



Българска академия на науките
Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Асен Славчев Мутафов

Затъмнителни променливи от UX Ori тип

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация за получаване на научна и образователна степен „Доктор“
по научната специалност 01.04.02 „Астрофизика и звездна астрономия“

Научен ръководител:
проф. д-р Евгени Христов Семков

София • 2023 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2023 година от часа в зала 301 на ИЕ, гр. София, бул. „Цариградско шосе“ 72.

Съдържание

Увод	4
1 Основни характеристики и променливост на звезди преди Главната последователност	5
1.1 Звезди преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел	6
1.1.2 Ae/Be звезди на Хербиг	8
1.2 Типове фотометрична променливост при младите звезди	9
1.2.1 Променливост от тип FU Orionis (фуори)	10
1.2.2 Променливост от типа EX Lupi (ексори)	12
1.2.3 Променливост от типа UX Orionis (уксори)	13
2 Наблюдения и обработка на данните на изследваните звезди.....	19
2.1 Наблюдения	19
2.2 Обработка на данните на изследваните звезди.....	20
2.2.1 Обработка на получените данни за звездата GM Cep	20
2.2.2 Обработка на получените данни за звездата V1180 Cas.....	21
3 Резултати от наблюденията на обектите и анализ на получените резултати.....	23
3.1 GM Cep.....	23
3.2 V1180 Cas.....	29
4. Заключение.....	35
5. Научни приноси.....	37
6. Публикации и цитирания	38
6.1 Публикации на които се основава дисертационния труд	38
6.2 Други публикации на докторанта	39
Благодарности	40
Библиография.....	41

Увод

Новообразуваните звезди се намират над Главната последователност (ГП) на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел и в зависимост от началната им маса достигат до ГП за различни периоди от време. В този етап на еволюцията си звездите се наричат звезди преди ГП (протозвезди) и основен източник на лъчението им е освободената при свиването гравитационна енергия. Формирането на планетите протича в акреционния диск и започва твърде рано, когато акрецията върху звездата е още силна.

Фотополяриметричните наблюдения и изследванията за фотометрична и поляриметрична променливост са от голямо значение за разбирането ни за ранните фази на образуване на звездите. Гравитационната нестабилност и хромосферната активност са характерни по време на формирането на младите звездни обекти. Основна характеристика на звездите преди ГП е фотометричната променливост, която се проявява като временно увеличаване на яркостта (избухвания), временни спадове на яркостта (затъмнения), периодични или непериодични вариации на яркостта за кратък или дълъг период от време.

Звездите преди ГП при които се наблюдава увеличение на светимостта са разделени на два подкласа: FUors и EXors, носещи имената на прототипите – звездите FU Orionis и EX Orionis. Друг тип звезди преди ГП за които са характерни временни спадове на яркостта са звездите от тип UXori, носещи името на прототипа – звездата UX Orionis.

Подробното и продължително фотометрично изследване в различни спектрални диапазони на звездите от тип UX Orionis предоставя възможност за по-задълбочен анализ на физическите явления. С резултатите от тези наблюдения могат да се сравнят данните от теоритични модели описващи различни теории за физическите процеси, определянето на параметрите на диска и механизмите за поглъщане и разсейване на светлината.

Настоящата дисертация е посветена на продължителното фотометрично изследване на звездите V1180 Cas и GM Cep показващи изменения на блясъка характерни за типа UXors. Основната цел на настоящата работа е на базата на кривите на блясъка за дълъг период от време да бъде точно класифицирана променливостта на изследваните звезди и да се направят изводи за физическите механизми, инициращи наблюдаваните промени в блясъка им. Дисертацията допълва по-ранния непълен поглед върху фотометрията на изследваните звезди и представя тяхната фотометрична история.

1 Основни характеристики и променливост на звезди преди Главната последователност

Една от основните фундаментални характеристики на младите звездни обекти е тяхната фотометрична променливост в оптичния и близкия инфрачервен диапазон. Проявява се като временни спадове в яркостта (затъмнения), преходни увеличения на яркостта (избухвания), периодични или непериодични промени в яркостта за кратки или по-дълги периоди от време.

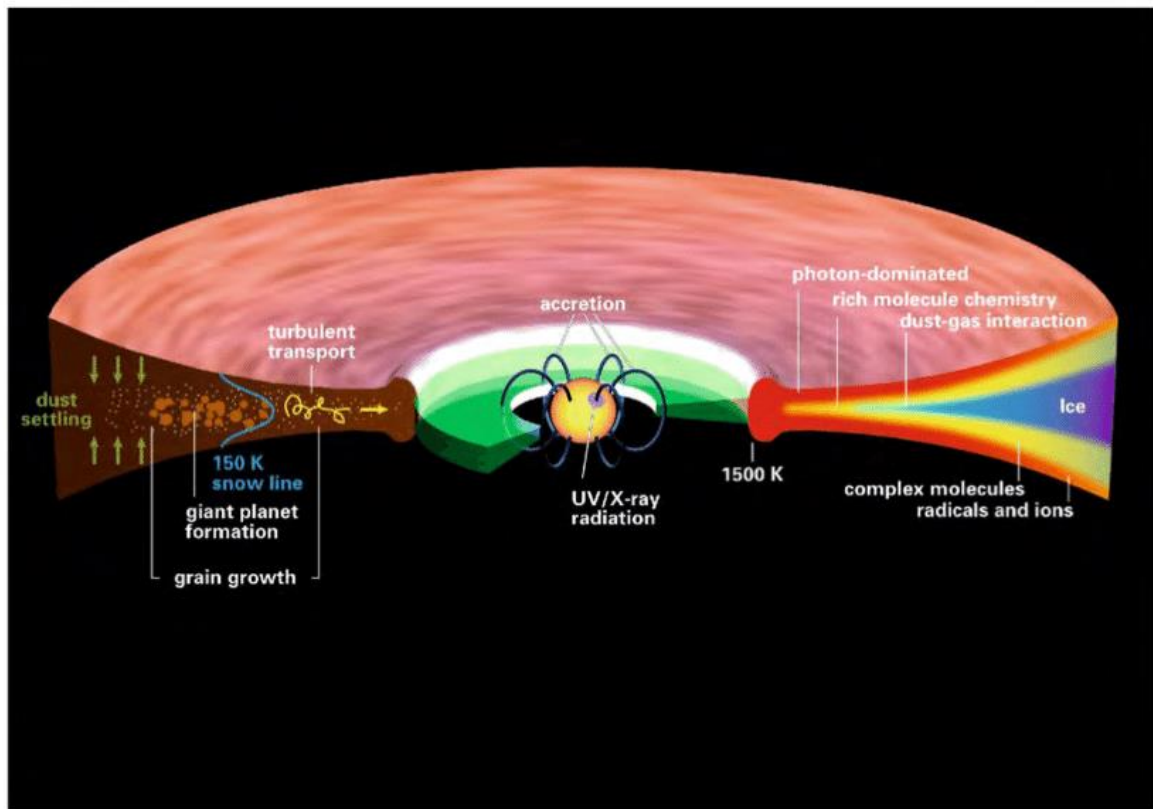
Фотометрична променливост с амплитуди с различна величина и периодичност може да се наблюдава и при двата типа звезди преди Главната последователност (ГП) с маси до $8M_{\odot}$ - широко разпространените звезди с малка маса ($M \leq 2M_{\odot}$) Т Тау и при по-масивните ($2M_{\odot} \leq M \leq 8M_{\odot}$) Ae/Be звезди на Хербиг с емисионни линии в спектъра (НАЕВЕ) (Herbst et al. (1994); Herbst et al. (2007)).

На Фигура 1 е показана схема на физическата и химическа структура на протопланетен диск на $\sim 1-5$ Муг около звезда, подобна на Слънцето (Henning & Semenov (2013)).

Значителна част от звездите НАЕВЕ – Ae/Be звезди на Хербиг с емисионни линии в спектъра и някои звезди от ранен тип класически Т Тау (СТТ) проявяват силна фотометрична променливост с внезапни квази-алголски спадове в яркостта и амплитудите до $2^{m.5}$ (V) (Natta et al. (1997); van den Ancker et al. (1998); Herbst & Shevchenko (1999)). Тази група звезди преди ГП с маси, подобни на или по-големи от слънчевата маса, са наречени UXors на името на техния прототип UX Orionis. Те показват увеличение на поляризацията и специфична цветова променливост („ефект на посиняване“) при дълбоките минимума на яркостта.

Едно от най-разпространените обяснения на неговата променливост е променливото поглъщане от бучки прах или нишки, преминаващи през зрителния лъч към звездата (Dullemond et al. (2003); Grinin et al. (1991)).

Обикновено, когато звездата е покрита от облаци прах, разположени по зрителния лъч, тя става по-червена. Но когато затъмнението нарастне достатъчно, разсеяната част от светлината в общата наблюдавана светлина става значителна и цветът на звездата става по-син.



Фигура 1. Схема на физическата и химическа структура на протопланетен диск на $\sim 1-5$ Myr около звезда, подобна на Слънцето (Henning & Semenov (2013)).

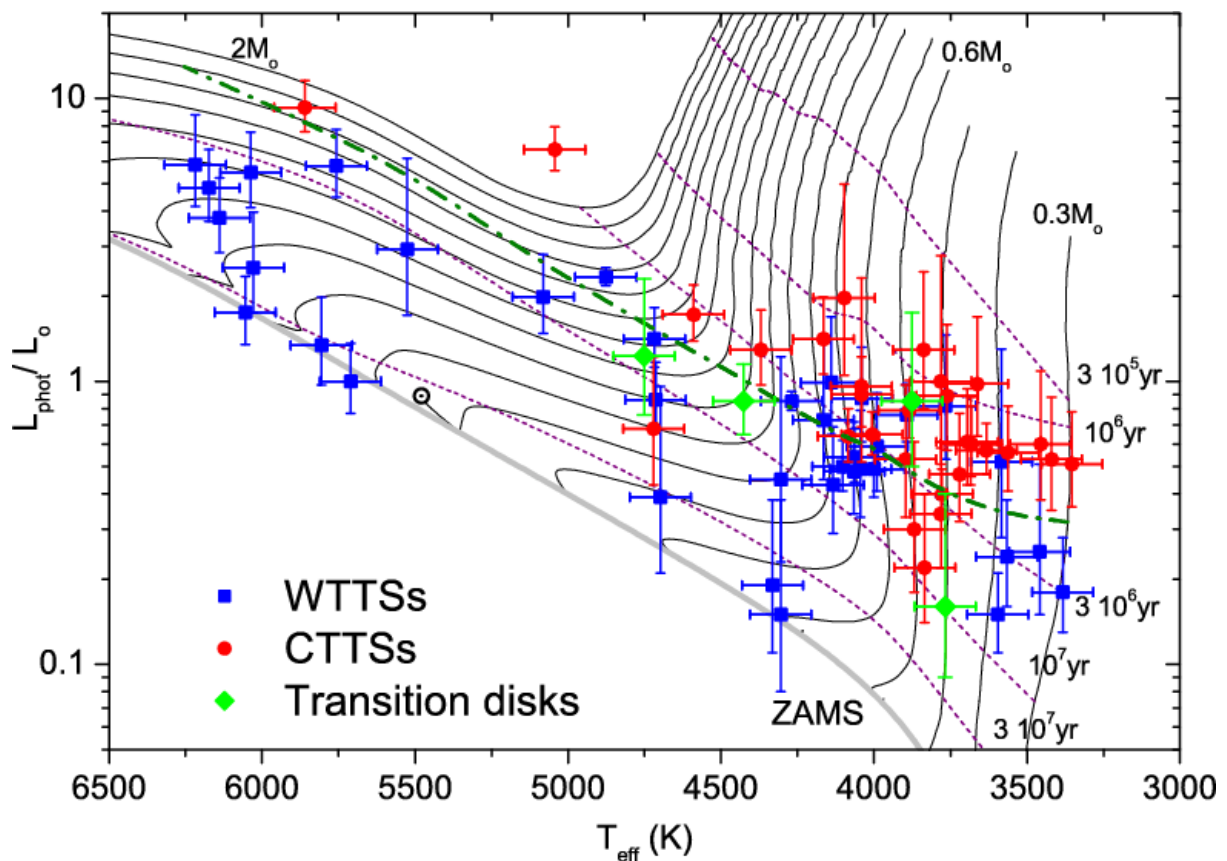
1.1 Звезди преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел

Широко разпространените звезди от тип T Tauri с малка маса ($M \leq 2M_{\odot}$) и по-масивните ($2M_{\odot} \leq M \leq 8M_{\odot}$) Ae/Be звезди на Хербиг с емисионни линии в спектъра (HAEBE) са два от класовете на звезди преди ГП. И за двата типа основна характеристика е спектралната и фотометрична променливост, открита в самото начало на тяхното изучаване (Herbig (1960)). Те показват различни видове фотометрична променливост с различни амплитуди и периоди (Herbst et al. (1994); Herbst et al. (2007)).

1.1.1 Звезди от типа T Tauri

Слънцеподобните обекти намиращи се преди ГП на диаграмата на Херцшпунг – Ръсел, т.е. звездите от типа T Tau могат да показват умерени промени в яркостта и цвета си (Herbst et al. (1994)) поради ротационна модулация от магнитни/хромосферни хладни петна или акреция/горещи петна на повърхността.

Върху Диаграмата на Херцшпунг – Ръсел T Tauri звездите се намират вдясно от ГП, в областта, заета от еволюционните трекове на звезди с маса $0.3 - 3 M_{\odot}$ и възраст от порядъка на $10^6 - 10^7$ г. На Фигура 2 са показани три еволюционни трека за звезди с маси $0.4 M_{\odot}$, $1.0 M_{\odot}$ и $2.0 M_{\odot}$, заедно с три изохрони за възрасти 10^5 , 10^6 и 10^7 г.



Фигура 2. Диаграма на Хершпунг-Ръсел на движеща се група звезди. Червените точки обозначават класически Т Tauri звезди (CTT), сините квадрати маркират Т Tauri звездите със слаби линии H α (WTT), а зелените диаманти показват звездите с преходни дискове (DI Tau, DM Tau, GM Aur и Lk Ca 15). Лентите за грешки показват σ неточности на L_{phot} и T_{eff} . Плътните черни линии са еволюционни трекове, изчислени с $Y=0,277$ и $Z=0,02$, за звезди с маси, вариращи от $0,3$ до $2 M_{\odot}$ със стъпка на нарастване на масата от $0,1 M_{\odot}$. Текущата позиция на Слънцето, изчислена с тези параметри е показана със соларен символ. Обърнете внимание, че параметрите, избрани за изчисляване на еволюционните трекове преди Главната последователност, не са слънчеви, така че свойствата на изчисления $1 M_{\odot}$ модел не съответстват точно на тези на действителното Слънце. Прекъснатите линии са изохрони за възрастите, посочени на фигурата, докато плътната тъмнозелена пунктирна линия показва живота на диска T_d като функция на звездната маса (Bertout et al. . (2007)).

В своята работа Joy (1945) дефинира критериите на звездите от типа Т Tauri по следния начин:

- (1) бързи неправилни промени в блясъка до 3 зв. вел.;
- (2) спектрален клас F5-G5 с емисионни линии, наподобяващи тези на слънчевата хромосфера;
- (3) ниска светимост;
- (4) звездите са свързани със светли и тъмни мъглявини.

По-късно Herbig (1962) допълва дефинициите по отношение на първичните спектрални критерии на Т Tauri звездите:

(1) линиите на водорода и H и K линиите на CaII са в емисия;

(2) съществуват емисионните линии на FeI в 4036 Å и 4132 Å ;

(3) емисионните линии на [SII] в 4068 Å и 4076 Å се срещат често, но не винаги. Емисионните линии обикновено са насложени върху един непрекъснат спектър, който варира от чист континуум (идеалната крива за черно тяло при съответната температура) до нормален абсорбционен спектър;

(4) когато абсорбционния спектър е видим, спектралния клас на звездата се намира в границите от късния F до M и е налице силна абсорбция на Li 6707 Å;

(5) звездите се намират близо до тъмни области.

Тези дефиниции са актуализирани от Bastian et al. (1983). Тяхната дефиниция гласи, че звездите от типа Т Tauri, са:

(1) звездни обекти, свързани с тъмни области;

(2) в спектъра си те показват балмерови линии на водорода и линиите H и K на CaII, които са в емисия;

(3) еквивалентната ширина на H α линията е най-малко 5 Å.

1.1.2 Ae/Be звезди на Хербиг

Звездите на Хербиг с емисионни линии в спектъра Ae/Be се явяват обекти с междинна маса, запълващи дупката между звездите с малка маса от типа на слънчевата ($M_* \leq 1.5 M_{\odot}$) и най-масивните звезди ($M_* \geq 10 M_{\odot}$). Те за пръв път са открити от Herbig (1960). Той подбира звезди по следните критерии:

а) спектрален клас A или по-ранен с емисионни линии;

б) звездата се намира в тъмна област;

в) звездатата осветява сравнително ярка мъглявина в непосредствена близост.

Критериите, по които са подбрани изследваните звезди са аналогични на критериите за класификация на Т Tauri звездите. Herbig (1960) веднага отбелязва сложността за разделянето на тези звезди от другите класове B- и A- звезди с околослънчево вещество.

Критериите на Herbig (1960) за класифициране на Ae/Be звездите с емисионни линии в спектъра са допълнени от van den Ancker et al. (1997). Авторите определят астрофизичните параметри (разстояние, температура, маса, възраст) и построяват диаграма на Херцшпрунг – Ръсел на изследваните звезди на Хербиг. Концентрацията на звездите върху диаграмата в близост до ГП се обяснява с по-продължителна еволюция на звездите близо до ГП.

В няколко статии са представени критерии за наблюдателно определяне на звездите от класа Хербиг Ae/Be (The et al. (1994); Malfait et al. (1998); Waters et al. (1998); Vieira et al. (2003)). Общото заключение е, че звездите на Хербиг Ae/Be имат емисионни линии от

спектрален клас В, А или F; H I емисионни линии, често свързана с мъглявина и инфрачервен екцес от топъл (~1000 K) или хладен (~100 K) околозвезден прах.

Brittain et al. (2023) определят звездите на Хербиг Ae/Be като клас млади звезди с междинна маса еволюиращи към ГП, с маса $\geq 1.5 M_{\odot}$ обкръжени от остатъчен акреционен диск, за което свидетелства наличието на газ в оптичния спектър и / или спектъра с по-големи дължини на вълните, а също инфрачервен екцес, породен от околозвездния прах.

Значителна част от звездите на Хербиг с емисионни линии в спектъра Ae/Be и ранните типове Т Тау показват силна фотометрична променливост с внезапни квази-Алгол спадове в яркостта и амплитуди до 2m,5 (V) (Natta et al. (1997), van den Ancker (1998)). По време на дълбоките минимума на блясъка на звездата тя става по синя (Vibo et al. (1990)). Тази специфична променливост на цвета е наречена “blueing effect”, и обикновено е съпроводена с увеличаване на поляризацията. Прототипът на тази група звезди преди ГП с междинна маса е звездата UX Orionis и затова те са наречени UXors. Широко приетото обяснение на променливостта е променливо поглъщане от струпания на прах или нишки, преминаващи през зрителната линия към звездата (Dullemond et al. (2003), Grinin et al. (1991)). Типичната амплитуда за UXor звездите е 2-3m.

Младите звезди с междинна маса се развиват по еволюционния си трек от ГП с нулева възраст към ГП, те ще придобият свойства, които ще ги класифицират като звезди от типа Т Тау, докато още не са охладнели и ще се преместят към по-ранен спектрален клас по време на повишаването на тяхната температура заедно с развитието си по радиационния трек до достигането на ГП с нулева възраст (ZAMS).

По този начин звездите със средна маса от типа Т Тау, от спектрален клас F, G и K намиращи се преди ГП, се явяват еволюционни предшественици на звездите на Хербиг (Brittain et al. (2023)).

Около 10 % от звездите на Хербиг Ae/Be имат магнитно поле, което можем да измерим (Vioque et al. (2018)). Повечето от магнитните полета са от порядъка на 100 G, а някои имат магнитна индукция на порядък по-голяма.

Темповете на акреция при звездите на Хербиг с маса $\leq 4 M_{\odot}$ са в диапазона $10^{-8} M_{\odot} / \text{год.} \leq \dot{M} \leq 10^{-6} M_{\odot} / \text{год.}$ Отношението между звездната светимост и акреционната светимост се определя на $-2 \lesssim \log(L_*/L_{\odot}) \lesssim 2$. За звездите с по-голяма маса се наблюдава прекъсване на това съотношение (при $M \sim M_{\odot}$) (Brittain et al. (2023)).

1.2 Типове фотометрична променливост при младите звезди

В своята статия Herbst et al. (1994), използвайки електрофотометричен UBVRI каталог, съдържащ данни за няколко стотин звезди, дефинират три типа фотометрична променливост, които се наблюдават при обектите преди Главната последователност:

Тип I: Ротационни модуляции на блясъка, причинени от студени магнитни петна

Периодичните промени в блясъка се наблюдават при всички млади звезди с маси, близки до слънчевата. При Т Тау звездите със слаби линии в спектъра най-лесно се разпознават. Прототип на този тип променливи е звездата V410 Тау.

Тип II и IIr: Променливост, дължаща се на студени и горещи петна

Според Herbst et al. (2007) високоамплитудните промени в блясъка на класическите T Tau звезди са причинени от акреция на вещество от околозвездния диск, насочвана от магнитното поле на звездата. В този случай темпът на акреция е силно променлив и зоните на акреция са разположени хаотично по звездната повърхност. Измененията в блясъка са неправилни с амплитуди достигащи $1.5m$ (V) за няколко денонощия.

Променливостта от II тип е периодична, а от тип IIr – непериодична. И двата типа променливост са характерни само за класическите T Tauri звезди и могат да се интерпретират като промяна на конфигурацията от горещи и студени петна върху повърхността на звездата. Горещите петна се дължат на акреция на вещество от околозвездния диск и биха могли да обяснят „воалирането“ на линиите в спектъра на класическите T Tauri звезди. Горещите петна имат по-кратко време на живот от студените, но могат да предизвикат променливост с амплитуди няколко звездни величини, особено в B и V филтри, тъй като в зоните на акреция температурата достига $7 \cdot 10^3 - 10^4$ K. Геометрията и разпределението на горещите петна по звездната повърхност не са изяснени, но според теоретичните модели около 1% от повърхността на звездата е заета от петна. Типичен пример за променлива от този тип е BP Tau.

Тип III: Променлива екстинкция от околозвезден прах

Промените в блясъка при този тип променливост се характеризират с големи амплитуди ($\Delta V = 1 - 3m$), като в спектъра не се наблюдава ефекта на „воалиране“ на спектралните линии, нито промени в ефективната температура. През по-голямата част от времето, променливите от този тип се намират в състояние с висока светимост, когато внезапно блясъкът им отслабва с няколко звездни величини. Фактът, че степента на линейна поляризация на звездното лъчение нараства, когато блясъкът на звездата спада, е основен аргумент в полза на предположението, че променливата екстинкция е причина за спадането на звездния блясък.

Този тип променливост се наблюдава главно при звездите на Хербиг от спектрални класове Ae/Be, но се среща и при T Tau звезди от ранни K спектрални класове, като RY Tau и RY Lupi. Звездите, показващи такава променливост се наричат още променливи от тип UX Ori. По нататък ние ще разгледаме по-подробно съществуващите теории обясняващи в една или друга степен наблюдателните данни.

1.2.1 Променливост от тип FU Orionis (фуори)

До момента са ни известни два типа избухвания, при които звездите увеличават яркостта си с голяма амплитуда. Те са наречени на техните прототипи – FU Orionis (фуори; Ambartsumian (1971)) и EX Lupi (ексори; Herbig (1989)). Това са звезди преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел с характерната за звездите от типа T Tauri променливост, дължаща се на масивни околозвездни дискове.

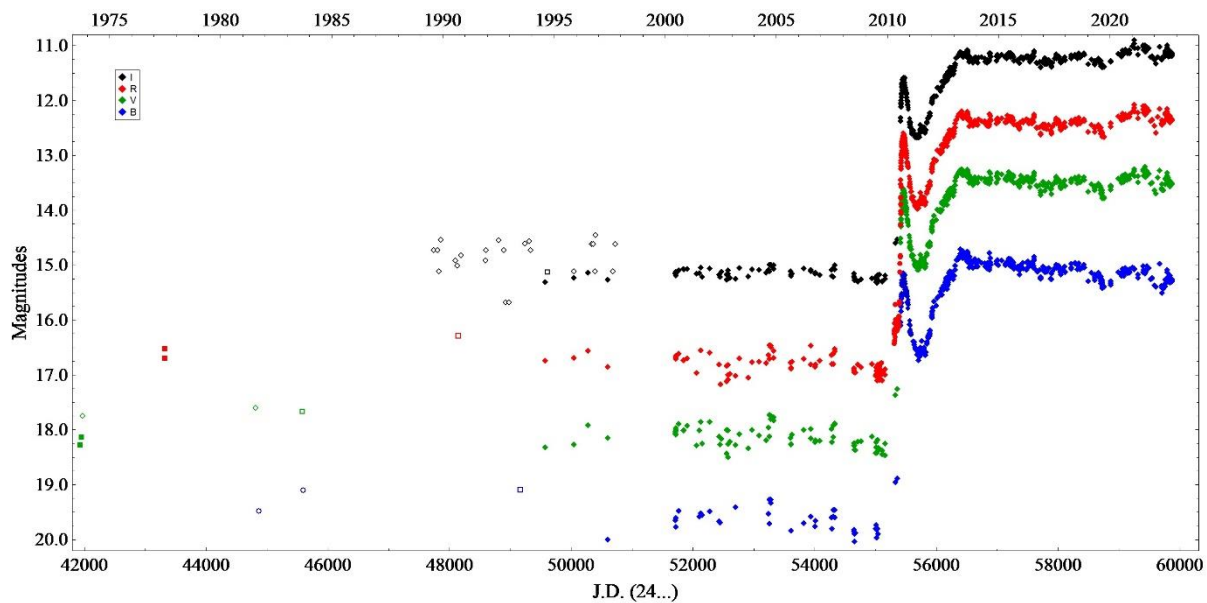
Звездата FU Orionis, намираща се в тъмната маглявина Barnard 35 е открита през 1936 година от Wachmann (1939) (1954) след като покачва блясъка си с около 6^m и за няколко десетилетия остава единствения познат ни обект от този тип. Welin (1971) наблюдава покачване на блясъка с около 5^m при звездата LkHa = V1057 Cyg, намираща се в областта NGC 7000. До този момент тази звезда е позната като неправилна променлива.

Получените спектри преди и след избухването показват значителна промяна от типичен емисионен спектър на Т Tauri звезда към спектър на звезда от клас А в синия диапазон и звезда от клас F-G0 в червения диапазон на спектъра, с характерен P Cygni профил на $H\alpha$ и линии на Na и силна линия на Li I 6707 Å (Herbig & Harlan (1971)).

Основните характеристики на звездите тип FU Orionis са:

- 1) покачване в продължение на няколко месеца или година на блясъка на звездата с около 4-5 звездни величини в оптичния диапазон на спектъра, последвано от сравнително по-бавно спадане, продължаващо няколко десетилетия;
- 2) спектралния клас на фуорите се променя по време на избухването. В зависимост от дължината на вълната в оптичния диапазон спектъра става типичен за F-G свръхгигант ($T_{\text{eff}} \sim 6500 - 7200 \text{ K}$), докато в инфрачервения диапазон се характеризира със силни ивици на CO и съответства на спектъра на свръхгигант от спектрален клас K-M;
- 3) оптичния спектър на фуорите се характеризира с широки абсорбционни линии от балмеровата серия (особено $H\alpha$) и Na I 5890/5896 Å с ясно изразен P Cygni профил. Профилите на много от абсорбционните линии в оптичния и инфрачервения спектър се характеризират с двоен минимум и показват високи скорости на въртене – индикация за наличието на въртящ се диск;
- 4) Разпределението на енергията в спектъра на фуорите се характеризира със силен инфрачервен ексцес. При много от тях наблюдавания ексцес може да се моделира с наличието на акреционен диск. При други обекти, наблюдаваният инфрачервен ексцес е много по-голям от предсказания от моделите и вероятно свидетелства за наличието на обширна околосвездна обвивка от прах;
- 5) Фуорите са млади обекти. Срещат се в области на активно звездобразуване и са свързани с отражателните мъглявини. В спектъра им често се наблюдава абсорбционна линия на Li I 6707 Å, която е характерна за младите звезди;
- 6) Предшественици на фуорите са звезди джуджета със слаба променливост, най-вероятно звезди от типа Т Tauri. Само звездите V1057 Cyg и V2493 Cyg (Semkov et al. (2010)) има спектър получен преди избухването, който има характеристиките на Т Tauri звезда.

Според най-разпространения модел (Hartmann & Kenyon (1985) (1996)) избухването при фуорите се дължи на краткотрайно голямо увеличение на акреция на вещество от околосвездния диск върху звездната фотосфера. По време на избухването светимостта на диска надвишава тази на централната звезда между 100 и 1000 пъти. На Фигура 3 са представени кривите на блясъка на фуора V2493.



Фигура 3. Исторически криви на блясъка BVRI на V2493 Cyg/HBC 722 за периода от септември 1973 г. до февруари 2021 г. (Semkov et al. (2012b), Semkov et al. (2021)).

Младата звезда от тип Т Tauri е заобиколена с акреционен диск, темпът на акреция е около $10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Тази относително бавна акреция е прекъсвана от внезапни смущения във вътрешните части на диска, при които темпът на акреция достига приблизително $10^{-4} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Дискът се загрива и излъчва по-голямата част от енергията си в оптичния диапазон. За избухване с продължителност от порядъка на 100 години върху звездата трябва да акретира вещество с маса по-голяма от $0.01 M_{\odot}$. По време на избухването се генерира звезден вятър със скорост $\geq 300 \text{ km/s}$ и темп на загуба на маса $10^{-1} - 10^{-2}$ от темпа на акреция. Съществуват предположения, че протозвездната обвивка продължава да пада върху диска, осигурявайки му необходимото количество вещество за повторно избухване.

До момента не е наблюдавано повече от едно избухване при звезди от типа фуори.

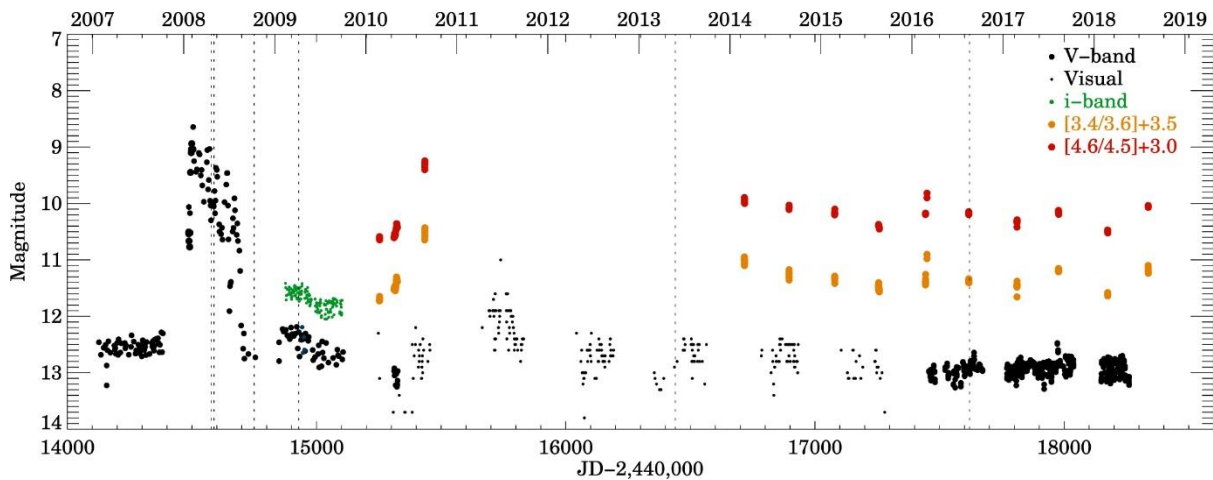
1.2.2 Променливост от типа EX Lupi (ексори)

За първи път звездата EX Lupi привлича вниманието към себе си през 1929 г., когато върху една спектрограма с обективна призма от Харвард са забелязани емисионни линии. Впоследствие McLaughlin (1946) получава крива на блясъка от около 500 плаки от колекцията на Харвард, получени между 1893 и 1941 г. Данните показват, че яркостта на звездата понякога се покачва с няколко звездни величини (най-малко 2,5 mag), но обикновено тя се намира в минимума на блясъка си (около $B = 14,7$) в продължение на години.

Физическият механизъм, причиняващ избухванията на ексорите все още се обсъжда. Поради малкия брой известни обекти от типа ексори основно характеристиките на този тип променливи звезди се определят от наблюденията на самата EX Lupi.

EX Lupi е млада Т Tauri звезда ($\sim 2 \text{ Myr}$, Garufi et al. (2018)) от спектрален клас M0 с $M^* = 0,6 M_{\odot}$, на разстояние $157 \pm 0,9 \text{ pc}$ (Gaia Collaboration (2018); Bailer-Jones et al. (2018)). Най-яркото й известно избухване е през 2008 г. (Jones (2008)), когато тя покачва блясъка

си с около четири звездни величини във видимата област на спектъра. Кривите на блясъка ѝ са показани на Фигура 4 (Ábrahám et al. (2019)).



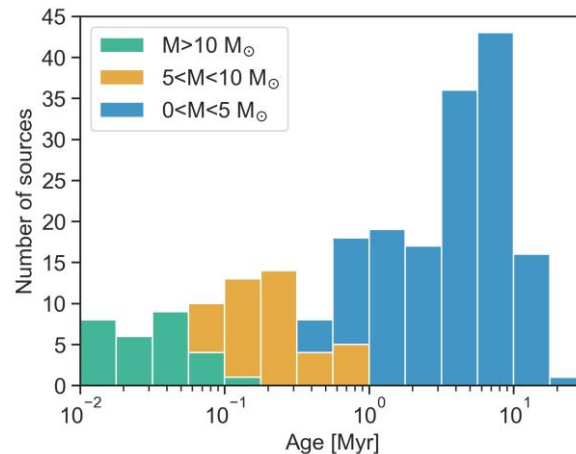
Фигура 4. Криви на блясъка на EX Lup. Наблюденията на V-филтър преди 2010 г. и оценките на визуалната яркост са от базата данни на AAVSO (<http://www.aavso.org>). Точките с данни за V-филтър от 2016 г. и по-късно са от проучването ASAS-SN (Shappee et al. (2014); Kochanek et al. (2017)). Данните за i-филтър са наблюдавани с телескопа RoBoTT в Universitätssternwarte Bochum. Фотометрията от 3,4 и 4,6 μm е направена от сателита WISE (Wright et al. (2010)) и е публикувана в AllWISE Multiepoch Photometry Table и в NEOWISE-R Single Exposure (L1b) Source Table. Допълнителни данни от 3,6 и 4,5 μm са взети от космическия телескоп Spitzer и са публикувани в Kóspál et al. (2014). За по-добра видимост кривите на инфрачервения спектър се изместват със стойностите, посочени в горния десен ъгъл. Вертикалните пунктирани линии маркират епохите, когато са наблюдавани средни инфрачервени спектри.

1.2.3 Променливост от типа UX Orionis (уксори)

Съществува още един клас от звезди наречени уксори (Herbst et al. (1994)) носещи наименованието на прототипа на тази група звездата UX Orionis. Този тип звезди показва неравномерно затъмняване, причинено от поглъщане от околосъзвезден прах. Обектите от типа UX Orionis (уксори) са звезди преди Главната последователност, предимно с междинна маса. Те са отделен подклас сред звездите на Хербиг Ae/Be. Звездите от този тип демонстрират фотополяриметрична променливост. Това са обекти от спектрален клас A0 или по-късен. През по-голямата част от времето уксорите се намират в състояние с относително висок блясък, когато внезапно блясъкът им спада с $\Delta V \sim 1 - 3^m$ за няколко денонощия или седмици, дори месеци (Voshchinnikov (1989); Grinin et al. (1991); Herbst et al. (2007)). Тези спадове на блясъка обикновено са съпроводжани от повишена степен на линейна поляризация до 5 – 8 %. Рядко се наблюдават необикновени много големи затъмнения с висока степен на поляризация (Rostopchina et al. (2001)). Спадовете на блясъка обикновено са разделени от сравнително дълги периоди. Степента на фотометрична активност е различна при различните звезди и се променя с времето (Zaitseva (1986)).

Приликата във формата на кривата на блясъка в минимума с тази на затъмнителните двойни звезди е причина състоянието на минимален блясък на тези звезди да се нарича „минимум от тип Алгол“. Освен звездата UX Orionis като уксори може да посочим звездите CO Ori, RR Tau и VV Ser.

В същата статия van den Ancker et al. (1998) обясняват наблюдаваната зависимост между спектралния клас на звездата и амплитудата на изменение на нейния блясък с т. нар. еволюционен ефект. Звездите с по-малка маса стават видими в оптичния диапазон по време в етапа на гравитационно свиване, преди звездата да достигне Главната последователност с нулева възраст (ZAMS), докато по-масивните звезди стават видими след като достигнат ZAMS (виж Фигура 5).



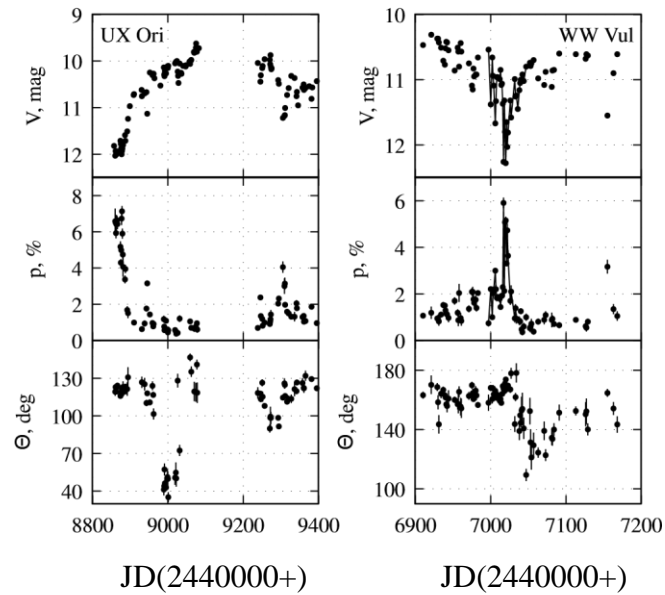
Фигура 5. Разпределение по възраст на 218 звезди на Хербиг (Vioque et al. (2018)). Звездите с най-голяма маса имат най-малка възраст. Възрастта на болшинството звезди на Хербиг Ae, а следователно и техните дискове надхвърля няколко милиона години (Brittain et al. (2023)).

Характерно за ускорите е, че в дълбоките минимума в блясъка звездата става по-синя (Bibo & The (1990)). Този ефект се нарича „blueing” ефект или още „посиняване“ или „обръщане на цвета“ на звездата. Когато звездата започва да отслабва тя първоначално става по-червена, но в самите минимума на блясъка звездата става по-синя.

Освен фотометрична променливост ускорите показват и поляриметрична променливост (виж Фигура 6). По време на дълбоките минимума поляризираната светлина се увеличава от типични междузвездни стойности до няколко процента (Dullemond et al. (2003)). Понякога позиционният ъгъл на линейната поляризация също може да се изменя по време на затъмнението (Shakhovskoi et al. (2003)).

В спектрите на ускорите се регистрират редица линии от фотосферен и междузвезден произход. Някои от тях (NaI, HeI 5876, H_{α}) са силно променливи (Grinin et al. (1994)) и са доказателство за сложни движения на околзвездния газ в непосредствена близост до звездата.

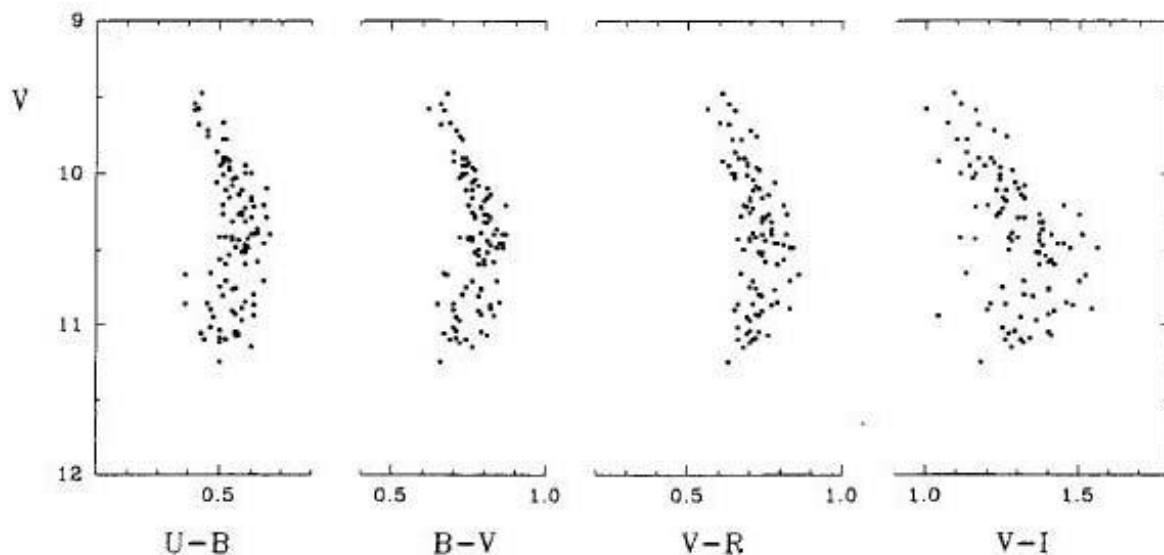
Според общоприетата теория фотополариметричната променливост на ускорите и дълбоките минимума в блясъка им се дължат на затъмнения от оптично дебели прахови облаци (Thé (1994)). От наблюдаваната висока линейна поляризация наблюдавана в дълбоките минимума на блясъка, може да се предположи, че фотометричната активност на звездите от типа UX Ori се дължи на малкия наклон на околзвездния диск към лъча на зрение. Според този модел звездната атмосфера е разпределена във вид на дискообразна структура, като праховите частици са разположени във външния студен край на диска, а дискът е разположен ребром спрямо наблюдателя.



Фигура 6. Звездна величина във V филтър (горния панел), степен на поляризация (средния панел) и позиционен ъгъл на поляризацията (долен панел) по време на продължителното дълбоко затъмнение на звездите UX Orionis (Grinin et al. (1994)) и WW Vul (Grinin et al. (1988)).

По време на минимумите в блясъка нараства степента на линейна поляризация на лъчението (Grinin et al. (1991); Grinin et al. (1994)). Наблюдаваният ефект може да се обясни с наличието на околосвезден прах, който разсейва лъчението от звездата. Разсейването от прахови частици е един от основните източници на поляризация при младите звезди. В съгласие с разглеждания модел е и друг наблюдаван ефект: в дълбоките минимума на блясъка се наблюдава промяна на посоката на изменение на цвета на звездата върху диаграмите цвят – величина (обръщане на цвета или посиняване на звездата) (Zaitseva (1986), Herbst (1986), Grinin et al. (1991)). С отлабване на блясъка, първоначално звездата става по-червена, но близо до минимума цветовите индекси се променят в противоположна посока, цветът на звездата става по-син (виж Фигура 7).

Първоначално тази промяна на цвета се обяснява с наличието на допълнителен източник на енергия на звездата в синия диапазон, който е толкова слаб, че приносът му става забележим, когато общият блясък на звездата отслабне. Според Grinin (1991) източник на такова синьо лъчение може да бъде излъчването от самата звезда, разсеяно от околосвездния прах. Разсеяната от праха светлина се наблюдава само в дълбоките минимума, когато звездата е почти напълно покрита от непрозрачни облаци прах, пресичащи зрителния лъч.



Фигура 7. Диаграми цвят – величина на звездата от тип Ae/Be звезди на Хербиг CQ Tau (Grinin (1992)).

В работата на Herbst & Shevchenko (1999), обобщавайки резултатите, авторите предполагат наличието на два типа променливост, чието съвместно действие определя формите на кривите на блясъка на ускорите:

- 1) неправилна променливост (понякога квазипериодична) с продължителност няколко денонощия около средно ниво на блясъка;
- 2) внезапни резки спадания на блясъка с големи амплитуди, които се наблюдават често, когато звездата е в състояние с относително нисък блясък.

Според авторите моделът, обясняващ променливостта на ускорите чрез променлива екстинкция от околослъвездни прахови облаци не може да се приложи върху целия клас променливи и затова те предлагат допълнителен механизъм на променливост – непостоянна акреция. Променливата акреция предизвиква флуктуации на температурата и плътността във вътрешната част на диска, които водят до променливост в оптичния диапазон.

Grady et al. (2000) предлагат друга теория за наблюдаваните минимума на ускорите. Според нея звездите на Хербиг от спектрални класове Ae/Be са заобиколени от големи протокометарни облаци или кометарни тела. Когато един от тези обекти пресече лъча на зрение към звездата се наблюдава спад в блясъка ѝ. Поради абсорбцията първоначално звездата трябва да става по-червена, но при голяма екстинкция разсеяната светлина от други прахови облаци започва да доминира и звездата възстановява цвета си.

Интерферометричните наблюдения на някои уксори в милиметровата част на спектъра и техния анализ показват, че тези звезди са заобиколени от околослъвездни дискове, подобно на тези от типа T Tau – оптично дебели с маса 0.01 – 0.1 M_{\odot} (Natta et al. (1999)).

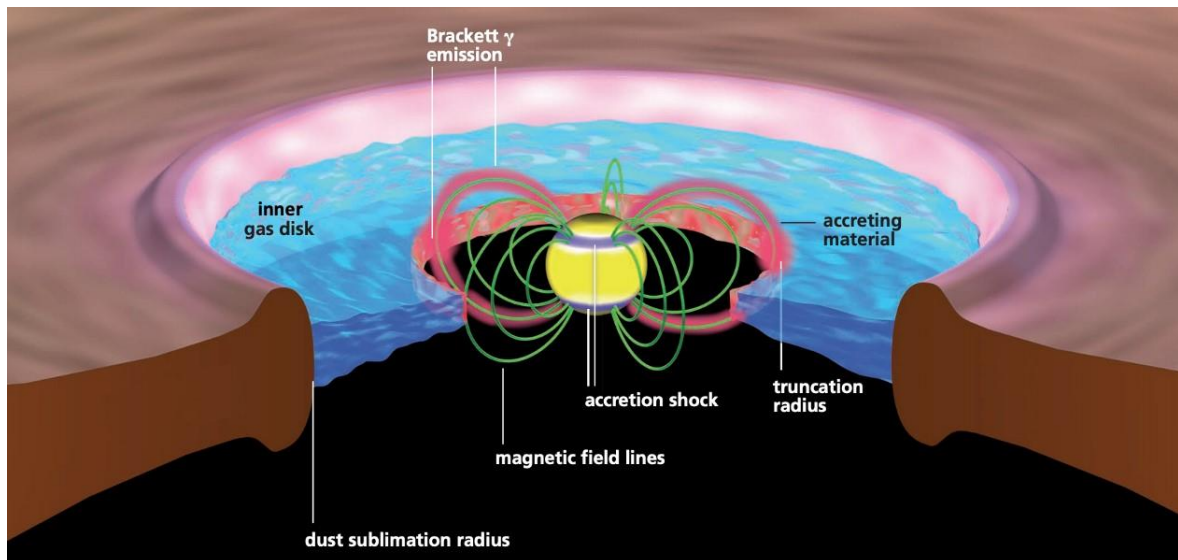
По-ново обяснение на фотометричната променливост на ускорите с т. нар. Самозатъмняващ се диск е направено от Dullemond et al. (2003). Авторите са разбрали, че времевата скала на промените от седмици до месеци означава, че затъмняващият облак

трябва да се намира във вътрешния диск, в мястото на надутия вътрешен край. Те показват, че този ефект ще се вижда само при дисковете тип GII, където линията на наблюдение на вътрешния край остава практически неизменена. По такъв начин ефекта на наблюдаваното „посиняване“ ще е предизвикан от изграден от бучки вътрешен диск.

В следствие с развитието на наблюдателната техника, позволяваща да се постига пространствено разделение от няколко ъглови милисекунди в близкия инфрачервен диапазон, довежда до откриването на доказателства за неосисиметрични структури при 27 % от наблюдаваните обекти (Lazareff et al. (2017)). Lopez et al. (2022) в спектралните ивици L, M и N с помощта на MATISSE, също намират асиметрия на променливата яркост в L' в диска на звездата HD 163296 с мащаби по-малки от 0.3 а.е. (Varga et al. (2021)). Такива вариации също се наблюдават в ивиците H и K и се съхраняват в течение на няколко години (GRAVITY Collaboration et al. (2021)). Всички тези промени отразяват орбитално нееднородното разпределение на праха в самите вътрешни области на диска, подобно на наблюдаваните при ускорите изменения на яркостта и цвета.

Схема на околос звездното обкръжение близко до звездите от типа Хербиг Ae представен в Brittain et al. (2023) е показана на Фигура 8.

Подробното изучаване на затъмненията на звездите от типа UX Ori, основаващи се на различни наблюдателни данни, би предоставило повече информация за вътрешните области на протопланетните дискове и протичащите в тях процеси.



Фигура 8. Схема на околозвездното обкръжение близко до звездите от типа Хербиг Ae. Първоначално разработен за илюстрация на парадигмата за магнитосферната акреция на класическите T Tau звезди (CTTS), тази рисунка също е приложима и към звездите от типа Хербиг Ae. Прахът в диска сублимира, когато достигне температура ~ 1500 K. По навътре от тази област се намира диск от газ, който е силно йонизиран. Диска е пресечен от магнитното поле, където налягането на акретиращия газ се уравнива с магнитното налягане. След това акретиращия газ попада в звездата по силовите линии, от които излиза рекомбинационно излъчване на водорода и се създава акреционна ударна вълна близко до повърхността на звездата (Brittain et al. (2023)).

2 Наблюдения и обработка на данните на изследваните звезди

Астрономическите наблюдения на изследваните обекти са проведени през периода от юни 2008 година до февруари 2022 година.

2.1 Наблюдения

Наблюдателният материал използван за получаване на резултатите в настоящата работа е получен с помощта на четири телескопа в две обсерватории. Това са телескопите в Националната астрономическа обсерватория (НАО) „Рожен“ към Института по астрономия на Българската академия на науките (БАН) - 2 метров Ричи-Кретиен-Куде, 50/70 см Шмит и 60 см Касегрен и 1,3 метра Ричи-Кретиен телескоп в обсерваторията „Скинакас“ към университета в Крит, Гърция (Обсерваторията Скинакас е съвместен проект на Университета на Крит, Фондацията за изследвания и технологии - Hellas и Max-Planck-Institut fur Extraterrestrische Physik).

Тъй като наблюденията обхващат период от повече от 10 години е използвана различна светоприемна апаратура - CCD камери (Charge-Coupled Device, елемент със зарядна връзка). Всички изображения са получени със стандартен набор от филтри UBVR_cI_c на Johnson-Cousins. Техническите и оптични характеристики на използваните CCD камери са обобщени в Таблица 1.

Телескоп	CCD камера	Размер на чипа	Поле	Размер	Мащаб	RON	Gain
		[pix x pix]	[' x ']	на пиксела, mkm	["/pix]	[e-rms]	[e-/ADU]
2-м РК НАО Рожен	Vers Array 1300B	1340 x 1300	5.8 x 5.6	20.0	0.26	2.00	1.0
	ANDOR iKon-L	2048 x 2048	6.0 x 6.0	13.5	0.17	6.90	1.1
1.3-м РК Скинакас	ANDOR DZ436-BV	2048 x 2048	9.6 x 9.6	13.5	0.28	8.14	2.7
50/70 см Шмит НАО Рожен	FLI PL16803	4096 x 4096	73.8 x 73.8	9.0	1.08	9.00	1.0
60-см Касегрен НАО Рожен	FLI PL9000	3056 x 3056	16.8 x 16.8	12.0	0.33	8.50	1.0

Таблица 1. Технически параметри и спецификации на използваните CCD камери за наблюдение на звездата V1180 Cas.

Данните за фотометричните CCD наблюдения на звездите GM Cep и V1180 Cas са обобщени в Таблица 2.

Обект	Брой наблюдения нощи	Период на наблюдение	Брой стандартни звезди около обекта	Брой нощи, през които са получени стандартите
V1180 Cas	193	2011 - 2022 г.	8	6
GM Cep	386	2008 - 2020 г.	16	8

Таблица 2. Обобщени данни за фотометричните CCD наблюдения на звездите GM Cep и V1180 Cas.

При възможност за всяко наблюдение са получавани по два кадъра във всеки филтър, което улеснява откриването на дефектни пиксели на камерата и следи от космически частици. Плоски полета във всеки филтър са получавани всяка ясна нощ във вечерния полумрак. Когато това е било невъзможно са взимани плоски полета от съседните нощи. Всички изображения, получени с камерите VersArray и ANDOR са коригирани за плоско

поле и шум на четене (bias), а тези получени с камерите FLI са коригирани за плоско поле и ток на тъмно.

2.2 Обработка на данните на изследваните звезди

За да се преобразуват инструменталните звездни величини в стандартни, в полето на всеки от изследваните обекти са калибрирани вторични стандартни звезди във фотометрична система Johnson-Cousins. Калибровката на вторичните стандартни звезди е направена по проведения в няколко нощи (виж Таблица 2) наблюдения с 1.3-м РК телескоп на обсерваторията Скинакас (Гърция). Така се повишава точността на измерените BVRI звездни величини на вторичните стандартни звезди. Използването на стандартни звезди в полетата около изследваните обекти е с голямо значение за точното измерване на звездните величини на обектите. Изследваните обекти се намират в области на активно звездообразуване, където голяма част от звездите са променливи.

2.2.1 Обработка на получените данни за звездата GM Cep

В полето около звездата GM Cep са калибрирани шестнадесет BVRI стандартни звезди (Semkov & Peneva (2012a)). Калибровката е направена в течение на осем ясни нощи през 2008 и 2009 г. Стандартни звезди от Landolt (1992) са използвани като еталон. Стандартните звезди са означени с букви от А до Р в низходящ ред на блясъка им във филтър V. Координатите и измерените BVRI звездни величини на стандартните звезди, заедно със съответните средноквадратични грешки са дадени в Таблица 3. Звездните величини на стандартните звезди са в интервала от 11.77^m до 17.16^m (V), а цветовите индекси (B – V) се променят от 0.57^m до 2.28^m.

Таблица 3. BVRI звездни величини на стандартните звезди в полето около GM Cep.

Звезда	α 2000	δ 2000	B	σ_B	V	σ_V	R	σ_R	I	σ_I
A	21:38:11.1	57:32:50.9	12.39	0.02	11.77	0.02	11.40	0.01	11.06	0.01
B	21:38:24.2	57:33:23.6	13.40	0.03	12.84	0.02	12.53	0.02	12.15	0.02
C	21:38:22.4	57:32:13.6	16.32	0.02	14.25	0.03	13.01	0.04	11.73	0.08
D	21:38:10.3	57:30:19.5	15.35	0.02	14.37	0.01	13.78	0.02	13.19	0.02
E	21:38:19.4	57:30:10.6	16.67	0.03	14.39	0.04	13.00	0.04	11.62	0.09
F	21:38:00.9	57:33:00.8	17.04	0.04	14.97	0.03	13.71	0.03	12.50	0.08
G	21:38:06.9	57:30:30.0	16.03	0.03	14.98	0.02	14.37	0.02	13.77	0.03
H	21:38:00.3	57:32:33.2	16.86	0.03	15.07	0.03	13.99	0.03	12.94	0.06
I	21:38:19.0	57:33:55.5	15.82	0.03	15.08	0.02	14.63	0.02	14.12	0.03
J	21:38:19.7	57:32:07.5	16.20	0.03	15.23	0.02	14.64	0.02	14.07	0.02
K	21:38:30.1	57:34:04.8	17.03	0.03	15.37	0.03	14.40	0.02	13.44	0.06
L	21:38:30.7	57:33:05.9	16.38	0.02	15.53	0.02	15.03	0.02	14.50	0.04
M	21:38:29.9	57:32:37.7	16.87	0.04	15.57	0.02	14.69	0.02	13.99	0.04
N	21:38:29.2	57:33:29.5	16.69	0.03	15.70	0.02	15.12	0.03	14.50	0.04
O	21:38:00.9	57:32:05.7	17.03	0.03	15.93	0.02	15.28	0.02	14.60	0.04
P	21:38:05.6	57:30:40.7	18.93	0.12	17.16	0.05	16.10	0.02	15.10	0.09

С помощта на процедури с пакета DAOPHOT в IDL беше извършена апертурна звездна фотометрия на изследваните обекти, като са използвани вторичните BVRI стандартни звезди в полето на всеки обект. Наблюденията на даден обект, направени с различни

телескопи и CCD камери са измерени с една и съща апертура. Същият отвор беше използван за анализ на всички данни. Той беше избран като 6 arcsec в радиус, докато фоновият пръстен беше от 10 до 15 arcsec. По този начин се осигурява максимална съвместимост на фотометричните данни, получени с различни инструменти.

Наблюденията във всички филтри (BVRI) не са едновременни и са с обща продължителност 20 - 30 минути. През това време няма значителна промяна в яркостта на звездата, която да доведе до значителни промени в цветовия индекс.

2.2.2 Обработка на получените данни за звездата V1180 Cas

За да се улесни трансформацията от инструментално измерване към стандартната система на Johnson-Cousins, в полето около звездата V1180 Cas са калибрирани осем VRI стандартни звезди. Калибровката е направена в течение на шест ясни нощи през 2011, 2012 и 2015 г. Стандартни звезди от Landolt (1992) са използвани като еталон.

Калибриране на вторични VRI стандартни звезди около V1180 Cas.

За да се преобразуват инструменталните звездни величини в стандартни, в полето на всеки от изследваните обекти са калибрирани осем вторични стандартни звезди във фотометрична система Johnson-Cousins. Използването на стандартни звезди в полетата около изследваните обекти е с голямо значение за точното измерване на звездните величини на обектите. Изследваните обекти се намират в области на активно звездообразуване, където голяма част от звездите са променливи. Калибровката на вторичните стандартни звезди е направена по проведени наблюдения през голям брой нощи. Така се намалява вероятността променливи звезди с малки амплитуди да попаднат между звездите, подбрани за стандарти и се повишава точността на измерените VRI звездни величини на вторичните стандартни звезди.

Калибровката е извършена по наблюдения с 1.3-м РК телескоп на обсерваторията Скинакас (Гърция) в течение на шест фотометрични нощи в периода 2011 – 2015 г., като са използвани стандартни звездни площадки от Landolt (1992). Landolt (1992) правят UBVRI фотоелектрични наблюдения в Johnson-Kron-Cousins фотометрична система на 526 звезди, разположени в ивица около небесния екватор. Блясъкът на звездите, разделени в 298 подгрупи, е прецизно измерен, с което се осигурява стандартна широкоивична фотометрична система по цялото небе за телескопи със среден или голям размер от двете полукълба. Всяка звезда е измерена средно 29 пъти в течение на 19 нощи. По-голямата част от измерените звезди имат звездни величини в интервала $11.5 < V < 16.0$ и цветове в интервала $-0.3 < (B - V) < +2.3$.

Наблюденията на стандартните площадки са правени в началото, средата и края на ноща. Всяка нощ са наблюдавани между 40 и 50 звезди с различен цвят, намиращи се на различна въздушна маса. Извършена е апертурна звездна фотометрия на стандартните площадки с пакета DAOPHOT в IDL. Получени са инструменталните звездни величини на стандартните звезди с добра точност.

Връзката между стандартните VRI звездни величини, инструменталните v_i звездни величини и въздушната маса $X = 1/\cos Z$ се задава от следните уравнения:

$$V = v + l_1.(v - i) + l_2.X_v + l_3 \quad (3)$$

$$R = r + m_1.(v - r) + m_2.X_r + m_3 \quad (4)$$

$$I = i + n_1.(v - i) + n_2.X_i + n_3 \quad (5)$$

V , R и I са стойностите на стандартните звездни величини от Landolt (1992), а с X са означени стойностите на въздушната маса на която се намират площадките в момента на наблюдение. Коефициентите $k_{1,2,3}$, $l_{1,2,3}$, $m_{1,2,3}$ и $n_{1,2,3}$ са определени по метода на най-малките квадрати.

Процедурата на наблюдение и процесът на редукция на данните са описани в Ibraymov et al. (2015).

Звездните величини на стандартните звезди са в интервала от 16.84^m до 19.73^m (V), а цветовете индекси ($V - R$) се променят от 1.01^m до 1.35^m . Координатите и измерените VRI звездни величини на стандартните звезди, заедно със съответните средноквадратични грешки са дадени в Таблица 4.

Таблица 4. Координати и фотометрични данни за последователността за сравнение на VRI на звездата V1180 Cas.

Звезда	α 2000	δ 2000	V	σ_V	R	σ_R	I	σ_I
A	02 33 25.2	72 43 54.9	16.8	0.04	15.8	0.03	14.4	0.03
B	02 32 58.0	72 42 54.5	17.6	0.03	16.3	0.04	14.7	0.03
C	02 33 06.0	72 41 58.8	18.7	0.05	17.6	0.03	16.5	0.04
D	02 33 11.3	72 43 37.2	-	-	18.8	0.07	16.5	0.07
E	02 32 48.7	72 42 45.0	18.7	0.05	17.6	0.03	16.6	0.03
F	02 33 06.7	72 45 20.9	19.6	0.03	18.6	0.07	17.5	0.07
G	02 33 03.2	72 42 11.9	-	-	19.2	0.07	17.7	0.06
H	02 32 52.0	72 44 32.9	19.7	0.05	18.7	0.06	17.7	0.05

С помощта на процедури с пакета DAOPHOT в IDL беше извършена апертурна звездна фотометрия на изследваните обекти, като са използвани вторичните VRI стандартни звезди в полето на всеки обект. Наблюденията на даден обект, направени с различни телескопи и CCD камери са измерени с една и съща апертюра. Същият отвор беше използван за анализ на всички данни. Той беше избран като 4 arcsec в радиус, докато фоновият пръстен беше от 13 до 17 arcsec. По този начин се осигурява максимална съвместимост на фотометричните данни, получени с различни инструменти.

Наблюденията във всички филтри (VRI) не са едновременни и са с обща продължителност 20 - 30 минути. През това време няма значителна промяна в яркостта на звездата, която да доведе до значителни промени в цветовия индекс.

3 Резултати от наблюденията на обектите и анализ на получените резултати

3.1 GM Cep

Звездата преди ГП GM Cep (R.A.=21^h38^m17^s.32, decl.=+57°31'22", J2000) се намира в полето на младия отворен куп от състава на асоциацията Цефей OB2 - Trumpler 37 (~4 млн. години на възраст и на разстояние 870 pc, Marschall et al. (1990), Patel et al. (1995), Contreras et al. (2002), Sicilia-Aguilar et al. (2005), Errmann et al. (2013)). Звездата вероятно е член на купа (Marschall & van Altena (1987), Sicilia-Aguilar et al. (2005)). При прецизното определяне на паралакса извършено с помощта на инструмента Gaia (Gaia DR2, Gaia Collaboration, (2018)) се получава стойност от $\varpi = 1.21 \pm 0.02$ mas ($d = 826 \frac{+14}{-13}$ pc), което съвпада с известното разстояние до купа Trumpler 37 и затвърждава увереността ни, че GM цеп е физически член на този куп.

Според Sicilia-Aguilar et al. (2008) GM Cep има маса, подобна на слънчевата ($M \sim 2.1 M_{\odot}$), с радиус, който варира между 3 и 6 R_{\odot} и е от спектралния G7V-K0V тип и със силни инфрачервени ексцеси, което може да се обясни с наличието на много ярък и масивен околзвезден диск. Според Huang et al. (2013) спектралния клас на звездата е F9. Chen et al. (2012) предполагат наличието на фрагментиран прахов диск и според кривите на блясъка, нивата на поглъщане и времевите граници попада и в двата подтипа млади звездни обекти с прототипи AA Tau и KH 15D (виж глава 1.2.3).

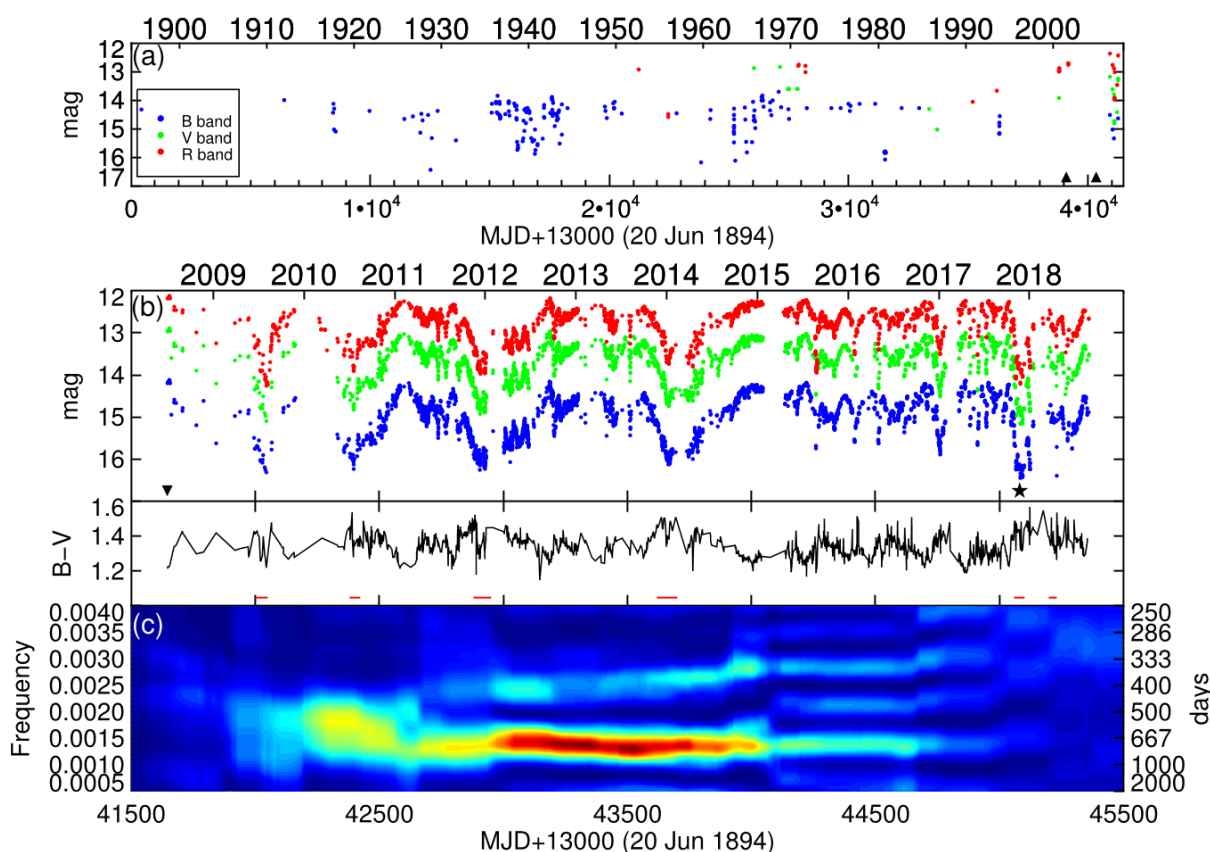
В изследването на Sicilia-Aguilar et al. (2008) за GM Cep е установено, че нейната H α емисионна линия в спектъра има силен P Cyg профил и еквивалентната ширина на линията варира значително от 6 Å до 19 Å. Широките спектрални линии предполагат скорост на въртене $v \sin i \sim 43.2$ km s⁻¹, което е много по-бързо от средното значение $v \sin i \sim 10.2$ km s⁻¹ характерно за членовете на купа Trumpler 37 (Sicilia-Aguilar et al. (2008)). Скоростта на дисковата акреция е променлива до $\sim 10^{(-6)}$ M_{\odot} /година, което е на 2 – 3 порядъка повече от медианната стойност за младите звездни обекти в купа Trumpler 37 и на 1 – 2 порядъка повече от типичното за звездите от типа T Tau (Gullbring et al. (1998), Sicilia-Aguilar et al. (2008)). При звездата е установено също наличие на рентгеново излъчване (Mercer et al. (2009)).

Първоначалните проучвания за фотометричното поведение на GM Cep на базата на фотометрия в оптичния и инфрачервения спектър и спектроскопия, а също и наблюдения в милиметровите линии и континуума довеждат авторите до извода, че звездата проявява характеристики типични за ексорите (Sicilia-Aguilar et al. (2008)).

В последващото дългосрочно фотометрично изследване на GM Cep, направено от Xiao et al. (2010) за период от няколко десетилетия звездата е класифицирана като уксор. Дългопериодичните В и V светлинни криви на звездата са направени с помощта на архивите на фотографските плаки от обсерваторията на Харвардския колеж и от обсерваторията Сонеберг за периода 1895 до 1993 г. Резултатите предполагат, че кривите на блясъка на GM Cep изглежда са доминирани от спадове, насложени върху състоянието на покой, и че липсват бързи покачвания на яркостта, типични за променливите EXor. В своето изследване Xiao et al. (2010) не са намерили доказателства за периодичност на наблюдаваните спадове в яркостта.

В изследването на Chen et al. (2012) при извършване на интензивен BVR фотометричен мониторинг на GM Cep през периода 2009-2011 г. потвърждават UXor природата на неговата променливост и предполагат ранен етап на планетезимално формиране в около звездната среда.

Звездата GM Cep е изследвана в продължение на 10 години и в проекта YETI (Young Exoplanet Transit Initiative) с цел търсене на възможни транзитни купове, екзопланети (Neuhäuser et al. (2011)). В своята работа Huang et al. (2019) обобщават получените резултати от оптичната фотометрия и поляриметрия (виж Фигура 9).



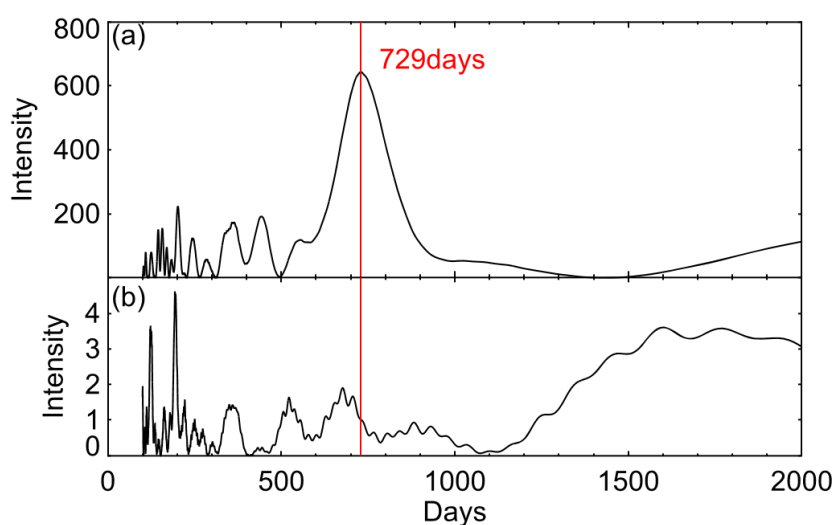
Фигура 9. Крива на блясъка на GM Cep от 1894 г. до 2018 г. (a) Столетните данни са представени от Sicilia-Aguilar et al. (2008) и Xiao et al. (2010). (b) Криви на блясъка и (B – V) крива на цвета от 2008 г. до 2018 г., представени в Huang et al. (2019). Епохите в които има съобщения за спектрални измервания в литературата, са отбелязани с триъгълни символи за Sicilia-Aguilar et al. (2008), обърнати триъгълници за Semkov et al. (2015) и звездички за Giannini et al. (2018). (c) Анализ на динамичния период на входната крива на блясъка (b) с размери на прозореца 2000 дни и стъпка 1 ден. Цветовете представляват мощността на периодограмата, от червен до син. Вертикалната ос представлява или честотата (от ляво), или съответния период (от дясно) (Huang et al. (2019)).

Те правят анализи за търсене на периоди и стигат до заключението, че се наблюдава период на въртене от около 3.43 дни, който се е съхранил в продължение на целия наблюдателен период. Освен това се наблюдават признаци на удължение на периода при намаляване на амплитудата. Този ефект те обясняват като приемат, че съществува

зависимост на появяването на звездните петна от ширината от повърхностното диференциално въртене по аналогия със Слънцето (слънчев магнитен цикъл на Швабе).

Събраните многоцветни фотометрични данни показват ефекта от обръщане на цвета при дълбокия минимум на яркостта, което е доказателство за променливо поглъщане от околосвездната среда, типично за UXoг променливите.

Опитите за намиране на дълговременна периодичност започват от Chen et (2012), като авторите предполагат възможен период от ~ 1 година. Този период не е потвърден и на базата на наблюдаваните дълбоки спадове в яркостта Chen & Hu (2014) предполагат периодичност от около 300 дни. Този период ~ 350 дни е регистриран и в работата на Huang et al. (2019), но е обяснен като следствие от ежегодните пропуски в наблюденията. Според тях след направения анализ с помощта на алгоритъма на Lomb (1976) и Scargle (1982) се наблюдава период от около 730 дни (виж Фигура 10).

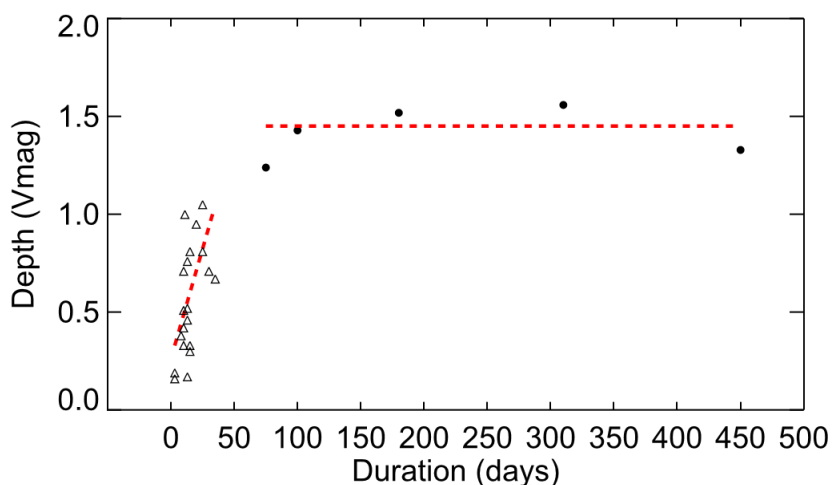


Фигура 10. (а) Периодограма на кривата на блясъка във филтър V, където с червена линия е отбелязан пик в спектъра на мощността. (б) Периодограма на функцията подбор (Huang et al. (2019).

Многоцветните наблюдения ни дават възможност да изясним механизма на вариациите на яркостта. Съществуват три основни вида промени. Най-забележими се явяват основните спадове на яркостта $\sim 1 - 2.5^m$ в B-, V- и R- филтрите, продължаващи месеци (Munari et al. (2017). Освен това се наблюдават незначителни разлики в яркостта ($\sim 0.2 - 1^m$), с продължителност от дни до седмици. Третия тип е с амплтуда около 0.05^m и протича за няколко дни.

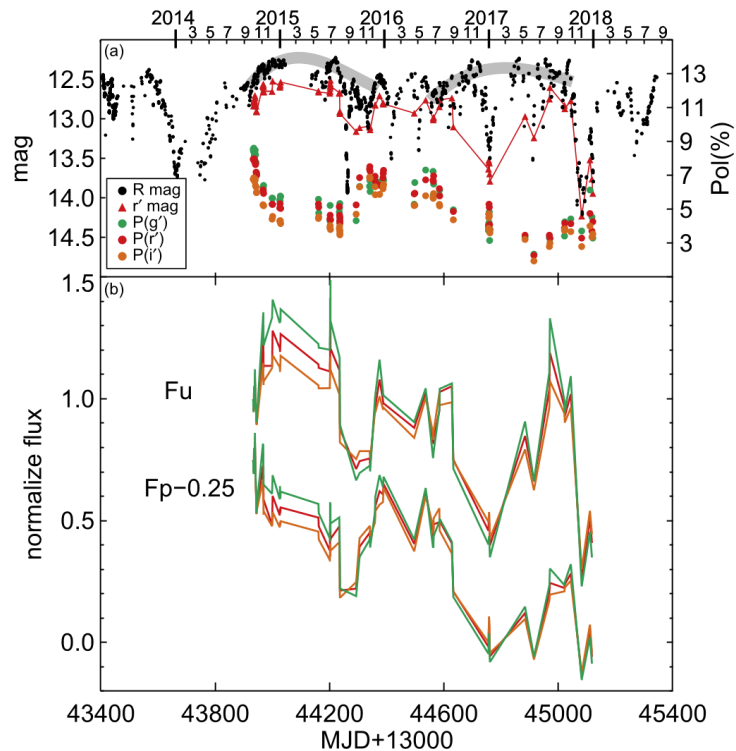
Изследването на връзката между на дълбочината на затъмнението и неговата продължителност при звездата GM Ser показва наличието на два различни класа от събития (Huang et al. (2019). За кратките събития продължителността като цяло се увеличава с дълбочината до приблизително $A_V \sim 1$ mag за 30 дни. Това може да се обясни с наличието на различни по размери затъмняващи прахови частици. Затова по-големите частици довеждат до по-продължително събитие с по-голяма амплтуда на затъмнение. Дълбочината на затъмнението е почти еднаква за по дълги (≥ 100 дни) събития да $A_V \sim 1.5$ mag (виж Фигура 11). Авторите предполагат, че по-продължителните събития се

дължат на поредица от събития или едно непрекъснато събитие, състоящо се много прахови фрагменти, разпределени като струна или спирален ръкав.



Фигура 11 . Дълбочина на затъмнението в зависимост от неговата продължителност. Всяко събитие е параметризирано с гаусовска апроксимация на кривата на блясъка. Съществува линеен тренд за кратките събития (триъгълници). За по-дългите събития (кръгчета) дълбочината на затъмнението е почти равна, независимо от продължителността (Huang et al. (2019)).

Изследването на поляризацията на светлината в зависимост от стадия на развитие на затъмнението на звездата ни дава важна информация. На Фигура 12 по наблюдателните данни се вижда бавно променящата се картина на поляризацията. Докато тя намалява изменението на яркостта има обратна тенденция. Трябва да се отбележи, че поляризацията е по-висока в по-късите дължини на вълните, но в дълбоките минимума се появява аномалия (Huang et al. (2019)).



Фигура 12. (а) Фотополариметрична крива на блясъка във филтър r' (в червено) vs. крива на блясъка в R -филтър (в черно), и са показани по-ниските поляризационни нива в g' (в зелено), r' (в червено), и i' (в кафяво). Със сиви отенъци са означени бавните изменения на яркостта и едновременното поведение на поляризацията. (b) Криви на блясъка за неполяризиран поток (F_u) и поляризиран поток (F_p), със същите цветови символи както в (a) (Huang et al. (2019)).

Съществуващите модели описващи поляризацията като резултат от горещи петна или изкривен вътрешен диск (вариации от около 1 %), на този етап не могат да обяснят наблюдаваната голяма промяна на поляризацията при GM Сер (промяна с около 5 %). Вероятно допълнително газовата обвивка оказва съществено влияние на протичащите физически процеси.

В настоящата дисертация са представени данните от многоцветните фотометрични наблюдения на GM Сер за периода от юни 2008 г. до октомври 2020 г. Те са публикувани в работата на Semkov & Peneva (2012a) за периода юни 2008 г. - февруари 2011 г., в работата на Semkov et al. (2015) за периода април 2011 г. - август 2014 г. и работата на Mutafov et al. (2022) за периода август 2014 г. до октомври 2020 г.

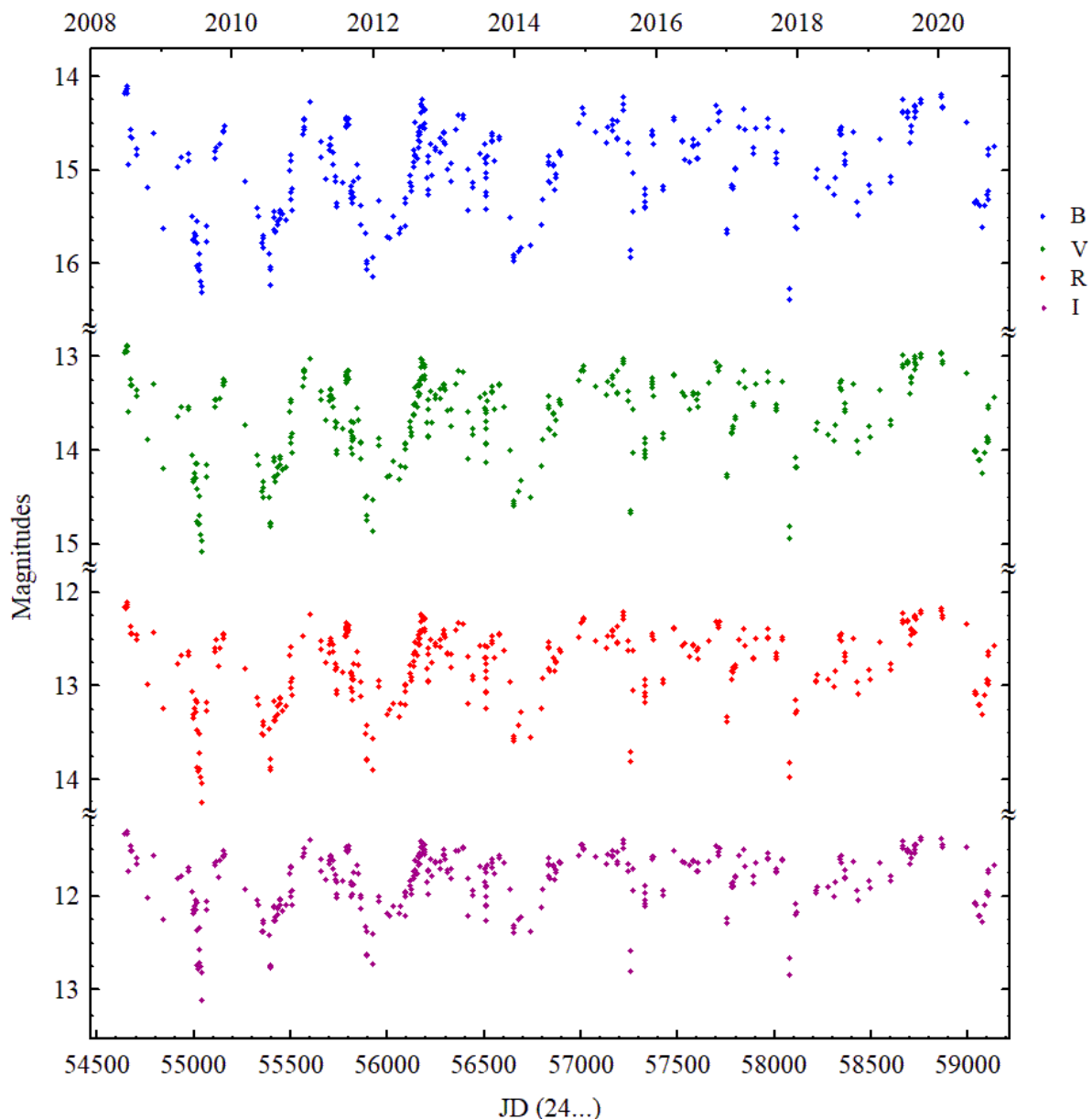
Типичните инструментални грешки от BVRI фотометрията са публикувани в работата на Semkov & Peneva (2012a).

Обобщените резултати на фотометричните BVRI данни (виж графиките на Фигура 13) от над 12-годишния период на наблюдения показват продължаваща много силна променливост на блясъка на GM Сер, както е регистрирано и в предишните проучвания (Sicilia-Aguilar et al. (2008), Xiao et al. (2010), Semkov & Peneva (2012a), Chen et al. (2012), Semkov et al. (2015), Huang et al. (2019); виж Фигура 9).

През периода юни 2008 – октомври 2020 г. регистрирахме девет дълбоки минимума на блясъка: първите два минимума наблюдавани през 2009 г. и 2010 г. са с

продължителност от един до два месеца, третия (2011/2012) и петия (2013/2014) минимум са с продължителност около половин година, а четвъртият минимум (август 2013г.) е с продължителност една седмица. Шестият, седмият, осмият и деветият минимум наблюдавахме съответно през август 2015 г., януари 2017 г., ноември 2017 г., август 2020 г.

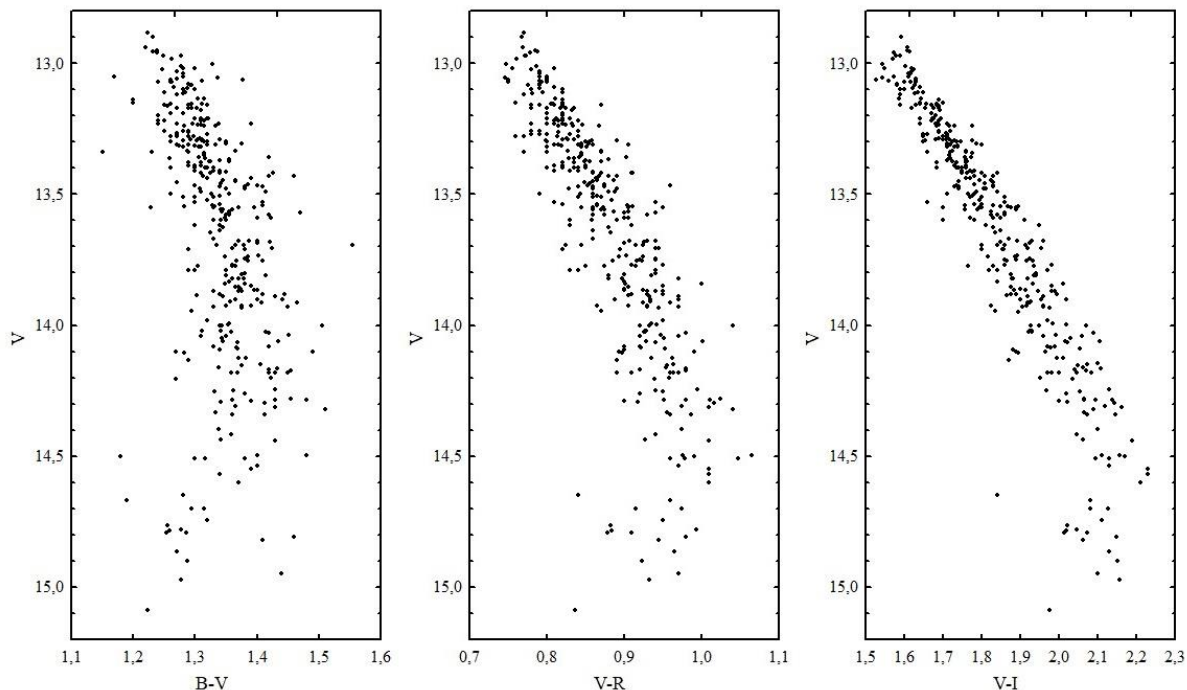
Във времевата скала от дни и месеци извън дълбоките минимуми GM Сер показва и значителни вариации на блясъка.



Фигура 13. BVRI криви на блясъка на GM Сер за целия период на нашето фотометрично наблюдение (2008 - 2020 г.)

На Фигура 14 са показани съответно диаграми цвят-величина V/B-V, V/V-R и V/V-I. Събраните многоцветни фотометрични данни показват типичното за UXor обръщане на цветовете по време на минимумите на блясъка. Това съвпада с модела на отражение на прахообразния материал - наблюдаваното обръщане на цвета е причинено от дифузната

светлина от малки пращинки (виж Фигура 8). Това е типична характеристика на звездите преди ГП от типа Ухор. За всяка от цветните диаграми такава точка на обръщане се наблюдава при различна звездна яркост: в диаграмата V/B-V точката на обръщане се наблюдава при V около 14,0 mag, в V/V-R диаграма при V около 14,5 mag и в диаграмата V/V-I при V около 14,6 mag.



Фигура 14. Диаграмите цвят-величина V/B – V, V/V – R и V/V – I на GM Cep в период на наблюдения юни 2008 г. - октомври 2020 г.

Обикновено, когато на линията на зрителния лъч има клъстери от прах, звездата става по-червена. Но по време на максимално затъмнение синята част от разсеяната светлина в общата наблюдавана светлина става значителна и цветът на звездата става по-син. Това е проява на така наречения ефект на „посиняване“, цветът на звездата става по-син в минимумите на нейния блясък, в съответствие с модела на затъмнение от прахови частици.

Въз основа на данните от нашите многогодишни многоцветни фотометрични наблюдения можем да потвърдим, че променливостта на GM Cep е типична за представителите на звездите от тип уксори. Кривите на блясъка са доминирани от спадове, а в минимумите се наблюдава характерното обръщане на цветовете типично за уксорите.

3.2 V1180 Cas

За първи път звездата V1180 Cas е определена като млад променлив обект със силна H α емисия от Kun et al. (1994). Тя е свързана с тъмния облак Lynds 1340 в района на формиране на звезди в Касиопея (Lynds (1962)). Lynds 1340 е малък тъмен облак с площ 0,001 квадратни градуса, разположен на разстояние 600 pc от Слънцето.

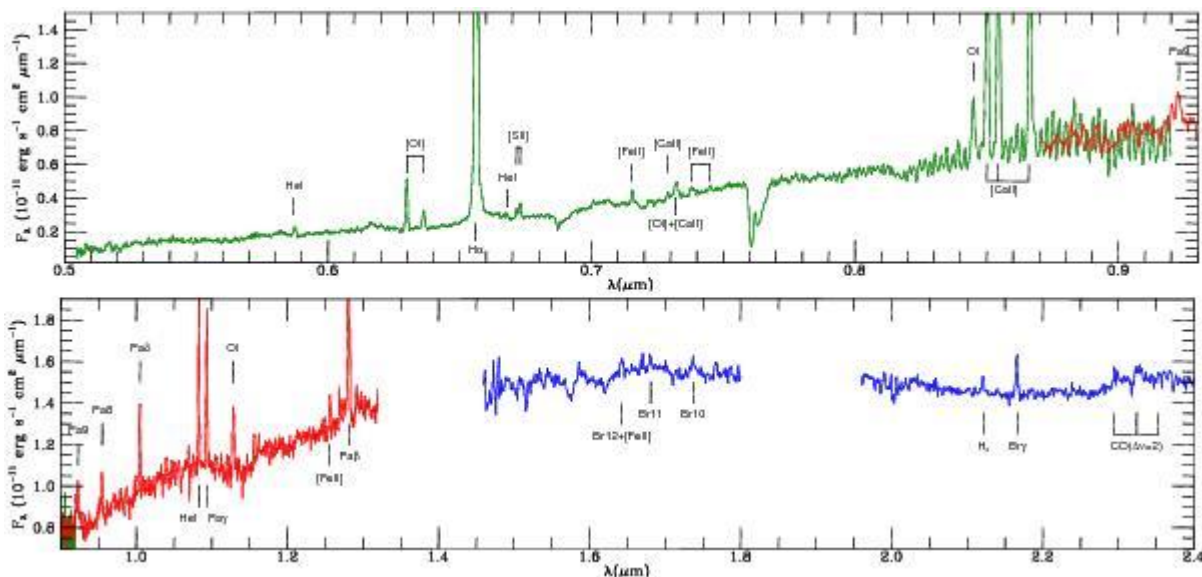
Фотометричните наблюдения, извършени от Kun et al. (2011) през периода от октомври 1999 г. до февруари 2011 г. показват променливост с амплитуда от около 6 mag. (Ic

филтър). Променливостта с такава голяма амплитуда е в съответствие с тази на известните еруптивни млади звездни обекти. Но наблюдаваните характерни времеви мащаби на слабите и ярки фази се различават от тези на еруптивните звезди преди ГП от типа FU Ori (FUor) и EX Lupi (EXor). Kun et al. (2011) отбелязват, че диаграмата цвят - величина (I_c срещу $R_c - I_c$) показва зачервяване, докато настъпва отслабване на яркостта на звездата.

Те определят спектралния тип на V1180 Cas като K7-M0; светимостта като $L/L_{\odot} \sim 0,07$ с ефективна температура $T_{\text{eff}} = 4060$ К от спектрален тип K7; еквивалентните ширини на H α варират от 300 до 900 Å и темп на акреция на маса като $>1,6 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ (Сап λ 8542). Авторите предполагат, че е необходимо да се прецизира текущата картина на механизмите на епизодични изблици на акреция по това време. Те предполагат, че V1180 Cas може да е нов член на неклассифицирани еруптивни млади звезди.

Близкият инфрачервен мониторинг на обекта за периода септември - август 2013 г. е докладван от Antoniucci et al. (2013). Авторите разпознават две големи избухвания и чертаят двуцветната диаграма [J-H] срещу [H-K]. Според тях описанието на цветовата вариация не може да бъде само чисто поглъщане, което е в съгласие със заключенията на Kun et al. (2011).

Използвайки техните оптични и близки инфрачервени емисионни наблюдения Antoniucci et al. (2014) изчисляват масата на акреция използвайки емпиричното отношение което свързва линиите и акреционната светимост (L_{acc}) получено от Alcalá et al. (2014)). Използвайки звездните параметри на V1180 Cas ($M_* = 0.8 M_{\odot}$, $R_* = 2 R_{\odot}$), I разстояние от 600 pc, и поглъщане от $A_V = 4.3$ mag, те получават средна стойност \dot{M}_{acc} от $3 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. Тази стойност е на порядък по-малка ($\dot{M}_{\text{acc}} > 1.6 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$) от стойността, получена от Dahm (2008).



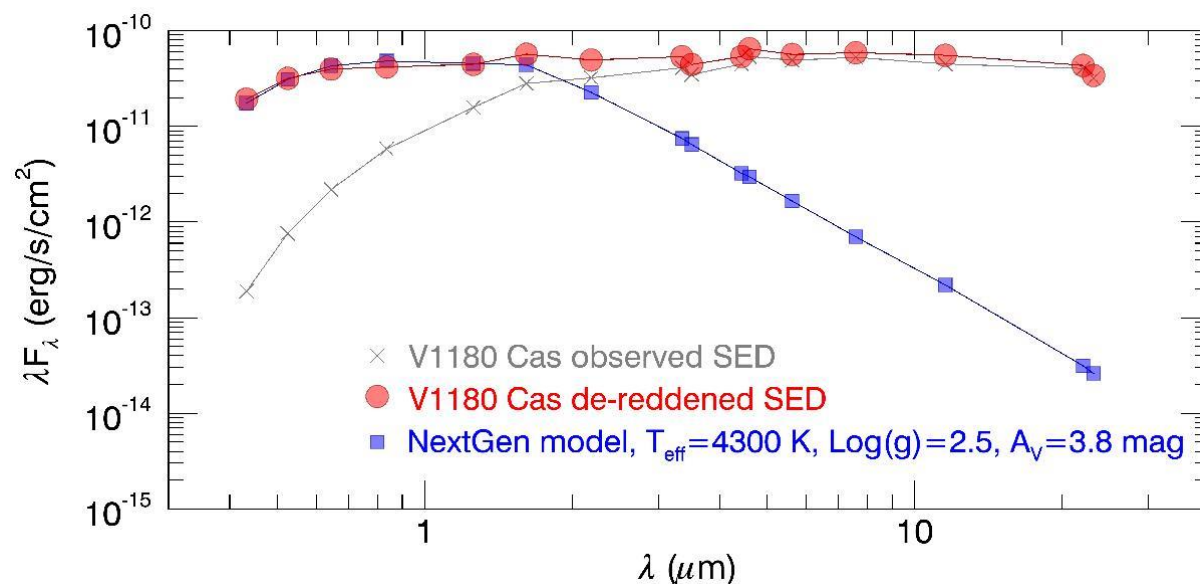
Фигура 15. V1180 Cas оптичен (отгоре) и близък инфрачервен (отдолу) спектър с обозначени основни емисионни характеристики (Antoniucci et al. (2014)).

Antoniucci et al. (2014) използвайки получените изображения в H2 и K-филтри в полето около V1180 Cas регистрират още един обект (една звезда на около 6'' североизточно). V1180 Cas B е оптически невидима звезда със стръмно разпределение на енергията в

спектъра ($\alpha_2 - 24 \mu\text{m} = 1,9$). Фотометричните данни на V1180 Cas B показва постоянни стойности на $K = 14,6 \text{ mag}$ и $H > 15,1 \text{ mag}$, като не разкрива значителна вариация по отношение на стойностите от 2MASS ($K = 14,7$, $H > 16,3$). Ъгловото разстояние между двата обекта предполага очаквано разстояние от 3600 AU, следователно не е сигурно, че двете звезди са физически свързани.

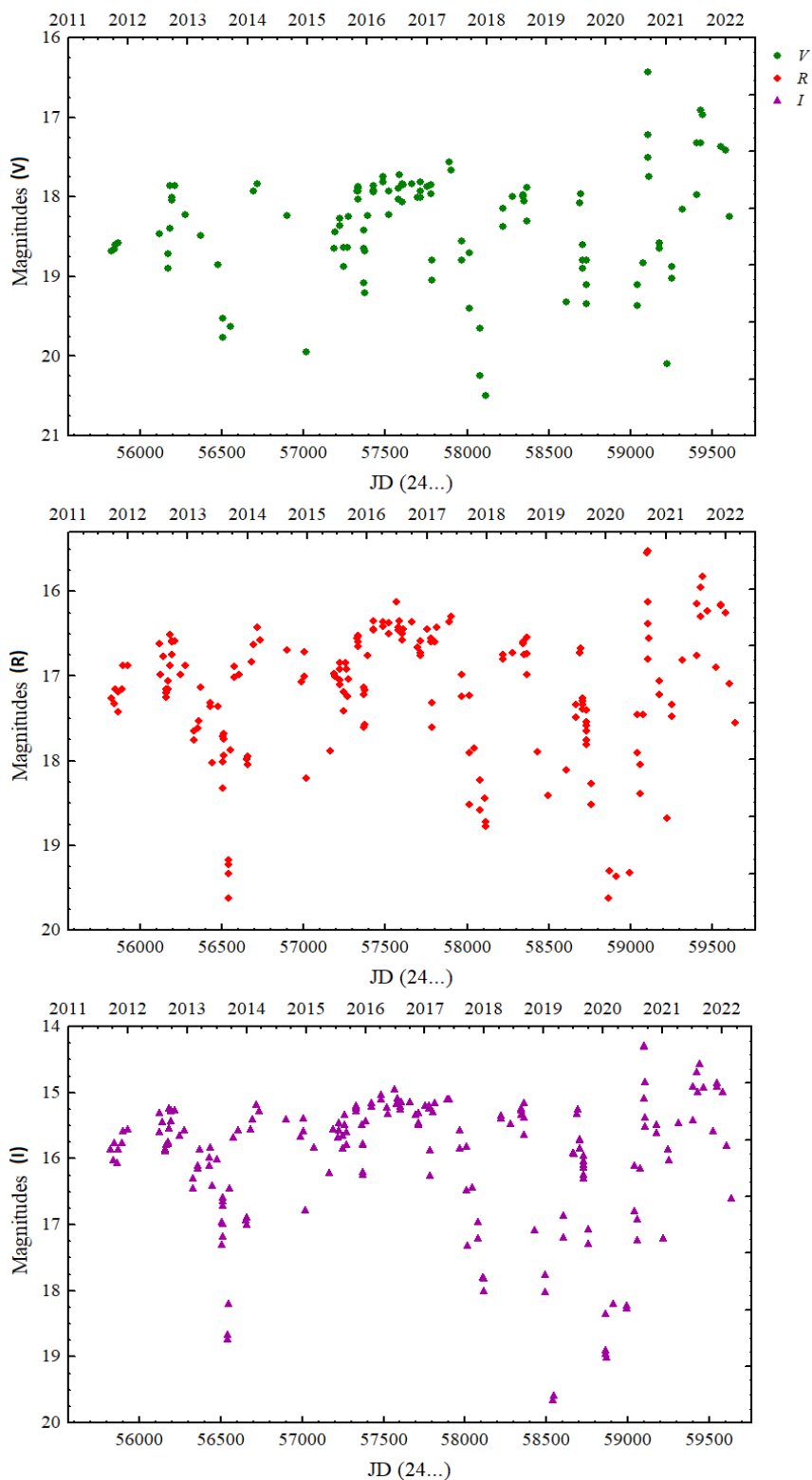
Първите рентгенови наблюдения на V1180 Cas са докладвани в статията на Antonucci et al. (2015). Те са извършили едновременни наблюдения – рентгенови лъчи, JHK фотометрия и J-лентова спектроскопия. От наблюдавания сигнал на Chandra авторите оценяват рентгеновата светимост L_X (0,5-7 keV) в диапазона $0,8 \div 2,2 \times 10^{30} \text{ erg.s}^{-1}$.

Въз основа на спектралното енергийно разпределение авторите заключават, че светимостта на звездата е $0,8-0,9 L_\odot$ и температура T_{eff} диапазона 4200–4400 K. Освен това измерените нива на излъчване на рентгеновия поток са от порядъка на $5 \times 10^{30} \div 1 \times 10^{31} \text{ erg.s}^{-1}$. Авторите заключават, че фотометричното поведение на V1180 Cas може да се обясни с комбинация от ефекти, предизвикани от акреция и задвижвани от екстинкция (виж Фигура 16).



Фигура 16. SED построена с помощта на фотометрията в Antonucci et al. (2015). В червено е показан SED с отстранено почервявяване, докато наблюдаваните точки са нанесени в сиво. Най-подходящият звезден модел на NextGen, получен с VOSA, е очертан в синьо (параметрите на модела и поглъщането са дадени в легендата).

VRI-светлинните криви на V1180 Cas през периода на нашите наблюдения са нанесени на Фигура 17. В повечето случаи размерът на стойностите на инструменталните грешки са в диапазона $0.^m01-0.^m02$ (за I и R) и $0.^m01-0.^m03$ (за V) и е по-малък от размера на използваните символи.



Фигура 17: VRI криви на бляска на звездата V1180 Cas в периода септември 2011 г. - февруари 2022 г.

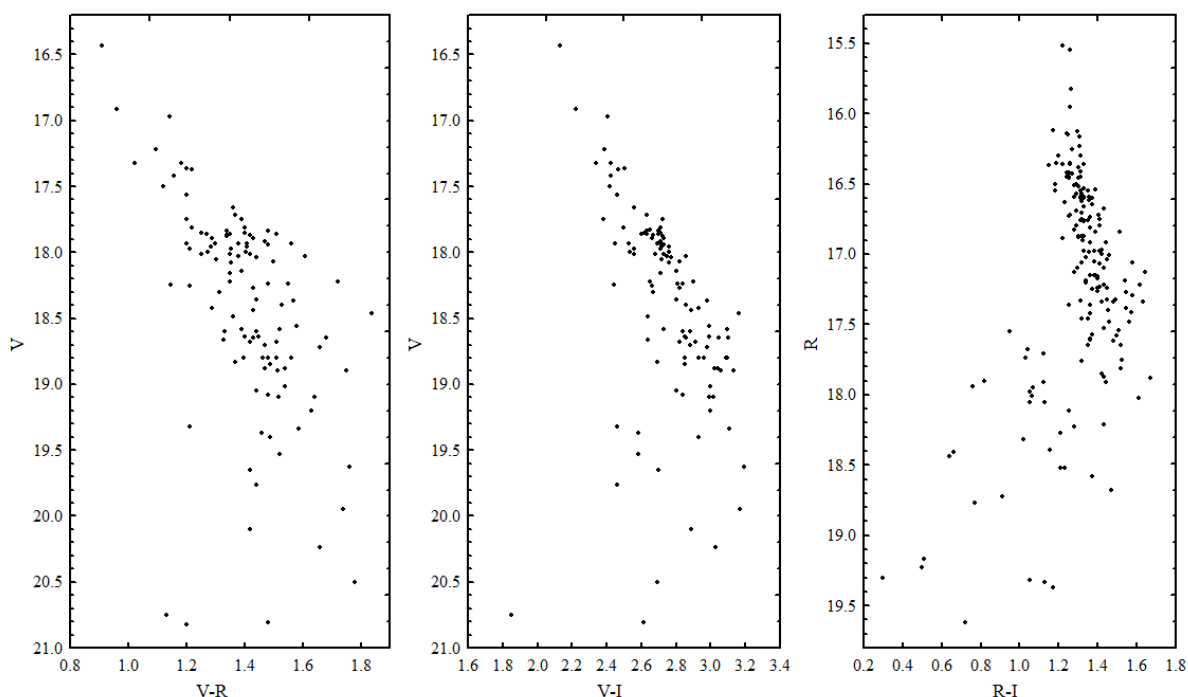
Резултатите от нашите VRI фотометрични наблюдения на V1180 Cas са публикувани в Mutafov et al. (2019a) за периода от септември 2011 г. до април 2018 г. и Mutafov et al.

(2022) за периода от април 2018 г. до февруари 2022 г. През периода от 2011 г. до 2020 г. нашите данни показват много силна фотометрична променливост с големи амплитудни вариации ($\Delta I \sim 5$ mag) за които не се наблюдава периодичност Същата променливост на блясъка е регистрирана и в предишните проучвания на Kun et al. (2011), Antoniucci et al. (2013), (2014) и Lorenzetti et al. (2015). Регистрирахме четири дълбоки минимума на блясъка в светлинната крива на V1180 Cas: първият дълбок минимум е регистриран през септември 2013 г., вторият през декември 2017 г., третият през февруари-март 2019 г. и четвъртият през януари 2020 г.

През по-голямата част от времето блясъка на звездата в I-филтър е в диапазона от 15-16 mag., което се счита за максимални стойности в предишните изследвания. През тези периоди обаче има промени в блясъка с малки амплитуди, което е характерно за T Tau звездите.

Следователно, кривите на блясъка за дълъг период от време на V1180 Cas е подобна на тази на други млади звезди с ниска маса като GM Cep (Semkov & Peneva (2012a); Semkov et al. (2015); Mutafov et al. (2019)), 2MASS J22534654+6234582 (Ibryamov et al. (2020)) и FHO 27 (Findeisen et al. (2013), Ibryamov & Semkov (2020)).

Диаграмите цвят-величина на V1180 Cas V спрямо (V-R), V спрямо (V-I) и R спрямо (R-I) са показани на Фигура 18.



Фигура 18: Диаграмите цвят-величина $V/V-R$, $V/V-I$ и $R/R-I$ на V1180 Cas в периода на наблюдения септември 2011 г. -- февруари 2022 г.

Събраните многоцветни фотометрични данни показват типичното за UXors обръщане на цветовете по време на минимумите на блясъка. Това е проява на така наречения ефект на „посиняване“, цветът на звездата става по-син в минимумите на нейния блясък, в съответствие с модела на затъмнение от прахови частици.

Фигура 18 показва, че за всяка от цветните диаграми се наблюдава точка на обръщане на цвета при различни яркости на звездите: в диаграмата V към (V-R) точката на обръщане се наблюдава при V около 19,0 mag, във V към (V-I) диаграма при V около 19,2 mag и в диаграмата R към (R-I) при R около 17,5 mag. В диаграмите цвят-величина на V1180 Cas, както и в случая на GM Cep и V1184 Tau, ефектът на "посиняване" се наблюдава, освен във V-R цвят, също и в R-I цвят (Semkov et al. (2013), Semkov et al. (2015), Mutafov et al. (2019), Mutafov et al. (2022)).

От есента на 2020 г. има значителна промяна във фотометричното поведение на V1180 Cas. Регистрирахме две увеличения на блясъка (локални максимуми на блясъка): първото през септември 2020 г. и второто през юли/август 2021 г. В този случай увеличаването на блясъка изглежда е причинено от повишена акреция. Доказателство за това е намаляването на цветовите индекси (V-R и V-I) на звездата (Фигура 18), по време на увеличаване на блясъка.

Звездите на преди ГП се характеризират с различни видове променливост. В много случаи могат да се наблюдават два или повече различни вида променливост за една и съща звезда. Познаваме обекти, които показват както увеличение на блясъка поради повишена акреция, така и намаляване на блясъка, причинени от променливата екстинкция, като V582 Aur (Semkov et al. (2013), Abraham et al. (2018)).

Предположението, че наблюдаваните вариации в блясъка на V1180 Cas са комбинация от променлива акреция и променливо поглъщане в линията на видимост, беше направено от Kun et al. (2011) и Antonucci et al. (2015).

Но използвайки данни от многоцветна фотометрия, можем да различим двата феномена през различни периоди от време. Феноменът UXor е открит и дефиниран при млади звезди с големи и средни маси (звезди на Хербиг с емисионни линии в спектъра и класически T Tau звезди от ранен тип). Но наскоро бяха открити голям брой обекти с малка маса, които също показват този тип променливост (Semkov et al. (2013), Ibraymov et al. (2015), Semkov et al. (2015), Mutafov et al. (2022)). Всички тези обекти показват типична променливост на UXor, но са звезди тип T Tau от късни спектрални типове.

Това явление е особено често срещано сред звезди от млади звездни купове и звездни асоциации (Findeisen et al. (2013), Barsunova et al. (2015)). Това показва, че процесите на образуване на звезди с различна маса протичат по подобен начин. Значителна част от протозвездния газово-прахов облак остава в близост до новообразуваните звезди и причинява променливо поглъщане.

На базата на получените от нас многоцветни наблюдения на V1180 Cas може да потвърдим, че през различни периоди звездата показва различен тип променливост: както характерния за ускорите значителен спад в блясъка и обръщане на цветовете по време на минимумите причинени от променливата екстинкция, така и типичните за ексорите увеличения на блясъка (локални максимуми на блясъка) причинено от повишена акреция.

4. Заключение

С цел изясняване на физическите процеси, отговорни за наблюдаваната променливост при обекти, намиращи се на еволюционната фаза “звезди преди Главната последователност” при работата по дисертационния труд бе предприето фотометрично изследване на звездите GM Cep и V1180 Cas.

Съгласно поставените цели и задачи в дисертационния труд бе стигнато до следните изводи:

1. Във времевата скала от дни и месеци извън дълбоките минимума GM Cep показва значителни вариации на яркостта.
2. Последните данни отново потвърждават наличието на „ефект на посиняване“ по време на минимум на блясъка и са независимо доказателство, че променливостта на GM Cep е доминирана от променливата екстинкция. Събраните многоцветни фотометрични данни показват типичното за UXor променливи обръщане на цвета по време на минимумите на блясъка.
3. Можем да потвърдим нашите предишни заключения, че фотометричните свойства на GM Cep могат да се обяснят със суперпозиция на силно променлива акреция от околосвездния диск върху звездната повърхност и затъмнение от околосвездни прахови частици, планетезимали или от други характеристики на околосвездния диск.
4. Последните събрани многоцветни фотометрични данни потвърждават, че извън дълбоките минимума V1180 Cas показва значителни вариации на яркостта, продължаващи дни и месеци. Същите данни отново потвърждават, че променливостта на звездата е доминирана от променливата екстинкция.
5. VRI кривите на блясъка на V1180 Cas са подобни на други обекти - GM Cep, V1184 Tau, 2MASS J22534654+6234582 и FHO 27.
6. По време на минимумите на яркостта се наблюдава "ефектът на посиняване", който е типичен за променливите от типа UXor. Диаграмите цвят-величина на V1180 Cas, подобно на тези на GM Cep и V1184 Tau, ясно показват ефекта на "посиняване" както във V-R, така и в R-I цветове.
7. Фотометричните свойства на V1180 Cas могат да бъдат обяснени със суперпозиция на силно променлива акреция от околосвездния диск върху звездната повърхност и окултация от околосвездни бучки прах, планетезимали или от други характеристики на околосвездния диск.
8. На базата на получените от нас многоцветни наблюдения на V1180 Cas може да потвърдим, че през различни периоди звездата показва различен тип променливост: както характерния за ускорите значителен спад в блясъка и обръщане на цветовете по време на минимумите причинени от променливата екстинкция, така и типичните за ексорите увеличения на блясъка (локални максимуми на блясъка) причинено от повишена акреция.
9. Направен бе предварителен опит за намиране на периодичност на светлинните криви V1180 Cas, но без задоволителен резултат. Подробно изследване за наличието или липсата на период/и изисква допълнителни наблюдения.

Бъдещи фотометрични и спектрални наблюдения ще бъдат много полезни за изясняване на физическите процеси, отговорни за наблюдаваната променливост при изследваните в

дисертационния труд звезди преди Главната последователност. Те ще предоставят и допълнителна информация за обяснение на наблюдаваната при звездата V1180 Cas променливост характерна за двата типа звезди пред ГП – ексори и уксори. И ще даде възможност да се потвърди или отхвърли хипотезата, че една звезда преди ГП може да се намира по пътя на своята еволюция едновременно и в стадия на ексор и в стадия на уксор.

Научни приноси

В рамките на дисертационния труд са:

1. Проведени наблюдения на звездата GM Cep през 386 наблюдателни нощи в периода юни 2008 – октомври 2020 г.
2. Проведени наблюдения на звездата V1180 Cas през 193 наблюдателни нощи в периода септември 2011 г. - февруари 2022 г.
3. Калибрирани 8 вторични VRI стандартни звезди с цел постигане на висока точност на фотометричните изследвания в полето на звездата V1180 Cas са.

Анализът на получените многогодишни многоцветни фотометрични данни ни позволява с точност да класифицираме GM Cep като променлива от тип UX Orionis. Кривата на блясъка за дълъг период от време са доминирани от спадове, а в минимумите се наблюдава характерното обръщане на цветовете на диаграмите цвят – величина подобно на кривите на блясъка на други ексори. Наблюдаваната променливост по време на спадане на блясъка също е типична за други обекти от този тип. Наблюденията потвърждават, че променливостта на звездата се дължи на затъмнения от околосвездни прахови облаци.

На базата на получените от нас многоцветни наблюдения на V1180 Cas може да потвърдим, че през различни периоди звездата показва различен тип променливост: както характерния за уксорите значителен спад в блясъка и обръщане на цветовете по време на минимумите причинени от променливата екстинкция, така и типичните за ексорите увеличения на блясъка (локални максимуми на блясъка) причинено от повишена акреция. Значителна част от протозвездния газово-прахов облак остава в близост до новообразуваните звезди и причинява променливо поглъщане.

6. Публикации и цитирания

6.1 Публикации на които се основава дисертационния труд

1. Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Ibryamov, S. I., Peneva, S. P. "Long-time photometric study of UX Orionis stars." *AIP Conference Proceedings* 2075. 2019. 090004. <https://doi.org/10.1063/1.5091218>
2. Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Peneva, S. P., Ibryamov, S. I. "New Results from Long-time Photometric Study of UX Orionis Star GM Cephei." *BAJ* 36 (2022): 3.
3. Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Peneva, S. P., Ibryamov, S. I. —. "Photometric study of UX Ori type stars GM Cep and V1180 Cas." Edited by Milan S. Dimitrijević, Momchil Dechev, Zoran Simić Milcho Tsvetkov. *Proceedings of the XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference (XI BSAC) Belogradchik, Bulgaria, May 14-18, 2018*. Publ. Astron. Soc. "Rudjer Bošković", 2019a. 229.
4. Mutafov, A., Semkov, E., Peneva, S., Ibryamov, S. "Long-term Photometric Study of the Pre-main Sequence Star V1180 Cas." *RAA* 22 (December 2022): 125014.

Цитиране на публикации

Към публикация No. 1

1. Hillenbrand, L. A., Reipurth, B., Connelley, M., Cutri, R. M., Isaacson, H., *Gaia 19ajj: A Young Star Brightening Due to Enhanced Accretion and Reduced Extinction*, 2019, *AJ*, **158**, 240 DOI 10.3847/1538-3881/ab4e16

Към публикация No. 4

1. Ghosh, A., Sharma, S., Ninan, J. P., Ojha, D. K., Gour, A. S., Pandey, R., Sinha, T., Verma, A., Singh, K., Ghosh, S., Kaur, H., *Spectroscopy of 9 eruptive young variables using TANSPEC, 2023, Journal of Astrophysics and Astronomy*, DOI: 10.48550/arXiv.2302.04645

Публикувани абстракти

Доклади и постери на научни форуми

1. Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Ibryamov, S. I., Peneva, S. P. "Long-time photometric study of UX Orionis stars." 10-та юбилейна международна конференция на BPU (Balkan Physical Union), 26–30 August 2018, доклад.
2. Mutafov, A., Semkov, E., Peneva, S., Ibryamov, S. „Multicolor photometry of the stars GM Cep and V1180 Cas“, втората международна конференция The UX Ori type stars and related topics, 30 септември – 4 октомври 2019 год. в гр. Санкт Петербург (Русия), доклад.
3. Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Peneva, S. P., Ibryamov, S. I., "Photometric study of UX Ori type stars GM Cep and V1180 Cas.", XI българо-сръбска среща – Белградчик 14-18 май 2018 г., постер
4. Mutafov, A. S., Tyutyundzhiev, N., Nitchev, H., Lovchinov, K., “On the Terrestrial Measurements of Solar UV irradiance at NAO-Rozhen Observatory (BG)”, XIII българо-сръбска среща – Велинград 3-7 октомври 2022 г., постер

Участия в международни научни школи и конференции

1. Участие с постер за XI българо-сръбска среща – Белоградчик 14-18 май 2018 г. на тема “Photometric study of UX Ori type stars GM Cep and V1180 Cas”.
2. Участие с доклад на тема „Long-time Photometric Study of UX Orionis Stars“ на 10-тата юбилейна международна конференция на BPU (Balkan Physical Union), 26–30 August 2018.
3. Участие в STARRY Final Conference 18 – 21 юни 2019, Лийдс, Англия, доклад на тема Results from the optical photometric monitoring of young stellar objects.
4. Участие в European Week of Astronomy and Space Science, The annual meeting of the European Astronomical Society 24 - 28 JUNE, 2019 LYON с постер на тема Photometric variability of pre-main sequence objects on long time scales.
5. Участие с доклад във втората международна конференция The UX Ori type stars and related topics, 30 септември – 4 октомври 2019 год. в гр. Санкт Петербург (Русия) с доклад на тема „Multicolor photometry of the stars GM Cep and V1180 Cas“.
6. Участие с постер за XIII българо-сръбска среща – Велинград 3-7 октомври 2022 г. на тема “On the Terrestrial Measurements of Solar UV irradiance at NAO-Rozhen Observatory (BG)”.

6.2 Други публикации на докторанта

1. Tyutyundzhiev, N., Angelov, Ch., Lovchinov, K., Nitchev, Hr., Arsov, T., Mutafov, A., “Comparative measurements of solar UV irradiation at the high-mountain stations of BEO-Moussala (BG) and NAO-Rozhen (BG)”, 21st International Summer School on Vacuum, Electron and Ion Technologies, Journal of Physics: Conference Series 1492 (2020) 012044, IS 0.55, SJR 0.21 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1492/1/012044/pdf>
2. Semkov, E., Peneva, S., Ibryamov, S., Mutafov, A., Long-term photometric observations in the field of the star formation region NGC7129. International Astronomical Union Proceedings Series, 336, 2018, , 287-288.
3. Semkov, E., Ibryamov, S., Peneva, S., Mutafov, A., „Long-term Photometric Monitoring of FUor and FUor-like Objects“, Communications of BAO, Vol.2, (LXV), 2018, Is.2, pp.240-248.
4. Tyutyundzhiev, N. ; Angelov, Ch ; Arsov, T. ; Lovchinov, K. ; Nitchev, H. ; Mutafov, A. ; Alexieva, G., „Remote datalogging of solar UV irradiation using open-source ESP32 platform and MQTT protocol“, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2436, Issue 1, id.012003, DOI: 10.1088/1742-6596/2436/1/012003.
5. Tyutyundzhiev, N.; Angelov, Ch.; Arsov, T.; Nitchev, H.; Lovchinov, K.; Mutafov, A., „Variation of UV-A/UV-B daily profiles depending on locations and altitude“, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2436, Issue 1, id.012008, DOI: 10.1088/1742-6596/2436/1/012008.

Благодарности

Благодаря на научния си ръководител проф. д-р Евгени Семков за това, че ме ,откри‘ за астрономията и през годините ми даваше уроци и увереност, както в науката, така и в живота.

Благодаря на родителите ми, докато бяха живи, и брат ми за подкрепата и разбирането през всичките тези години да не се отказвам от мечтите си.

Благодаря на семейството ми, за това, че търпи всички несгоди на астрономическия живот.

Благодаря на всички мой колеги с които съм работил и са ми давали точни и ценни съвети.

Благодаря и на директора на обсерваторията Skinakas проф. I. Papamastorakis и проф. I. Papadakis за предоставеното наблюдателно време.

Изследванията в тази дисертация са частично подкрепени от Фонд „Научни изследвания“ на Министерството на образованието и науката по грантове DN 08-1/2016, DN 18-10/2017 и DN 18-13/2017, както и от Националния проект за пътна карта за научна инфраструктура (договори D01-383/18.12.2020 г. и D01-176/29.07.2022 г.) на Министерството на образованието и науката на Република България.

В това изследване са използвани данни от услугите на: системата за астрофизични данни на НАСА, базата данни SIMBAD и инструмента за достъп до каталог VizieR, опериран в CDS, Страсбург, Франция.

Библиография

- Ábrahám P., Kóspál Á., Kun, M., Fehér, O., Zsidi, G., Acosta-Pulido, J. A., Carnerero, M.I., García-Álvarez, D., Moór, A., Cseh, B., Hajdu, G., Hanyecz, O., Kelemen, J., Kriskovics, L., Marton, G., Mező, Gy., Molnár, L., Ordasi, A., Rodríguez-. *ApJ* 853 (2018): 28.
- Ábrahám, P., Chen, L., Kóspál, Á., Bouwman, J., Carmona, A., Haas, M., Sicilia-Aguilar, A., Figaredo, C. S., van Boekel, R. and Varga, J. "Spectral Evolution and Radial Dust Transport in the Prototype Young Eruptive System EX Lup." *ApJ* 887 (2019): 156.
- Alcalá, J. M., Natta, A., Manara, C. F., et al. "X-shooter spectroscopy of young stellar objects. IV. Accretion in low-mass stars and substellar objects in Lupus." *A&A* 561 (2014): A2.
- Ambartsumian, V. A. *Astrophysics* 7 (1971): 331.
- Antoniucci, S., Arkharov, A. A., Di Paola, A., Giannini, T., Harutyunyan, A., Kopatskaya, E. N., Larionov, V. M., Li Causi, G., Lorenzetti, D., Morozova, D., Nisini, B. and Vitali, F. *AAP* 565 (2014): L7.
- Antoniucci, S., Arkharov, A. A., Efimova, N., Kopatskaya, E. N., Larionov, V. M., Di Paola, A., Giannini, T., Li Causi, G., Lorenzetti, D., Vitali F. *ATel* 5421 (2013): 1.
- Antoniucci, S., Nucita, A.A., Giannini, T., Lorenzetti, D., Stelzer, B., Gerardi, D., Delle Rose, S., Di Paola, A., Giordano, M., Manni, L. and Strafella, F. *AAP* 584 (2015): A21.
- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Mantelet, G., Andrae, R. "Estimating Distance from Parallaxes. IV. Distances to 1.33 Billion Stars in Gaia Data Release 2." *AJ* 156 (2018): 58.
- Barsunova, O. Yu., Grinin, V. P., Sergeev, S. G., Semenov, A.O., Shuganov, S. Yu. *Astrophysics* 58 (2015): 193B.
- Bastian, U., Finkenzeller, U., Jaschek, C., Jaschek, M. *A&A* 126 (1983): 438.
- Bertout, C., Siess, L., Cabrit, S. "The evolution of stars in the Taurus-Auriga T association." Edited by LETTER TO THE EDITOR. *A&A* 473 (2007): L21-L24.
- Bibo, E. A., The, P. S. "A study of the Herbig Ae-type star UX Orionis - Its remarkable behaviour in the colour-magnitude diagram, and the properties of its dust shell." *A&A* 236 (1990): 155.
- Brittain, S.D., Kamp, I., Meeus, G., Oudmaijer, R.D., Waters, L.B.F.M. "Herbig Stars: A Quarter Century of Progress." *Space Science Reviews* 219, no. 1 (2023): 7.
- Chen, W. P., and Hu, S. C.-L. *IAUS* 293 (2014): 74.
- Chen, W. P., Hu, S. C.-L., Errmann, R., et al. "A Possible Detection of Occultation by a Proto-planetary Clump in GM Cephei." *ApJ* 751 (2012): 118.
- Chen, W. P., Hu, S. C.-L., Errmann, R., et al. "A POSSIBLE DETECTION OF OCCULTATION BY A PROTO-PLANETARY CLUMP IN GM Cephei." *ApJ* 751 (2012): 118.

- Contreras, M. E., Sicilia-Aguilar, A., Muzerolle, J., Calvet, N., Berlind, P., Hartmann, L. "A Study of Intermediate-Mass Stars in Trumpler 37." *AJ* 124 (2002): 1585.
- Dahm, S. E. "A Spectroscopic Examination of Accretion Diagnostics for Near Solar Mass Stars in IC 348." *AJ* 136 (2008): 521 .
- Dullemond, C. P., van den Ancker, M. E., Acke, B., van Boekel, R. "Explaining UX Orionis Star Variability with Self-shadowed Disks." *ApJ* 594 (2003): L47.
- Errmann, R., Neuhäuser, R., Marschall, L., Torres, G., Mugrauer, M., Chen, W.P., Hu, S.C.-L., Briceno, C., Chini, R., Bukowiecki, Ł., Dimitrov, D.P., Kjurkchieva, D., Jensen, E.L.N., Cohen, D.H., Wu, Z.-Y., Pribulla, T., Vaňko, M., Krushevskaja, V., et al. "The stellar content of the young open cluster Trumpler 37." *AN* 334 (2013): 673.
- Findeisen K., Hillenbrand L., Ofek E., Levitan D., Sesar B., Laher R., Surace J. *ApJ* 768 (2013): 93.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. "Gaia Data Release 2." *A&A* 616 (2018): A1.
- Garufi, A., Benisty, M., Pinilla, P., Tazzari, M., Dominik, C., Ginski, C., Henning, Th., Kral, Q., Langlois, M., Ménard, F., Stolker, T., Szulagyi, J., Villenave, M., van der Plas, G. "Evolution of protoplanetary disks from their taxonomy in scattered light: spirals, rings, cavities, and shadows." *A&A* 620 (2018): A94.
- Giannini, T., Munari, U., Lorenzetti, D., Antonucci, S., Castellani, F., Dallaporta, D. and Jurdana-Šepić, R. . "The Mass Accretion Rate of the Young Variable Star GM Cep." *RNAAS* 2 (2018): 124.
- Grady, C. A., Sitko, M. L., Russell, R. W., Lynch, D.K., Hanner, M.S., Perez, M.R., Bjorkman, K.S., de Winter, D. Edited by A. Boss, S. Russell V. Mannings. *Protostars and Planets IV*. Tucson: The University of Arizona Press, 2000. 613.
- GRAVITY Collaboration, Sanchez-Bermudez J, Caratti O Garatti A, Garcia Lopez R, Perraut K, Labadie L, Benisty M, Brandner W, Dougados C, Garcia PJV, Henning T, Klarmann L, Amorim A, et al. "The GRAVITY young stellar object survey. VI. Mapping the variable inner disk of HD 163296 at sub-au scales. ." *A&A* 654 (2021): A97.
- Grinin V. P., Kiselev N. N., Minikulov N. K., Chernova G. P. *Soviet Astronomy Letters* 14 (1988): 219.
- Grinin V. P., Kiselev N. N., Minikulov N. Kh., Chernova G. P., Voshchinnikov N. V. "The investigations of 'zodiacal light' of isolated AE-Herbig stars with nonperiodic algol-type minima." *ApSS* 186 (1991): 283.
- Grinin V. P., The P. S., de Winter D., Giampapa M., Rostopchina A. N., Tambovtseva L. V., van den Ancker M. E. "The β Pictoris phenomenon among young stars. I. The case of the Herbig AE star UX Orionis." *A&A* 292 (1994): 165.
- Gullbring, E., Hartmann, L., Briceño, C., & Calvet, N. "Disk Accretion Rates for T Tauri Stars." *ApJ* 492 (1998): 323.
- Hartmann, L., & Kenyon, S. "THE FU ORIONIS PHENOMENON." *ARA&A* 34 (1996): 207.

- Hartmann, L., Kenyon, S. J. "On the nature of FU Orionis objects." *ApJ* 299 (1985): 462.
- Henning, T., Semenov, D. *Chemical Reviews* 113 (December 2013): 9016-9042.
- Herbig, G. H. *AdA&A* 1 (1962): 47.
- Herbig, G. H., and Reipurth, B. *ESO Workshop on Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence Objects*. European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, 1989. 233.
- Herbig, G.H. *ApJ* 131 (1960): 516.
- Herbig, G.H., Harlan, E.A. *IBVS* 543 (1971).
- Herbst W., Herbst D. K., Grossman E. J., Weinstein D. "Catalogue of UBVRI photometry of T Tauri stars and analysis of the causes of their variability." *AJ* 108, no. 1 (1994): 1906.
- Herbst, W. *PASP* 98 (1986): 1088.
- Herbst, W., Eisloffel J., Mundt R., and Scholz A. "The Rotation of Young Low-Mass Stars and Brown Dwarfs." Edited by Jewitt D. and Keil K. Reipurth B. *Protostars and Planets IV*. Tucson: University of Arizona Press, 2007. 297.
- Herbst, W., Shevchenko, V. S. . *AJ* 118 (1999): 1043.
- Huang P. C., Chen W. P., Mugrauer M., Bischoff R., et al. *ApJ* 871 (2019): 183.
- Huang, Y. F., Li, J. Z., Rector, T. A., & Mallamaci, C. C. "EFFICIENT SELECTION AND CLASSIFICATION OF INFRARED EXCESS EMISSION STARS BASED ON AKARI AND 2MASS DATA." *AJ* 145 (2013): 126.
- Ibryamov S. I., Semkov E. H., Peneva S. P. "Long-Term Multicolour Photometry of the Young Stellar Objects FHO 26, FHO 27, FHO 28, FHO 29, and V1929 Cygni." *PASA* 32 (2015): id. e021.
- Ibryamov, S., Semkov, E. *BAJ* 32 (2020): 96.
- Ibryamov, S., Semkov, E., Peneva, S., Gocheva, K. *RAA* 20, no. 12 (2020): id 194, 8.
- Jones, A. F. A. L. "EX Lupi." Edited by D. W. E. Green. *Central Bureau Electronic Telegrams* 1231 (2008): 1.
- Joy, A. H. *ApJ* 102 (1945): 168.
- Kochanek, C. S. ; Shappee, B. J. ; Stanek, K. Z. ; Holoiien, T. W. -S. ; Thompson, Todd A. ; Prieto, J. L. ; Dong, Subo ; Shields, J. V. ; Will, D. ; Britt, C. ; Perzanowski, D. ; Pojmański, G. "The All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) Light Curve Server v1.0." *PASP* 129 (2017): 104502.
- Kóspál, Á. ; Mohler-Fischer, M. ; Sicilia-Aguilar, A. ; Ábrahám, P. ; Curé, M. ; Henning, Th. ; Kiss, Cs. ; Launhardt, R. ; Moór, A. ; Müller, A. "Radial velocity variations in the young eruptive star EX Lupi." *A&A* 561 (2014): A61.

- Kun, M., Obayashi, A., Sato, F., Yonekura, Y., Fukui, Y., Balazs, L. G., Abraham, P., Szabados, L., Kelemen, J. "Study of L 1340: A star-forming cloud in Cassiopeia." *AAJ* 292 (1994): 249.
- Kun, M., Szegedi-Elek, E., Moór, A., Kóspál, Á., Ábrahám, P., Apai, D., Kiss, Z. T., Klagyivik P., Magakian, T. Yu., Mező, Gy., Movsessian, T. A., Pál, A., Rácz, M., Rogers, J. "A Peculiar Young Eruptive Star in the Dark Cloud Lynds 1340." *ApJ* 733 (2011): L8.
- Landolt, A.U. *AJ* 104 (1992): 340-371.
- Lazareff B, Berger JP, Kluska J, Le Bouquin JB, Benisty M, Malbet F, Koen C, Pinte C, Thi WF, Absil O, Baron F, Delboulb´e A, Duvert G, Isella A, Jocou L, Juhasz A, Kraus S, Lachaume R, M´enard F, Millan-Gabet R, Monnier JD, Moulin T, Perraut K, et al. "Structure of Herbig Ae/Be disks at the milliarcsecond scale . A statistical survey in the H band using PIONIER-VLTI." *A&A* 599 (2017): A85.
- Lomb, N. R. "Least-squares frequency analysis of unequally spaced data." *Ap&SS* 39 (1976): 447.
- Lopez B, Lagarde S, Petrov RG, Jaffe W, Antonelli P, Allouche F, Berio P, Matter A, Meilland A, Millour F, Robbe-Dubois S, Henning T, Weigelt G, Glindemann A, Agocs T, Bailet C, Beckmann U, Bettonvil F, van Boekel R, Bourget P, Bresson Y, Bristow P, Cruza. "MATISSE, the VLTI mid-infrared imaging spectro-interferometer. ." *A&A* 659 (2022): A192.
- Lorenzetti, D., Antonucci, S., Giannini, T., Harutyunyan, A., Arkharov, A. A., Larionov, V. M., Cusano, F., Di Paola, A., Li Causi, G., Nisini, B., Speziali, R., Vitali, F. *ApJ* 802 (2015): 24.
- Lynds, B. T. *ApJS* 7 (1962): 1.
- Malfait K, Bogaert E, Waelkens C. "An ultraviolet, optical and infrared study of Herbig Ae/Be stars." *A&A* 331 (1998): 211.
- Marschall, L. A. and van Altena, W. F. "Membership in the young cluster Trumpler 37." *AJ* 94 (1987): 71.
- Marschall, L. A., Karshner, G. B., & Comins, N. F. "Photometry of the Young Open Cluster Trumpler 37." *AJ* 99 (1990): 1536.
- Mercer, E. P., Miller, J. M., Calvet, N., Hartmann, L., Hernandez, J., Sicilia-Aguilar, A. and Gutermuth, R. "CHANDRA AND SPITZER OBSERVATIONS REVEAL NEW YSOs IN THE HEART OF TRUMPLER 37." *AJ* 138 (2009): 7.
- Munari, U., Castellani, F., Giannini, T., Antonucci, S., Lorenzetti, D. "A sudden brightness decrease of the young pre-MS object GM Cep." 2017.
- Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Ibryamov, S. I., Peneva, S. P. "Long-time photometric study of UX Orionis stars." *AIP Conference Proceedings*. 2019. 090004.
- Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Peneva, S. P., Ibryamov, S. I. "New Results from Long-time Photometric Study of UX Orionis Star GM Cephei." *BAJ* 36 (2022): 3.

- Mutafov, A. S., Semkov, E. H., Peneva, S. P., Ibryamov, S. I. "Photometric study of UX Ori type stars GM Cep and V1180 Cas." Edited by Milan S. Dimitrijević, Momchil Dechev, Zoran Simić Milcho Tsvetkov. *Proceedings of the XI Bulgarian-Serbian Astronomical Conference (XI BSAC) Belogradchik, Bulgaria, May 14-18, 2018*. Publ. Astron. Soc. "Rudjer Bošković", 2019a. 229.
- Mutafov, A., Semkov, E., Peneva, S., Ibryamov, S. "Long-term Photometric Study of the Pre-main Sequence Star V1180 Cas." *RAA* 22 (December 2022): 125014.
- Natta, A., Grinin, V. P., Mannings, V., Ungerechts, H. "The Evolutionary Status of UX Orionis-Type Stars." *ApJ* 491 (1997): 885.
- Natta, A., Prusti, T., Neri, R., Thi, W.F., Grinin, V.P., Mannings, V. *A&A* 350 (1999): 541.
- Neuhäuser, R., Errmann, R., Berndt, A., et al. "The Young Exoplanet Transit Initiative (YETI)." *AN* 332 (2011): 547.
- Patel, N. A., Goldsmith, P. F., Snell, R. L., Hezel, T., & Xie, T. "The Large-Scale Structure, Kinematics, and Evolution of IC 1396." *ApJ* 447 (1995): 721.
- Rostopchina A. N., Grinin V. P., Shakhovskoi D. N. *Astronomy Reports* 45 (2001): 51.
- Scargle, J. D. "Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data." *ApJ* 263 (1982): 835.
- Semkov E. H., Peneva, S. P., Munari U., Dennefeld M., Mito H., Dimitrov D. P., Ibryamov S., Stoyanov, K. A. *A&A* 556 (2013): A60.
- Semkov, E. H. ; Peneva, S. P. ; Munari, U. ; Tsvetkov, M. K. ; Jurdana-Šepić, R. ; de Miguel, E. ; Schwartz, R. D. ; Dimitrov, D. P. ; Kjurkchieva, D. P. ; Radeva, V. S. "Optical photometric and spectral study of the new FU Orionis object V2493 Cygni (HBC 722)." *A&A* 542 (2012b): A43.
- Semkov, E. H., and Peneva, S. P. "Optical photometry of GM Cep: evidence for UXor type of variability." *ApSS* 338 (2012a): 95.
- Semkov, E. H., Ibryamov, S. I., Peneva, S. P., Milanov, T. R., Stoyanov, K. A., Stateva, I. , K., Kjurkchieva, D. P., Dimitrov, D. P., Radeva, V. S. "The unusual photometric variability of the PMS star GM Cep." *PASA* 32 (2015): e011.
- Semkov, E. H., Peneva, S. P., Munari, U., Milani, A., & Valisa, P. "The large amplitude outburst of the young star HBC 722 in NGC 7000/IC 5070, a new FU Orionis candidate." *A&AL* 523 (2010): L3.
- Semkov, E.; Ibryamov, S.; Peneva, S. "The FUor Star V2493 Cyg (HBC 722)—Eleven Years at Maximum Brightness." *Symmetry* (MDPI) 13 (2021): 2433.
- Shakhovskoi D. N., Rostopchina A. N., Grinin V. P., Minikulov N. K. *Astronomy Reports* 47 (2003): 301.
- Shappee, B. J., Prieto, J. L., Grupe, D., Kochanek, C. S., Stanek, K. Z., De Rosa, G., Mathur, S., Zu, Y., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Komossa, S., Im, M., Jenson, J., Holoiien, T. W. -S., Basu, U., Beacom, J. F., Szczygieł, D. M., Brimacombe, J., et al. "The Man

- behind the Curtain: X-Rays Drive the UV through NIR Variability in the 2013 Active Galactic Nucleus Outburst in NGC 2617." *ApJ* 788 (2014): 48.
- Sicilia-Aguilar, A., Hartmann, L., Hernandez, J., Briceno, C., and Calvet, N. "Cepheus OB2: Disk Evolution and Accretion at 3-10 Myr." *AJ* 130 (2005): 188.
- Sicilia-Aguilar, A., Merín, B., Hormuth F., Abraham, P., Henning T., Kun M., Patel N., Juhasz A., Brandner W., Hartmann, L. W., Csizmadia, Sz., Moor, A. "The Rapid Outbursting Star GM Cep: An EXor in Tr 37?" *ApJ* 673 (2008): 382.
- Th´e PS, de Winter D, Perez MR . "A new catalogue of members and candidate members of the Herbig Ae/Be (HAEBE) stellar group." *A&AS* 104 (1994): 315.
- The, P.S. Edited by P.S., Perez M.R., van den Heuvel E.P.J. The. *Nature and evolutionary status of Herbig Ae/Be stars*. ASP Conf. Ser., 1994. 23.
- van den Ancker, M. E. ; The, P. S. ; Tjin A Djie, H. R. E. ; Catala, C. ; de Winter, D. ; Blondel, P. F. C. ; Waters, L. B. F. M. "HIPPARCOS data on Herbig Ae/Be stars: an evolutionary scenario." *A&A* 324 (1997): L33.
- van den Ancker, M. E., de Winter, D., Tjin A Djie, H. R. E. "HIPPARCOS photometry of Herbig Ae/Be stars." *A&A* 330 (1998): 145.
- Varga J, Hogerheijde M, van Boekel R, Klarmann L, Petrov R, Waters LBFM, Lagarde S, Pantin E, Berio P, Weigelt G, Robbe-Dubois S, Lopez B, Millour F, Augereau JC, Meheut H, Meilland A, Henning T, Jaffe W, Bettonvil F, Bristow P, Hofmann KH, Matter A, Zins. "The asymmetric inner disk of the Herbig Ae star HD 163296 in the eyes of VLTI/MATISSE: evidence for a vortex?" *A&A* 647 (2021): A56.
- Vieira SLA, Corradi WJB, Alencar SHP, Mendes LTS, Torres CAO, Quast GR, Guimarˆaes MM, da Silva L. "Investigation of 131 Herbig Ae/Be Candidate Stars." *AJ* 126, no. 6 (2003): 2971.
- Vioque, M., Oudmaijer, R. D., Baines, D., Mendigutía, I. and Pérez-Martínez, R. . "Gaia DR2 study of Herbig Ae/Be stars." *A&A* 620 (2018): A128.
- Voshchinnikov, N. V. *Astrofizika* 30 (1989): 509.
- Wachmann, A. A. *IAU Circ.* 738 (1939): 1.
- Wachmann, A. A. *ZfA* 35 (1954): 74.
- Waters LBFM, Waelkens C. "Herbig Ae/Be Stars." *ARA&A* 36 (1998): 233.
- Welin, G. *A&A* 12 (1971): 312.
- Wright, E.L., Eisenhardt, P.R.M., Mainzer, A.K., Ressler, M.E., Cutri, R.M., Jarrett, T., Kirkpatrick, J.D., Padgett, D., McMillan, R.S., Skrutskie, M., Stanford, S.A., Cohen, M., Walker, R.G., Mather, J.C., Leisawitz, D., Gautier, T.N. III et al. "The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance." *ApJ* 140, no. 6 (2010): 1868.
- Xiao, L., Kroll, P., and Henden, A. "Long-term Light Curve of Highly Variable Protostellar Star GM Cep." *AJ* 139 (2010): 1527.

Zaitseva, G. V. *Astrophysics* 25 (1986): 626.