeva, S., Stoyanov, K. A., Latev, G., Spassov, B., Kurtenkov, A., 2022, Bulgarian Astronomical Journal, 37, 62
- Gilfanov, M.; Bogdán, Á., February 2010, Nature, Volume 463, Issue 7283, pp. 924-925
- Goranskij, V. P. et al. 2018, ATel, #12227.
- Goranskij, V. P. et al. 2021, ATel #15061
- Gottlieb, A. M., Eikenberry, S. S., Ackley, K., et al. 2020, ApJ, 896, 32
- 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
- Henden, A. A., Levine, S., Terrell, D., & Welch, D. L., 2015, AAS, 225, 336.
- Hinkle, K. H., Lebzelter, T., Fekel, F. C., et al. 2020, ApJ, 904, 143
- Horne, K., & Marsh, T. R. 1986, MNRAS, 218, 761.
- Howell, S. B. et al. 2009 PASP, 121, 16.
- Huang, S.-S. 1972, ApJ, 171, 549
- Iijima, T. 1984, Information Bulletin on Variable Stars, 2491, 1
- Ilkiewicz, Krystian Mikołajewska, Joanna; Stoyanov, Kiril A., August 2023, The Astrophysical Journal Letters, Volume 953, Issue 1, id.L7, 5 pp.
- Ilkiewicz, 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
- Kaufer, A., Stahl, O., Tubbesing, S., et al., 1999, *The Messenger*, 95, 8
- Kenyon, S. J., & Garcia, M. R. 1986, *AJ*, 91, 125.
- Kholopov, P. N., Samus, N. N., Frolov, M. S., et al. 1998, *Combined General Catalogue of Variable Stars*, Moscow: Nauka Publishing House (1985-1988), *VizieR On-line Data Catalog: II/214A*
- Kjurkchieva, D. et. al., *Bulg. Astron. Journal*, 2020, Vol. 32, p. 113.
- King, A. R., & Pringle, J. E. 2009, *MNRAS*, 397, L51
- Kondratyeva, L. N. et. al., 2021, *Ap*, 64, 306
- Kotov, O., Churazov E., Gilfanov M., 2001, *MNRAS*, 327, 799
- Lasota, Jean-Pierre, June 2001, *New Astronomy Reviews*, Volume 45, Issue 7, p. 449-508
- Leedjarv, L., Mikolajewski, 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, G. J. M., Costa, R. D. D., 2005, *A&A*, 435, 1087
- Luna, G. J. M., Sokoloski, J. L., Mukai, K., et al. 2013, *A&A*, 559, A6
- 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
- Lutz, J. H., 1984, *ApJ*, 279, 714
- Lyubarskii, Y. E., 1997, *MNRAS*, 292, 679
- MacDonald, J., April 1983, *Astrophysical Journal*, Vol. 267, p. 732-746.
- Marchev, D., Stoyanov, K., Marchev, V., et al., 2022, *Acta Scientifica Naturalis*, 9, 1
- Marchev, D., Yordanova, G., Pavlova, N., et al., 2023, *The Astronomer's Telegram*, 15906
- Masetti, N., Orlandini, M., Palazzi, E., et al. 2006, *A&A*, 453, 295
- 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
- Mikołajewska, J., Kolotilov, E. A., Shugarov, S. Y., Tatarnikova, A. A., & Yudin, B. F. 2003, R. L. M. Corradi, J. Mikołajewska, & T. J. Mahoney (Eds.), Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution, ASP Conf. Vol. 303, p. 151.
- Mohamed, S., & Podsiadlowski, P. 2012, Baltic Astronomy, 21, 88.
- Moultaka, J., Ilovaisky, S. A., Prugniel, P., Soubiran, C., 2004, PASP, 116, 693
- Muerstet, 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., 2021, ATel #15066
- Munari, U.; Dallaporta, S.; Cherini, G. , August 2016, New Astronomy, Volume 47, p. 7-15.
- Munari, U., Dallaporta, S., Castellani, F., et al. 2016, New A, 49, 43
- Nelson, T., Mukai, K., Orio, M., Luna, G. J. M., & Sokoloski, J. L. 2011, ApJ, 737, 7
- Nielsen et al., 2013
- 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
- Patterson, J.; Raymond, J. C., May 1985, Astrophysical Journal, Vol. 292, p. 535-549
- Pereira, C. B., Landaberry, S. J. C., & da Conceicao, F., 1998, AJ, 116, 1971

- 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. 2020, in XIV.0 Scientific Meeting (virtual) of the Spanish Astronomical Society, 182
- Rodrigo, C., Solano, E., Bayo, A. 2018, IVOA Working Draft 15 October 2012
- Rossi, C., Altamore, A., Ferrari-Toniolo, M., et al., 1988, A&A, 206, 279
- Rutkowski, A., Mikolajewska, J., & Whitelock, P. A. 2007, Baltic Astronomy, 16, 49
- Samus, N. N., Kazarovets, E. V., Durlevich, O. V., et al. 2017, Astronomy Reports, 61, 80
- Sanford, Roscoe F., January 1949, Astrophysical Journal, vol. 109, p.81
- Sarre, P. J. 2006, Journal of Molecular Spectroscopy, 238, 1
- Scaringi, S., K^ording, E., Uttley, P., Groot, P. J., Knigge, C., Still, M., Jonker, P., 2012, MNRAS, 427, 3396
- 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, D. J, Finkbeiner, D. P., Davis, M., 1998, ApJ, 500, 525
- 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-B^ornstein 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
- Selbstelli, Pier L.; Cassatella, Angelo; Gilmozzi, Roberto, July 1992, Astrophysical Journal v.393, p.289
- 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., Breittellner, 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
- Tomov, T., Zamanov, R., Galan, C., Pietrukowicz, P., 2017 AcA 67, 225
- 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
- Tshernova, T. C. 1949, Peremennye Zvezdy, 7, 140
- Verbunt, Frank; Rappaport, Saul, September 1988, Astrophysical Journal v.332, p.193
- Wenger, M., Ochsenbein, F., Egret, D., et al. 2000, A&AS, 143, 9
- Weselak, T., 2019, A&A, 625, A55
- Wiecek, M., Mikolajewski, M., Tomov, T., et al. 2010, arXiv:1003.0608
- 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, L. R., Kuranov, A. G., & Postnov, K. A. 2019, *MNRAS*, 485, 851
- 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, R. K., Stoyanov, K. A., Kostov, A., et al. 2021, *Astronomische Nachrichten*, 342, 952
- 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
- Zhekov, Svetozar A.; Tomov, Toma V. , October 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 489, Issue 2, p.2930-2940

Приложения към дисертацията

Приложение 1

Тук е дадена програма, която пресмята радиуса на абсолютно черно тяло на разстояние от 2217 парсека, с температура 10000 келвина и коригирана за екстинция звездна величина във филтър В 11. Програмата използва IDL Astronomy Users Library.

(<https://idlastro.gsfc.nasa.gov/>):

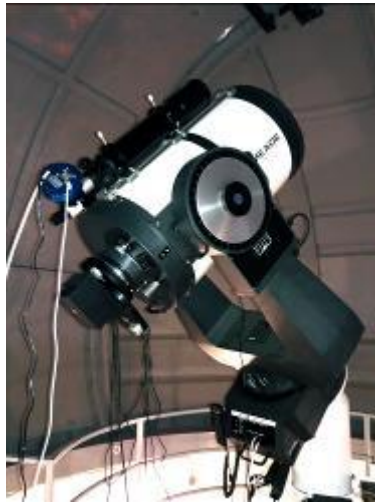
```
wave=4378.12
mag3= 11.0
T1= 10000.0
R= 10.0
d1= 2217.0*3.0857e18 R1= R * 6.96e10
flu1= R1/d1*R1/d1 * planck(wave,T1)
mag1=-2.5*alog10(flu1/6.293e-9)
dmag= mag1 - mag3
R3 = R*sqrt(10^(dmag/2.5))
print, R, mag1, mag3
print, R3
```

Тук $1 \text{ pc} = 3.0857 \times 10^{18} \text{ cm}$, ефективна дължина на вълната в В филтър $4378.12 \text{ \AA}$, и поток на звезда с нулев магнитуд в В филтър $6.13 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. Програмата използва първоначално зададена стойност за R и изчислява потока с вградена функция на Планк за съответните температура и дължина на вълната. Накрая се получава радиусът R3 на база разликата в звездните величини.

Приложение 2

Телескопи, използвани за получаване на фотометричните и спектрални наблюдения:

40см телескоп Обсерватория-Шумен MEADE 16" LX200ACF



(източник на фотографията <https://astro.shu.bg/AO/equipment.php>)

Диаметър на огледалото: 406 мм

Фокусно разстояние: 4064 мм

Оптична система: Шмит-Касегрен

CCD-камера: FLI PL09000

Филтри: r' i' g', H α B, red cont, U, B, V, R, I

Работно поле: 31.02' x 31.02', резолюция 0.61"/пиксел

Автогид: TS-Optics Guiding Scope 80/600 mm и CCD Camera ATIK Titan

Монтиран в 5.5 м купол.

CCD камера FLI PL09000

Брой пиксели: 3056 x 3056

Размер на пиксела: 12 μ m x 12 μ m

Филтри: Sloan r' i' g', H α B, red cont, U, B, V, R, I

Филтърен блок: CFW-5-7

60см телескоп Обсерватория-Шумен ASA RC600



(източник на фотографията <https://astro.shu.bg/AO/equipment.php>)

Диаметър на огледалото: 600 мм

Фокусно разстояние: 4200 мм / f/7

Оптична система: Ричи-Кретиен

Монтировка: ASA DDM200

CCD-камера: SBIG Aluma4040

Филтри: Ha, g' r' i' U B V R I

Фокален редуктор: Да (0.64x)

Работно поле: 47.00' x 47.00', резолюция 0.69"/пиксел

Монтиран в 4.0 м купол.

CCD-камера SBIG Aluma AC4040 ADVANCED sCMOS DETECTOR

Брой пиксели: 4096 x 4096

Размер на пиксела: 9.0 μm

Ток на тъмно: 0.3 e-/p/s при 0°C

Максимален квантов добив- 74% (FSI), 95% (BSI)

2.0m телескоп Обсерватория- НАО Рожен



Диаметър на главното огледало: 2 m

При система Ричи-Кретиен

Фокусно разстояние: 16 m

Относителен отвор: 1:8 (f/8)

CCD-камера Andor iKon-L 21703

Брой пиксели: 2048 x 2048 пиксела

Размер на пиксела: 13.5 x 13.5 μm

Ешеле спектрограф ESpeRo:

Спектрографа е свързан с телескопа посредством оптично влакно, монтирано на блок закрепен за Ричи-Кретиен фокуса. Спектралния диапазон на спектрографа е между 3900Å и 9000Å, с разделнителна способност $R \approx 30000 \sim 45000$. Подробно описание на инструмента и възможностите му има в статията на Bonev et al. (2017).

50/70см Шмит телескоп Обсерватория- НАО Рожен



Диаметър на Шмит пластината (входна апертура): 50 см

Диаметър на сферичното огледало: 70 см

Фокусно разстояние: 172 см

Относителен отвор: 1:3.44 (f/3.44)

CCD-камера FLI PL 16803

Брой пиксели: 4096x4096 пиксела

Размер на пиксела: 9 x 9 μm

60cm Zeiss-600 телескоп Обсерватория- НАО Рожен



(източник на фотографията <https://www.nao-rozhen.org/telescopes/fr16.html>)

Диаметър на главното огледало: 60 см

Фокусно разстояние: 750 см

Относителен отвор: 1:12.5 (f/12.5)

Оптична система: Касегрен

CCD-камера: PL 09000

Филтри: U B V R I

Брой пиксели: 3056x3056 пиксела

Размер на пиксела: 12 x 12 μm

1.5m ASA AZ1500 телескоп Обсерватория- НАО Рожен



(източник на фотографията <https://www.nao-rozhen.org/telescopes/fr18.html>)

Диаметър на главното огледало: 1.5м, $f/2$

Фокусно разстояние на телескопа: 9 m

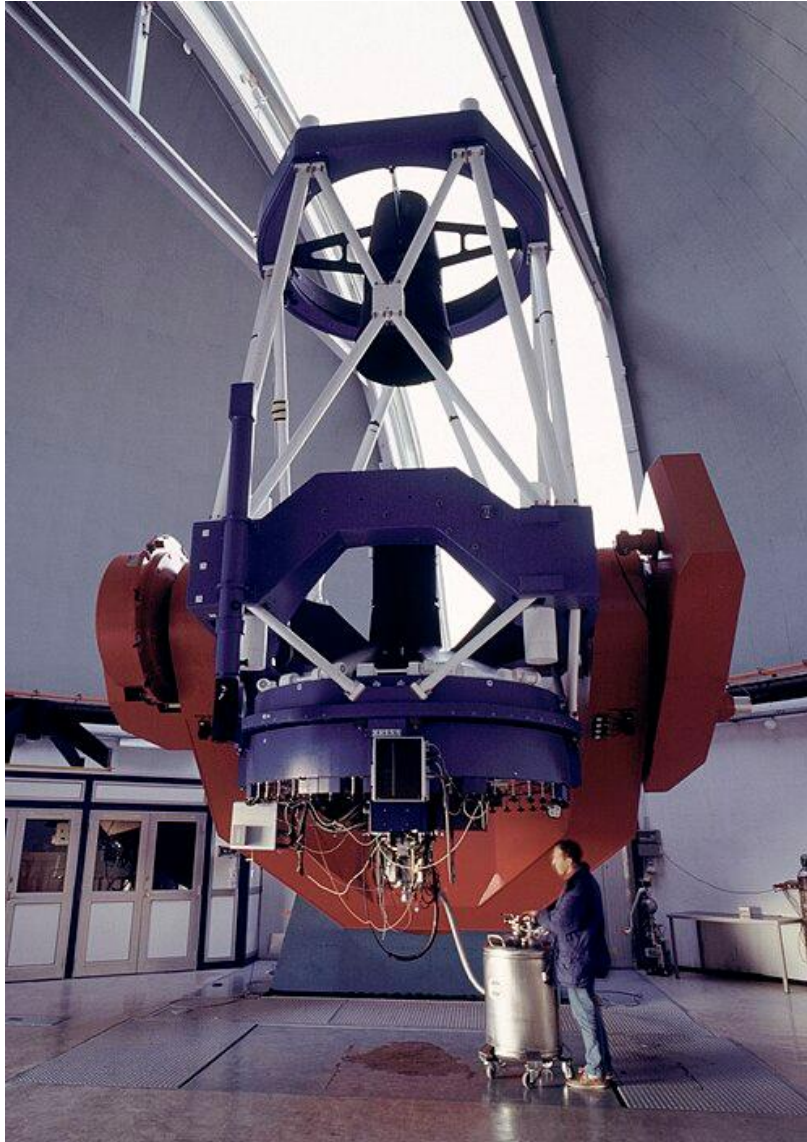
Относителен отвор: 1:6 ($f/6$)

Диаметър на плоското фокално поле: 200 mm

Монтировка тип: алт-азимутална, direct drive

CCD-камера: Moravian C3 pro

2.2м телескоп Обсерватория- La Silla, Чили (ESO)



(източник на фотографията <https://www.la.silla.eso.org/la.silla/Telescopes/2p2/>)

Диаметър на огледалото: 2.2m

Фокусно разстояние: 17.6м, f/8.0

Оптична система: Ричи-Кретиен рефрактор

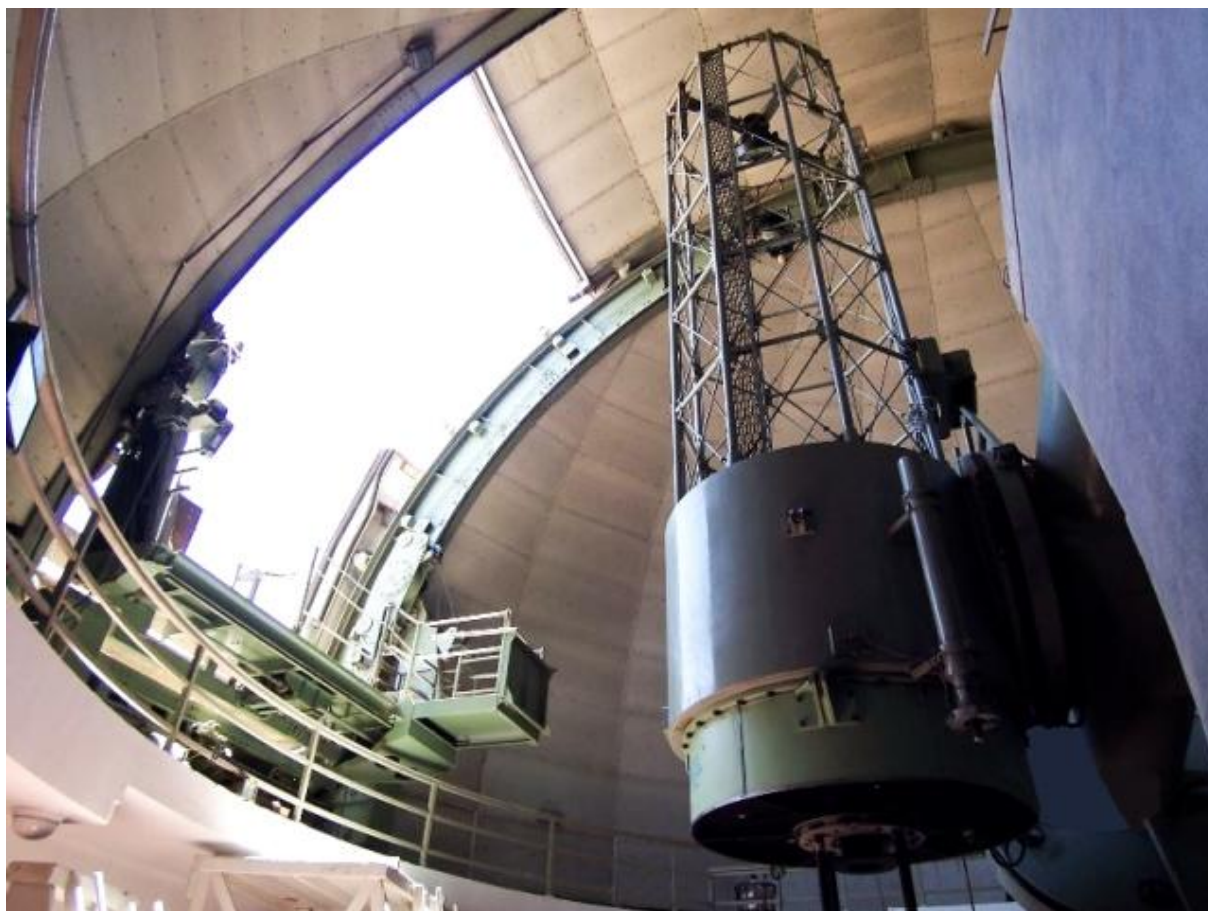
Монтировка: екваториална монтировка тип вилица

Спектрограф FEROS

Резолюция: $R = 48000$

Спектрален диапазон: 3600 ~ 9000Å

1.88м телескоп Обсерватория- Kottamia, Египет



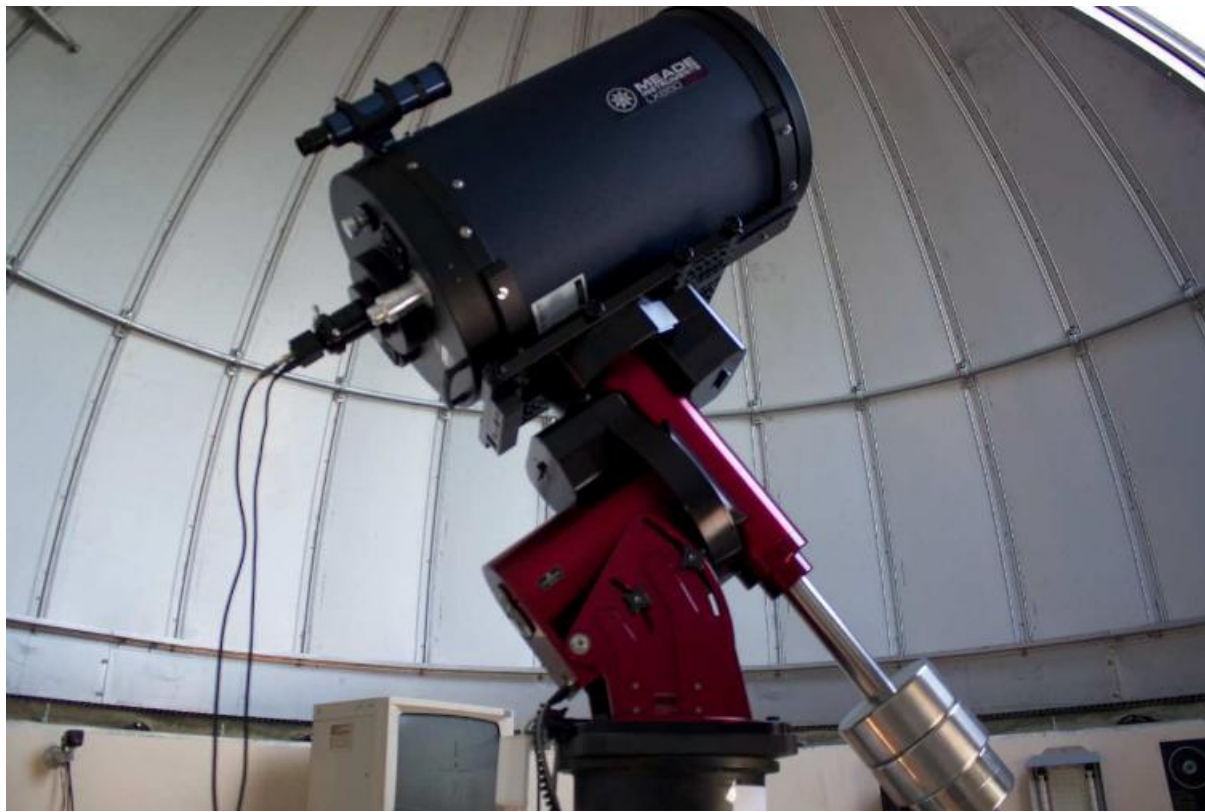
(източник на фотографията <https://www.nriag.sci.eg/overview-at-kottamia-astronomical-observatory/>)

Диаметър на огледалото: 1.88m

Фокусно разстояние: 9.2m, f/4.9

Оптична система: Касегрен, f/18

40см телескоп Обсерватория- Жа'ен, Испания 16" LX200ACF



(източник на фотографията <https://aljayani.ujaen.es/faeg/observatory.php>)

Диаметър на огледалото: 41cm, f/8

Оптична система: Шмит-Касегрен

Монтиран в 4.0 м купол.

CCD-камера: SBIG ST10-XME

Брой пиксели: 2184x1472 пиксела

Размер на пиксела: 6.8 x 6.8 μm

Филтри: U B V R I

Приложение 3

Методика за обработка на суровите наблюдателни данни:

За обработка на спектралните наблюдения е използван IRAF и по-специално целия Scisoft пакет на ESO- <https://www.eso.org/sci/software/scisoft.html>. Софтуера е инсталиран на операционна система Fedora 28. Метода за обработка на спектралните наблюдения се състои от следните стъпки:

1. Стартира се терминала и се активират пакетите:

```
SCISOFT_IGNORE_SELINUX_WARNING=1  
./scisoft/bin/Setup.bash
```

```
xgterm &
```

```
cl
```

```
cl> noao  
cl> imred  
cl> echelle
```

2. Определяне на апертурите.

Наблюдателните данни от Ешеле спектрографа на Рожен в суров вариант представляват .fits файл, в който се виждат до 60 отделни апертури и IRAF определя позицията им автоматично. Понякога при наличието на космични лъчи те са определени грешно. За това всяка наблюдателна нощ има спектър на ярка звезда, по която се определя положението на апертурите. По долу е поазано как изглежда една експозиция в суровия си вариант. IRAF е идентифицирал приблизително 60 апертури, но се забелязва, че има поне 2 космически лъча, които са погрешно идентифицирани като отделна апертура. За това те се изтриват. Параметрите са следните:

```
cl> epar apall
```

I R A F
Image Reduction and Analysis Facility

```
PACKAGE = echelle  
TASK = apall
```

```
input = ref.fits List of input images
```

```

(output =          ) List of output spectra
(apertur=         ) Apertures
(format =         multispec) Extracted spectra format
(referen=         ) List of aperture reference images
(profile=         ) List of aperture profile images

(interac=         yes) Run task interactively?
(find  =         yes) Find apertures?
(recente=         yes) Recenter apertures?
(resize =         yes) Resize apertures?
(edit   =         yes) Edit apertures?
(trace  =         yes) Trace apertures?
(fittrac=        yes) Fit the traced points interactively?
(extract=        yes) Extract spectra?
(extras =        no) Extract sky, sigma, etc.?
(review =        no) Review extractions?

(line  =          970) Dispersion line
(nsum  =          20) Number of dispersion lines to sum or median

# DEFAULT APERTURE PARAMETERS
(lower =         -5.) Lower aperture limit relative to center
(upper =         5.) Upper aperture limit relative to center
(apidtab=        ) Aperture ID table (optional)

# DEFAULT BACKGROUND PARAMETERS
(b_func=        chebyshev) Background function
(b_order=        2) Background function order
(b_sampl=       -15:-5,5:15) Background sample regions
(b_naver=        0) Background average or median
(b_niter=        5) Background rejection iterations
(b_low_r=        4.) Background lower rejection sigma
(b_high_=       2.) Background upper rejection sigma
(b_grow =        0.) Background rejection growing radius

# APERTURE CENTERING PARAMETERS
(width  =        5.) Profile centering width
(radius =       10.) Profile centering radius
(thresho=        0.) Detection threshold for profile centering

# AUTOMATIC FINDING AND ORDERING PARAMETERS
nfind  =        60 Number of apertures to be found automatically
(minsep =       12.) Minimum separation between spectra
(maxsep =       55.) Maximum separation between spectra
(order  =        increasing) Order of apertures

# RECENTERING PARAMETERS
(aprecen=        ) Apertures for recentering calculation
(npeaks =       INDEF) Select brightest peaks
(shift  =        yes) Use average shift instead of recentering?

```

```

# RESIZING PARAMETERS
(llimit = INDEF) Lower aperture limit relative to center
(ulimit = INDEF) Upper aperture limit relative to center
(ylevel = 0.1) Fraction of peak or intensity for automatic width
(peak = yes) Is ylevel a fraction of the peak?
(bkg = yes) Subtract background in automatic width?
(r_grow = 1.) Grow limits by this factor
(avglimi= no) Average limits over all apertures?

# TRACING PARAMETERS
(t_nsum = 10) Number of dispersion lines to sum
(t_step = 10) Tracing step
(t_nlost= 3) Number of consecutive times profile is lost before quitting
(t_func= legendre) Trace fitting function
(t_order= 5) Trace fitting function order
(t_sampl= *) Trace sample regions
(t_naver= 1) Trace average or median
(t_niter= 0) Trace rejection iterations
(t_low_r= 3.) Trace lower rejection sigma
(t_high_= 3.) Trace upper rejection sigma
(t_grow = 0.) Trace rejection growing radius

# EXTRACTION PARAMETERS
(backgro= fit) Background to subtract
(skybox = 1) Box car smoothing length for sky
(weights= none) Extraction weights (none|variance)
(pfit = fit1d) Profile fitting type (fit1d|fit2d)
(clean = no) Detect and replace bad pixels?
(saturat= INDEF) Saturation level
(readnoi= 1) Read out noise sigma (photons)
(gain = 1.) Photon gain (photons/data number)
(lsigma = 4.) Lower rejection threshold
(usigma = 4.) Upper rejection threshold
(nsubaps= 1) Number of subapertures per aperture
(mode = ql)

```

3. Налагане на вече определените позиции на апертурите върхи лист с файлове съдържащ всички наблюдения от нощта:

```
cl> epar apall
```

I R A F Image Reduction and Analysis Facility

```
PACKAGE = echelle
TASK = apall
```

```
input = @list.1 List of input images
(output = ) List of output spectra
```

(apertur=) Apertures
 (format = multispec) Extracted spectra format
 (referen= ref.fits) List of aperture reference images
 (profile=) List of aperture profile images

(interac= yes) Run task interactively?
 (find = no) Find apertures?
 (recente= no) Recenter apertures?
 (resize = no) Resize apertures?
 (edit = no) Edit apertures?
 (trace = no) Trace apertures?
 (fittrac= no) Fit the traced points interactively?
 (extract= yes) Extract spectra?
 (extras = no) Extract sky, sigma, etc.?
 (review = no) Review extractions?

Останалите параметри са същите.

4. Калибровка по дължина на вълната. Всяко наблюдателна нощ има спектър на Тории-Аргонова лампа, който се използва като референция за да може да се калибрират линиите по дължина на вълната. Първо се идентифицират линиите в референтния спектър на лампата и после софтуера автоматично идентифицира всички останали линии като за добри резултати е необходимо да се пробват различни комбинации от threshold и степен на фитиращия полином. Примерна конфигурация е дадена тук:

echelle> epar ecidentify

I R A F

Image Reduction and Analysis Facility

PACKAGE = echelle

TASK = ecidentify

images = th1.ms.fits Images containing features to be identified
 (databas= database) Database in which to record feature data
 (coordli= linelists\$thar.dat) User coordinate list
 (units =) Coordinate units
 (match = 0.085) Coordinate list matching limit in user units
 (maxfeat= 5550) Maximum number of features for automatic identification
 (zwidth = 10.) Zoom graph width in user units
 (ftype = emission) Feature type
 (fwidth = 4.) Feature width in pixels
 (cradius= 5.) Centering radius in pixels
 (thresho= 100.) Feature threshold for centering
 (minsep = 2.) Minimum pixel separation
 (functio= chebyshev) Coordinate function
 (xorder = 3) Order of coordinate function along dispersion
 (yorder = 3) Order of coordinate function across dispersion
 (niterat= 0) Rejection iterations

```

(lowreje=          2.5) Lower rejection sigma
(highrej=          2.5) Upper rejection sigma
(autowri=         no) Automatically write to database?
(graphic=         stdgraph) Graphics output device
(cursor =         ) Graphics cursor input
(mode =          ql)

```

5. Последната стъпка е да се използва калибрирания вече спектър на ThAr и да се наложи върху целия лист с наблюдения от вечерта:

```

cl> epar refspectra
cl > refspectra

```

```

PACKAGE = onedspec
TASK = refspectra

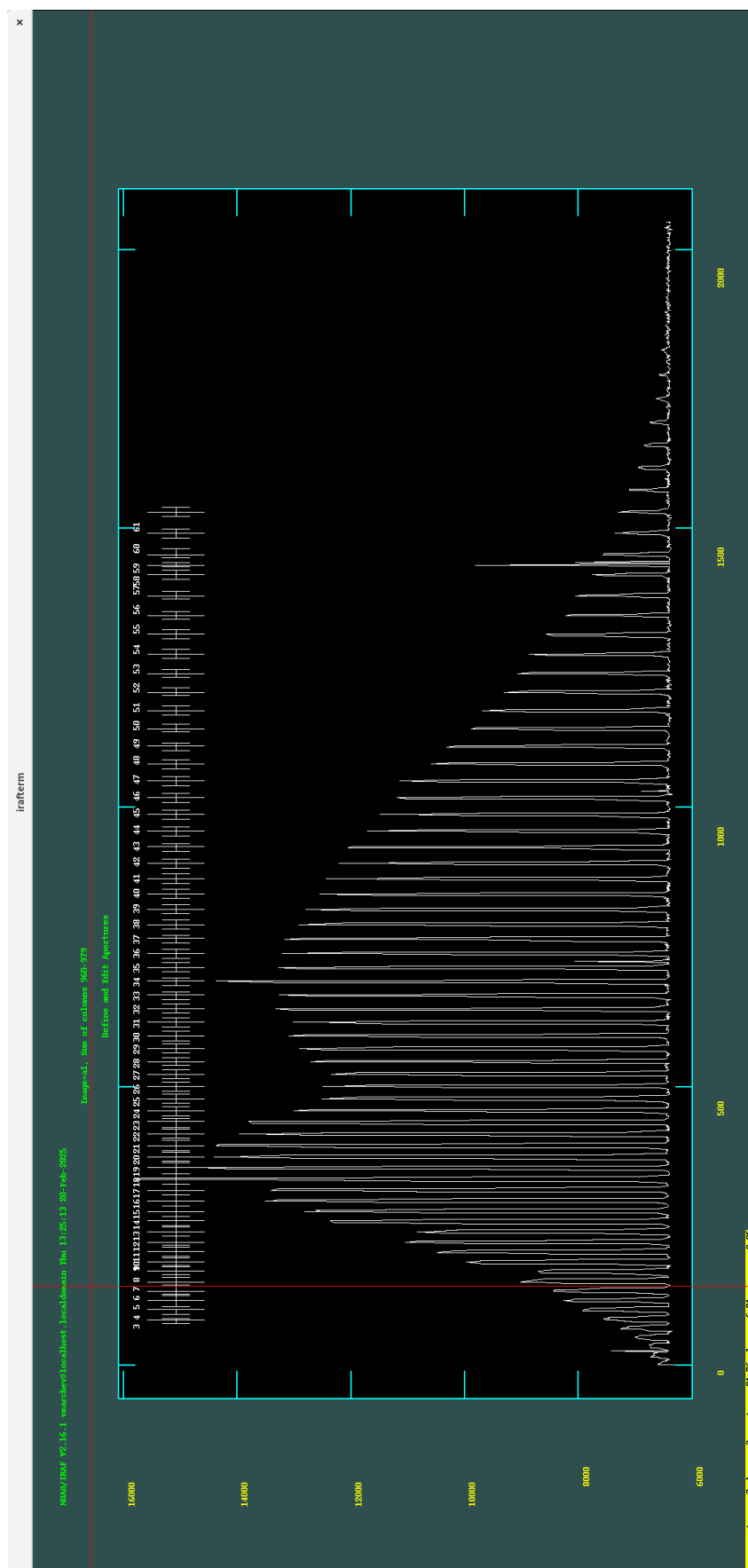
```

```

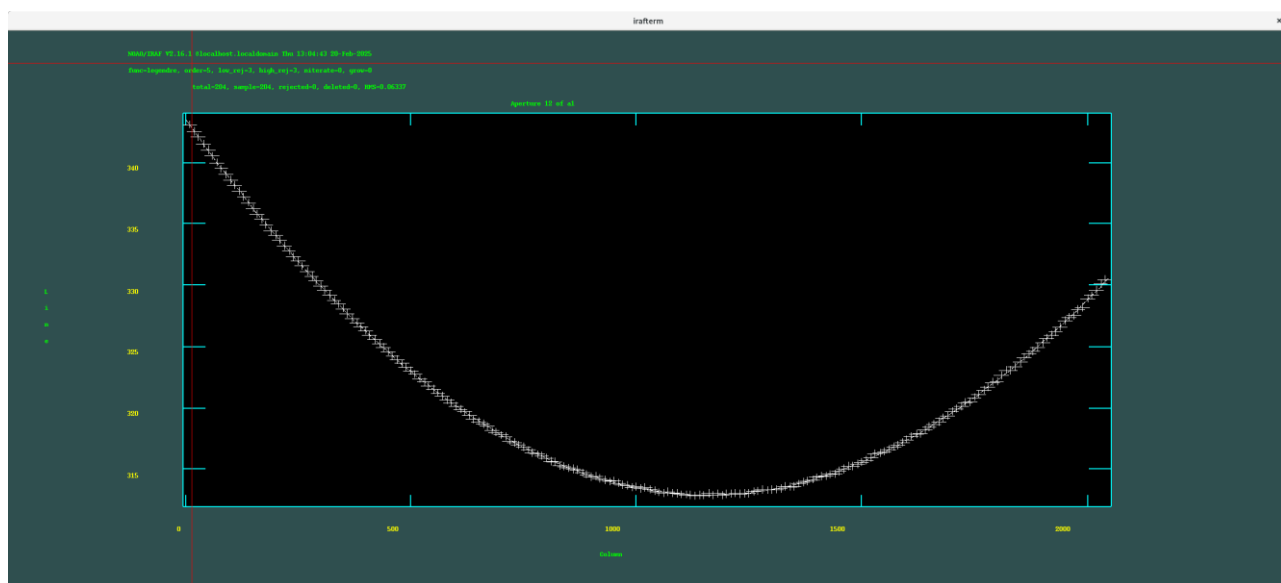
input =          @li.2 List of input spectra
(referen=        th1.ms.fits) List of reference spectra
(apertur=        ) Input aperture selection list
(refaps =        ) Reference aperture selection list
(ignorea=        yes) Ignore input and reference apertures?
(select =        nearest) Selection method for reference spectra
(sort =          ) Sort key
(group =         ) Group key
(time =          no) Is sort key a time?
(timewra=        17.) Time wrap point for time sorting
(overrid=        no) Override previous assignments?
(confirm=        yes) Confirm reference spectrum assignments?
(assign =        yes) Assign the reference spectra to the input spectrum?
(logfile=        STDOUT,logfile) List of logfiles
(verbose=        no) Verbose log output?
answer =         yes Accept assignment?
(mode =          ql)

```

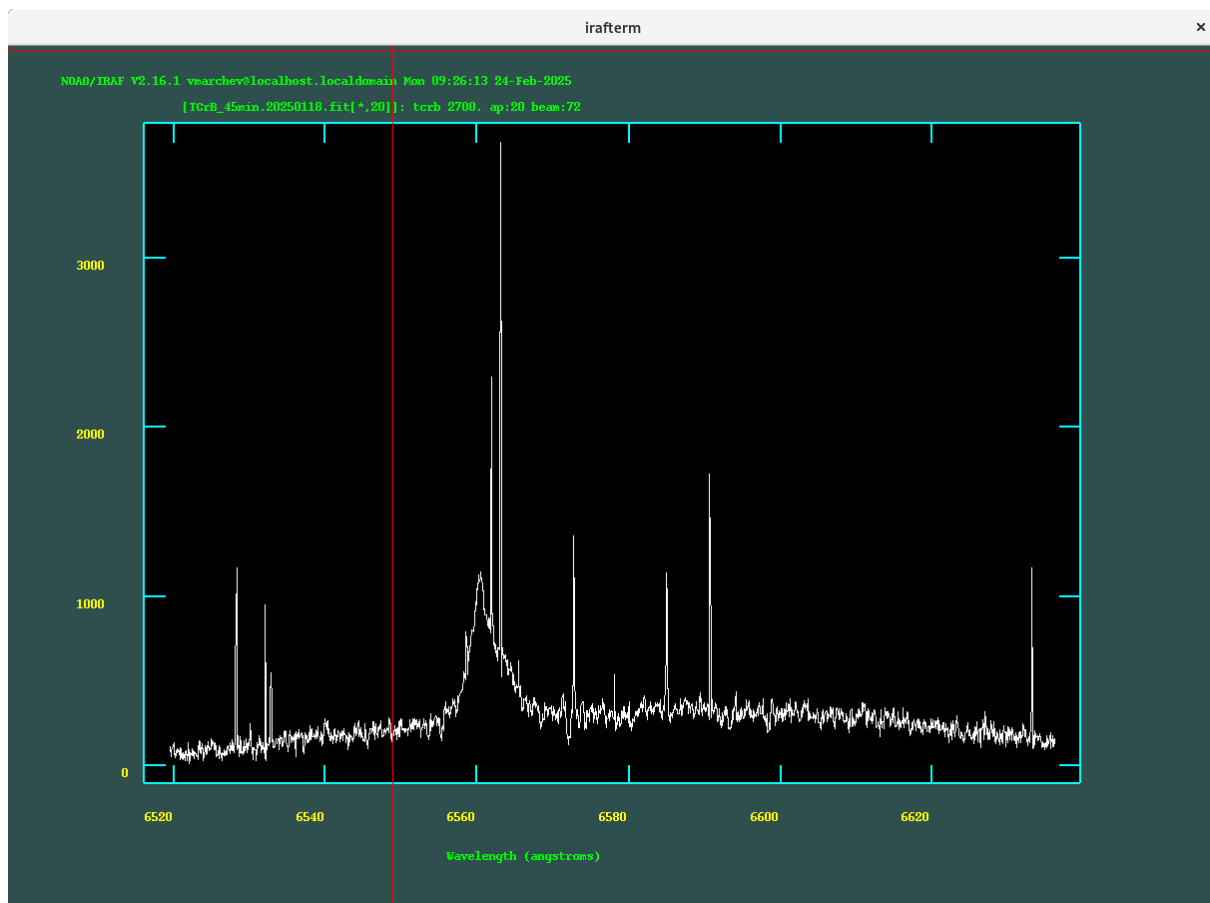
Сурови данни .fits от Ешеле спектрограф прочетени с IRAF.



Единична апертура от .fits файла.



H_{α} линия на Т CrV замърсена от космичен лъч.



Реферетни линии

