



Българска академия на науките
Институт по астрономия
с Национална астрономическа обсерватория

Асен Славчев Мутафов

Затъмнителни променливи от UX Ori тип

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.

Съдържание

Увод	3
1 Основни характеристики и променливост на звезди преди Главната последователност	6
1.1 Звезди преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел	7
1.1.2 Ae/Be звезди на Хербиг	10
1.2 Типове фотометрична променливост при младите звезди	21
1.2.1 Променливост от тип FU Orionis (фуори)	24
1.2.2 Променливост от типа EX Lupi (ексори)	29
1.2.3 Променливост от типа UX Orionis (уксори)	36
2 Наблюдения и обработка на данните на изследваните звезди.....	46
2.1 Наблюдения	46
2.2 Обработка на данните на изследваните звезди.....	47
2.2.1 Обработка на получените данни за звездата GM Cep	47
2.2.2 Обработка на получените данни за звездата V1180 Cas.....	49
3 Резултати от наблюденията на обектите и анализ на получените резултати.....	53
3.1 GM Cep.....	53
3.2 V1180 Cas.....	71
4. Заключение.....	84
5. Научни приноси.....	86
6. Публикации и цитирания	88
6.1 Публикации на които се основава дисертационния труд	88
6.2 Други публикации на докторанта	89
Благодарности	90
Библиография.....	91

Увод

От древни времена хората се стремят да разгадаят тайните на заобикалящия ги свят. С натрупването на все повече опит едни остават мечтатели за цял живот, други подлагат всичко на съмнение, а трети отричат дори очевадните неща. Егото на хората ги провокира да смятат, че те са в центъра на всичко. Самодоволни и самодостатъчни. Дори когато падне ябълка на главата им, огромна част от хората ще изпитат само раздражение, без да осъзнават откривателския шанс който са пропуснали.

И въпреки тези дадености на човешкия характер, с течение на времето философското разбиране за устройството на заобикалящия ни свят се е променяло. Понякога в положителна посока (от гледна точка на миналото), понякога не толкова. Но въпреки тази спирала, с помощта и на развитието на наблюдателните методи и апаратура на човека му става все по-ясно, че не той е в центъра на света.

След като се оказа, че Земята не е плоска и не е в центъра на Вселената, човечеството осъзнава, и че не всичко започва от настоящия момент. Днешните хора почти сигурно не сме по-умни сравнение с предците ни, живели в миналото. Като отчитат всички тези факти от пространство-времето, съвременните учени поучили се от опита на предшествениците се опитват безпристрастно да отбелязват и систематизират наблюдаваните от тях явления.

Хилядолетия наред знанието се предавало устно, и едва в последните четири-пет хиляди години се записва чрез различни знаци и писмени системи на различни носители (камък, папирус, пергамент, хартия, компютърен диск). С развитието на обществото и средствата му за придвижване и споделяне на информация се ускорява и темпото с което се променя представата ни за Вселената. Ако в древни времена просветените са малцина и е необходимо лично общуване и информацията се е разпространявала до там, докдето просветените могат да пътуват физически, то в днешно време информацията се разпространява на практика мигновено и е достъпна за всички.

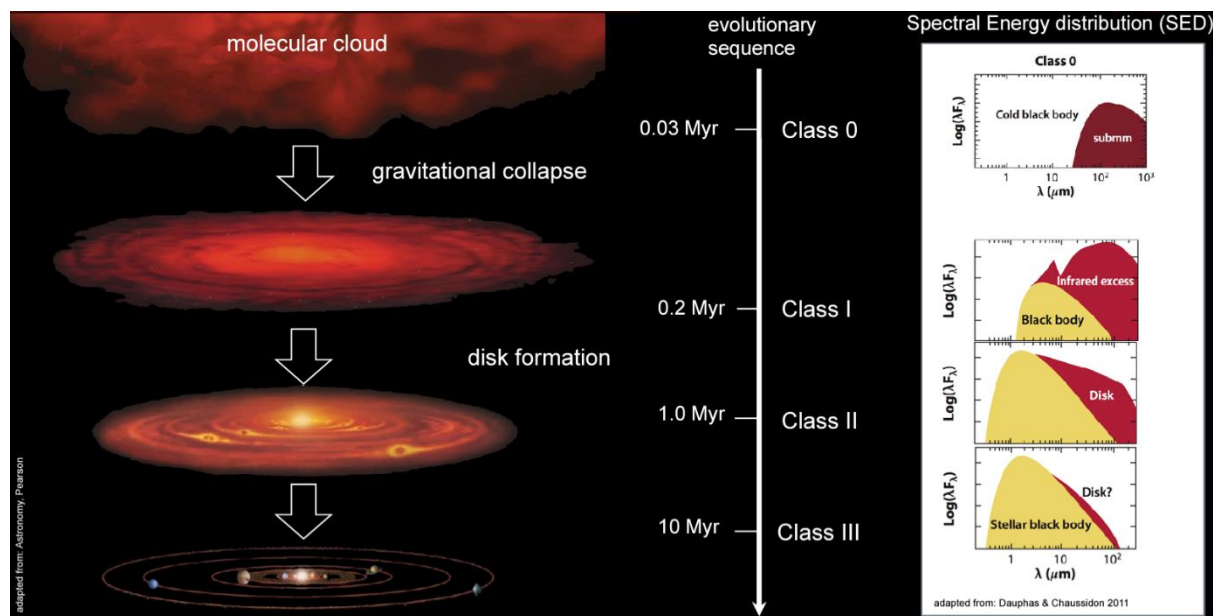
Естествено егото на хората не се е променило. Ако в древността е трябвало да си просветен, за да ти предадат дадена информация, сега всеки автор търси защита на авторските си права. Ако преди достоверността се е гарантирала от този, който споделя информацията, сега тя се легитимира с мненията на научната общност. И доколкото в миналото „просветеният“ е можело да бъде подведен или да има користни цели, то също така и сега автора и научната общност могат да се подадат на модни тенденции или желаниа за лидерство.

От динамиката на представите за време/пространството през хилядолетията, от често взаимно отхвърлящите се една друга светогледни представи в миналото, неизменен е само егоцентризмът на човека. За това днешното ни самомнение, че сме синтезът и венецът на хилядолетно интелектуално развитие може да ни изиграе лоша шега.

Така или иначе, в резултат на всички събрани и описани данни в съвременната литература и сред съвременната научна общност се е формирало мнението, че съвременната Вселена е възникнала преди повече от 13 милиарда земни години. И в настоящия етап се състои от видима (галактики, звезди и т.н.) и невидима (тъмна) материя.

Един от основните въпроси в съвременната астрофизика е разбирането ни за образуването и ранната еволюция на звездите и планетните системи. То е тясно свързано с разбирането ни за произхода на Слънцето и планетите от Слънчевата система, включително на родната ни планета Земя.

Според сегашните ни представи звездите се образуват в резултат на гравитационен колапс на части от плътни молекулярни облаци (виж Фигура 1), където гравитацията превъзхожда газовото налягане и това води до образуването на ядро. След като във фрагмент от свиващия се облак се формира звезда в хидростатично равновесие, съхранението на ъгловия момент води до образуването на акреционен диск и веществото от облака продължава да акретира върху нея. Първоначално звездата е обкръжена от непрозрачен облак и може да се наблюдава само в далечния инфрачервен диапазон. Когато този молекулярен облак се разсее (обикновено след 0.5 – 1 млн. години), акрецията се забавя и настъпва по-бавна фаза (обикновено от 5 – 15 млн. години) от еволюцията на звездата, която завършва с началото на горенето на водорода в нейното ядро (Palla & Stahler (1993); Lada (2005); McKee & Ostriker (2007); Li et al. (2014)).



Фигура 1. Образуване на звездите (Kreplin, A., (2019)).

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 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 непълнен поглед върху фотометрията на изследваните звезди и представя тяхната фотометрична история.

Дисертационния труд съдържа 106 страници, включващи 44 фигури, 9 таблици, цитирани 234 източника. Съдържанието е структурирано в 6 глави. Първата глава има обзорен характер и в нея са описани основните характеристики и типове променливост на звездите преди ГП, като особено внимание е обърнато на тяхната класификация и променливост. Във втората глава е представена информация за използваните при получаването на наблюдателния материал телескопи и детектори (CCD камери), както и процедурите за тяхната обработка - процедурите за калибриране на вторични стандартни звезди и апертурна фотометрия. Резултатите от наблюденията и анализа на получените резултати за всеки от изследваните обекти са дадени в трета глава, а заключенията и научните приноси са формулирани съответно в глави четвърта и пета. В шеста глава се съдържа списък с публикациите и цитиранията на които се основава дисертационния труд.

1 Основни характеристики и променливост на звезди преди Главната последователност

Съгласно възприетите идеи, звездите се образуват в резултат на гравитационния колапс на фрагменти от ядрата на плътни молекулярни облаци. Гигантските молекулярни облаци са най-масивните обекти в Галактиката ($10^5 - 10^6 M_{\odot}$). Масивните горещи звезди се образуват само в гигантските молекулярни облаци, съсредоточени в спиралните ръкави на Галактиката. По-малко масивните облаци, в които се образуват съответно по-малко масивни звезди, са по-равномерно разпределени в галактичния диск. Например, комплекса Taurus-Auriga съдържа около $10^4 M_{\odot}$ материя, където се срещат много звезди от типа T Tauri.

В началото на еволюционното си развитие звездите се намират в етап на гравитационно свиване и са разположени преди ГП на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел. В тези ранни етапи от еволюцията светимостта на звездата е относително висока. Постепенно благодарение на свиването температурата в центъра на звездата се повишава и когато тази температура се повиши достатъчно започват термоядрени реакции превръщащи водорода в хелий. Звездата достига ГП на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел. В този момент светимостта на звездата достига минималната си стойност. След това през по-късните етапи на еволюцията след ГП светимостта нараства отново. По тази причина звездите, които са разположени преди ГП са относително ярки, което улеснява откриването им.

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 ($M \leq 2M_{\odot}$) T Tau 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)).

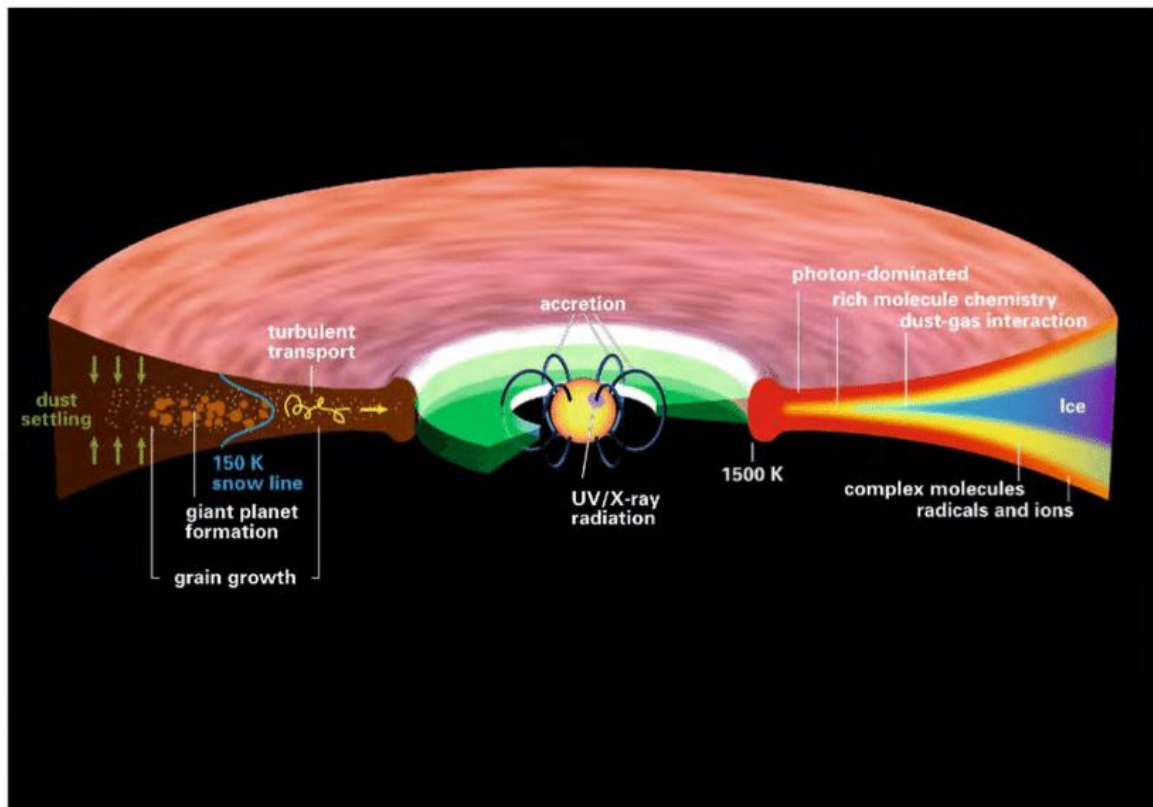
Широко прието е (Bertout (1989); Appenzeller & Mundt (1989)), че звездите преди ГП от тип T Tau могат да бъдат разделени на два подкласа въз основа на наличието на акреционен диск - класически T Tau (CTT) звезди, заобиколени от масивен акреционен диск и звезди T Tau със слаба линия H α (WTT) без индикации за акреция на диска. На Фигура 2 е показана схема на физическата и химическа структура на протопланетен диск на $\sim 1-5$ Муг около звезда, подобна на Слънцето (Henning & Semenov (2013)).

Докато променливостта на T Tau звездите със слаба линия H α най-често се обяснява с ротационна модулация на хладни петна по тяхната повърхност, класически T Tau звезди се характеризират с променливост с големи амплитуди. Тя може да се обясни с акреция по линиите на магнитното поле от околосвездния диск върху повърхността на звездата. Това обяснение е обобщено в работата на Herbst et al. (2007).

Значителна част от звездите НАЕВЕ – Ae/Be звезди на Хербиг с емисионни линии в спектъра и някои звезди от ранен тип 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 цвятова 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 2. Схема на физическата и химическа структура на протопланетен диск на $\sim 1-5$ Муг 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 (НАЕВЕ) 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)).

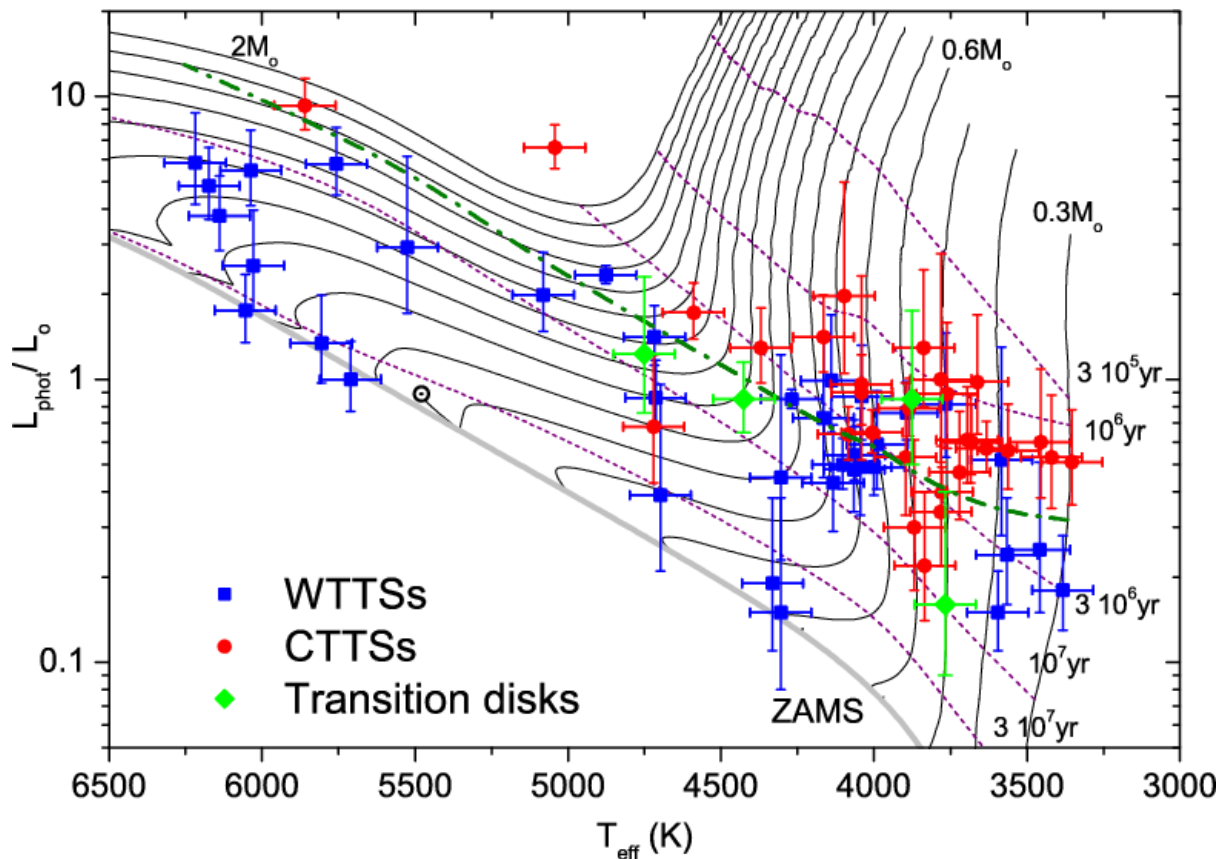
Разликата между двата типа звезди преди ГП – Т Tauri и звездите на Хербиг от спектрални класове Ae/Be е не само в масата, но и в техния вътрешен строеж и еволюционен статус. Ae/Be звездите на Хербиг са изцяло радиативни и нямат конвективна зона, подобно на Т Tauri звездите (Water & Waelkens (1998)).

1.1.1 Звезди от типа Т Tauri

Известно е, че младите звездни обекти показват промени в яркостта си. Слънцеподобните обекти намиращи се преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг – Ръсел, т.е. звездите от типа Т Тау, също могат да показват умерени промени в яркостта и цветовете се (Herbst et al. (1994)) поради ротационна модулация от магнитни/хромосферни хладни петна или акреция/горещи петна на повърхността.

За първи път звездите преди ГП с малка маса ($M \leq 2M_{\odot}$) са обособени като отделен тип променливи в пионерската работа на Joy (1945). Той свързва тези обекти с тъмни области и мъглявини в облака Taurus-Auriga. Прототипът на тези обекти е звездата Т Tauri, която дава името си на цялата група звезди преди ГП, известна днес като звезди от типа Т Tauri. Преди това тези звезди са били известни като неправилни променливи, свързани с тъмни облаци и отражателни мъглявини.

Върху Диаграмата на Херцшпунг – Ръсел Т 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 3 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 3. 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)).

Подробни описания на наблюдателните характеристики на Т Tauri звездите, са дадени в работите на Appenzeller & Mundt (1989), Bertout (1989) и Petrov (2003).

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 T 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 T 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.

През последните години натрупването на наблюдателен материал, заедно с развитието на разбирането ни на някои от процесите на звездната еволюция, доведоха много астрономи до убеждението, че звездите от тип T Tau са млади звезди, които все още са в етап на гравитационно свиване към ГП. Ако това е вярно, тогава яркостта на звездите от тип T Tau показва, че те са обекти с малка до средна маса, които след време ще станат звезди от ГП от тип F и по-късни.

1.1.2 Ae/Be звезди на Хербиг

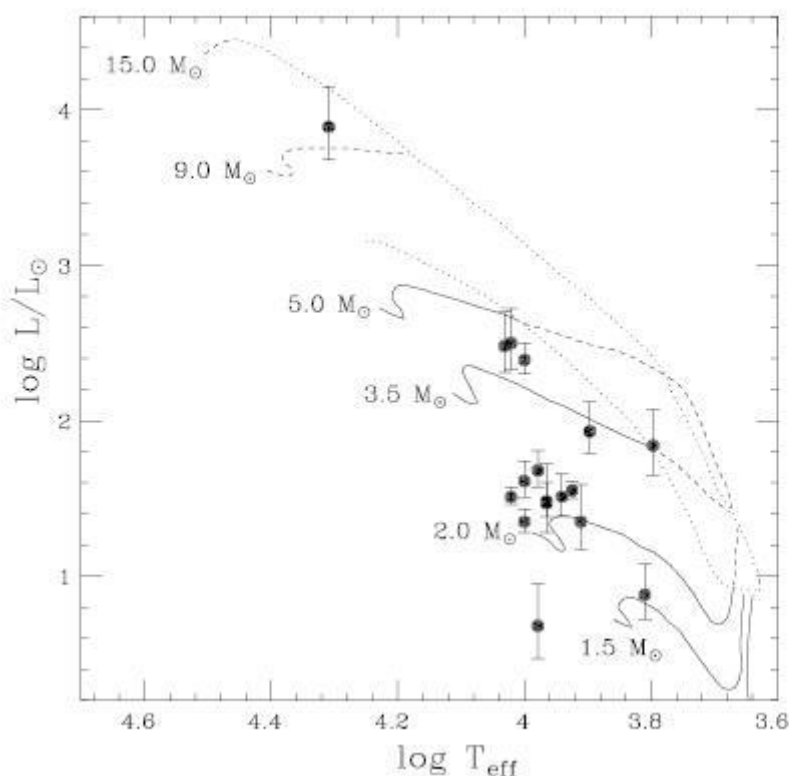
Звездите на Хербиг с емисионни линии в спектъра Ae/Be се явяват обекти с междинна маса, запълващи дупката между звездите с малка маса от типа на слънчевата ($M_* \leq 1.5 M_{\odot}$) и най-масивните звезди ($M_* \geq 10 M_{\odot}$). Те за пръв път са открити от Herbig (1960) при търсене по-масивен аналог на звездите от тип T Tau. Той прави оценка на броя звезди с маси между 2 и $20M_{\odot}$, намиращи се в етап на гравитационно свиване в околността на Слънцето и стига до извода, че в обем от 1 крс от Слънцето и 100 pc от равнината на Галактиката по статистически оценки биха могли да се очакват 18 звезди в етап на гравитационно свиване, които ще се превърнат в звезди от Главната последователност от спектрални класове B2 и B3.

Herbig (1960) открива 26 звезди от спектрални класове Ae/Be, които се намират в затъмнителни райони и осветяват близки мъглявини. Списъкът съдържа както добре познати променливи, така и новооткрити звезди с емисионни линии в спектрите си. Звездите са подбрани по следните критерии:

- а) спектрален клас А или по-ранен с емисионни линии;
- б) звездата се намира в тъмна област;
- в) звездата 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 В- и А- звезди с околзвездно 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 изследват фотометричните характеристики на 44 кандидат-звезди на Хербиг, използвайки фотометрични данни от мисията Хипаркос. Те определят астрофизичните параметри на тези звезди (разстояние, температура, маса, възраст) и построяват диаграма на Херцшпрунг – Ръсел на изследваните звезди на Хербиг (виж **Фигура 4**). На диаграмата са нанесени също еволюционните трекове на звезди с маси между 1.5 и 15 M_{\odot} и линията, след която звездите стават видими в оптичния диапазон (birthline). Всички звезди (без една) се намират между ГП и линията, след която звездите стават видими. Концентрацията на звездите върху диаграмата в близост до ГП се обяснява с по-продължителна еволюция на звездите близо до ГП.



Фигура 4. Положение на звездите на Хербиг от спектрални класове Ae/Be върху диаграмата на Херцшпрунг – Ръсел (van den Ancker et al. (1998)).

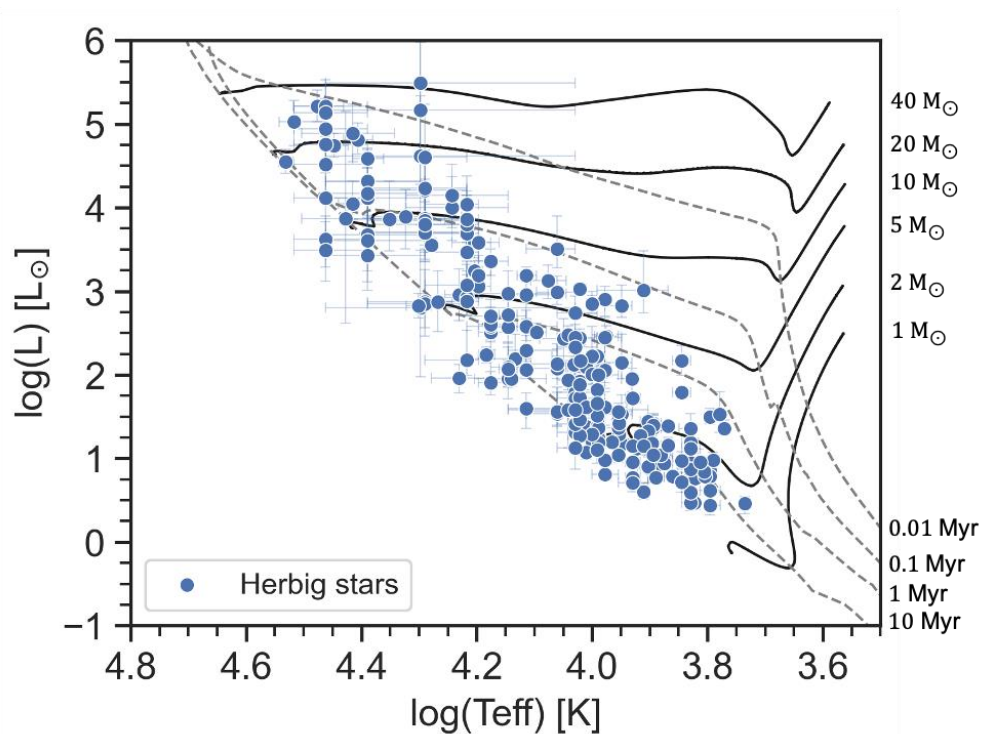
В няколко статии са представени критерии за наблюдателно определяне на звездите от класа Хербиг Ae/Be (The et al. (1994); Malfait et al. (1998); Waters et al. (1998); Vieira et al. (2003)). Общото заключение е, че звездите на Хербиг Ae/Be имат емисионни линии от

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 T Tau 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 (Vibø 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 струпувания 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 T Tau, 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) (виж Фигура 5).



Фигура 5. Диаграмата на Херципунг-Ръсел, съдържаща 218 звезди на Хербиг Ae/Be с висока точност на паралаксите DR2 Gaia (адаптирано то Vioque et al (2018), тяхна фиг. 2). Плътните линии представляват трекове на звезди преди ГП. Масите на всеки трек е посочена от дясната страна (Bressan et al. (2012)). Изохроните (Bressan et al. (2012); Marigo et al. (2017)) също са показани за справка като пунктирна линия. ZAMS е отбелязан като край на треките преди ГП (Brittain et al. (2023)).

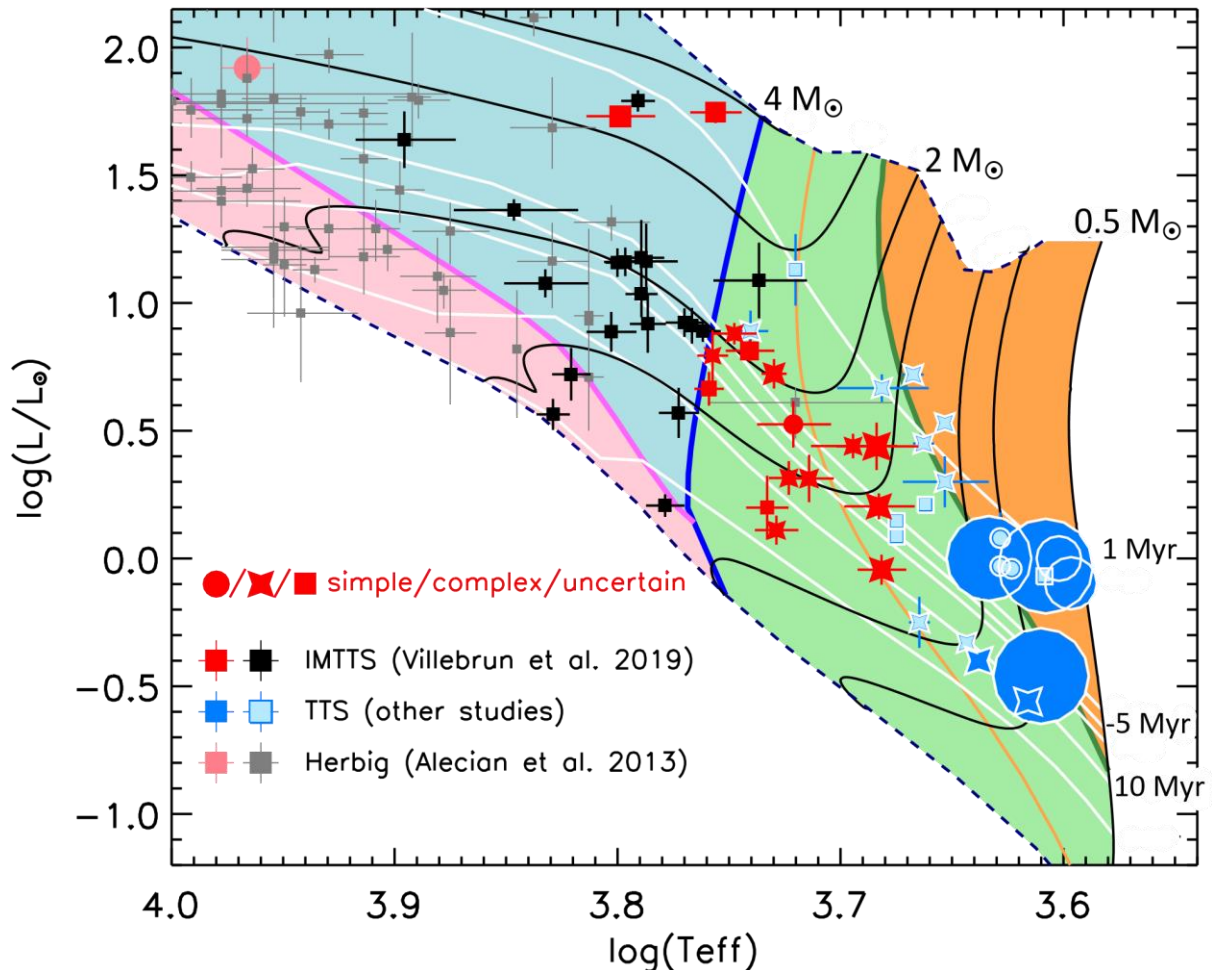
По този начин звездите със средна маса от типа Т Тау, от спектрален клас F, G и K намиращи се преди ГП, се явяват еволюционни предшественици на звездите на Хербиг (Brittain et al. (2023)). Calvet et al. (2004) за първи път използват термина звезда от тип Т Тау със средна маса (ИМТТ), който в последствие е приет в литературата за обозначаване на нискотемпературни прародители на звездите на Хербиг.

С бурното развитие на наблюдателната техника в последните години много нови наблюдателни и теоретични изследвания хвърлиха светлина върху природата и еволюционния статус на звездите на Хербиг Ae/Be и тяхното околосвездно обкръжение. Поради факта, че тези звезди са с междинна маса те се намират на границата между звездообразуването на звезди с малка и с голяма маса. По-високата звездна светимост, масата на диска и често големите околосвездни дискове ни позволяват по-лесно и по-детайлно да наблюдаваме със съответния пространствен мащаб процесите на формиране на планети в сравнение с обектите с по-малка маса. Благодарение на тези наблюдения с високо пространствено разрешение бяха намерени кеплерви дискове, които убедително свидетелстват за наличието на процеси формиращи планети. С нарастването на броя известни екзопланети ние сме в състояние да започнем да търсим връзка между разнообразието от екзопланетни системи при звездите с междинна маса и местата на тяхното раждане.

Болшинството от звездите на Хербиг Ae/Be се намират в двойни системи ($\geq 70\%$) (Baines et al. (2006), Wheelwright et al. (2010)). Отношението на масите при двойните звезди на

Хербиг показва, че те са се образували в резултат на фрагментация на диска, което ни дава важна информация за интерпретацията на рентгеновите свойства на тези звезди. Произхода на рентгеновото излъчване засега не е обяснен. Възможно е неговият произход да е свързан с невидим компаньон или с остатъчно магнитно поле.

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 (виж Фигура 6).



Фигура 6. В-полето на звезди от типа T Tau и Хербиг Ae по Villebrun et al. (2019); Alecian et al. (2013). Черните и сивите символи са звезди без намерени полета, а червените и сините символи представляват обекти с открити В-полета пропорционални по магнитна индукция с размера на символите. Оранжевата зона показва областта, където звездите са напълно конвективни, синята зона, където напълно излъчват, а другите цветове представляват смес; зеления (радиационно ядро и конвективна обвивка); розовия (конвективно ядро и радиационна обвивка). Различните еволюционни трекове (черните линии) и изохроните (белите линии) са взети от работата на Behrend & Maeder (2001); Фигурата е от работата на Brittain et al. (2023).

От наблюденията емпирически е показано, че звездите на Хербиг Ae демонстрират много характеристики, свързани с акрецията, сходни със звездите от тип T Tau (Scholler et al. (2016)). Това се явява като косвено свидетелство за магнитнонасочена акреция, действаща при тези обекти. Това от своя страна ни дава възможността да използваме

моделирането на удърната вълна на магнитосферна акреция за определяне на скоростта на акреция, поне за звездите на Хербиг от по-късен тип.

Предполагайки, че материалът пада от безкрайност, скоростта на акреция на маса се определя от израза

$$\dot{M}_{\text{acc}} = \frac{L_{\text{acc}} R_*}{GM_*}, \quad (1)$$

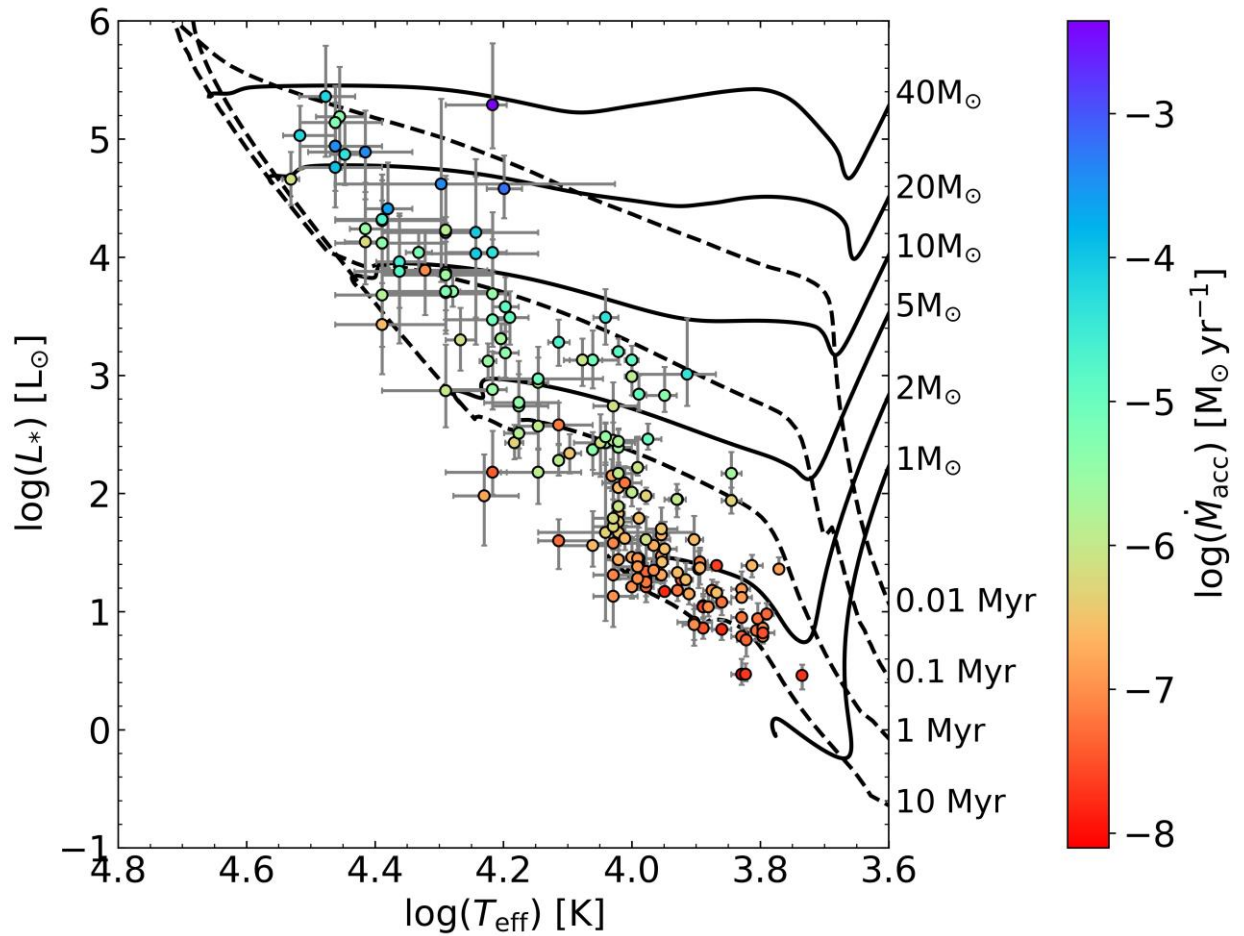
където L_{acc} е акреционната светимост, R_* е радиуса на звездата, M_* е масата на звездата, и G е гравитационната константа.

От формулата е видно, че правилното определяне на характеристиките на звездните параметри е много важно. Тъй като звездите на Хербиг са много по-ярки от тези от тип Т Тау, измерването на ултравиолетова светимост от акрецията не е проста задача. За скорости на акреция превишаващи $10^{-8} M_{\odot} / \text{год}$, акреционната светимост може да бъде определена от измерването на ексcesa в Балмеровския континуум. Оказва се, че яркостта на повечето от емисионните линии корелира с акреционната светимост. Съотношението между акреционната светимост и светимостта в линиите изглежда по следния начин (виж Mendigutia et al. (2011)):

$$\log\left(\frac{L_{\text{acc}}}{L_{\odot}}\right) = A + B \times \log\left(\frac{L_{\text{line}}}{L_{\odot}}\right), \quad (2)$$

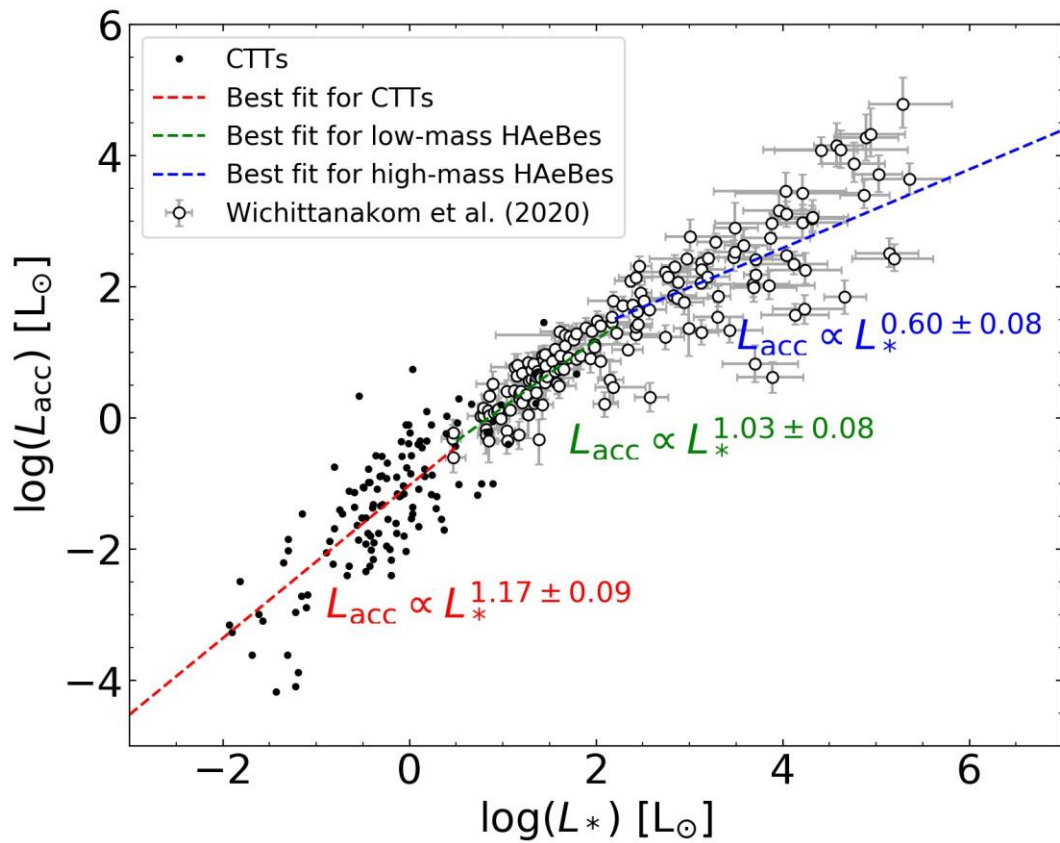
където A и B съответстват на точките на пресичане и градиента на (праволинейната) зависимост на $\log(L_{\text{acc}}/L_{\odot})$ и $\log(L_{\text{line}}/L_{\odot})$ съответно. Като пример, Fairlamb et al. (2017) определят константите $A = 2.09 \pm 0.06$ и $B = 1.00 \pm 0.05$ в случая на $\text{H}\alpha$.

Използвайки данните от изследването на Vioque et al. (2018), базирано на наблюдения със спътника Gaia, както и наличните в литературата данни за еквивалентната ширина на $\text{H}\alpha$, Arun et al. (2019) са определили темповете на акреция за много обекти. Wichittanakom et al. (2020) използват малко по-голяма извадка, за да разширят спектроскопическото определяне на температурите, направено от Fairlamb et al. (2015). Резултатите от тази работа са показани на Фигура 7.



Фигура 7. Диаграма на Херципунг-Ръсел съдържаща 163 звезди на Хербиг с точни паралакси (Gaia DR2) и скорости на акреция. Плътните линии представляват трекове на звезди преди ГП (Bressan et al. (2012), Tang et al. (2017)), с крайни маси показани на ГП. Пунктираните линии са изохрони 0.01, 0.1, 1 и 10 млн. години (Marigo et al. (2017)). Цветната карта показва темпа на акреция на веществото. Очевидно е, че при по-младите звезди скоростта на акреция е по-голяма, но младите звезди са и много по-масивни (Brittain et al. (2023)).

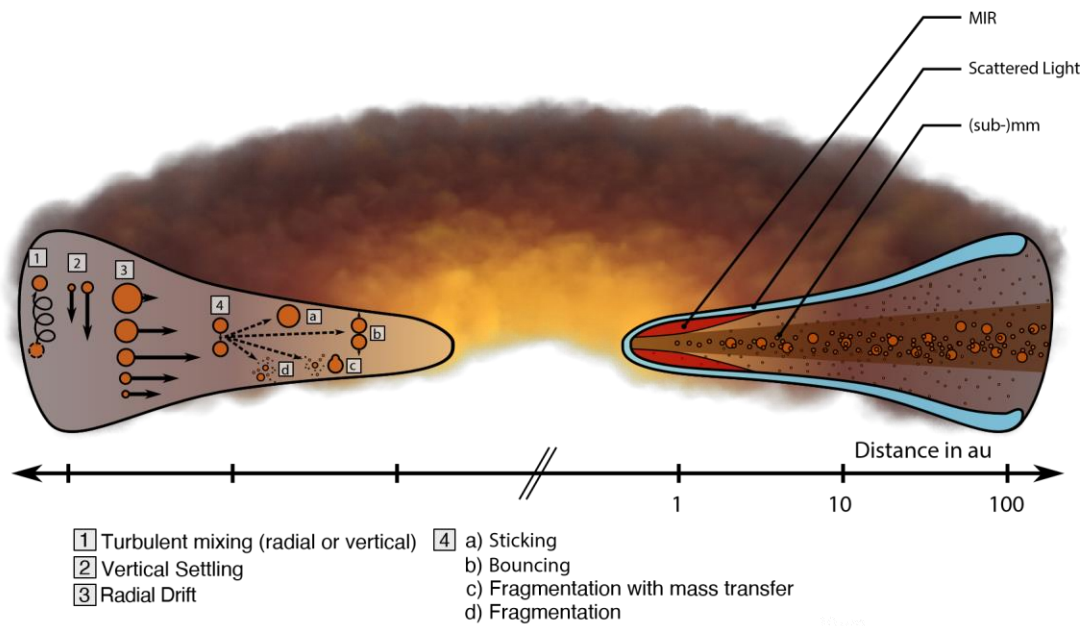
На Фигура 8 са показани акреционните светимости на звездите на Хербиг и няколко звезди от типа Т Тау взети от литературата (Hartmann et al. (1998), White & Basri (2003), Calvet et al. (2004), Natta et al. (2006)) като функция на звездната светимост. Както се вижда акреционната светимост се увеличава с увеличаването на звездната светимост. Интересното е, че звездите на Хербиг Ae следват близко звездите от типа Т Тау; най-добрите наклони съответстващи на съотношението $L_{acc} - L_*$ за двете групи обекти са блиски и са в пределите на грешката. В същото време това не е така за звездите на Хербиг Be.



Фигура 8. Акреционна светимост в зависимост от звездната светимост за 163 звезди на Хербиг от Wichittanakom et al. (2020) и класически T Tau звезди от литературата (Brittain et al. (2023)).

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)).

На Фигура 9 е представена схема, илюстрираща доминиращите процеси, които, както се счита, управляват еволюцията на праховия диск на звездите на Хербиг.

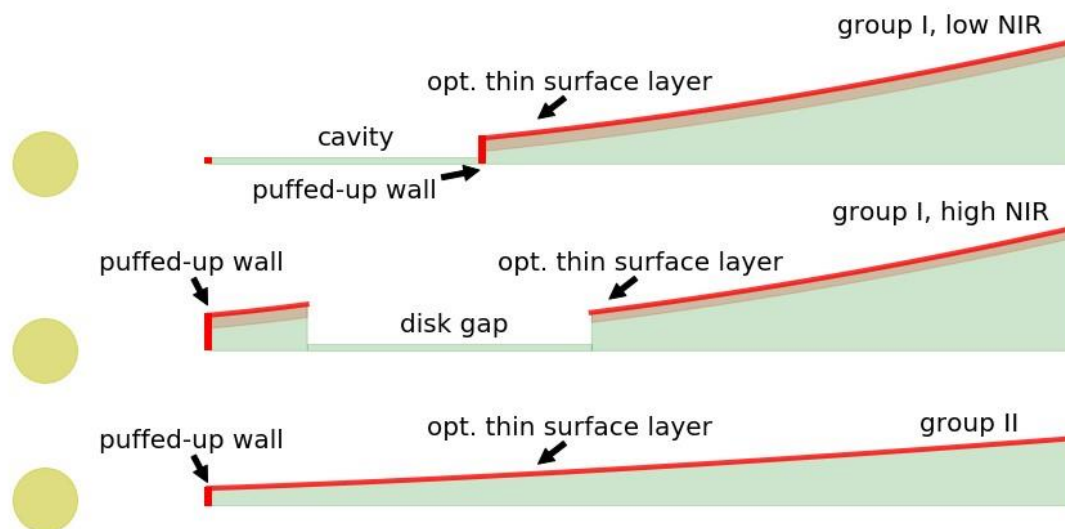


Фигура 9. Схема на диска около млада звезда, адаптирана от Testi et al. (2014). На тази схема са показани основните процеси управляващи еволюцията на прахта (от ляво) и области от диска изследвани в различни дължини на вълните (от дясно) (Brittain et al. (2023).

Дисковете около звездите на Хербиг могат да се класифицират по формата на тяхното спектрално разпределение на енергията (СПЕ - SED) на два типа – група I (GI) дискове с кухня и група 2 (GII) – самозатъмняващи се дискове. Тези дискове са със оптически плътна средна равнина, обкръжена от оптически тънък повърхностен слой. Вътрешния край на диска е издут, а най-вътрешната област е с изчерпана прах. Източниците в GI дисковете излъчват по-силно в далечната инфрачервена област, отколкото източниците в GII дисковете. За да съответства техния ексцес на дисковете тип GI е нужен степенен закон + компонент на черно тяло, докато при дисковете тип GII е нужен само степенен закон (Brittain et al. (2023). За класификацията на дисковете може да се използват критерии основани на инфрачервената фотометрия.

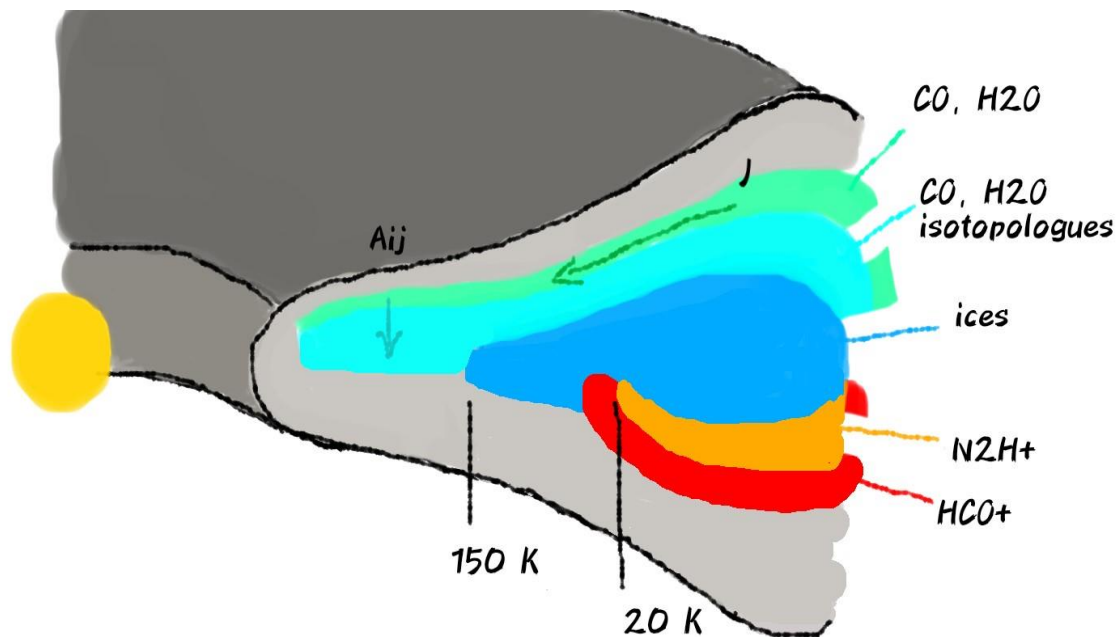
На Фигура 10 е показана морфологията на три различни типове диск.

През последните години познанията ни за съдържанието на газ в дисковете на звездите на Хербиг значително се увеличиха. Термохимическите моделирания на дисковете са способни да възпроизведат много от наблюдателните данни за различните линии на емисии на газа, обхващащи от близкия инфрачервен диапазон до mm вълни.



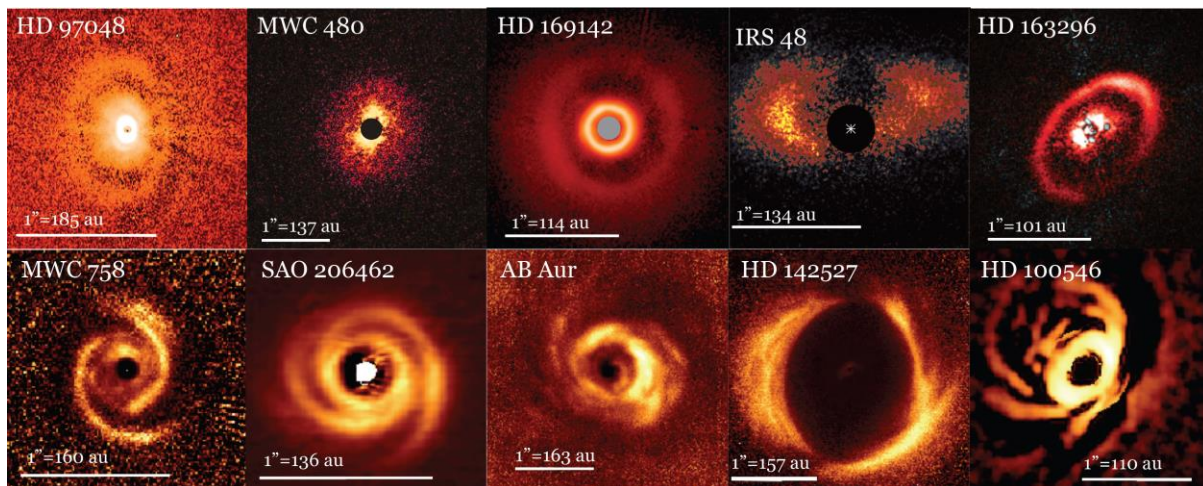
Фигура 10. Различни структури на диска, предложени от Banzatti et al. (2018) за дисковете на звездите на Хербиг. Най-отгоре: Схема на диск с вътрешна кухина и издут външен край. Тази геометрия довежда до диск GI практически без ексцес на излъчването в близкия инфрачервен диапазон (БИД). По средата: Схема на диск с дупка, разделяща вътрешния и външния диск. Тази геометрия също довежда до диск GI, но има съществен ексцес в БИД. Отдолу: Схема на непрекъснат диск. Тази геометрия довежда до диск GII. Фигурата се базира на Vosman et al. (2019)(Brittain et al. (2023).

На Фигура 11 е показано как ние можем да разберем радиалните и вертикалните температурни профили на дисковете или като използваме линиите на газовите емисии, или да се върнем към косвените индикатори такива като пространственото разпределение на молекулите, свързани с конкретните линии на леда (например N_2H^+ , DCO^+ , вода).



Фигура 11. Схема на различни методи за оценка на температурните профили на газа от диска и ледените линии (радиално и вертикално). Показани са ключовите молекулярни трасери, използвани за получаването на температурните профили. Стрелките показват как се премества региона на емисионните линии с нарастване на ротационното квантово число J или намаляването на коефициента на Айнщайн A_{ij} (Brittain et al. (2023)).

Последните изследвания използващи новите 8 метрови телескопи и постигащи много висока разделителна способност показват, че при значителна част от звездите на Хербиг се наблюдава спирална структура (Dong et al. (2018a)). Наблюдавани са (при звездата HD 139614) също няколко пръстена и съществено затъмнение, показващо деформация на диска (Muro-Alena et al. (2020)). Засега са известни два механизма, които могат да доведат до спирална структура: гравитационна нестабилност или взаимодействие планета – диск с планета с маса по-голяма от масата на Юпитер (виж Фигура 12).



Фигура 12. Десет единични звезди на Хербиг в границите на 200 pc получени с помощта на висококонтрастни изображения (на основата на Ginski et al. (2016), Kusakabe et al., (2012), Pohl et al., (2017), van der Marel et al., (2021), Muro-Arena et al., (2018), Benisty et al., (2015), Garufi et al., (2013), Hashimoto et al., (2011), Avenhaus et al., (2017), Follette et al., (2017)). От тези десет звезди на Хербиг пет имат спирална структура, показваща присъствието на планета с маса по-голяма от тази на Юпитер (Dong et al. (2018b)), (Brittain et al. (2023)).

Дълго време идентификацията на звездите на Хербиг бе сложна задача. Но с помощта на новите телескопи като Spitzer, WISE и Gaia бяха проведени крупномасщабни изследвания, които подобриха ситуацията. Mooly et al. (2013) правят идентификация на младите звезди от клас А в Tauri, а Vioque et al. (2020) използвайки машинно обучение успяват да увеличат с един порядък броя на кандидатите за звезди на Хербиг.

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, авторите 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.

През 90-те години за пръв път се измерва магнитното поле на някои Т Tauri звезди, използвайки различни методи, основани на ефекта на Зеeman. Магнитните полета на повърхността на звездите са около 1-2 kG. Най-силното доказателство за съществуването им са студените петна по повърхността на звездата, които се проявяват с ротационни модуляции на блясъка и цвета на звездата. Петната покриват до 40% от звездната повърхност и са с около 1000 K по-студени от останалата фотосфера. Въртенето на звезда със студени петна по повърхността е единственият източник на променливост на Т Tauri звездите със слаби линии и е в състояние да обясни промените във V, R и I филтри. Амплитудите на изменение на блясъка, в резултат на този тип променливост са около 0.8m във V и 0.5m в I.

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

Според Herbst et al. (2007) високоамплитудните промени в блясъка на класическите Т Тау звезди са причинени от акреция на вещество от околосвездния 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 IIp – непериодична. И двата типа променливост са характерни само за класическите Т Тау_i 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 околосвездния диск и биха могли да обяснят „воалирането“ на линиите в спектъра на класическите Т Тау_i звезди. Горещите петна имат по-кратко време на живот от студените, но могат да предизвикат променливост с амплитуди няколко звездни величини, особено в В и V филтри, тъй като в зоните на акреция температурата достига $7.10^3 - 10^4$ К. 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 ВР Тау.

Тип III: Променлива екстинкция от околосвезден 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.

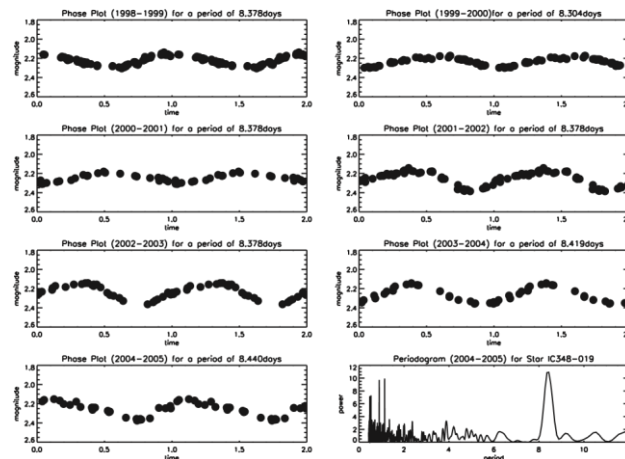
Този тип променливост се наблюдава главно при звездите на Хербиг от спектрални класове Ae/Be, но се среща и при Т Тау звезди от ранни К спектрални класове, като RY Тау и RY Lupi. Звездите, показващи такава променливост се наричат още променливи от тип UX Ori. По нататък ние ще разгледаме по-подробно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

По-късно в своята работа Bouvier et al. (1995) фокусират изследванията си върху периодичните промени при младите звезди. Базирайки се на тези две изследвания и свързаните с тях проучвания Herbst et al. (2007) селектират пет типа фотометрична променливост на звездите преди ГП:

1. Периодична променливост, причинена от модулация от въртене на звездния поток от асиметричното разпределение на студени петна или група от петна по звездната повърхност.

Този тип променливост се наблюдава по-често при Т Тау звездите със слаби линии, но е възможно да бъде наблюдаван и при класическите Т Тау звезди. На Фигура 13 е показана този тип променливост, вижда се как формата на кривата на блясъка и амплитудата на една звезда се променя във времето, докато периода остава постоянен. Типичните амплитуди на тези промени са в границите на $0.03 - 0.3$ звездни величини във V- цвят, с

най-екстремни стойности, достигащи до 0.8 звездни величини във V- и 0.5 звездни величини в I-цвят.



Фигура 13. Криви на бляска на T Tau звезда със слаби линии HMW 19 (Herbst et al. (2007)).

2. Неправилни промени, причинени вероятно от силно променлива акреция от околосвездния диск към звездната повърхност.

Темпът на акреция към звездата е променлив във времето, както и акреционните зони не са равномерно разпределени по повърхността на звездата. Сложното взаимодействие между звездната магнитосфера и вътрешния диск очевидно е силно динамично и зависимо от времето. Типичните амплитуди на получените големи неперодични промени са с 2-5 звездни величини по големи във V, отколкото тези на периодичните промени, които се наблюдават в много T Tau звезди със слаби линии. Фотометричните промени от 1.5 звездни величини във V-цвят в рамките на няколко дни са обичайни, а някои звезди могат да покажат подобни промени в рамките на часове.

3. Периодични промени причинени от горещи петна.

Този тип променливост се наблюдава само при класическите T Tau звезди като тези горещи петна вероятно са в основата на магнитните канали. Периодичността обикновено продължава само няколко цикъла на въртене. Тъй като конфигурацията на магнитното поле е силно нестабилна, размерите и местоположенията на петната се променят за няколко периода на въртене. За сравнение студените петна могат да съществуват за период от стотици до хиляди завъртания. Амплитудите от модулацията от въртене на горещи петна обикновено са с 2-3 звездни величини по-големи във V, отколкото при наблюдаваните при T Tau звездите със слаби линии, причинени от студени петна (в по-екстремни случаи студени петна се наблюдават и при класическите T Tau звезди).

4. Фотометрични промени, причинени от явления като избухване.

Тези промени се наблюдават главно в U- и В-цветовете при T Tau звездите със слаби линии. Този тип променливост вероятно присъства и при класическите T Tau звезди, но е трудно да се разграничи от силните неправилни промени на бляска.

5. Променливост от типа UX Orionis (уксори).

Този тип променливост се наблюдава при ранните (по-ранни от K0) звезди от типа T Tau и при Ae/Be звездите на Хербиг. Амплитудите на тази променливост могат да достигнат до 2.8 звездни величини във V-филтър, но времевите периоди са с около 2- 10 пъти по-дълги, в сравнение с неправилните промени при класическите T Tau звезди. Също така звездите от този тип често стават по-сини в минимума на блясъка.

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 околосъзвездни 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. Това избухване бележи важен момент в изследването на ранната еволюция на звездите. И макар никои по това време да не осъзнава това през 1969 година се случва друго много подобно избухване. То е наблюдавано през 1970 година. 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 T Tauri звезда към спектър на звезда от клас A в синия диапазон и звезда от клас F-G0 в червения диапазон на спектъра, с характерен P Cygni профил на H α и линии на Na и силна линия на Li I 6707 Å (Herbig & Harlan (1971)).

Изследвайки основните наблюдателни характеристики на FU Ori и V1057 Cyg Ambartsumian (1971) стига до извода, че избухването като фуор би трябвало да е нормален етап от еволюцията на звездата. След като подобно избухване с голяма амплитуда бива наблюдавано и при звездата V1515 Cyg Herbig (1977) обобщава основните характеристики на младите променливи звезди от типа FU Orionis. В последствие тези характеристики са допълвани от Reipurth (1990), Bell et al. (1995), Clarke et al. (2005) и Reipurth & Aspin (2010). Като обобщение 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 α) 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 околзвездна обвивка от прах;
- 5) Фуорите са млади обекти. Срещат се в области на активно звездообразуване 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 T Tauri. Само звездите V1057 Cyg и V2493 Cyg (Semkov et al. (2010)) има спектър получен преди избухването, който има характеристиките на T Tauri звезда.

В Таблица 1 са дадени основните данни на известните до момента 14 звезди от типа FU Orionis, 10-те фуороподобни звезди и 9 обекта, които притежават характеристики подобни на фуори (Connelley & Reipurth (2018)).

Таблица 1. Основни данни за известните фуори и фуороподобни обекти.

Name	Alt. Name	α (J2000)a	δ (J2000)a	Kb	Groupc	Dist (pc)d	Lbole	Avf
FU Ori	IRAS 05426+0903	45:22.4	+09:04:12	5.79	FUor	400 ± 40 (7)	66	1.5 ± 0.2
HBC 722	V2493 Cyg	58:17.0	+43:53:43	6.31	FUor	550 ± 50 (18)	17	3.7 ± 0.5
RNO 1b	V710 Cas	36:46.3	+63:28:54	8.34	FUor	930 ± 35 (1)	1652	14.5 ± 1
V1057 Cyg	LkH α 190	58:53.7	+44:15:29	6.59	FUor	550 ± 50 (18)	100	3.9 ± 1.6
V1515 Cyg	IRAS 20220+4202	23:48.0	+42:12:26	7.95	FUor	1050 (17)	103	3.5 ± 0.4
V1735 Cyg	IRAS 21454+4718, HBC 733	47:20.7	+47:32:04	7.54	FUor	950 ± 80 (21)	166	12.5 ± 2
V2494 Cyg	IRAS 20568+5217, HH 381 IRS	58:21.4	+52:29:27	8.37	FUor	600 (19)	187	17.5 ± 5
V2495 Cyg	Braid star	00:25.4	+52:30:16	11.79	FUor	600 (19)	21	49.5 ± 9
V2775 Ori	HOPS 223	42:48.5	-08:16:35	8.43	FUor	428 ± 10 (6)	29	27.5 ± 1
V582 Aur		25:52.0	+34:52:30	8.18	FUor	1300 (5)	168	5.6 ± 1.2
V733 Cep	Persson's Star	53:33.3	+62:32:24	8.29	FUor	800 (23)	43	11.5 ± 1
V883 Ori	HBC 489	38:18.1	-07:02:26	5.53	FUor	388 ± 5 (6)	212	22.5 ± 1
V900 Mon		57:22.2	-08:23:18	7.51	FUor	1100 (9)	99	13.5 ± 2
V960 Mon		59:31.6	-04:05:28	7.42	FUor	1100 (9)	48	1.5 ± 0.4
BBW 76	V646 Pup	50:35.6	-33:06:24	8.6	FUor-like	1800 (11)	114	1.6 ± 0.2
CB 230	IRAS 21169+6804	17:39.4	+68:17:32	10.27	FUor-like	300 ± 30 (20)	6.6	26.5 ± 7
Haro 5a/6a	IRAS 05329-0505	35:26.6	-05:03:56	9.85	FUor-like	388 ± 5 (6)	18	57.5 ± 5
HH 354 IRS	IRAS 22051+5848, L1165 IRS1	06:50.2	+59:02:45	10.83	FUor-like	300 ± 100 (22)	16	31.5 ± 7
IRAS 05450+0019	NGC 2071 MM3	47:36.6	+00:20:06	8.76	FUor-like	388 ± 5 (6)	35	31.5 ± 1
L1551 IRS5	IRAS 04287+1801	31:34.2	+18:08:05	9.21	FUor-like	147 ± 5 (3, 4)	29	25.5 ± 2
Parsamian 21	IRAS 19266+0932, HBC 687	29:00.8	+09:38:43	9.55	FUor-like	500 (16)	16	2.5 ± 0.5

PP 13S	IRAS 04073+3800	10:41.1	+38:07:53	10.82	FUor-like	450 ± 23 (2)	51	56.5 ± 5
RNO 1c	V710 Cas	36:46.4	+63:28:55	7.73	FUor-like	930 ± 35 (1)	1652	19.5 ± 4
Z CMa	HD 53179	03:43.2	-11:33:06	3.77b	FUor-like	990 ± 50 (10)	3548	7.1 ± 8.0
AR 6a	V912 Mon	40:59.3	+09:35:52	7.88	Peculiar	738 ± 57 (8)	310	20.5 ± 2
AR 6b		40:59.3	+09:35:52	10.89	Peculiar	738 ± 57 (8)	310	28.5 ± 3
IRAS 06297+1021W		32:26.1	+10:19:18	8.14	Peculiar	738 ± 57 (8)	31	10.3 ± 3.8
IRAS 06393+0913		42:08.1	+09:10:30	10.45	Peculiar	738 ± 57 (8)	0.9	23.5 ± 7
IRAS 18270- 0153W		29:38.9	-01:51:06	12.87b	Peculiar	436 ± 9 (13)	30	41.5 ± 11
IRAS 18341- 0113S		36:46.5	-01:10:42	11.39	Peculiar	259 ± 37 (15)	0.8	31.5 ± 6
V1647 Ori	McNeil's Nebula	46:13.1	-00:06:05	7.9	Peculiar	388 ± 5 (6)	21	22.5 ± 7
V346 Nor	HH 57 IRS	32:32.1	-44:55:31	10.51	Peculiar	700 (12)	176	46.5 ± 9
V371 Ser	EC 53	29:51.2	+01:16:39	12.19	Peculiar	429 ± 2 (14)	1.6	47.5 ± 9

Забележки.

a 2MASS координати.

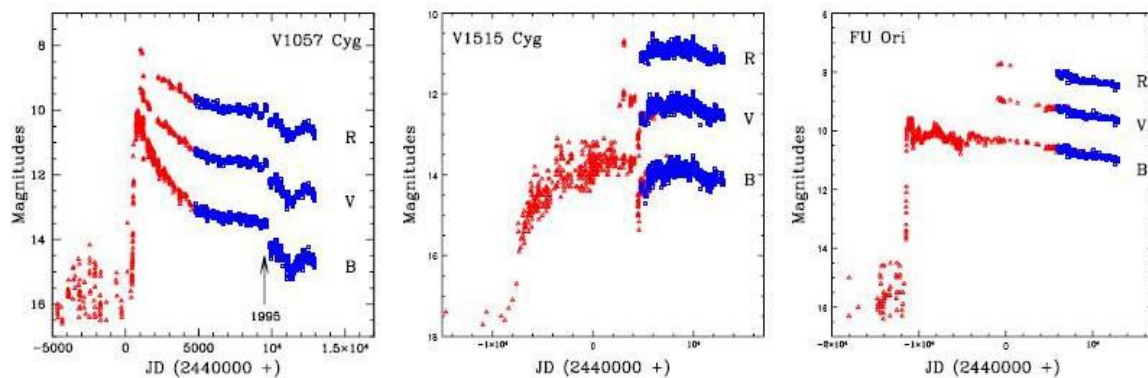
b Величините в K-band са от наблюденията на Connelley & Reipurth (2018) и са във фотометричната система MKO, освен ако не е отбелязано друго. Z CMa е наблюдавана през тесния K-continuum филтър, за да се избегне насищане. 2MASS фотометрията е дадена за IRAS 18270-0153 #7.

c FUor: наблюдавано е избухване; FUor-like: не е наблюдавано избухване, но спектъра е подобен на фуор; Peculiar: има някои спектроскопски или фотометрични прилики с фуори.

d (1) Reid et al. (2014) (2) Lada et al. (2009) (3) Loinard et al. (2007) (4) Connelley & Reipurth (2018) (5) Kun et al. (2017) (6) Kounkel et al. (2017) (7) Murlin & Penston (1977) (8) Kamezaki et al. (2014) (9) Kim et al. (2004) (10) Kalcheva & Hilditch (2000) (11) Reipurth et al. (2002) (12) Graham & Frogel (1985) (13) Ortiz-León et al. (2017) (14) Dzib et al. (2011) (15) Straizys et al. (1996) (16) Dame & Thaddeus (1985) (17) Racine (1968) (18) Laugalys et al. (2006) (19) Herbig & Dahm (2006) (20) Kun (1998) (21) Harvey et al. (2008) (22) Dobashi et al. (1994) (23) Reipurth et al. (2007).

e Болонетричната светимост е изчислена с помощта на фотометрия от 2MASS (1.2 to 2.2 μm), WISE (3.4 to 22 μm), и Akari (65 to 160 μm). Черно тяло с 80 K е добавено към данните за най-червената точка. За RNO 1b/c и AR 6a/b, двойствеността не беше разделена.

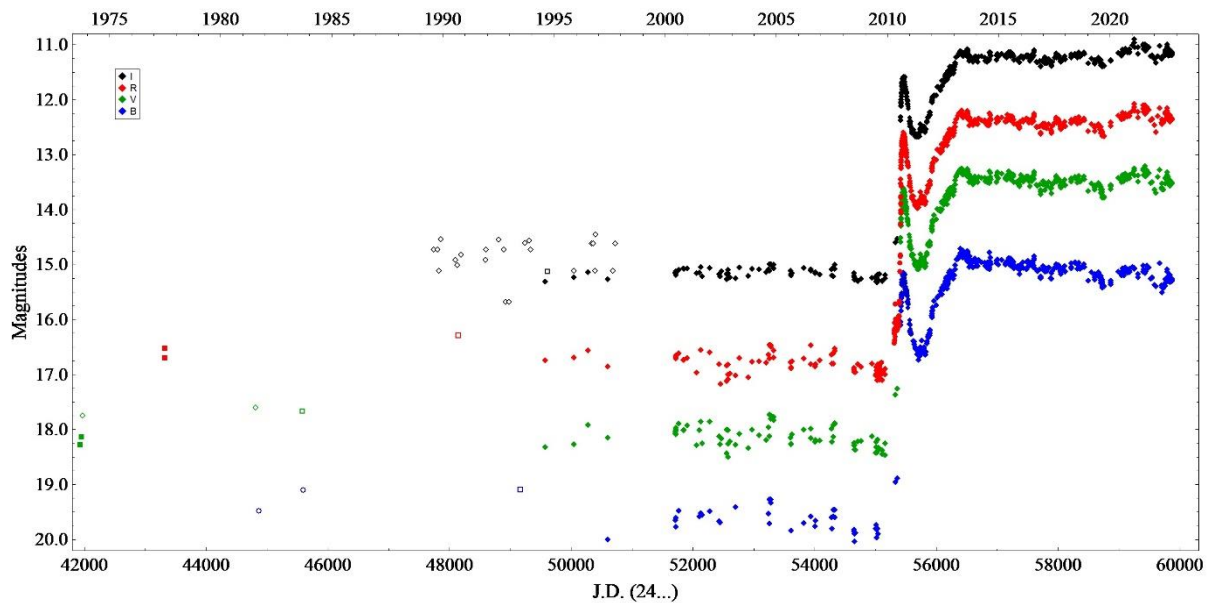
f Визуално избухване в mag., получено от напасване на спектъра към FU Ori и добавяне на 1.5 mag на избухване на фуора.



Фигура 14. Криви на блясъка на трите най-детайлно изследвани фуора: V1057 Cyg, V1515 Cyg и FU Ori (Clarke et al. (2005)).

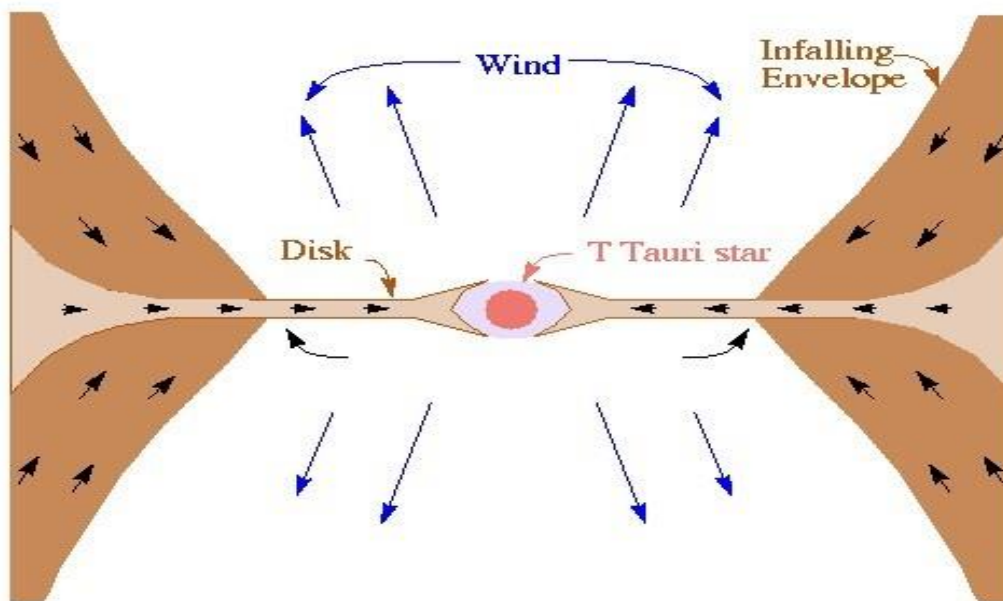
Според най-разпространения модел (Hartmann & Kenyon (1985) (1996)) избухването при фуорите се дължи на краткотрайно голямо увеличение на акреция на вещество от околосвездния диск върху звездната фотосфера. В поредица от публикации авторите успяват да обяснят много от наблюдаваните характеристики на фуорите с този модел. По време на избухването светимостта на диска надвишава тази на централната звезда

между 100 и 1000 пъти. На Фигура 14 и Фигура 15 са представени кривите на блясъка на по-детайлно изучените фуори.



Фигура 15. 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)).

На Фигура 16 е представена обобщена схема на типична звезда от тип FU Orionis.



Фигура 16. Обобщена схема на обект от тип FU Orionis. Падащият материал от обвивката се натрупва в протозвезден диск и се задвижва върху протозвезда в поредица от краткотрайни (<100-200 години) акреционни избухвания. Периодите на покой между избухванията (10^3 - 10^4 години) се характеризират с нисък темп на акреция (Vorobyev et al. (2019), модифицирана схема от Hartmann & Kenyon, (1996)).

Младата звезда от тип Т Таурі 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 загрева 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.

Съвременните модели добре възпроизвеждат спектралните енергийни разпределения на фуорите със скорост на акреция от около $10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ (напр. Zhu et al. (2008)). Темпове на акреция на фуорите са с няколко порядъка по-големи от типичните за T Тау звездите. Моделът на акреционния диск може успешно да обясни много от наблюдателните характеристики на фуорите, които ги разграничават от другите обекти преди Главната последователност на диаграмата на Херцшпунг-Ръсел.

В работата на Baraffe et al. (2012) разпределението на яркостта в диаграмата на Херцшпунг-Ръсел и предполагаемите свойства на събитията при избухването на фуор (маса, радиус, скорост на акреция) с първоначална маса на протозвездата $M_i \sim 1 M_{\text{Jup}}$ са обяснени със сценарий, осигуряващ две условия: първо, наличие на известна вариация в рамките на частта от акреционната енергия, погълната от протозвездата по време на процеса на акреция и второ, обхватът на тази вариация трябва да се увеличава с увеличаване на интензитета на акреционното избухване и по този начин да обясни с първоначалната маса на ядрото крайната маса на звездата. Авторите на базата на числови симулации показват, че масивни предзвездни ядра с висок начален ъглов импулс произвеждат интензивни избухвания, характерни за събития, подобни на фуор. Те предполагат връзка между интензитетите на избухване и частта от акреционната енергия, погълната от протозвездата, с някакъв праг в скоростта на акреция от порядъка на $10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, ограничавайки прехода от „студена“ към "гореща" акреция. Такъв преход може да отразява промяна в геометрията на акрецията с увеличаване на скоростта на акреция, т.е. преход от магнитосферна или тънкодискова акреция към дебел диск, или в магнитосферното взаимодействие между звездата и диска. Обратно, разпространението на яркостта може също да се обясни с вариация на първоначалната маса на протозвездата в диапазона $\sim 1-5 M_{\text{Jup}}$.

Има различни идеи за обяснение на задействането на избухването на звездата като фуор. Една от тях е съществуването на дроселов механизъм, който контролира преминаването на газ през вътрешния диск (напр. Zhu et al. (2009)). Дискът се захранва с газ от надуваща се обвивка със скорост различна от тази, с която газът се прехвърля от диска към повърхността на звездата. Това понякога води до препълване на диска с вещество, което по-късно може да предизвика избухване. Друга идея също разглежда наличието на диск, който получава газ от падаща обвивка и предполага, че ако скоростта на акреция от диска се увеличи и по този начин се увеличи и температурата на диска, тогава непрозрачността на газа може да се повиши толкова бързо, че тази топлина се улавя в диска и възниква ситуация на движение, по време на която вътрешният диск може да се изпразни (напр. Bell & Lin (1994); Armitage et al. (2001)). Трета идея предполага механизъм, при който спътник в ексцентрична орбита смущава диска в периастръра

(Bonnell & Bastien (1992); Reipurth & Aspin (2004). Разгледани са също и механизми породени от смущения от планета (Clark et al. (2005)) или от друг член на плътен кълстер (Pfalzner (2008)). И накрая, четвъртата идея предполага акреция от голямо тяло, като планета (Larson (1980)) или голямо „газово петно“ в околосвездния диск (Vorobyov & Basu (2015)).

Моделите основаващи се на наличието на акреционен диск добре описват промяната на спектралния клас с дължината на вълната, двойните минимума на абсорбционните линии и наблюдаваната разлика в доплеровото разширение на линиите в оптичния и в инфрачервения диапазон. Съгласно тези модели светимостта на диска е много по-голяма от тази на централната звезда и неговите характеристики определят спектъра във всички спектрални диапазони.

Въпреки, че предложения модел от Hartman & Kenyon (1996) обяснява добре много от характеристиките на фуорите, то съществуват и някои несъответствия. Ако преди избухването фуорите са били Т Tauri звезди с акреционни дискове, тогава фуорите би трябвало да се наблюдават в области, богати на Т Tauri звезди, а такава закономерност не е установена (Herbig et al. (2003)). За разлика от класическите Т Tauri звезди, при фуорите не са наблюдавани джетове, които са индикатори за наличие на акреционни дискове.

Алтернатива на идеята за моделът на диска, предложена за първи път от Larson (1980) и доразвита от Herbig и Petrov (Petrov & Herbig (1992) (2008)); Herbig et al. (2003) предполага, че оптичните спектрите са причинени от бързо въртяща се раздута звезда близо до граница на нестабилност. Интересен е сценарият с раздутата звезда и акреция от диска. Концепциите не се изключват взаимно: последните изчисления на епизодична акреция върху протозвезди с ниска маса предполагат, че за достатъчно високи нива на акреция, централната звезда може да се разшири.

До момента не е наблюдавано повече от едно избухване при звезди от типа фуори (въпреки че особеният обект V1647 Ori, който има определени характеристики на фуор е имал предишно избухване). Поради малкия брой на известните обекти, честотата на фуор избухванията е слабо позната. Статистически анализ направен от Herbig (1977) показва, че явлението трябва да се повтаря с честота на избухване от приблизително 10^{-4} на година на звезда в регион на звездобразуване. При предполагаема продължителност на еволюцията в етап на Т Tauri звезда $\sim 10^6$ год., той заключава, че избухванията трябва да са повече от 100 за една звезда. Последвалите проучвания са подкрепили това заключение, макар и с малко по-различни проценти на избухвания (напр. Hartmann & Kenyon (1996); Hillenbrand & Findeisen (2015)).

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. Авторът отбелязва пет такива максимума през 48-те години, обхванати от

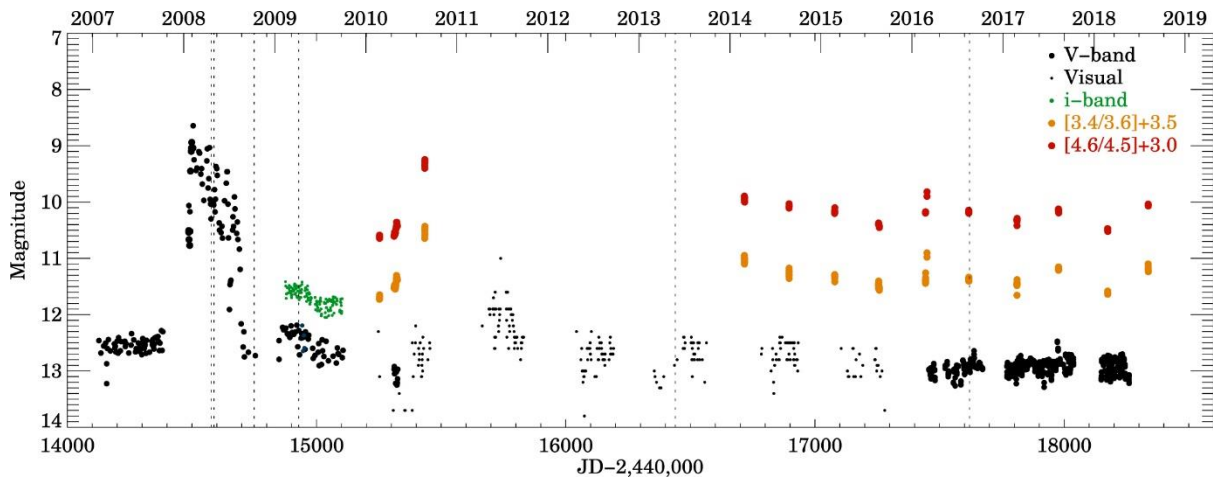
наблюденията в Харвард, но в неговите данни съществуват значителни пропуски, така че някои максимуми може да са пропуснати и общият им брой може да е по-голям.

През 1989 година Herbig (1989) класифицира девет променливи звезди преди главната последователност, за които са регистрирани избухвания с кратка продължителност (месеци-една година) и с голяма амплитуда с период на повторение от няколко години и за които в максимума на блясъка имат спектър, характерен за звездите Т Tauri. Тези звезди показват темп на акреция от порядъка на $10^{-6} - 10^{-7} M_{\odot} \text{ год.}^{-1}$ и се характеризират с емисионни линейни спектри (напр. Herbig (2008); Lorenzetti et al. (2009); Kóspál et al. (2011); Sicilia-Aguilar et al. (2012); Antonucci et al. (2013a)). Herbig кръщава този тип звезди ексори, като за прототип използва звездата EX Lupi.

Физическият механизъм, причиняващ избухванията на ексорите все още се обсъжда. Ексорите в състояние на покой са подобни на обикновените млади звездни обекти от клас II, с дискове с относително ниска маса (Liu et al. (2018)). По-подробното анализиране на този клас обекти може да хвърли светлина върху механизмите, захранващи епизодичните избухвания. Тези обекти ни дават възможност да ги изучаваме както в състояние на покой, така и по време на избухване и следователно можем да наблюдаваме ефекта от епизодичната акреция върху околостъзвездния диск; по-специално планетообразуващата зона (напр. кристализацията на силикатни зърна в EX Lupi, Ábrahám et al. (2009)).

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 (~ 2 Myr, Garufi et al. (2018)) от спектрален клас M0 с $M^* = 0,6 M_{\odot}$, на разстояние $157 \pm 0,9$ pc (Gaia Collaboration (2018); Bailer-Jones et al. (2018)). Най-яркото ѝ 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 17 (Ábrahám et al. (2019)).



Фигура 17. 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.

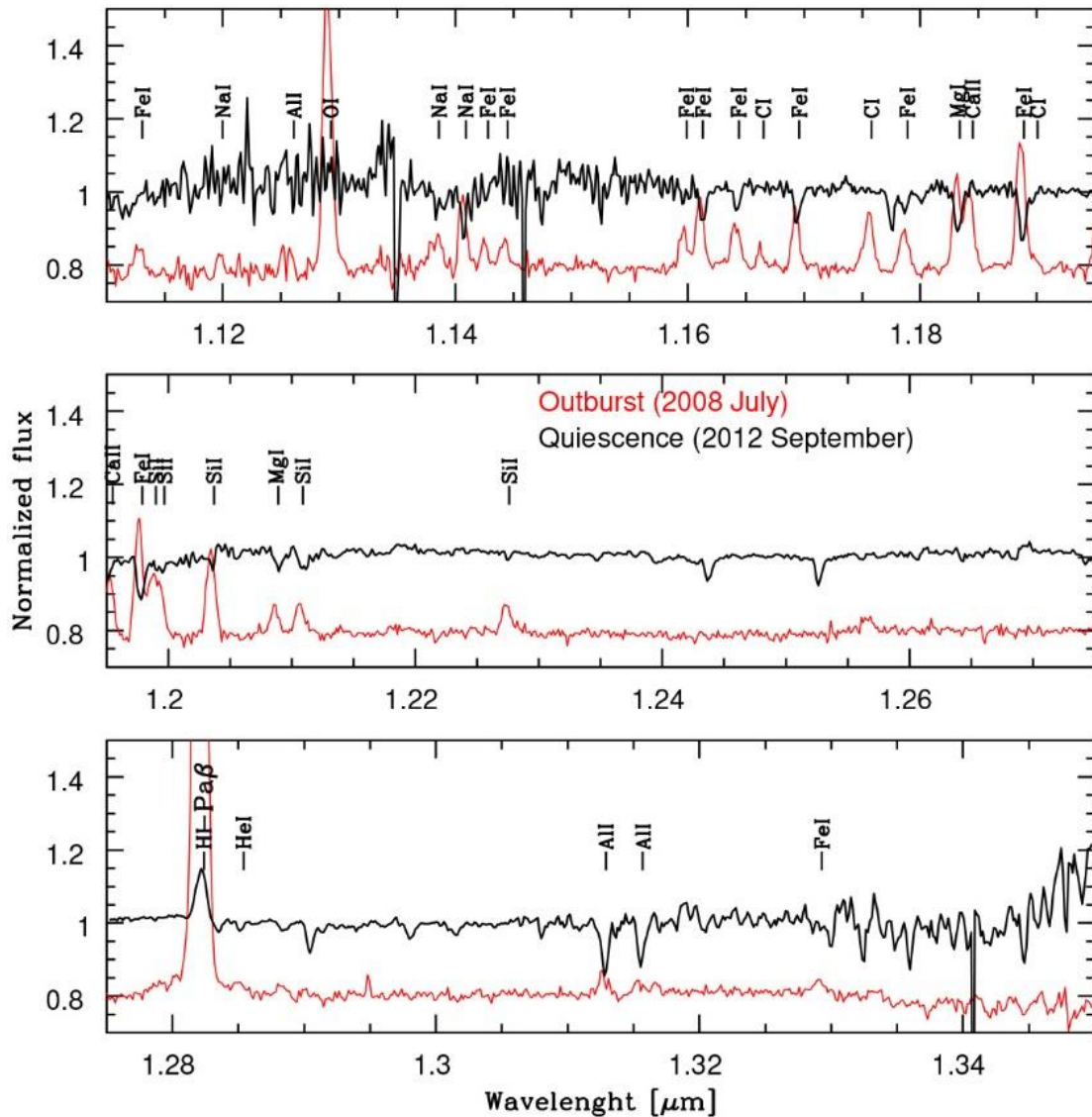
В работата на Sipos et al. (2009) е направено моделиране на разпределение на енергията в спектъра (SED) на EX Lupi. То дава доказателства за наличието на инфрачервен ексцес, съответстващ на умерено горещ пращен диск, който се простира от 0,2 до 150 au от централната звезда с обща маса от $0,025 M_{\odot}$. Последната стойност се получава въз основа на предположението, че праховият модел съдържа само аморфни силикати от оливин и пироксенов тип с масово съотношение 2:1. Наблюденията не ограничават външния радиус на диска. Най-вътрешните региони на диска около EX Lup са обстойно изследвани (Grosso et al. (2010); Kóspál et al. (2014); Sicilia-Aguilar et al. (2015)) и се предполага, че падащият материал достига звездата в горещи точки чрез магнитосферна акреция. Въз основа на линиите на рекомбинация на водород, скоростта на акреция на маса върху звездата се определя на $\sim 4 \times 10^{-10} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ преди избухването през 2008 г. (Sipos et al. (2009)), увеличавайки се до $3 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ по време на избухване (Sicilia-Aguilar et al. (2012)) и обратно до $\sim 10^{-10} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ след това (Juhász et al. (2012)).

През 2016 година Kóspál et al. (2016) провеждат изследвания върху структурата и динамиката на външния диск на EX Lupi. Те използват APEX за откриване на $^{12}\text{CO}(3-2)$, $^{12}\text{CO}(4-3)$ и $^{13}\text{CO}(3-2)$ молекулярни емисии от Кеплеровия диск около EX Lup, без пространствено разделяне на диска. На базата на оптично тънката ^{13}CO линия те получават обща маса на диска от $2,3 \times 10^{-4} M_{\odot}$, което е значително по-малко от това, получено от данните за континуума (приемайки канонично съотношение газ-прах от 100) и моделиране на спектрално енергийно разпределение (SED). Hales et al. (2018) използвайки наблюдения от ALMA пространствено разделят емисиите на прах от диска в 1,3 mm континуум и от по-разширен Кеплеров газов диск в $^{12}\text{CO}(2-1)$, $^{13}\text{CO}(2-1)$ и

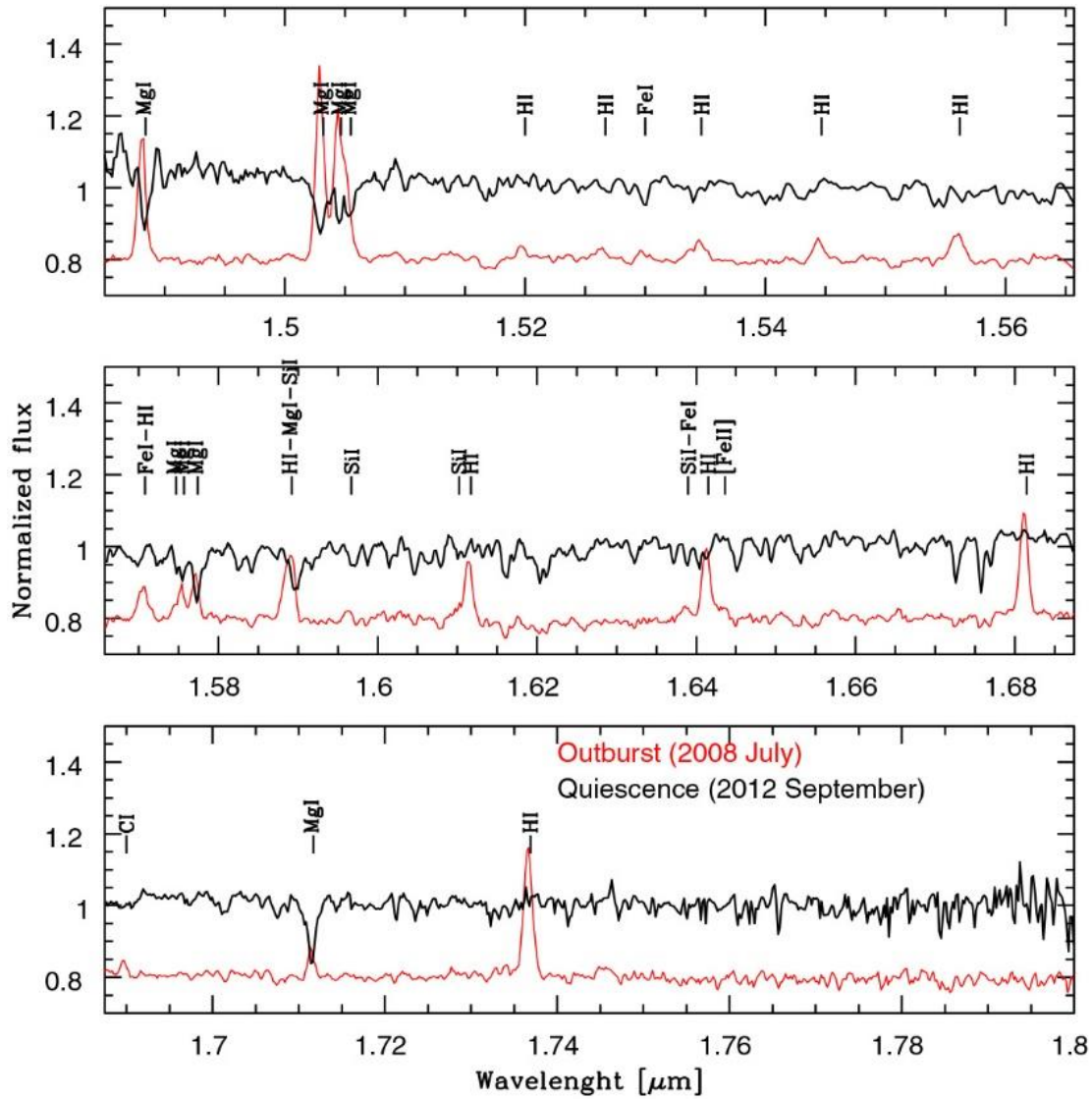
$C^{18}O(2-1)$. Освен това те обръщат внимание на по-разширено и некеплерово излъчване на $^{12}CO(2-1)$, тълкувано като взаимодействие на молекулярен поток от остатъчен околел материал. При сравняване на съотношенията на линията на EX Lup $^{13}CO/C^{18}O$ с тези, базирани на моделите на Williams & Best (2014), Hales et al. (2018) се получава обща маса на газовия диск от $5,4 \times 10^{-4} M_{\odot}$ и обща маса на праха, получена в процеса на напасване на модела на радиационен трансфер от $1,0 \times 10^{-4} M_{\odot}$, което дава съотношение газ-прах от 5.4. Съотношенията газ/прах, по-ниски от типичната междузвездна средна стойност от 100, изглежда са често срещани в протопланетните дискове на млади звезди намиращи се в комплекса в съзвездието Lupus (Ansdell et al. (2016)).

Rigliaco et al. (2020) сравняват спектрите в близката инфрачервена област, получени в J, H- и K-филтри със SINFONI в спокойната фаза на EX Lupi със същите данни, взети по време на избухване (виж Фигура 18, Фигура 19 и Фигура 20). Те откриват, че всички емисионни характеристики, наблюдавани по време на избухването, са изчезнали в периода на покой, с изключение на линията Pa β , която изглежда по-малко ярка. Техния извод е, че няма линии, свързани с активната фаза на избухване във фазата на покой, което подкрепя идеята, че излъчването в разсеяна светлина идва от диска. Те очертават и два различни сценария за произхода на емисиите, наблюдавани в разсеяна светлина. Интерпретирайки факта, че празната зона между пръстените може да е издълбана от спътник (субзвездна маса), този спътник също би бил вероятната причина за получените от наблюденията на IRDIS-PDI данни за разместването на вътрешния и външния диск на EX Lupi.

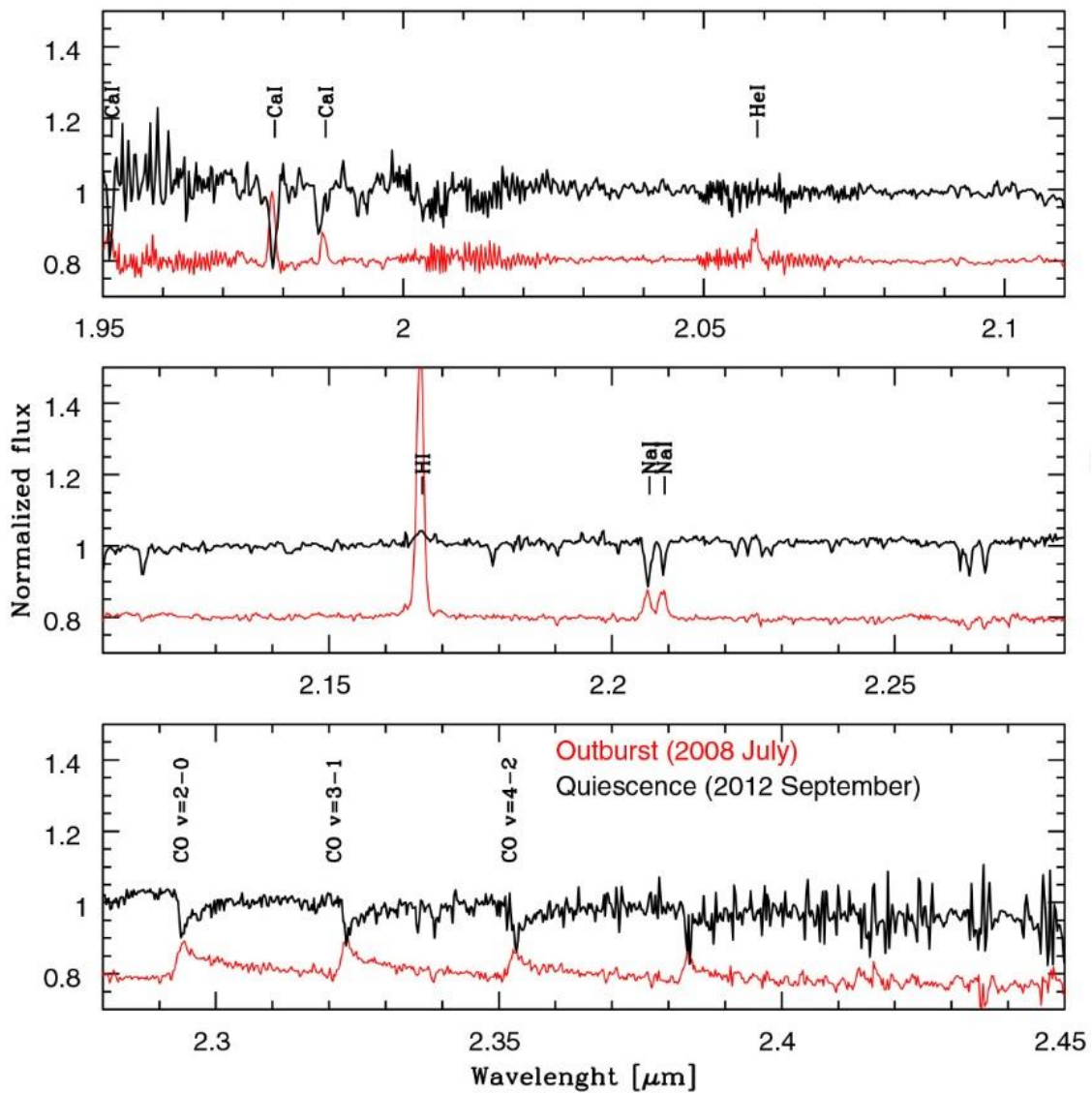
Списък на класическите ексори (Arkharov et al. (2019)) е представен в Таблица 2.



Фигура 18. Нормирани спектъри от SINFONI J-филтър на EX Lup в състояние на покой и в сравнение с избухването. Позициите на емисионните линии, наблюдавани в спектъра на J-филтър, взети по време на избухването, са маркирани (Kóspál et al. (2011)). Много линии се виждат по-скоро като абсорбционни, отколкото като емисионни, с изключение на Pa β линиите, които все още се виждат като емисионни. Емисионният спектър е изместен по интензитет.



Фигура 19. Нормирани спектъри от SINFONI H-филтър на EX Lyr в състояние на покой и в сравнение с избухването. Позициите на емисионните линии, наблюдавани в спектъра на H-филтър, взети по време на избухването, са маркирани (Kóspál et al. (2011)). Всички линии се виждат по-скоро като абсорбционни, отколкото като емисионни. Спектърът на избухването е изместен по интензитет.



Фигура 20. Нормирани спектъри от SINFONI К-филтър на EX Lup в състояние на покой и в сравнение с избухването. Позициите на емисионните линии, наблюдавани в спектъра на К-филтъра, взети по време на избухването, са маркирани (Kóspál et al. (2011)). Всички линии се виждат по-скоро като абсорбционни, отколкото като емисионни. CO обертонната линия също се вижда като абсорбционна. Емисионният спектър на избухването е изместен по интензитет.

Source	$L_{bol} (L_{\odot})$	max-min (V mag)	A_V (mag)
UZ Tau E	1.7	11.7 – 15.0	1.5
VY Tau	0.7	9.0 – 15.3	0.8
DR Tau	1.0 - 5.0	10.5 – 16.0	1.7 – 2.0
V1118 Ori	1.4 - 25	12.8 – 17.5	0 - 2
NY Ori	...	14.5 – 17.5	0.3
V1143 Ori	...	13 - 19	...
EX Lup	0.7	8.4 – 13.2	0
PV Cep	100	14.6 – 18.0	5 – 7
V1180 Cas	0.07	15.7 - >21	4.3
V512 Per	...	15.9 – 19.0	6 – 15
LDN1415	...	14.7 – 18.4	...
V2775 Ori	1.9 - 22	11.8 – 16.4	18
V1647 Ori	5.2, 2.8- 44	14.4 – 20.3	9 – 19
GM Cha	1.5	10.6 – 12.7	13
OO Ser	4.5 - 26/36	11.4 – 16.1	42
V2492 Cyg	20	14.7 – 18/19	6 – 12
V2493 Cyg	2.7 - 12	13.6 – 17.0	3.4
GM Cep	30/40	12.4 – 14.6	2 – 4

Таблица 2. Списък на класическите ексори (Arkharov et al. (2019)).

Мониторингът на EX Lup с наблюдение на ъглово диференциално изображение със сигурност би могъл да помогне за откриването на възможния спътник, който е толкова широко обсъждан в литературата.

1.2.3 Променливост от типа UX Orionis (уксори)

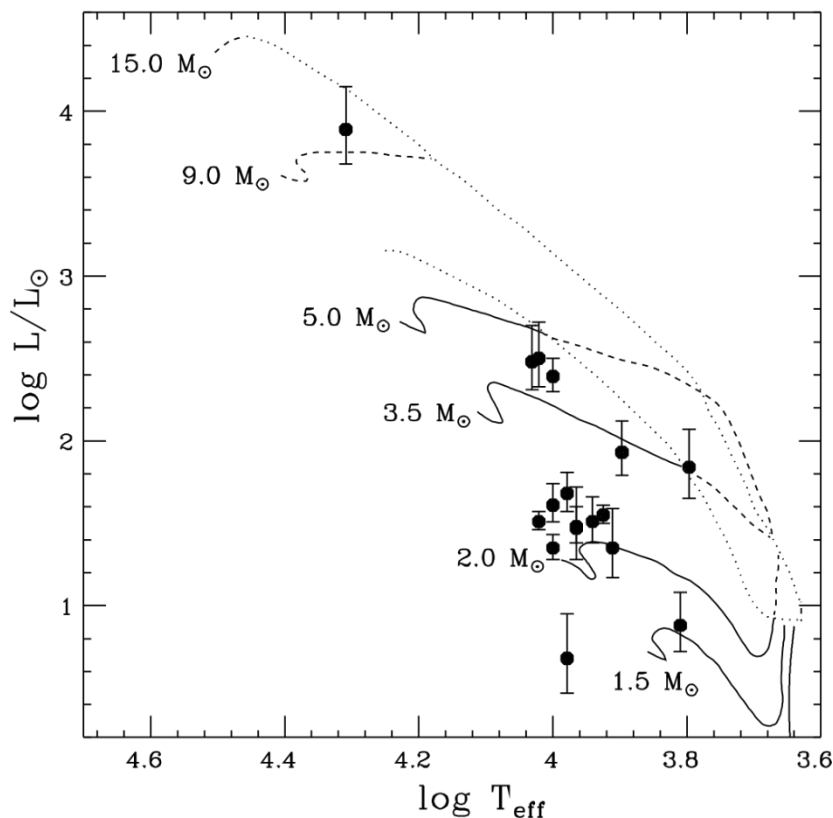
Съществува още един клас от звезди наречени уксори (Herbst et al. (1994)) носещи наименованието на прототипа на тази група звездата UX Orionis. Този тип звезди показва неравномерно затъмняване, причинено от поглъщане от околосъзвезден прах. Обектите от типа UX Orionis (уксори) са звезди преди Главната 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

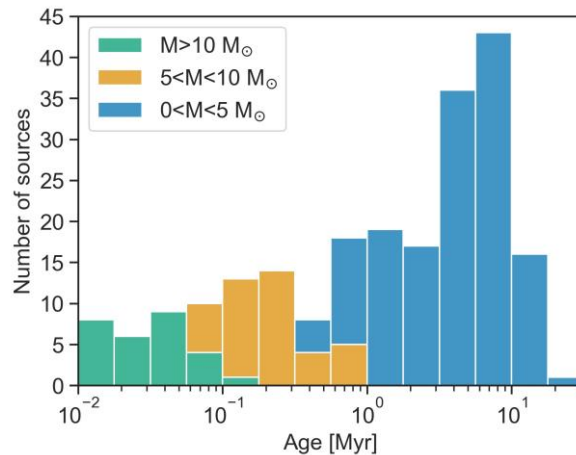
„минимум от тип Алгол”. Освен звездата UX Orionis като уксори може да посочим звездите CO Ori, RR Tau и VV Ser.

Съществува и друга група звезди на Хербиг от спектрален клас по-ранен от A0, за които са характерни изменения в блясъка с малки амплитуди $\sim 0.1^m$ (Bibo & Thé (1991)). Връзката между температурата на звездата и степента на фотометрична променливост, открита от Finkenzeller & Mundt (1984) е потвърдена от van den Ancker et al. (1998). Изследването показва, че амплитуди на изменение на блясъка по-големи от 0.5^m са характерни само звезди от спектрален клас A0 или по-късен, а 65% от всички изследвани от тях звезди на Хербиг от спектрален клас Ae/Be показват фотометрична променливост с амплитуди по-големи от 0.05^m .

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 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 21 и Фигура 22).



Фигура 21. Диаграма на Херципунг-Ръсел за звездите на Хербиг с паралакси измерени от Hipparcos. Показани са също теоретичните еволюционни трекове на звезди преди ГП (плътни линии и прекъснати линии) и линиите на раждане за 10^{-4} (горната точкова линия) и $10^{-5} M_{\odot}$ (долната точкова линия) според Palla &Stahler (1993), van den Ancker et al. (1998).



Фигура 22. Разпределение по възраст на 218 звезди на Хербиг, определени по положението на Фигура 5 (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 23). 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 околосвездния газ в непосредствена близост до звездата.

Събитията за затъмняване на младите звездни обекти могат да бъдат допълнително категоризирани според нивата на поглъщане и времевите граници. Единия тип са обекти преди ГП, които натрупват материал от своите околосвездни дискове през звездната магнитосфера. Техният уникален тип променливост ни позволява да изследваме процесите на магнитно взаимодействие звезда-диск в млади звездни обекти.

При този тип (Cody & Hillenbrand (2010)), чиито прототип е AA Tau (Bouvier et al. (1999), (2003)), се наблюдават кратки (1–5 дни) и квазипериодични събития, за които се смята, че произхождат от затъмнения причинение от нееднородности (Terquem & Papaloizou (2000); Cody et al. (2014)) или чрез фуниевидни потоци (Blinova et al. (2016)) близо до радиуса на срязване на диска и предизвикани от взаимодействието между звездната магнитосфера и вътрешния диск (Romanova et al. (2013)).

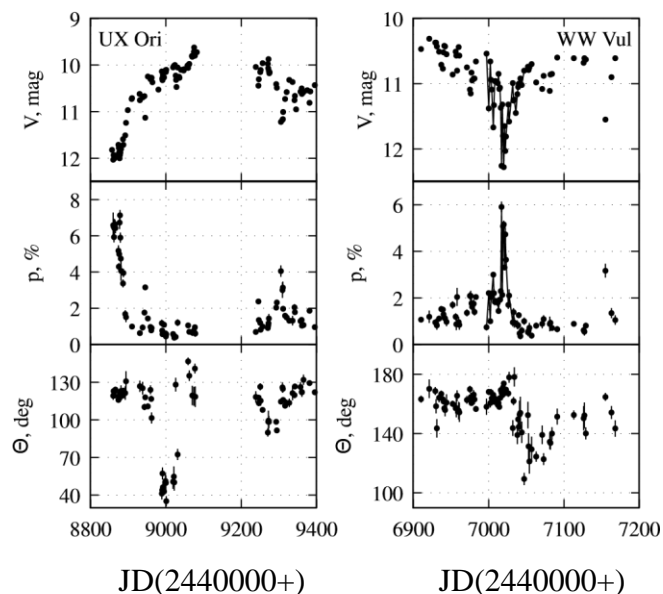
Вторият тип, прототипът на които е звездата KH 15D (Kearns & Herbst 1998; Hamilton et al. 2001), показват продължителни събития на затъмнения, всяко от които продължава от месеци до години с обикновено голямо отслабване на блясъка до няколко величини.

За тях се смята, че са причинени от окултация от външната част на диска (Bouvier et al. (2013); Rodriguez et al. (2015), (2016)).

Първото предположение, че минимумите в блясъка от тип Алгол се дължат на наличието на протопланетарен диск около звездата е направено от Wenzel et al. (1971). Първоначално обяснението на физическата природа на ускорите се базира на модела на Grinin (1988), според който облаците от газ и прах, затъмняващи звездата са достатъчно компактни и не оказват съществено влияние на разсеяната светлина от околосвездния диск. По този начин наблюдаваните фотополяриметрически изменения на звездата се обясняват с увеличаване на дела на поляризационното излъчване на диска в общата яркост на системата при затъмняването на звездата от газово-праховия облак. Този подход не може да се използва при случаите на продължителни затъмнения. Тогава праховата завеса закрива вътрешните области на диска заедно със звездата, което води до собствена зависимост на поляризацията на диска от фазата на затъмнението.

Според общоприетата теория фотополяриметричната променливост на ускорите и дълбоките минимуми в блясъка им се дължат на затъмнения от оптично дебели прахови облаци (Thé (1994)). От наблюдаваната висока линейна поляризация наблюдавана в дълбоките минимуми на блясъка, може да се предположи, че фотометричната активност на звездите от типа UX Ori се дължи на малкия наклон на околосвездния 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.

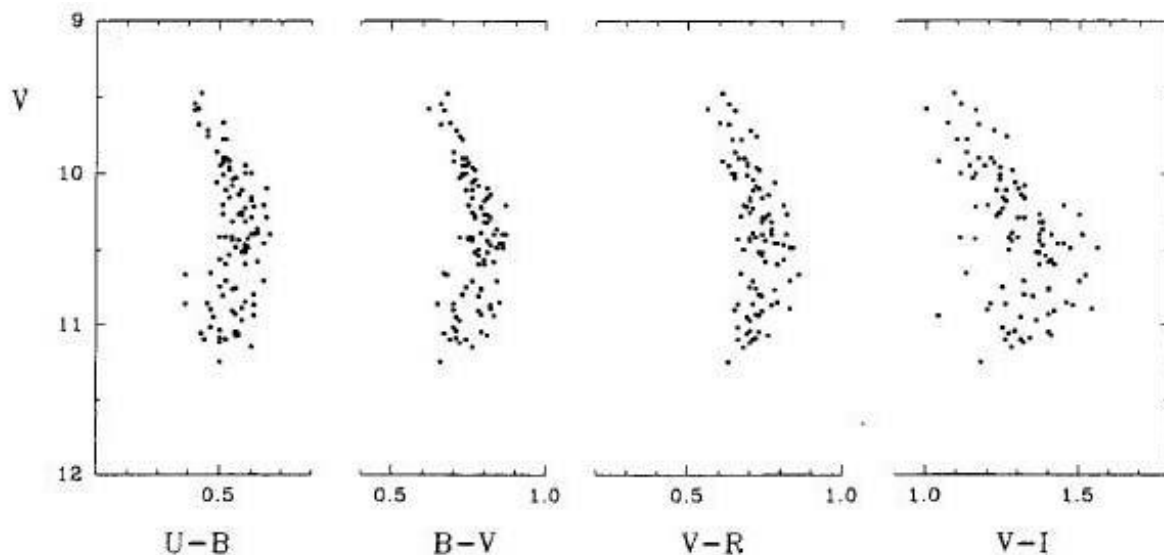
В подкрепа на този модел е инфрачервения ексцес, регистриран в максимума на блясъка на Ae/Be звездите на Хербиг, който може да се обясни с топлинно лъчение от прахови частици, поглъщащи светлината от звездата (Thé (1994)). Интерферометричните наблюдения на тези звезди в близката инфрачервена област като цяло потвърждават тази хипотеза (Kreplin et al. (2016)).



Фигура 23. 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 24).

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

Първият фотометричен каталог съдържащ 230 звезди на Хербиг от спектрален клас Ae/Be и подобни на тях обекти е изготвен от Herbst & Shevchenko (1999). Тяхното изследване потвърждава, че високоамплитудната променливост е присъща на звездите от спектрален клас по-късен от B8. Те не успяват да открият и периодичност в изменението на блясъка, като търсенето им с период до 30 денонощия дава отрицателен резултат. Те стигат до извода, че променливостта на Ae/Be звездите на Хербиг не е свързана нито с усойчиви студени петна, нито с горещи петна по повърхността на звездата, които се дължат съответно на силни магнитни полета и акреция, насочвана от магнитното поле.

В същата работа Herbst & Shevchenko (1999), обобщавайки резултатите, 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 околосвездни 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 околзвездни дискове, подобно на тези от типа Т Тау – оптично дебели с маса $0.01 - 0.1 M_{\odot}$ (Natta et al. (1999)). Голяма е вероятността променливата екстинкция да присъства при повечето звезди на Хербиг от спектрални класове Ae/Be, но този ефект да става забележим само когато околзвездните дискове са разположени с малки ъгли спрямо лъча на зрение (Grinin et al. (1991); Natta & Whitney (2000)).

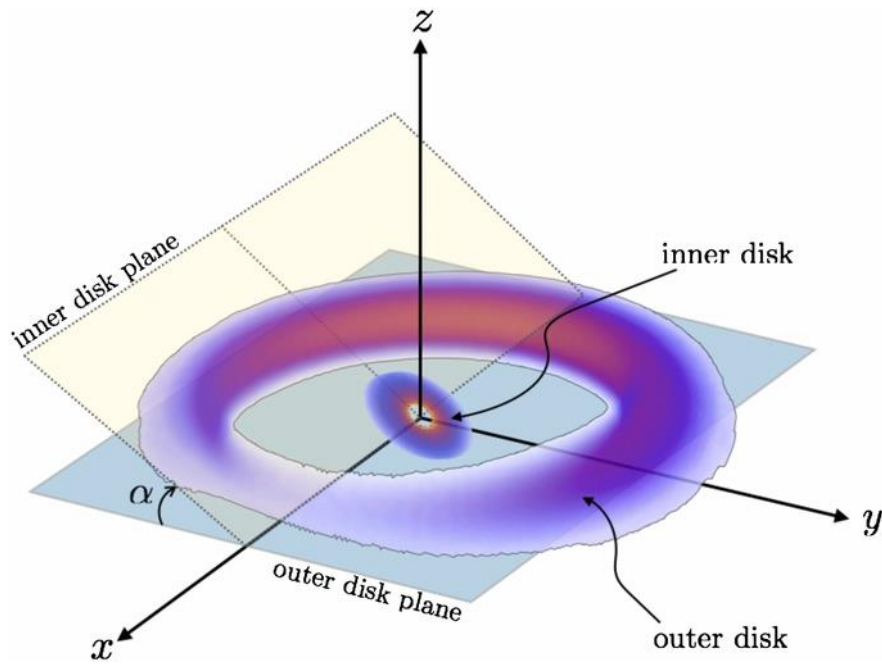
Фотополариметричните наблюдения в различни спектрални диапазони са безценни за по-дълбокия анализ на явленията и определяне на параметрите на диска и поглъщащия екран. Сложните изменения на позиционния ъгъл може частично да се обяснят с променливата скорост на акреция и изтичащата маса, влияещи на раздуването на диска (Shulman & Grinin (2022)). Те могат да се оценят по спектрални наблюдения.

По-ново обяснение на фотометричната променливост на уксорите 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.

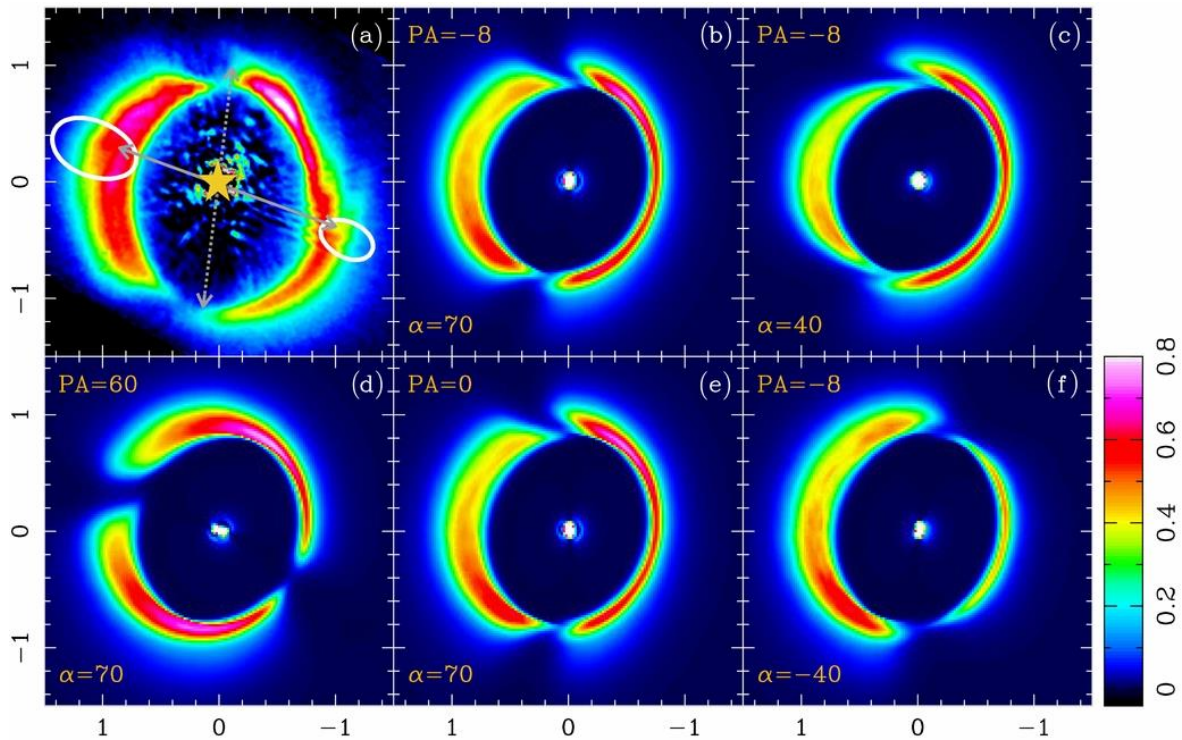
В следствие с развитието на наблюдателната техника, позволяваща да се постига пространствено разделение от няколко ъглови милисекунди в близкия инфрачервен диапазон, довежда до откриването на доказателства за неосисиметрични структури при 27 % от наблюдаваните обекти (Lazareff et al. (2017)). Lopez et 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 уксорите изменения на яркостта и цвета.

На Фигура 25 е представен схематичен изглед с произволна ориентация на параметричния модел, представен в Marino et al. (2015), а на Фигура 26 е представено въздействието на ориентацията на вътрешния диск върху светлината от H-лентата, разпръсната от външния диск. Схема на околзвездното обкръжение близко до звездите от типа Хербиг Ae представен в Brittain et al. (2023) е показана на Фигура 27.

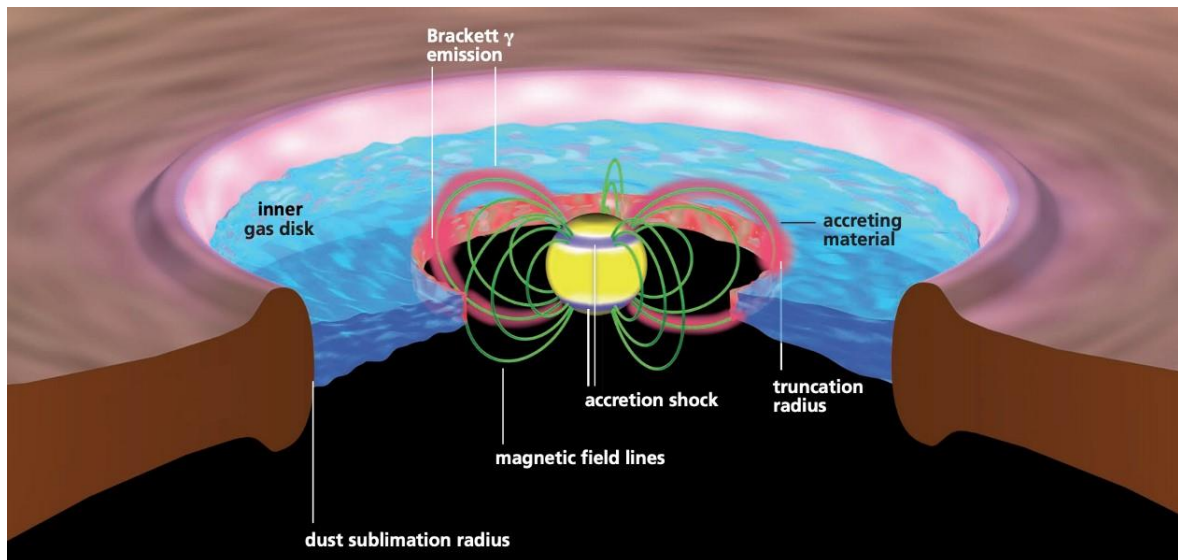
Подробното изучаване на затъмненията на звездите от типа UX Ori, основаващи се на различни наблюдателни данни, би предоставило повече информация за вътрешните области на протопланетните дискове и протичащите в тях процеси.



Фигура 25.— Схематичен изглед с произволна ориентация на параметричния модел, представен в Marino et al. (2015). Централната звезда е поставена в началото. Външният диск лежи в равнината x - y . Ъгълът α е относителният наклон между средната равнина на външния диск и равнината на вътрешния диск. Разпределението на плътността на масата на праха на вътрешния диск и външните секции на диска са изобразени във фалшив цвят. Празнината е показана лишена от материал за простота. Вътрешният диск е увеличен по размер и плътност за по-добра визуализация.



Фигура 26. Въздействие на ориентацията на вътрешния диск върху светлината от H-лентата, разпръсната от външния диск. a: NACO-PDI H-band изображение от Avenhaus et al. (2014), в сравнение с емисиите на C18O(2-1) при системна скорост от Perez et al. (2014 г.). Излъчването на C18O(2-1), представено тук като един бял контур при максимум 0,75, показва, че позиционният ъгъл (PA) на външния диск е на -20 градуса източно от север и е перпендикулярен на плътната сива двойна стрелка, докато позиционният ъгъл на нулевите стойности на интензитета е обозначен с прекъснатата двойна стрелка (-8 градуса). b-f: Предвиждане на радиационен трансфер за поляризиран интензитет в H-лента, за различни PA на вътрешния диск (посочени в градуси на графиките) и за различни относителни наклони α между вътрешния и външния диск, така че нетният наклон на вътрешния диск е $(-20+\alpha)$ градуса спрямо равнината на небето. Оста x- и y- показват отместване по протежение на RA и DEC, в arcsec (Merano et al. (2015)).



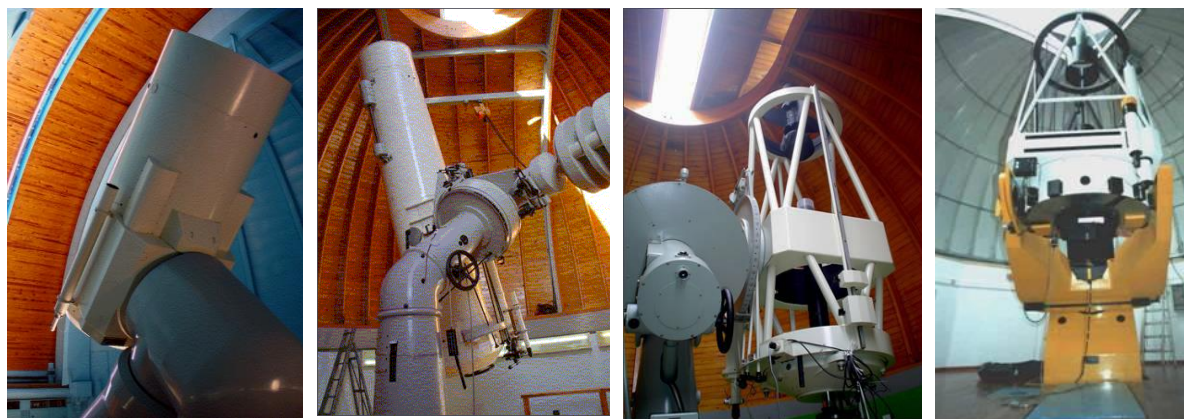
Фигура 27. Схема на околозвездното обкръжение близко до звездите от типа Хербиг Ae. Първоначално разработен за илюстрация на парадигмата за магнитосферната акреция на класическите T Tau звезди (CTTS), тази рисунка също е приложима и към звездите от типа Хербиг Ae. Прахът в диска сублимира, когато достигне 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) (виж Фигура 28).



Фигура 28. Използваните телескопи. Отляво надясно: 2-м Ричи-Кретиен-Куде, 50/70-ст Шмит и 60-ст Касегрен на НАО Рожен (България) и 1,3-м телескоп на обсерваторията Скинакас (Гърция).

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 3.

Телескоп	CCD камера	Размер на чипа	Поле	Размер	Мащаб	RON	Gain
		[pix x pix]	[′ x ′]	на пиксела, μm	[″/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 3. Технически параметри и спецификации на използваните CCD камери за наблюдение на звездата V1180 Cas.

Данните за фотометричните CCD наблюдения на звездите GM Сер и V1180 Cas са обобщени в Таблица 4.

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 4. 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.

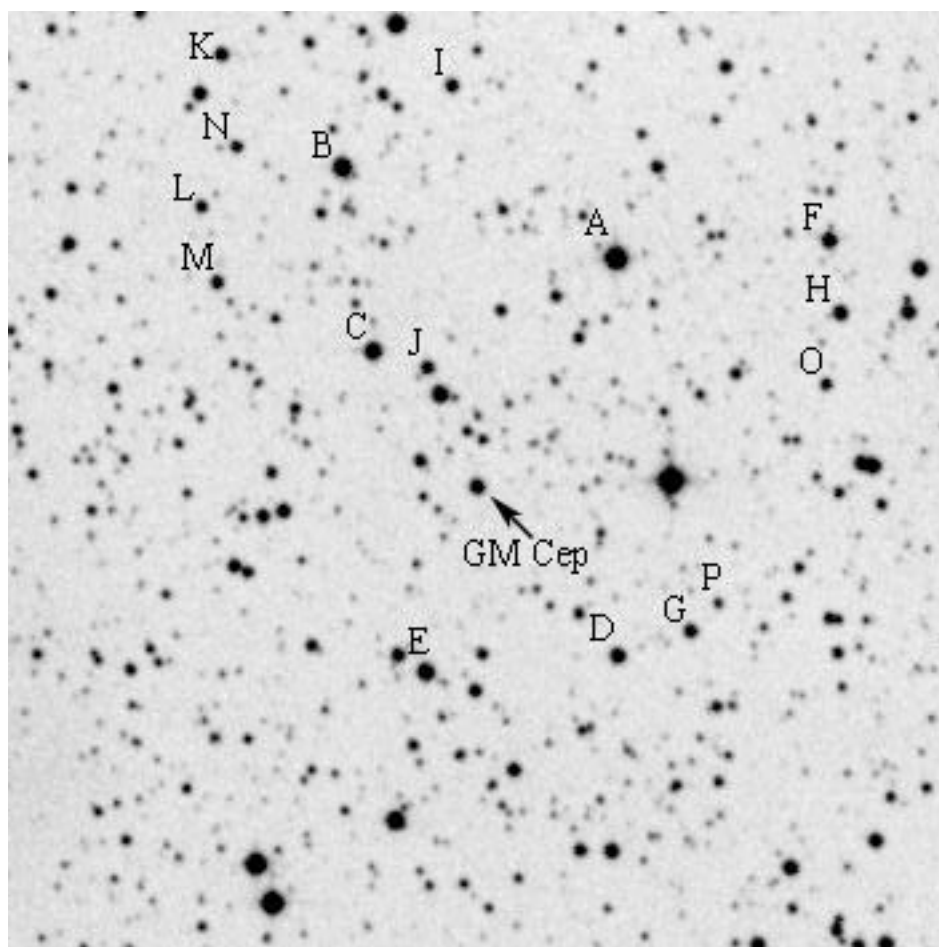
2.2 Обработка на данните на изследваните звезди

За да се преобразуват инструменталните звездни величини в стандартни, в полето на всеки от изследваните обекти са калибровани вторични стандартни звезди във фотометрична система Johnson-Cousins. Калибровката на вторичните стандартни звезди е направена по проведени в няколко нощи (виж Таблица 4) 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 калибровани 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. Карта на областта около GM Cep и стандартните звезди в нея е представена на Фигура 29. Стандартните звезди са означени с букви от A до P в низходящ ред на блясъка им във филтър V. Представеното поле е с размери $6' \times 6'$, като GM Cep е в центъра. Координатите и измерените BVRI звездни величини на стандартните звезди, заедно със съответните средноквадратични грешки са дадени в Таблица 5. 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 .

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.



Фигура 29. Диаграма за намиране на последователностите за сравнение на звездата GM Cep.

Таблица 5. 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 апертюра. 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.

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 $-0.3 < (B - V) < +2.3$.

Списък на използваните стандартни площадки от Landolt (1992) е даден в Таблица 6. В таблицата са нанесени: име и координати на стандартната площадка, броят на звездите в нея, максималната и минималната стойност на V звездната величина, както и максималната и минималната стойност на цветовия индекс $(V - I)$.

Таблица 6. Използвани стандартни площадки от Landolt (1992).

Име	α_{2000} hh:mm:ss	δ_{2000} dd:mm:ss	Брой звезди	V_{\max}	V_{\min}	$(V-I)_{\max}$	$(V-I)_{\min}$
PG0231+051	02:33:41	05:18:40	6	12.772	16.105	1.951	-0.534
SA 95	03:53:40	-00:01:13	6	13.574	15.606	1.227	-0.300
PG1323-086	13:25:39	-08:49:16	5	12.080	14.003	0.833	-0.127
PG1525-071	15:28:11	-07:16:27	4	13.350	16.403	1.104	-0.168
PG1528+062	15:30:50	06:00:56	3	11.989	15.553	0.824	-0.296
PG1530+057	15:33:11	05:32:27	3	12.842	14.211	0.886	0.199
PG1633+099	16:35:24	09:47:50	5	12.969	15.256	1.138	-0.212
PG1657+078	16:59:32	07:43:31	5	14.033	15.225	1.113	-0.100
SA 110	18:43:10	00:27:40	8	11.312	14.022	2.625	0.652
SA 112	20:42:26	00:07:43	3	9.905	12.095	1.217	0.547
MARK A	20:43:59	-10:47:42	4	13.258	15.911	1.098	-0.241
PG2213-006	22:16:28	-00:21:15	4	12.706	15.109	0.830	-0.203
PG2331+055	23:33:49	05:46:49	3	13.051	15.182	0.935	-0.044

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:

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

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

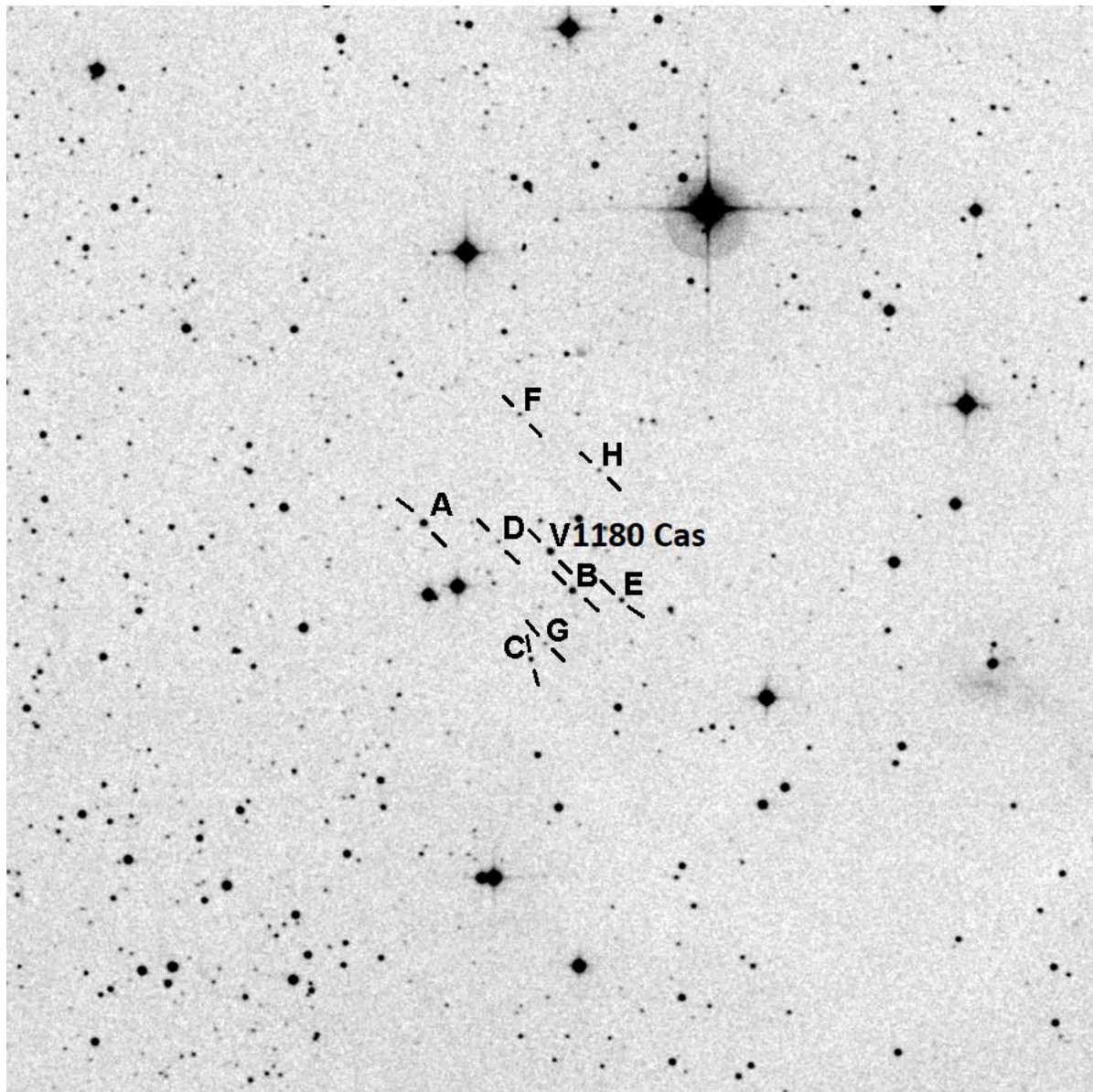
$$I = i + n_1.(v - i) + n_2.X_i + n_3 \quad (5)$$

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 редуция на данните са описани в Ibraymov et al. (2015).

Карта на областта около V1180 Cas и стандартните звезди в нея е представена на Фигура 30. Стандартните звезди са означени с букви от А до Н в низходящ ред на блясъка им във филтър V. Представеното поле е с размери 15' X 15', центрирано около V1180 Cas. Северът е отгоре, а изтокът отляво. Графиката е извлечена от STScI Digitized Sky Survey Second Generation Red. Координатите и измерените VRI звездни величини на стандартните звезди, заедно със съответните средноквадратични грешки са дадени в

Таблица 7. Звездните величини на стандартните звезди са в интервала от 16.84^m до 19.73^m (V), а цветовите индекси (V – R) се променят от 1.01^m до 1.35^m .



Фигура 30. Диаграма за намиране на последователностите за сравнение на звездата V1180 Cas.

Таблица 7. 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

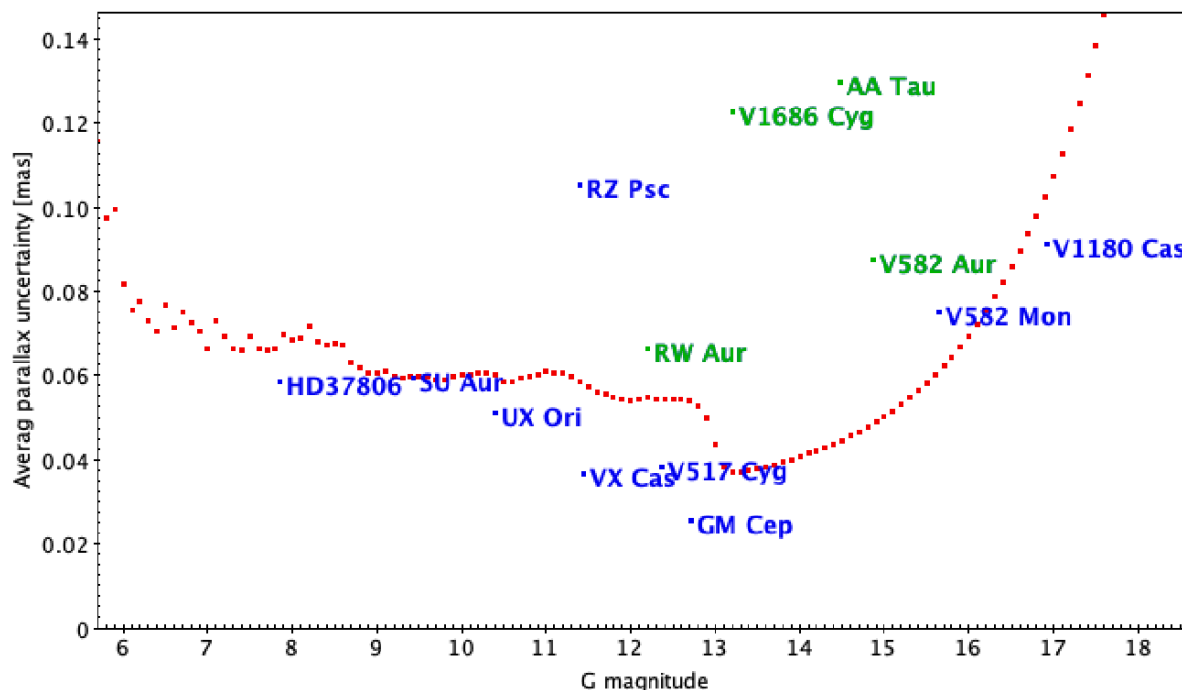
С помощта на процедури с пакета DAOPHOT в IDL беше извършена апертурна звездна фотометрия на изследваните обекти, като са използвани вторичните VRI стандартни звезди в полето на всеки обект. Наблюденията на даден обект, направени с различни телескопи и CCD камери са измерени с една и съща апертура. Същият 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 Cep е физически член на този куп (виж Фигура 31).



Фигура 31. Положение на звезди тип UX Orionis на диаграмата средна грешка в паралакса / звездна величина в G филтър в данните на GAIA (Prusti (2019)).

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 експеси, което може да се обясни с наличието на много ярък и масивен околосъзвезден 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 KJ 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

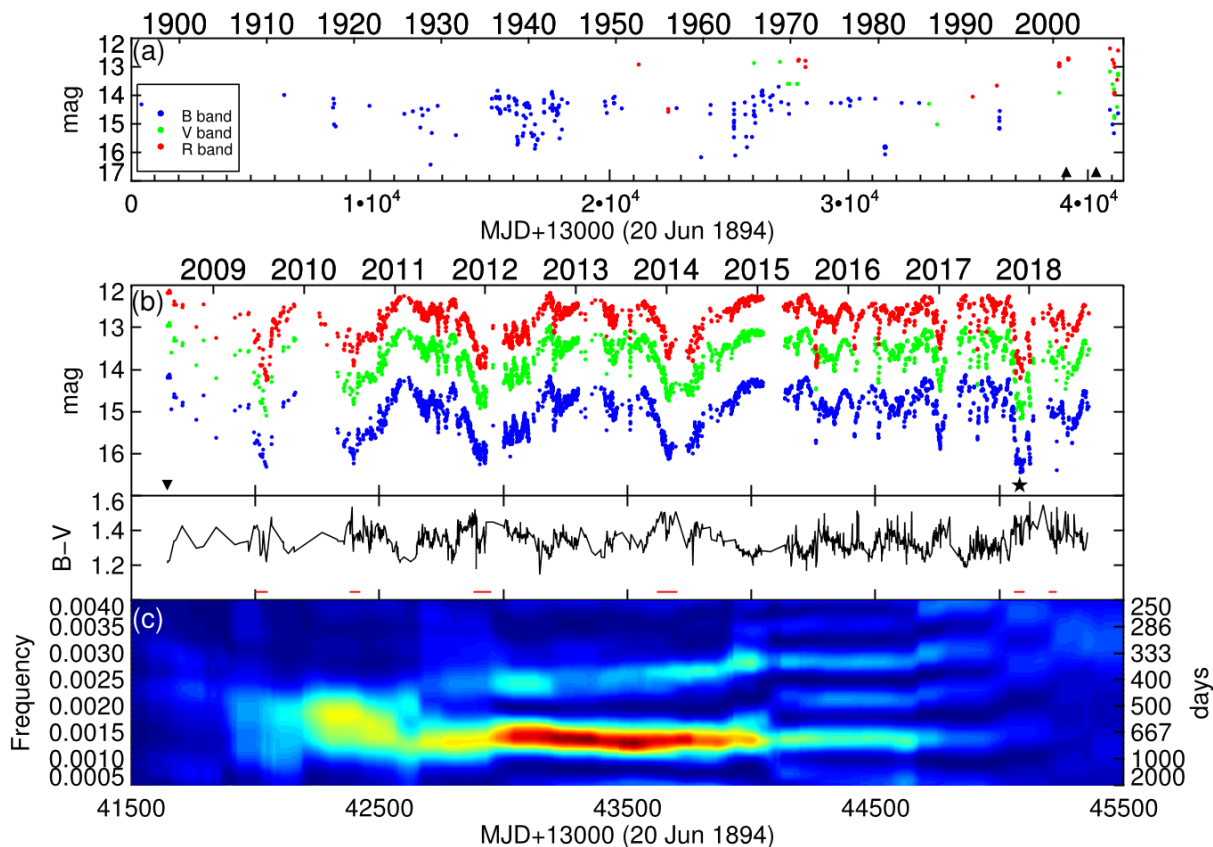
скорост на въртене $v \sin i \sim 43.2 \text{ km s}^{-1}$, което е много по-бързо от средното значение $v \sin i \sim 10.2 \text{ km s}^{-1}$ характерно за членовете на купа Trumpler 37 (Sicilia-Aguilar et al. (2008)). Скоростта на дисковата акреция е променлива до $\sim 10^{(-6)}$ M_{\odot} /година, 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.

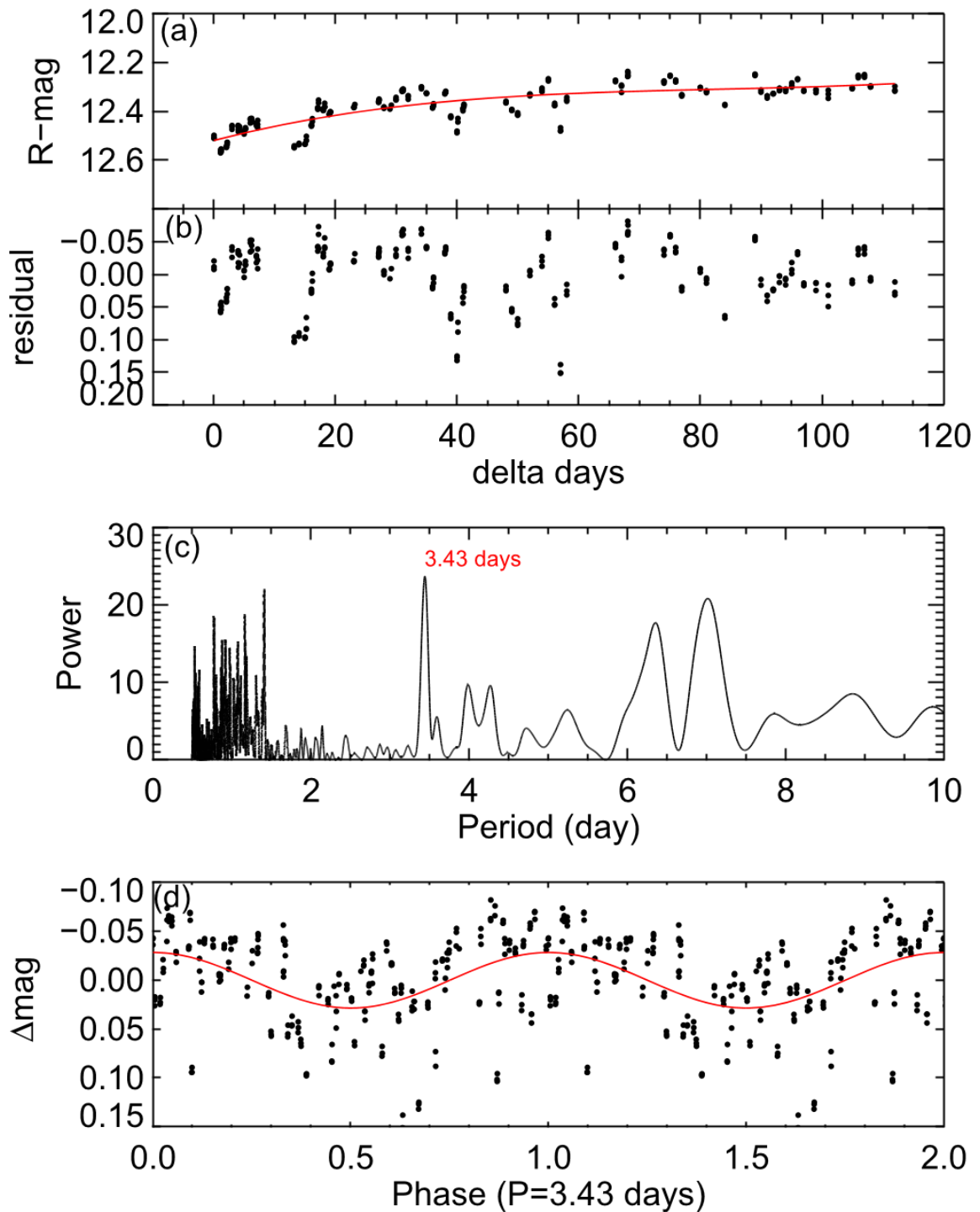
В изследването на Chen et al. (2012) при извършване на интензивен BVR фотометричен мониторинг на GM Cep през периода 2009-2011 г. потвърждават UXor природата на неговата променливост и предполагат ранен етап на планетезимално формиране в около звездната среда.

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 32).



Фигура 32. 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)).

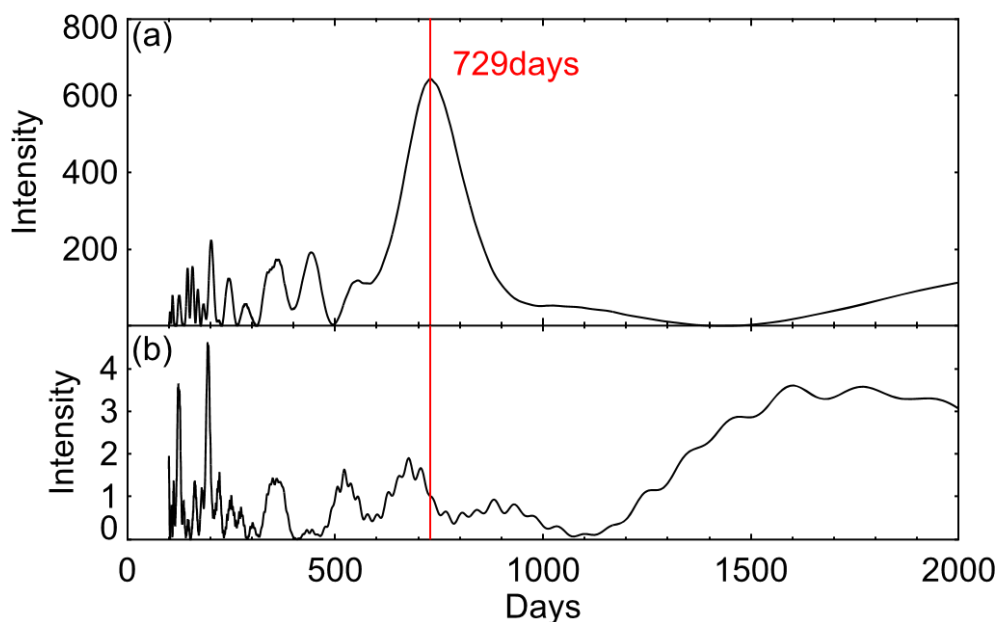
Те правят анали за търсене на периоди и стигат до заключението, че се наблюдава период на въртене от около 3.43 дни, който се е съхранил в продължение на целия наблюдателен период. Освен това се наблюдават признаци на удължение на периода при намаляване на амплитудата. Този ефект те обясняват като приемат, че съществува зависимост на появяването на звездните петна от ширината от повърхностното диференциално въртене по аналогия със Слънцето (слънчев магнитен цикъл на Швабе) (виж Фигура 33).



Фигура 33. (а) Звездата GM Сер в ярко състояние в средата на 2014 г. Крива на блясъка във филтър R. (б) Мащабирана крива на блясъка след премахване на бавно променящия се тренд. (с) Спектър на мощността (b), от който е изваден периодът от 3,43 дни. (d) Сбита крива на блясъка с $P = 3,43$ дни, намерена в (с). Плътната крива показва най-добрата синусоидална функция (Huang et al. (2019)).

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

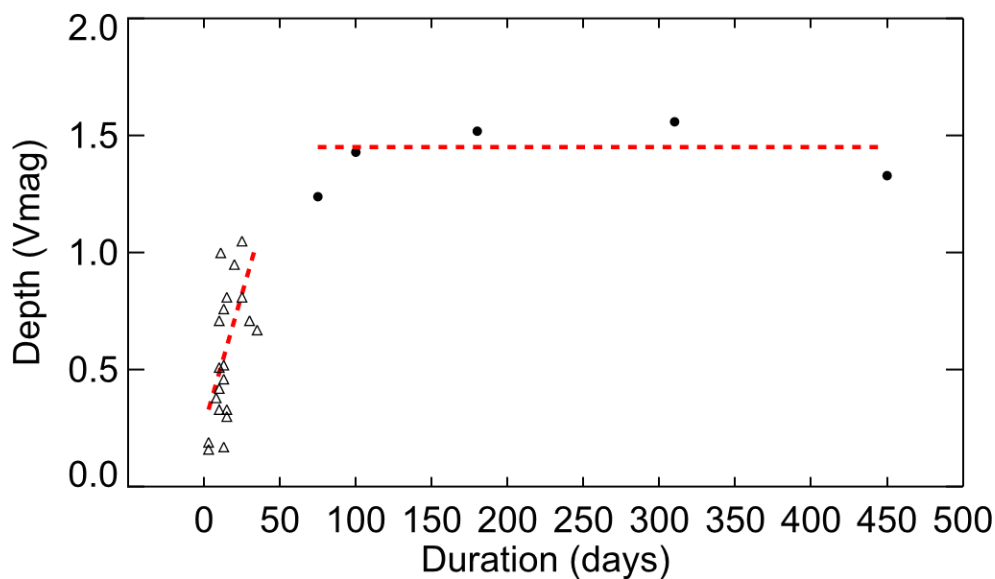
Опитите за намиране на дълговременна периодичност започват от Chen et (2012), като авторите предполагат възможен период от ~ 1 година. Този период не е потвърден и на базата на наблюдаваните дълбоки спадове в яркостта Chen & Hu (2014) предполагат периодичност от около 300 дни. Този период ~ 350 дни е 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 34).



Фигура 34. (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)).

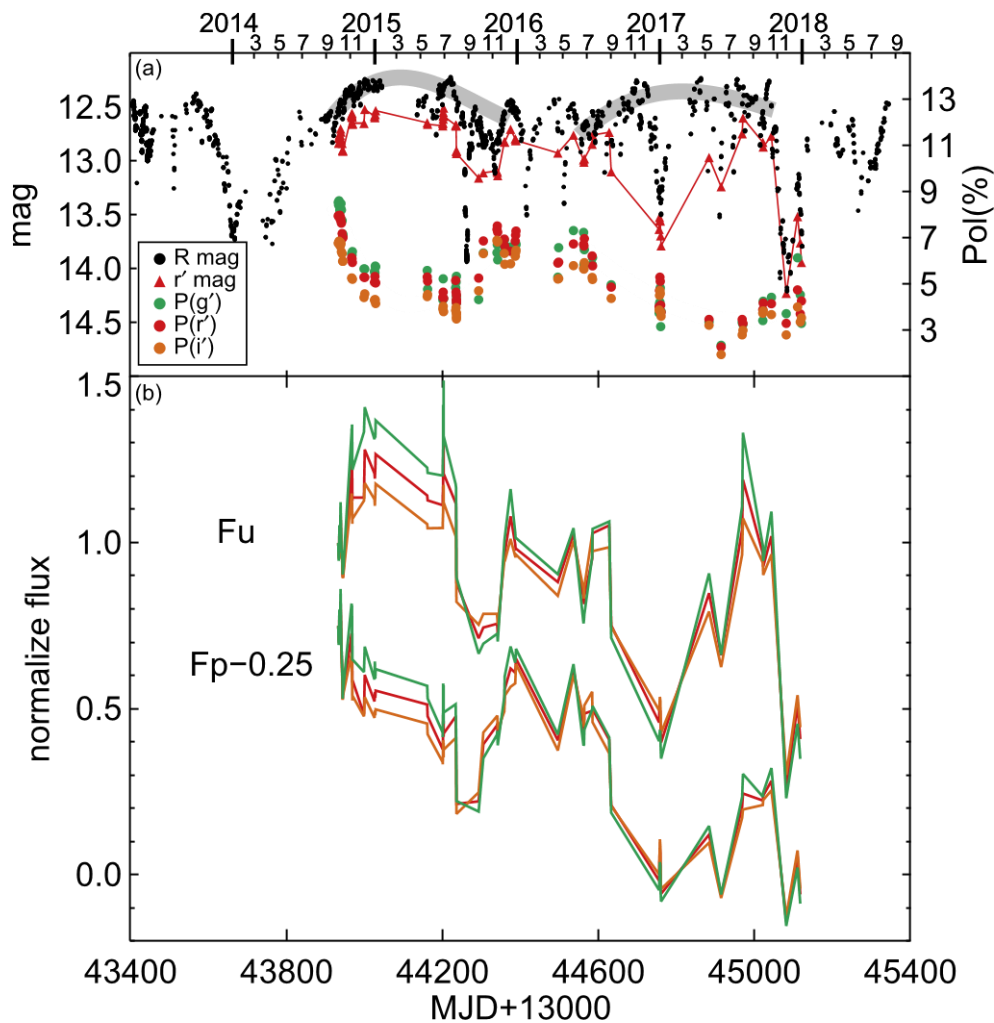
Многоцветните наблюдения ни дават възможност да изясним механизма на вариациите на яркостта. Съществуват три основни вида промени. Най-забележими се явяват основните спадове на яркостта $\sim 1 - 2.5^m$ в B-, V- и R- филтрите, продължаващи месеци (Munari et al. (2017)). Освен това се наблюдават незначителни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

Изследването на връзката между на дълбочината на затъмнението и неговата продължителност при звездата GM Cep 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 амплитуда на затъмнение. Дълбочината на затъмнението е почти еднаква за по дълги (≥ 100 дни) събития да $A_V \sim 1.5$ mag (виж Фигура 35). 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 35 . 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 36 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 36. (а) Фотополяриметрична 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. (б) Криви на блясъка за неполяризиран поток (F_u) и поляризиран поток (F_p), със същите цветови символи както в (а) (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. Данните са представени в Таблица 8.

Колоните предоставят Юлианската дата (JD) на наблюдение, BVRI величини и използвания телескоп. В колоната Телескоп съкращението 2-m означава 2-м Ричи-

Кретиен-Куде, Шмит - 50/70-см Шмит телескоп и 1,3-м - 1,3-м Ричи-Кретиен телескоп. Типичните инструментални грешки от BVRI фотометрията са публикувани в работата на Semkov & Peneva (2012a).

Таблица 8. BVRI фотометрични наблюдения на GM Сер за периода юни 2008 г. - октомври 2020 г.

JD	B	V	R	I	Tel.
54646.425	14.19	12.96	12.17	11.34	1.3-м
54647.432	14.16	12.94	12.17	11.33	1.3-м
54653.367	14.11	12.88	12.11		1.3-м
54654.429	14.13	12.90	12.13	11.31	1.3-м
54656.464	14.19	12.95	12.17	11.34	1.3-м
54661.428	14.94	13.59		11.74	1.3-м
54672.335	14.65	13.31	12.45	11.51	1.3-м
54673.355	14.58	13.24	12.37	11.46	1.3-м
54680.531	14.66	13.31	12.45	11.52	1.3-м
54706.292	14.85	13.42	12.51	11.66	Шмит
54707.346	14.78	13.36	12.45	11.60	Шмит
54762.228	15.19	13.89	12.98	12.02	Шмит
54791.235	14.61	13.30	12.44	11.57	Шмит
54842.197	15.62	14.20	13.24	12.25	Шмит
54917.539	14.97	13.65	12.76	11.81	Шмит
54938.474	14.87	13.54	12.68	11.79	Шмит
54971.404	14.91	13.57	12.68	11.74	Шмит
54973.427	14.83	13.55	12.64	11.70	Шмит
54994.581	15.49	14.06	13.06	11.96	1.3-м
54997.531	15.75	14.34	13.35	12.19	1.3-м
55000.584	15.74	14.32	13.31	12.15	1.3-м
55006.517	15.68	14.25	13.25	12.12	1.3-м
55009.588	15.71	14.30	13.28	12.15	1.3-м
55011.504		14.15	13.16	12.05	Шмит
55014.517	15.55	14.15	13.19	12.08	1.3-м
55016.576	15.78	14.42	13.48	12.37	1.3-м
55019.512	16.02	14.76	13.88	12.74	1.3-м
55022.521	16.05	14.79	13.91	12.78	1.3-м
55028.414	16.08	14.79	13.89	12.72	Шмит
55029.418	16.01	14.70	13.73	12.57	Шмит
55031.504	15.90	14.50	13.52	12.34	1.3-м
55037.526	16.19	14.90	13.98	12.75	1.3-м
55040.427	16.25	14.97	14.04	12.82	1.3-м
55044.366	16.31	15.09	14.25	13.11	1.3-м
55065.331	15.77	14.29	13.28	12.15	Шмит
55066.261	15.60	14.17	13.19	12.06	Шмит

55112.369	14.88	13.55	12.64	11.68	ШМИТ
55113.332	14.80	13.46	12.60	11.65	ШМИТ
55114.268	14.77	13.47	12.51	11.63	ШМИТ
55128.284			12.79	11.81	2-м
55133.262	14.73	13.46	12.61	11.63	ШМИТ
55155.207		13.24	12.44	11.52	ШМИТ
55156.221	14.60	13.29	12.46	11.58	ШМИТ
55157.251	14.59	13.31	12.49	11.58	ШМИТ
55161.217	14.54	13.27		11.56	2-м
55268.601	15.13	13.74	12.82	11.93	2-м
55330.414	15.41	14.06	13.13	12.05	ШМИТ
55333.390	15.50	14.16	13.21	12.10	ШМИТ
55356.394	15.78	14.44	13.51	12.38	ШМИТ
55358.445	15.83	14.51	13.53	12.38	ШМИТ
55359.492	15.74	14.40	13.42	12.30	ШМИТ
55360.426	15.70	14.34	13.38	12.27	ШМИТ
55391.338	15.89	14.51	13.46	12.42	2-м
55395.341	16.06	14.78	13.79	12.74	2-м
55396.322	16.23	14.82	13.88	12.76	2-м
55396.363	16.04	14.78	13.90	12.76	ШМИТ
55413.291	15.63	14.29	13.38	12.27	ШМИТ
55415.376	15.45	14.09	13.16	12.11	ШМИТ
55416.333	15.51	14.13	13.16	12.13	ШМИТ
55420.051	15.65	14.29	13.33	12.22	1.3-м
55421.367	15.67	14.33	13.38	12.27	1.3-м
55434.316	15.59	14.26	13.31	12.20	1.3-м
55435.352	15.55	14.18	13.22	12.14	1.3-м
55447.488	15.53	14.15	13.20	12.10	ШМИТ
55448.371	15.46	14.09	13.14	12.04	ШМИТ
55449.438	15.43	14.06	13.12	12.04	ШМИТ
55459.532	15.47	14.20	13.27	12.17	1.3-м
55480.337	15.54	14.18	13.22	12.10	1.3-м
55499.295	15.01	13.59	12.68	11.76	2-м
55500.238	14.85	13.46	12.59	11.68	2-м
55502.259	14.91	13.49	12.60	11.71	2-м
55504.400	15.24	13.86	12.96	11.96	ШМИТ
55505.261	15.32	13.93	13.02	12.01	ШМИТ
55506.269	15.20	13.82	12.93	11.95	ШМИТ
55507.424	15.44	14.03	13.10	12.10	ШМИТ
55563.203	14.63	13.32	12.47	11.58	ШМИТ
55568.223	14.57	13.23	12.40	11.55	2-м
55570.220	14.54	13.24	12.39	11.55	2-м

55571.249	14.47	13.17	12.35	11.52	2-м
55573.253	14.47	13.16	12.35	11.50	2-м
55574.261	14.45	13.14	12.33	11.49	2-м
55599.209	14.27	13.02	12.24	11.40	ШМИТ
55656.458	14.70	13.38	12.53	11.61	ШМИТ
55659.492	14.87	13.47	12.62	11.73	2-м
55683.557	15.10	13.68	12.76	11.83	2-м
55703.359	14.78	13.48	12.65	11.67	ШМИТ
55704.370	14.74	13.43	12.56	11.62	ШМИТ
55705.376	14.66	13.34	12.50	11.57	ШМИТ
55706.362	14.67	13.36	12.52	11.59	ШМИТ
55707.358	14.74	13.42	12.55	11.62	ШМИТ
55721.357	14.95	13.54	12.64	11.71	2-м
55722.396	14.81	13.45	12.56	11.62	ШМИТ
55734.452	15.07	13.69	12.77	11.78	ШМИТ
55735.410	15.12	13.75	12.83	11.82	ШМИТ
55736.407	15.35	14.00	13.06	11.98	ШМИТ
55737.425	15.39	14.05	13.10	12.02	ШМИТ
55739.553		13.71	12.81	11.85	60-см
55770.389	15.14	13.78	12.86	11.84	ШМИТ
55785.307			12.47		ШМИТ
55786.268	14.54	13.26	12.47		ШМИТ
55787.286	14.45	13.19	12.37		ШМИТ
55788.314	14.47	13.22	12.40		ШМИТ
55789.321	14.55	13.28	12.44		ШМИТ
55790.250	14.53	13.21	12.38	11.52	1.3-м
55790.261	14.46	13.22	12.41		ШМИТ
55791.277	14.47	13.17	12.34	11.48	1.3-м
55791.292	14.44	13.17	12.37	11.48	ШМИТ
55792.244	14.54	13.22	12.38	11.53	1.3-м
55792.279	14.50	13.23	12.43	11.52	ШМИТ
55797.343	14.45	13.16	12.35	11.48	ШМИТ
55798.328	14.45	13.16	12.35	11.47	ШМИТ
55799.342	14.52	13.24	12.41	11.51	ШМИТ
55814.349	15.30	13.98	13.03	12.01	ШМИТ
55815.276	15.23	13.81	12.88	11.88	1.3-м
55815.316			12.87		ШМИТ
55816.326	15.18	13.80	12.86	11.86	ШМИТ
55816.433	15.25	13.70	12.87	11.86	1.3-м
55817.244	15.24	13.85	12.90	11.87	ШМИТ
55818.275			12.90		ШМИТ
55819.246	15.24	13.87	12.92	11.88	ШМИТ

55820.276			13.16		ШМИТ
55821.246	15.35	14.04	13.07	11.98	ШМИТ
55822.238	15.30	13.90	12.93	11.88	ШМИТ
55824.237	15.29	13.88	12.93	11.89	1.3-м
55828.281	15.13	13.71	12.77	11.75	ШМИТ
55842.306	14.95	13.55	12.65	11.68	1.3-м
55848.297	15.09	13.69	12.79	11.76	1.3-м
55864.275	15.59	14.10	13.11	12.14	2-м
55865.268	15.38	13.92	12.96	11.99	2-м
55866.218	15.38	13.93	12.96	12.03	2-м
55890.202	15.68	14.50	13.51	12.33	60-см
55892.232	15.98	14.50	13.43	12.39	2-м
55895.212	16.07	14.75	13.80	12.64	ШМИТ
55896.222	16.00	14.70	13.79	12.62	ШМИТ
55925.200	16.14	14.87	13.90	12.74	ШМИТ
55928.207	15.94	14.54	13.57	12.41	ШМИТ
55957.187		13.95	13.01	12.06	2-м
55958.211	15.33	13.88	12.95	12.01	2-м
56003.528	15.72	14.29	13.31	12.19	ШМИТ
56015.536	15.74	14.28	13.26	12.22	2-м
56030.460	15.50	14.13	13.19	12.12	ШМИТ
56060.390	15.68	14.31	13.34	12.19	ШМИТ
56068.375	15.63	14.18	13.20	12.11	ШМИТ
56091.418	15.35	14.00	13.06	12.01	ШМИТ
56092.406	15.30	13.93	13.00	11.97	ШМИТ
56094.469	15.60	14.18	13.21	12.21	2-м
56096.423	15.31	13.94	12.99	11.96	ШМИТ
56120.397	15.06	13.70	12.78	11.84	ШМИТ
56121.291	15.14	13.76	12.87	11.89	ШМИТ
56122.352	15.18	13.81	12.91	11.93	ШМИТ
56123.416	15.23	13.86	12.95	11.98	ШМИТ
56137.318	14.79	13.51	12.67	11.74	ШМИТ
56139.292	14.97	13.63	12.75	11.80	1.3-м
56139.305	14.92	13.62	12.79	11.81	ШМИТ
56141.385	14.86	13.50	12.64	11.72	1.3-м
56142.256	14.85	13.51	12.64	11.73	1.3-м
56145.555	14.49	13.34	12.54	11.62	60-см
56157.592	14.88	13.54	12.68	11.76	1.3-м
56159.371	14.76	13.42	12.56	11.67	ШМИТ
56160.352	14.60	13.29	12.46	11.58	ШМИТ
56161.374	14.63	13.31	12.50	11.59	ШМИТ
56162.357	14.69	13.38	12.55	11.65	ШМИТ

56166.267	14.70	13.40	12.56	11.66	ШМИТ
56167.300	14.60	13.31	12.50	11.59	ШМИТ
56168.310	14.55	13.26	12.42	11.54	ШМИТ
56169.287	14.62	13.30	12.45	11.58	ШМИТ
56173.360	14.40	13.11	12.32	11.48	1.3-м
56174.338	14.30	13.03	12.24	11.41	1.3-м
56178.311	14.32	13.04	12.25	11.43	1.3-м
56179.485	14.53	13.22	12.41	11.55	1.3-м
56180.346	14.54	13.24	12.41	11.55	1.3-м
56181.273	14.33	13.07	12.27	11.44	60-см
56182.268	14.33	13.06	12.26	11.43	1.3-м
56183.280	14.25	13.04	12.25	11.43	60-см
56183.393	14.33	13.07	12.27	11.44	1.3-м
56192.311	14.36	13.11	12.29	11.46	60-см
56193.308	14.51	13.21	12.39	11.54	1.3-м
56193.360				11.51	ШМИТ
56194.341	14.56	13.24	12.43	11.56	ШМИТ
56195.270	14.36	13.09	12.28	11.45	ШМИТ
56208.248	15.09	13.71	12.82	11.86	ШМИТ
56209.251	15.26	13.87	12.97	11.98	ШМИТ
56210.242	15.22	13.86	12.95	11.98	ШМИТ
56212.281	14.92	13.57	12.66	11.74	60-см
56214.252	14.85	13.47	12.60	11.73	2-м
56226.374	14.73	13.38	12.51	11.62	ШМИТ
56231.280	15.07	13.71	12.76	11.79	60-см
56249.272	14.77	13.42	12.56	11.64	ШМИТ
56250.226	14.79	13.45	12.58	11.65	ШМИТ
56275.302	14.82	13.45	12.59	11.71	2-м
56276.259	14.67	13.35	12.51	11.64	2-м
56292.368	14.70	13.34	12.47	11.58	60-см
56294.303	14.60	13.31	12.41	11.51	60-см
56295.349	14.62	13.30	12.45	11.56	60-см
56296.327	14.72	13.37	12.49	11.61	60-см
56309.254			12.67	11.75	ШМИТ
56312.252	15.00	13.58	12.65	11.72	2-м
56329.210	14.93	13.57	12.67	11.71	ШМИТ
56330.218	15.13	13.75	12.81	11.82	ШМИТ
56356.261	14.58	13.30	12.41	11.52	60-см
56369.561	14.42	13.16	12.34	11.52	2-м
56392.487	14.46	13.17	12.35	11.50	ШМИТ
56394.432	14.42	13.17	12.35	11.48	ШМИТ
56415.444	15.44	14.10	13.20	12.22	ШМИТ

56417.414	14.99	13.59	12.69	11.82	2-м
56443.440	15.19	13.84	12.94	12.00	ШМИТ
56444.410	15.14	13.78	12.90	11.95	ШМИТ
56478.411	14.83	13.44	12.58	11.68	2-м
56506.411	14.73	13.40	12.58	11.72	2-м
56507.408	14.88	13.55	12.71	11.85	2-м
56508.446	14.93	13.60	12.77	11.90	2-м
56509.344	15.08	13.78	12.93	12.01	ШМИТ
56510.411	15.43	14.14	13.25	12.27	60-см
56511.435	15.24	13.95	13.08	12.11	ШМИТ
56511.452	15.28	13.93	13.06	12.10	60-см
56512.441	15.03	13.70	12.85	11.90	60-см
56513.419	14.94	13.58	12.71	11.76	60-см
56514.386	14.86	13.48	12.59	11.68	60-см
56540.346	14.63	13.32	12.48	11.61	ШМИТ
56541.380	14.62	13.32	12.47	11.61	ШМИТ
56542.420	14.70	13.38	12.52	11.65	ШМИТ
56543.376	14.69	13.38	12.55	11.70	2-м
56553.326	14.91	13.56	12.70	11.77	1.3-м
56577.469	14.65	13.30	12.45	11.57	60-см
56578.482	14.68	13.31	12.46	11.60	60-см
56604.444		13.55	12.63	11.65	60-см
56636.280	15.51	14.00	12.96	11.93	2-м
56655.226	15.94	14.55	13.54	12.32	ШМИТ
56656.234	15.91	14.57	13.56	12.34	ШМИТ
56657.212	15.97	14.60	13.59	12.39	ШМИТ
56681.239	15.87	14.44	13.43	12.25	ШМИТ
56694.239	15.83	14.32	13.28	12.23	2-м
56738.547	15.81	14.51	13.55	12.38	ШМИТ
56799.494	15.59	14.17	13.25	12.13	ШМИТ
56801.344	15.32	13.89	12.92	11.93	2-м
56832.325	14.85	13.43	12.54	11.60	2-м
56834.319	14.94	13.53	12.59	11.67	2-м
56835.481	14.92	13.55	12.60	11.66	2-м
56837.392	15.13	13.77	12.82	11.79	ШМИТ
56838.374	15.14	13.79	12.85	11.82	ШМИТ
56859.459	14.96	13.62	12.71	11.67	60-см
56860.469	14.95	13.60	12.71	11.69	60-см
56863.425	15.22	13.84	12.84	11.83	ШМИТ
56873.349	15.05	13.68	12.74	11.72	ШМИТ
56874.377	15.08	13.68	12.75	11.75	ШМИТ
56888.403	14.80	13.49	12.61	11.65	ШМИТ

56889.338	14.81	13.47	12.61	11.64	ШМИТ
56899.325	14.84	13.51	12.64	11.65	1.3-м
56988.217	14.51	13.26	12.48	11.57	ШМИТ
57005.259		13.15	12.33	11.45	ШМИТ
57006.315	14.34	13.14	12.32	11.45	ШМИТ
57016.251	14.41	13.16	12.29	11.49	2-м
57017.202	14.40	13.10	12.28	11.51	2-м
57074.579	14.60	13.32	12.52	11.59	ШМИТ
57136.511	14.71	13.41	12.60	11.66	ШМИТ
57138.450	14.54	13.27	12.47	11.56	ШМИТ
57162.406	14.47	13.23	12.42	11.52	ШМИТ
57164.479	14.58	13.31	12.47	11.59	ШМИТ
57167.433	14.52	13.21	12.41	11.57	2-м
57186.480	14.66	13.40	12.55	11.64	ШМИТ
57187.498	14.68	13.39	12.54	11.66	2-м
57190.410	14.48	13.16	12.37	11.53	2-м
57220.402	14.30	13.02	12.21	11.40	ШМИТ
57221.459	14.22	13.05	12.25	11.44	ШМИТ
57223.437	14.37	13.08	12.29	11.50	2-м
57246.395	14.83	13.48	12.62	11.74	1.3-м
57247.411	14.71	13.37	12.52	11.66	1.3-м
57259.363	15.86	14.67	13.71	12.59	ШМИТ
57260.404	15.93	14.65	13.81	12.81	ШМИТ
57269.401	15.45	14.03	13.05	11.94	ШМИТ
57271.468	15.04	13.57	12.63	11.71	2-м
57330.255	15.20	13.87	12.93	11.89	ШМИТ
57331.274	15.26	13.93	13.00	11.97	ШМИТ
57332.264	15.34	14.00	13.08	12.05	ШМИТ
57333.265	15.39	14.04	13.12	12.08	ШМИТ
57334.244	15.41	14.08	13.18	12.11	ШМИТ
57369.257	14.63	13.29	12.47	11.61	2-м
57370.229	14.62	13.23	12.45	11.59	2-м
57371.224	14.59	13.27	12.44	11.61	2-м
57372.241	14.63	13.34	12.47	11.58	ШМИТ
57374.299	14.73	13.42	12.51	11.58	ШМИТ
57425.221	15.18	13.82	12.94	11.94	ШМИТ
57426.226	15.22	13.88	12.97	11.99	ШМИТ
57483.462	14.47	13.19	12.39	11.52	2-м
57484.48	14.44	13.20	12.38	11.52	2-м
57522.460	14.69	13.39	12.58	11.63	ШМИТ
57523.448	14.70	13.39	12.57	11.63	ШМИТ
57540.447	14.89	13.43	12.55	11.65	2-м

57565.485	14.92	13.56	12.69	11.67	ШМИТ
57581.424	14.75	13.41	12.58	11.64	ШМИТ
57582.459	14.67	13.38	12.56	11.62	ШМИТ
57583.434	14.74	13.41	12.57	11.63	ШМИТ
57603.384	14.88	13.47	12.63	11.74	2-м
57605.412	14.88	13.54	12.72	11.74	ШМИТ
57607.392	14.72	13.40	12.60	11.65	ШМИТ
57664.304	14.57	13.28	12.52	11.63	ШМИТ
57698.280	14.31	13.07	12.32	11.47	ШМИТ
57714.306	14.48	13.16	12.38	11.57	2-м
57715.272	14.39	13.12	12.35	11.53	2-м
57716.286	14.38	13.10	12.32	11.50	2-м
57755.231	15.68	14.29	13.39	12.29	ШМИТ
57756.243	15.64	14.26	13.34	12.24	ШМИТ
57781.221	15.16	13.81	12.93	11.87	ШМИТ
57782.230	15.19	13.82	12.85	11.90	2-м
57784.227		13.75	12.81	11.86	2-м
57785.251	15.17	13.75	12.83	11.89	2-м
57786.222	15.20	13.77	12.86	11.91	2-м
57800.205	15.00	13.67	12.81	11.80	ШМИТ
57801.208	14.98	13.64	12.78	11.79	ШМИТ
57817.531	14.54	13.28	12.51	11.57	ШМИТ
57845.516	14.35	13.15	12.39	11.51	ШМИТ
57846.547	14.57	13.34	12.57	11.68	ШМИТ
57892.498	14.76	13.50	12.71	11.79	ШМИТ
57893.573	14.83	13.53	12.72	11.87	2-м
57904.451	14.56	13.30	12.50	11.65	ШМИТ
57967.438			12.50	11.60	ШМИТ
57968.369	14.54	13.27	12.49	11.61	ШМИТ
57969.371	14.46	13.17	12.39	11.55	ШМИТ
58011.342	14.81	13.51	12.65	11.71	ШМИТ
58012.352	14.93	13.58	12.72	11.74	ШМИТ
58013.348	14.88	13.55	12.69	11.75	ШМИТ
58039.325			12.51	11.61	ШМИТ
58043.304	14.59	13.27	12.48	11.62	ШМИТ
58080.294	16.27	14.81	13.83	12.66	ШМИТ
58081.311	16.39	14.95	13.98	12.85	ШМИТ
58109.346	15.61	14.18	13.29	12.20	ШМИТ
58113.284	15.50	14.08	13.16	12.09	ШМИТ
58114.287	15.63	14.18	13.27	12.18	ШМИТ
58217.551	15.08	13.79	12.96	11.97	ШМИТ
58218.535	15.09	13.79	12.95	11.95	ШМИТ

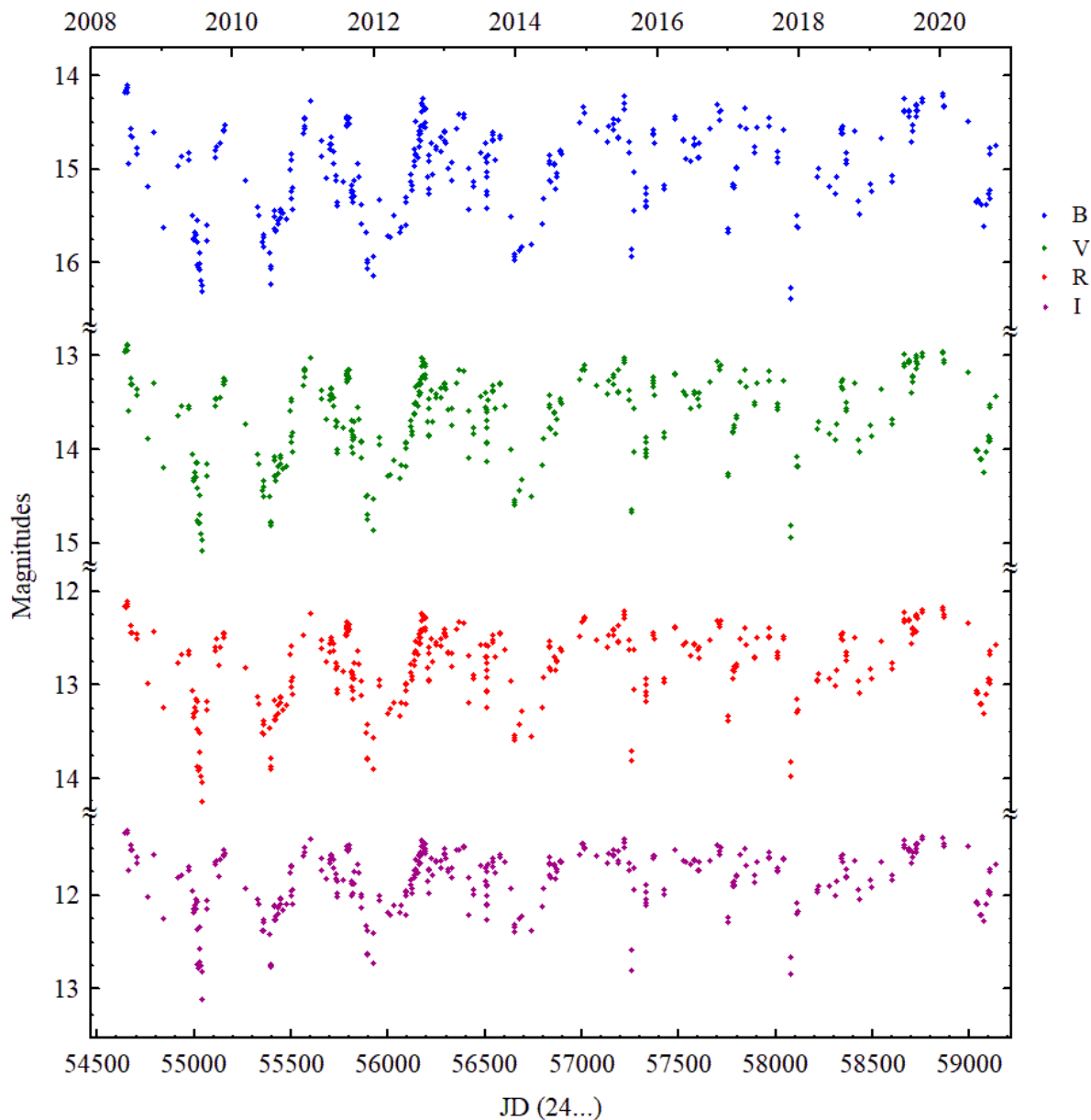
58220.493	15.00	13.71	12.89	11.91	ШМИТ
58278.436	15.19	13.84	12.94	11.91	ШМИТ
58312.365	15.27	13.90	13.02	12.00	ШМИТ
58316.323	15.09	13.74	12.85	11.85	ШМИТ
58340.393	14.62	13.33	12.51	11.61	ШМИТ
58342.379	14.58	13.28	12.46	11.58	ШМИТ
58343.391	14.58	13.29	12.47	11.59	ШМИТ
58344.388	14.55	13.26	12.45	11.57	ШМИТ
58346.344	14.62	13.36	12.53	11.64	2-м
58363.360	14.94	13.60	12.74	11.82	ШМИТ
58364.323	14.83	13.50	12.66	11.73	ШМИТ
58365.533	14.90	13.56	12.69	11.80	2-м
58409.220	14.60	13.29	12.49	11.64	ШМИТ
58428.174	15.34	13.90	12.97	11.95	ШМИТ
58435.295	15.49	14.04	13.09	12.04	ШМИТ
58492.225	15.16	13.75	12.84	11.84	ШМИТ
58496.201	15.24	13.87	12.94	11.92	ШМИТ
58547.625	14.68	13.36	12.54	11.65	ШМИТ
58603.481	15.14	13.74	12.83	11.84	ШМИТ
58604.532	15.07	13.68	12.77	11.79	ШМИТ
58665.455	14.25	12.98	12.22	11.41	ШМИТ
58666.459	14.38	13.10	12.31	11.47	ШМИТ
58667.494	14.40	13.12	12.33	11.49	ШМИТ
58690.370	14.38	13.08	12.31	11.50	2-м
58691.450	14.39	13.06	12.31	11.51	2-м
58692.389	14.44	13.06	12.31	11.54	2-м
58704.371	14.72	13.40	12.56	11.66	ШМИТ
58705.404	14.60	13.29	12.46	11.60	ШМИТ
58706.402	14.53	13.23	12.41	11.55	ШМИТ
58707.476	14.53	13.21	12.40	11.54	ШМИТ
58726.384	14.44	13.14	12.44	11.55	2-м
58727.428	14.38	13.07	12.28	11.51	2-м
58728.465	14.33	13.00	12.26	11.46	2-м
58729.395	14.32	13.02	12.27	11.47	2-м
58730.464	14.38	13.09	12.30	11.46	ШМИТ
58758.414	14.25	12.97	12.20	11.38	ШМИТ
58759.461	14.29	13.01	12.23	11.41	ШМИТ
58864.243	14.22	12.97	12.20	11.39	ШМИТ
58865.243	14.20	12.96	12.18	11.39	ШМИТ
58869.221	14.33	13.05	12.26	11.48	2-м
58870.238	14.34	13.07	12.28	11.46	ШМИТ
58993.457	14.49	13.18	12.35	11.49	ШМИТ

59040.398	15.34	14.00	13.07	12.07	ШМИТ
59041.413	15.36	14.02	13.09	12.09	ШМИТ
59042.403	15.33	14.02	13.09	12.10	ШМИТ
59059.412	15.37	14.10	13.21	12.22	ШМИТ
59060.436	15.39	14.11	13.21	12.21	ШМИТ
59075.371	15.61	14.25	13.31	12.28	2-м
59085.314	15.39	14.03	13.10	12.10	ШМИТ
59101.456	15.27	13.91	12.98	11.98	ШМИТ
59102.383	15.27	13.87	12.94	11.95	2-м
59103.464	15.32	13.91	12.99	12.00	2-м
59105.338	15.23	13.89	12.96	11.97	ШМИТ
59108.400	14.78	13.55	12.68	11.76	ШМИТ
59109.350	14.84	13.52	12.64	11.73	ШМИТ
59136.280	14.76	13.44	12.58	11.67	ШМИТ

Обобщените резултати на фотометричните BVRI данни (виж графиките на Фигура 37) от над 12-годишния период на наблюдения показват продължаваща много силна променливост на блясъка на GM Cep, 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 32).

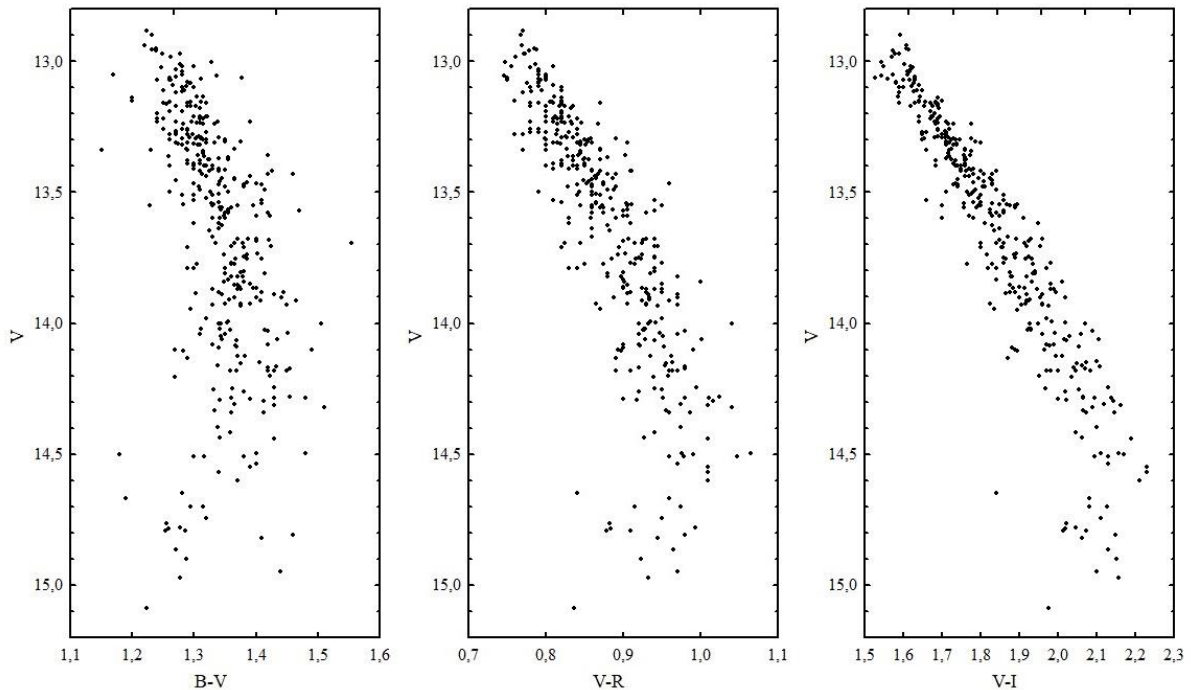
През периода юни 2008 – октомври 2020 г. регистрирахме девет дълбоки минимума на блясъка: първите два минимума наблюдавани през 2009 г. и 2010 г. са с продължителност от един до два месеца, третия (2011/2012) и петия (2013/2014) минимум са с продължителност около половин година, а четвъртият минимум (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 минимума GM Cep показва и значителни вариации на блясъка.



Фигура 37. BVRI криви на блясъка на GM Сер за целия период на нашето фотометрично наблюдение (2008 - 2020 г.)

На Фигура 38 са показани съответно диаграми цвят-величина V/B-V, V/V-R и V/V-I. Събраните многоцветни фотометрични данни показват типичното за UXор 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 25, Фигура 26 и Фигура 27). Това е типична характеристика на звездите преди ГП от типа UXор. 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 38. Диаграмите цвят-величина $V/B - V$, $V/V - R$ и $V/V - I$ на GM Сер 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 (виж Фигура 25, Фигура 26 и Фигура 27).

Въз основа на данните от нашите многогодишни многоцветни фотометрични наблюдения можем да потвърдим, че променливостта на GM Сер 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

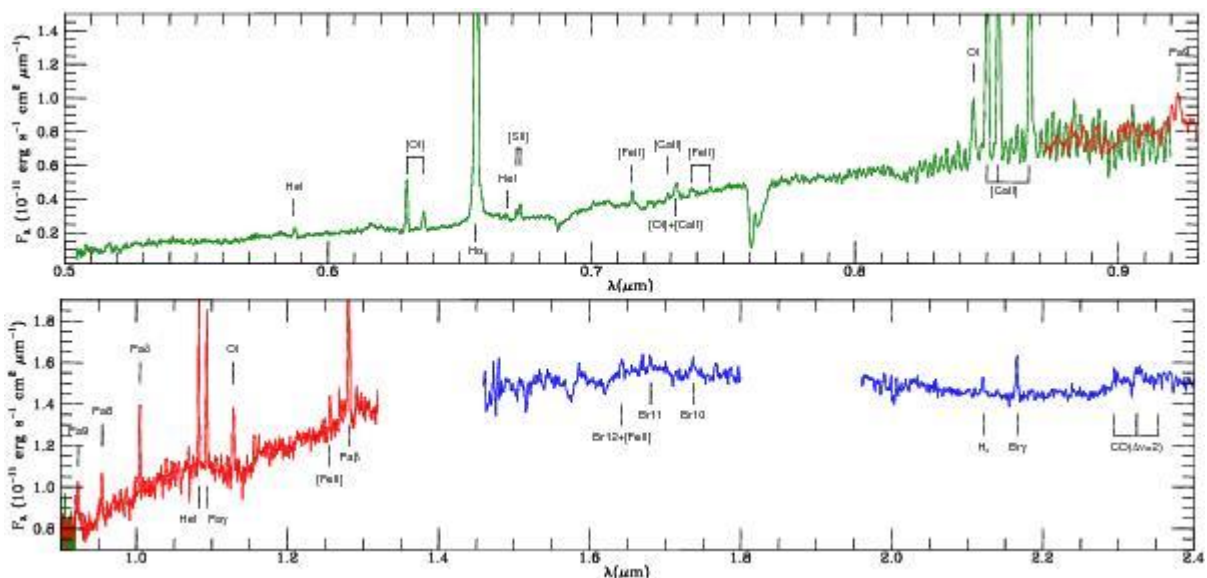
За първи път звездата V1180 Cas е определена като млад променлив обект със силна $H\alpha$ емисия от Kun et al. (1994). Тя е свързана с тъмния облак Lynds 1340 в района на формиране на звезди в Касиопея (Lynds (1962)). Lynds 1340 е малък тъмен облак с площ 0,001 квадратни градуса, разположен на разстояние 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. (I_c 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 $T_{\text{eff}} = 4060$ K от спектрален тип K7; еквивалентните ширини на H α варират от 300 до 900 Å и темп на акреция на маса като $>1,6 \times 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$ (CaII 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.

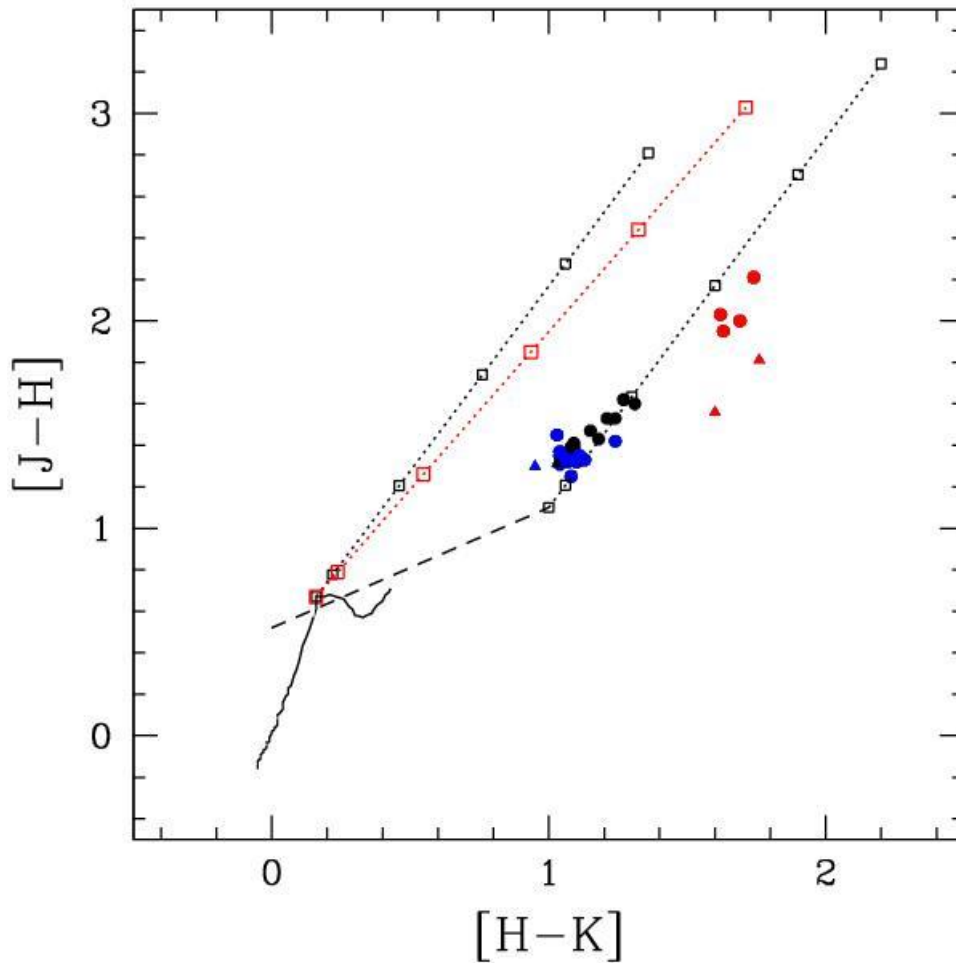
Близкият инфрачервен мониторинг на обекта за периода септември - август 2013 г. е докладван от Antoniucci et al. (2013). Авторите разпознават две големи избухвания и чертаят двуцветната диаграма [J-H] срещу [H-K]. Според тях описанието на цветовата вариация не може да бъде само чисто поглъщане, което 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 $3 \times 10^{-8} M_{\odot}/\text{год}$. (виж Фигура 39 и Фигура 40). 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).

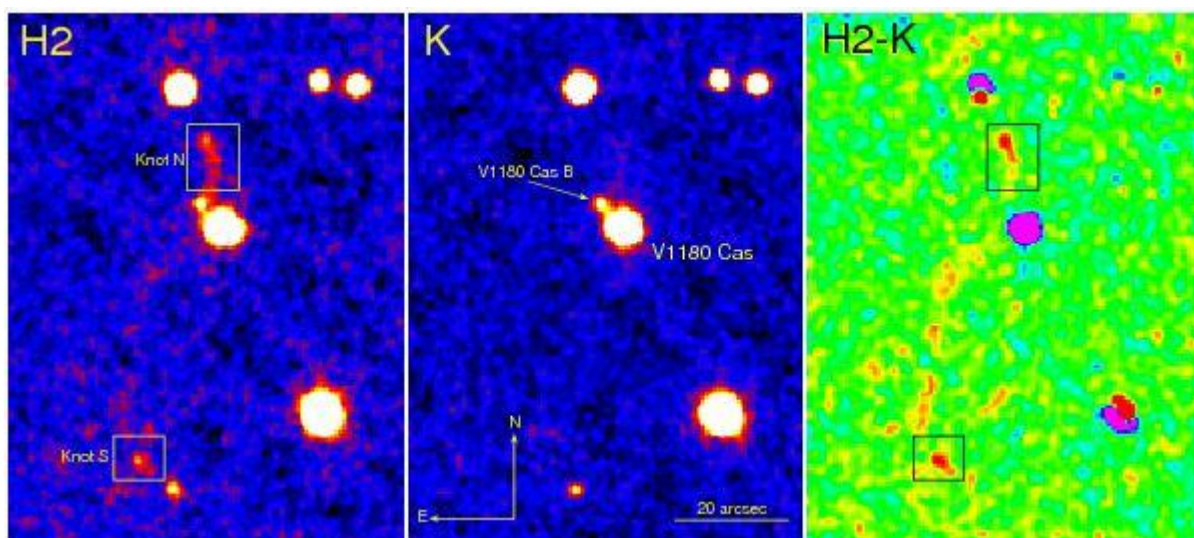


Фигура 39. V1180 Cas оптичен (отгоре) и близък инфрачервен (отдолу) спектър с обозначени основни емисионни характеристики (Antoniucci et al. (2014)).

Antoniucci et al. (2014) използвайки получените изображения в H2 и K-филтри в полето около V1180 Cas регистрират още един обект. На Фигура 41 са показани позициите на V1180 Cas и V1180 Cas B (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 $K = 14,6$ mag и $H > 15,1$ 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.



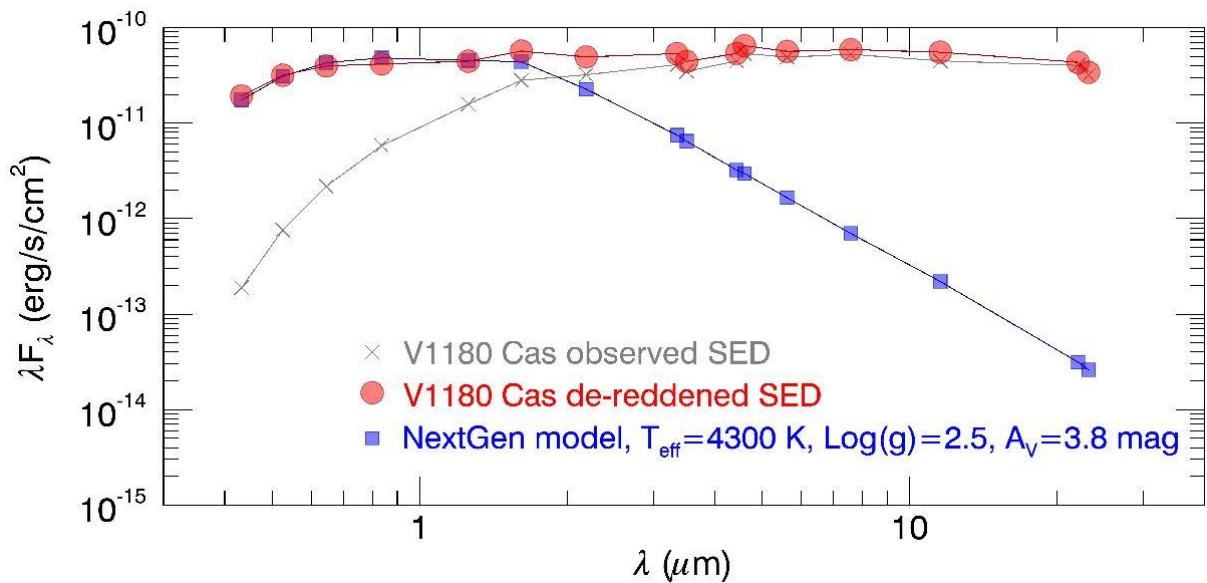
Фигура 40. Двухцветна графика на V1180 Cas в близкия инфрачервен диапазон. Със син цвят са означени данните за $J < 13.50 \text{ mag}$ и с червен цвят – за $J > 15.5 \text{ mag}$. С кръг са данните от (Antoniucci et al. (2014)), с триъгълник са показани резултатите от 2MASS (Skrutskie et al. (2006)) и K11 (V1180 Cas). С пълтна линия е показан цвета на звездите от ГП, с пунктирна линия – геометричното място на звездите от тип T Tau (Meuer et al. (1997)). С точкова линия са показани векторите на екстинкцията от Rieke & Lebofsky ((1985); черни) и Cardelli et al. ((1989); червени), с квадратчета са маркирани позициите съответстващи на $AV = 0, 1, 5, 10, 15, \text{ и } 20 \text{ mag}$. (Antoniucci et al. (2014)).



Фигура 41. Изображение на областта около V1180 Cas направено в *Campo Imperatore* (показаното поле е $70'' \times 90''$). Тесноивично H2 изображение, изображение в K-филтър, и разликата H2 – K са показани в ляво, средата и дясно съответно (Antoniucci et al. (2014)).

Първите рентгенови наблюдения на V1180 Cas са докладвани в статията на Antoniucci 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 42).



Фигура 42. 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).

Резултатите от нашите многоцветни фотометрични CCD наблюдения на V1180 Cas в периода от септември 2011 г. до февруари 2022 г. са обобщени в Таблица 9.

Колоните предоставят юлианската дата (JD) на наблюдение, VRI величини и използвания телескоп. В колоната Телескоп съкращението 2-m означава 2-m Ричи-Кретиен-Куде, Шмит - 50/70-см Шмит телескоп, 60-см - 60-см телескоп Касегрен и 1,3-m - 1,3-m Ричи-Кретиен телескоп.

Стойностите на инструменталните грешки са в диапазона $0.^m01$ - $0.^m02$ (за I и R) и $0.^m01$ - $0.^m03$ (за V). VRI-светлинните криви на V1180 Cas през периода на нашите наблюдения са нанесени на Фигура 43. В повечето случаи размерът на грешките е по-малък от размера на използваните символи.

Таблица 9. VRI фотометрични наблюдения на V1180 Cas за периода септември 2011 г. - февруари 2022 г.

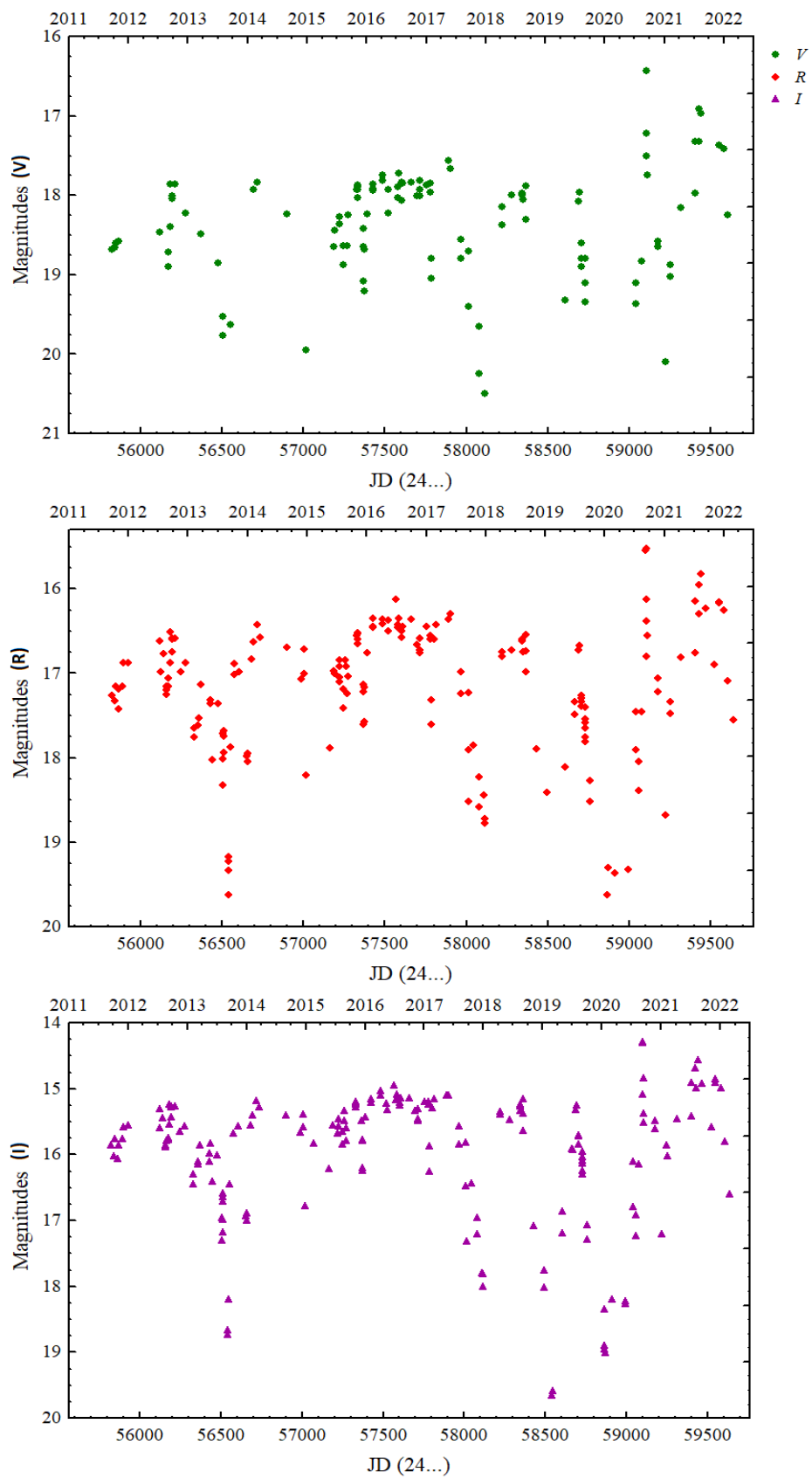
J.D. (24...)	V	R	I	Tel
55824.45	18.68	17.26	15.86	1.3-м
55842.39	18.66	17.33	16.02	1.3-м
55848.40	18.60	17.16	15.76	1.3-м
55865.40		17.42	16.06	2-м
55866.50	18.58	17.19	15.85	2-м
55892.34		17.15	15.76	2-м
55896.35		16.88	15.58	Шмит
55925.33		16.87	15.55	Шмит
56122.52	18.46	16.62	15.30	Шмит
56123.51		16.98	15.60	Шмит
56141.54		16.77	15.44	1.3-м
56159.50		17.20	15.86	Шмит
56160.50		17.25	15.88	Шмит
56161.52		17.15	15.79	Шмит
56173.47	18.72	17.06	15.74	1.3-м
56174.48	18.90	17.15	15.77	1.3-м
56182.41	18.40	16.87	15.54	1.3-м
56183.46	17.86	16.51	15.23	1.3-м
56193.45	18.01	16.59	15.28	1.3-м
56193.47	18.04	16.60	15.27	Шмит
56194.46		16.75	15.43	Шмит
56214.33	17.86	16.59	15.26	2-м
56249.37		16.98	15.65	Шмит
56275.37	18.22	16.87	15.57	2-м
56328.37		17.76	16.44	Шмит
56329.29		17.65	16.30	Шмит
56356.29		17.62	16.14	60-см
56357.29		17.53	16.10	60-см
56371.29	18.49	17.13	15.85	2-м
56428.52		17.36	16.11	60-см
56430.50			15.98	60-см
56432.49		17.32	15.83	60-см
56444.55		18.02	16.41	Шмит
56478.53	18.85	17.36	16.00	2-м
56507.52	19.76	18.32	17.30	2-м
56508.51	19.53	18.01	16.95	2-м
56509.47		17.71	16.59	Шмит
56510.49		17.74	16.71	Шмит

56510.55		17.68	16.64	60-см
56511.51			16.99	ШМИТ
56512.49		17.94	17.18	ШМИТ
56540.46		19.17	18.66	ШМИТ
56541.49		19.23	18.73	ШМИТ
56543.48	20.82	19.62		2-м
56544.45	20.81	19.33	18.20	2-м
56553.45	19.63	17.87	16.44	1.3-м
56577.54		16.89	15.67	60-см
56578.55		17.02	15.68	60-см
56604.48		16.98	15.57	60-см
56655.32		17.98	16.93	ШМИТ
56656.47		17.95	16.88	ШМИТ
56657.27		18.05	17.00	ШМИТ
56681.32		16.83	15.55	ШМИТ
56694.26	17.93	16.63	15.40	2-м
56715.40	17.83	16.42	15.18	ШМИТ
56738.36		16.57	15.28	ШМИТ
56899.46	18.24	16.69	15.40	1.3-м
56988.29		17.07	15.66	ШМИТ
57005.34		17.00	15.58	ШМИТ
57006.43		16.71	15.39	ШМИТ
57016.39	19.95	18.21	16.78	2-м
57074.23			15.83	ШМИТ
57164.55		17.88	16.21	ШМИТ
57187.55	18.65	16.97	15.55	2-м
57190.54	18.44	17.01	15.55	2-м
57220.52		17.05	15.67	ШМИТ
57221.54		17.10	15.67	ШМИТ
57223.54	18.36	16.92	15.56	2-м
57224.53	18.27	16.84	15.45	2-м
57246.53	18.88	17.41	15.84	1.3-м
57247.48	18.64	17.19	15.65	1.3-м
57259.45		16.84	15.33	ШМИТ
57260.47		16.92	15.48	ШМИТ
57271.49	18.64	17.24	15.79	2-м
57272.47	18.25	17.04	15.59	2-м
57330.34	17.93	16.55	15.24	ШМИТ
57331.36	17.89	16.60	15.23	ШМИТ
57332.35	18.03	16.65	15.28	ШМИТ
57333.33	17.93	16.52	15.22	ШМИТ
57334.32	17.87	16.53	15.20	ШМИТ
57369.31	18.42	17.13	15.49	2-м
57370.37	19.08	17.60	16.24	2-м
57371.34	18.65	17.22	15.79	2-м

57372.33	19.20	17.57	16.20	ШМИТ
57374.34	18.68	17.17	15.77	ШМИТ
57390.23	18.24	16.76	15.43	ШМИТ
57425.39	17.92	16.45	15.21	ШМИТ
57426.40	17.94	16.46	15.21	ШМИТ
57427.37	17.86	16.35	15.16	ШМИТ
57483.60	17.75	16.36	15.03	2-м
57484.60	17.81	16.41	15.10	2-м
57522.54	17.93	16.37	15.22	ШМИТ
57523.54	18.22	16.50	15.32	ШМИТ
57565.53		16.12	14.95	ШМИТ
57581.52	18.03	16.42	15.17	ШМИТ
57582.55	17.89	16.46	15.16	ШМИТ
57583.53	17.72	16.35	15.09	ШМИТ
57603.49	17.84	16.50	15.21	2-м
57605.49	18.07	16.57	15.25	ШМИТ
57607.47	17.85	16.45	15.14	ШМИТ
57664.46	17.84	16.36	15.14	ШМИТ
57698.36	18.01	16.66	15.33	ШМИТ
57714.43	17.81	16.59	15.31	2-м
57715.42	18.01	16.76	15.45	2-м
57716.43	17.93	16.73	15.48	2-м
57756.33	17.87	16.45	15.20	ШМИТ
57781.26	17.96	16.55	15.20	ШМИТ
57782.33	17.85	16.60	15.23	2-м
57785.28	19.05	17.61	16.25	2-м
57786.31	18.80	17.32	15.87	2-м
57801.26		16.60	15.29	ШМИТ
57817.23		16.43	15.16	ШМИТ
57893.54	17.56	16.36	15.10	2-м
57904.54	17.66	16.30	15.10	ШМИТ
57968.49	18.80	17.24	15.84	ШМИТ
57969.47	18.56	16.98	15.57	ШМИТ
58011.43	18.70	17.23	15.82	ШМИТ
58012.43	19.40	17.91	16.47	ШМИТ
58013.46	22.81	18.52	17.31	ШМИТ
58043.41		17.85	16.43	ШМИТ
58080.39	19.65	18.23	16.95	ШМИТ
58081.40	20.24	18.58	17.21	ШМИТ
58109.42		18.44	17.80	ШМИТ
58113.34	20.50	18.72	17.81	ШМИТ
58114.35		18.77	18.00	ШМИТ
58220.58	18.14	16.75	15.34	ШМИТ
58220.59	18.37	16.80	15.39	2-м
58278.52	18.00	16.73	15.47	ШМИТ

58343.47	18.00	16.60	15.24	ШМИТ
58344.47	17.97	16.62	15.26	ШМИТ
58346.49	18.05	16.75	15.34	2-м
58363.50	17.88	16.54	15.16	ШМИТ
58364.44		16.74	15.38	ШМИТ
58365.45	18.30	16.99	15.63	2-м
58428.32		17.90	17.08	ШМИТ
58492.26		18.41	17.75	ШМИТ
58496.28			18.01	ШМИТ
58543.38			19.65	ШМИТ
58544.24			19.58	2-м
58604.56			17.20	ШМИТ
58606.56	19.32	18.11	16.86	2-м
58666.52		17.34	15.92	ШМИТ
58667.55		17.48	15.92	ШМИТ
58690.52	18.08	16.73	15.32	2-м
58691.56	17.96	16.68	15.25	2-м
58704.50	18.90	17.39	15.84	ШМИТ
58705.49	18.60	17.27	15.72	ШМИТ
58706.50	18.80	17.34	15.70	ШМИТ
58707.52	18.80	17.29	15.71	ШМИТ
58726.48	18.80	17.40	15.95	2-м
58727.51		17.54	16.03	2-м
58728.59		17.82	16.30	2-м
58729.48	19.34	17.76	16.23	2-м
58730.51	19.10	17.58	16.09	2-м
58730.57		17.65	16.13	ШМИТ
58758.26		18.52	17.29	ШМИТ
58759.41		18.27	17.06	ШМИТ
58864.32			18.95	ШМИТ
58865.33			18.35	ШМИТ
58867.29	20.75	19.62	18.90	2-м
58870.32		19.30	19.00	ШМИТ
58909.25		19.37	18.20	ШМИТ
58993.55			18.22	ШМИТ
58993.53		19.32	18.27	2-м
59041.51	19.10	17.46	16.11	ШМИТ
59042.50	19.37	17.91	16.79	ШМИТ
59059.44		18.39	17.24	ШМИТ
59060.51		18.05	16.92	ШМИТ
59075.34	18.83	17.46	16.14	2-м
59101.50		15.55	14.29	ШМИТ
59102.40	16.43	15.52	14.30	2-м
59103.43	17.50	16.38	15.08	2-м
59104.45		16.80	15.51	ШМИТ

59105.47	17.22	16.13	14.83	ШМИТ
59109.44	17.75	16.55	15.37	ШМИТ
59176.34	18.65	17.22	15.60	ШМИТ
59177.36	18.58	17.06	15.48	ШМИТ
59220.31	20.10	18.68	17.21	2-м
59250.32	18.88	17.34	15.86	2-м
59251.27	19.02	17.48	16.02	2-м
59314.58	18.16	16.81	15.45	2-м
59402.53	17.97	16.76	15.41	2-м
59403.51	17.33	16.15	14.90	ШМИТ
59426.50	16.91	15.95	14.69	2-м
59428.52	17.32	16.30	14.99	2-м
59441.50	16.97	15.83	14.57	ШМИТ
59468.45		16.23	14.93	ШМИТ
59523.33		16.90	15.58	ШМИТ
59549.37	17.37	16.15	14.91	ШМИТ
59550.34	17.36	16.16	14.86	ШМИТ
59582.32	17.42	16.26	14.99	ШМИТ
59605.30	18.24	17.10	15.80	2-м
59636.25		17.55	16.60	ШМИТ



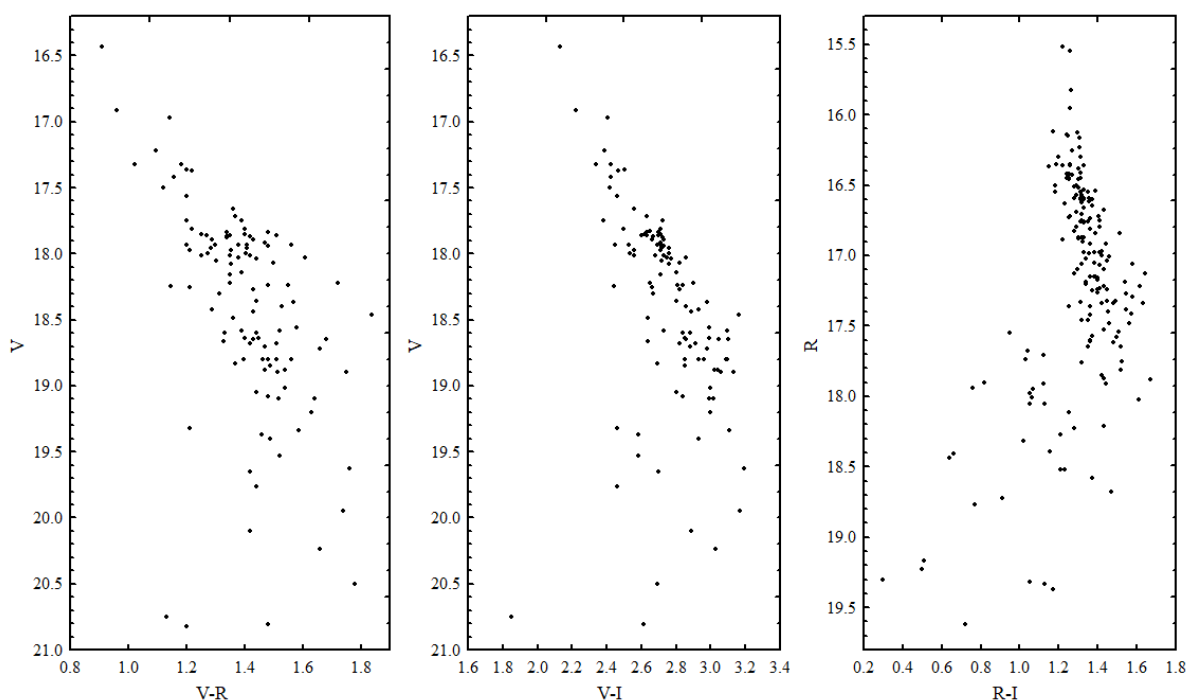
Фигура 43: VRI криви на бляска на звездата V1180 Cas в периода септември 2011 г. - февруари 2022 г.

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), Antonucci 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 Тау 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 44.



Фигура 44: 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 (виж Фигура 25, Фигура 26 и Фигура 27).

Фигура 44 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 Сер 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 44), 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 са наблюдения на звездата GM Cep през 386 наблюдателни нощи в периода юни 2008 – октомври 2020 г.
2. Проведени са наблюдения на звездата V1180 Cas през 193 наблюдателни нощи в периода септември 2011 г. - февруари 2022 г.
3. С цел постигане на висока точност на фотометричните изследвания в полето на звездата V1180 Cas са калибрирани 8 вторични VRI стандартни звезди.

Основните научни приноси на дисертационния труд могат да бъдат обобщени както следва:

1. През периода юни 2008 – октомври 2020 г. са регистрирани девет дълбоки минимума на блясъка на GM Cep: през 2009 г., през 2010 г., 2011/2012 г., 2013/2014 г., август 2013г., август 2015 г., януари 2017 г., ноември 2017 г., август 2020 г.
2. Във времевата скала от дни и месеци извън дълбоките минимума GM Cep показва и значителни вариации на блясъка.
3. Събраните многоцветни фотометрични данни за GM Cep показват типичното за UXor обръщане на цветовете по време на минимумите на яркостта. 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.
4. За всяка от цветните диаграми точката 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.

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.

5. През в периода септември 2011 г. - февруари 2022 г. са регистрирани четири дълбоки минимума на блясъка в светлинната крива на V1180 Cas: през септември 2013 г., през декември 2017 г., през февруари-март 2019 г. и през януари 2020 г.
6. През по-голямата част от времето блясъка на звездата в I-филтър е в диапазона от 15-16 mag. През тези периоди обаче има промени в блясъка с малки амплитуди, което е характерно за T Tau звездите. 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.
7. Събраните многоцветни фотометрични данни за V1180 Cas показват типичното за UXors обръщане на цветовете по време на минимумите на яркостта. 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.

8. 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 яркостта изглежда е причинено от повишена акреция. Доказателство за това е намаляването на цветовите индекси (V-R и V-I) на звездата, по време на увеличаване на яркостта.

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 укорите 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 ВРУ (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.
- Ábrahám, P., Juhász, A., Dullemond, C. P., Kóspál, Á., van Boekel, R., Bouwman, J., Henning, Th., Moór, A., Mosoni, L., Sicilia-Aguilar, A. & Sipos N. "Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star." *Nature* 459 (2009): 224.
- 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.
- Alecian E, Wade GA, Catala C, Grunhut JH, Landstreet JD, Bagnulo S, Böhm T, Folsom CP, Marsden S, Waite I. "A high-resolution spectropolarimetric survey of Herbig Ae/Be stars - I. Observations and measurements." *MNRAS* 429 (2013): 1001.
- Ambartsumian, V. A. *Astrophysics* 7 (1971): 331.
- Ansdell, M., Williams, J. P., van der Marel, N., Carpenter, J. M., Guidi, G., Hogerheijde, M., Mathews, G. S., Manara, C. F., Miotello, A., Natta, A., Oliveira, I., Tazzari, M., Testi, L., van Dishoeck, E. F. and van Terwisga S. E. "ALMA SURVEY OF LUPUS PROTOPLANETARY DISKS. I. DUST AND GAS MASSES." *ApJ* 828 (2016): 46.
- 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., Giannini, T., & Lorenzetti, D. "WISE photometry of EXOr sources and candidates." *New Astron* 23 (2013a): 98.
- 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.
- Appenzeller, I., Mundt, R. *A&A Rev*, 1989: 291.
- Arkharov. A. A., Larionov, V.M., Efimova, N.V., Klimanov, S.A. "Photometric activity of the EXORs type stars." *The 2-nd international Workshop "The UX Ori type stars and related topics"*. St. Petersburg, 2019.
- Armitage, P., Livio, M., & Pringle, J. "Episodic accretion in magnetically layered protoplanetary discs." *MNRAS* 324 (2001): 705.

- Arun R, Mathew B, Manoj P, Ujjwal K, Kartha SS, Viswanath G, Narang M, Paul KT . "On the Mass Accretion Rate and Infrared Excess in Herbig Ae/Be Stars." *AJ* 157, no. 4 (2019): 159.
- Avenhaus H, Quanz SP, Schmid HM, Dominik C, Stolker T, Ginski C, de Boer J, Szul'agyi J, Garufi A, Zurlo A, Hagelberg J, Benisty M, Henning T, M'enard F, Meyer MR, Baruffolo A, Bazzon A, Beuzit JL, Costille A, Dohlen K, Girard JH, Gisler D, Kasper M et al. "Exploring Dust around HD 142527 down to 0."025 (4 au) Using SPHERE/ZIMPOL." *AJ* 154, no. 1 (2017): 33.
- B., McLaughlin D. "THE NOVA-LIKE VARIABLE STAR HV 11976." *AJ* 52 (1946): 109.
- 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.
- Baines, D., Oudmaijer, R.D., Porter, J.M., Pozzo, M. "On the binary of Herbig Ae/Be stars." *MNRAS* 367 (2006): 737.
- Banzatti A, Garufi A, Kama M, Benisty M, Brittain, S, Pontoppidan KM, Rayner J. "Observing the linked depletion of dust and CO gas at 0.1-10 au in disks of intermediate-mass stars." *A&A* 609 (2018): L2.
- Baraffe, I., Vorobyov, E., & Chabrier, G. "OBSERVED LUMINOSITY SPREAD IN YOUNG CLUSTERS AND FU Ori STARS: A UNIFIED PICTURE." *ApJ* 756 (2012): A118.
- 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.
- Behrend R, Maeder A. "Formation of massive stars by growing accretion rate." *A&A* 373 (2001): 190.
- Bell, K. R., & Lin, D. "Using FU Orionis Outbursts to Constrain Self-regulated Protostellar Disk Models." *ApJ* 427 (1994): 987.
- Bell, K. R., Lin, D. N. C., Hartmann, L., Kenyon, S. J. *ApJ* 444 (1995): 376.
- Benisty M, Juhasz A, Boccaletti A, Avenhaus H, Milli J, Thalmann C, Dominik C, Pinilla P, Buenzli E, Pohl A, Beuzit JL, Birnstiel T, de Boer J, Bonnefoy M, Chauvin G, Christiaens V, Garufi A, Grady C, Henning T, Huelamo N, Isella A, Langlois M, et al. "Asymmetric features in the protoplanetary disk MWC 758." *A&A* 578 (2015): L6.
- Bertout, C. "T Tauri Stars: Wild as Dust." *ARA&A* 27 (1989): 351.
- 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. . "The type of variability of Herbig Ae/Be stars." *A&AS* 89 (1991): 319.
- 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.

- Blinova, A. A., Romanova, M. M., & Lovelace, R. V. E. "Boundary between stable and unstable regimes of accretion. Ordered and chaotic unstable regimes." *MNRAS* 459, no. 3 (2016): 2354.
- Bonnell, I., & Bastien, P. "A Binary Origin for FU Orionis Stars." *ApJL* 401 (1992): L31.
- Bosman AD, Banzatti A, Bruderer S, Tielens AGGM, Blake GA, van Dishoeck EF. "Probing planet formation and disk substructures in the inner disk of Herbig Ae stars with CO rovibrational emission." *A&A* 631 (2019): A133.
- Bouvier, J. ; Chelli, A. ; Allain, S. ; Carrasco, L. ; Costero, R. ; Cruz-Gonzalez, I. ; Dougados, C. ; Fernández, M. ; Martín, E. L. ; Ménard, F. ; Mennessier, C. ; Mujica, R. ; Recillas, E. ; Salas, L. ; Schmidt, G. ; Wichmann, R. "Magnetospheric accretion onto the T Tauri star AA Tauri. I. Constraints from multisite spectrophotometric monitoring." *A&A* 349 (1999): 619.
- Bouvier, j., Covino, E., Kovo, O., Martin, E.L., Matthews, J.M., Terranegra, L., Beck, S.C. *A&A* 299 (1995): 89.
- Bouvier, J., Grankin, K. N., Alencar, S. H. P., Dougados, C., Fernández, M., Basri, G., Batalha, C., Guenther, E., Ibrahimov, M. A., Magakian, T. Y., Melnikov, S. Y., Petrov, P. P., Rud, M. V. and Osorio, M. R. Z. "Eclipses by circumstellar material in the T Tauri star AA Tau." *A&A* 409 (2003): 169.
- Bouvier, J., Grankin, K., Ellerbroek, L. E., Bouy, H., & Barrado, D. "AA Tauri's sudden and long-lasting deepening: enhanced extinction by its circumstellar disk." *A&A* 557 (2013): A77.
- Bressan, A. ; Marigo, P. ; Girardi, L. ; Salasnich, B. ; Dal Cero, C. ; Rubele, S. ; Nanni, A. "PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code." *MNRAS* 427, no. 1 (2012): 127.
- 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.
- C.J., Lada. "Star Formation in the Galaxy: An Observational Overview." *Progress of Theoretical Physics Supplement* 158 (2005): 1.
- Calvet N, Muzerolle J, Briceño C, Hernández J, Hartmann L, Saucedo JL, Gordon KD. "The Mass Accretion Rates of Intermediate-Mass T Tauri Stars." *AJ* 128 (2004): 1294.
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. "The Relationship between Infrared, Optical, and Ultraviolet Extinction." *ApJ* 345 (1989): 245.
- 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 Protoplanetary 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.

- Clarke, C., Lodato, G., Melnikov, S. Y., Ibrahimov, M.A. *MNRAS* 361 (2005): 942.
- Cody, A. M., & Hillenbrand, L. A. "PRECISION PHOTOMETRIC MONITORING OF VERY LOW MASS σ ORIONIS CLUSTER MEMBERS: VARIABILITY AND ROTATION AT A FEW Myr." *ApJS* 191 (2010): 389.
- Cody, A. M., Stauffer, J., Baglin, A., et al. . "CSI 2264: SIMULTANEOUS OPTICAL AND INFRARED LIGHT CURVES OF YOUNG DISK-BEARING STARS IN NGC 2264 WITH CoRoT and SPITZER—EVIDENCE FOR MULTIPLE ORIGINS OF VARIABILITY." *AJ* 147 (2014): 82.
- Connelley, M.S. and Reipurth, B. "A Near-infrared Spectroscopic Survey of FU Orionis Objects." *ApJ* 861 (2018): 145.
- 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 .
- Dame, T. M., & Thaddeus, P. "A wide-latitude CO survey of molecular clouds in the northern Milky Way." *ApJ* 297 (1985): 751.
- Dobashi, K., Bernard, J.-P., Yonekura, Y., & Fukui, Y. "Molecular Clouds in Cygnus. I. A Large-Scale 13CO Survey." *ApJS* 95 (1994): 419.
- Dong R, Liu Sy, Eisner J, Andrews S, Fung J, Zhu Z, Chiang E, Hashimoto J, Liu HB, Casassus S, Esposito T, Hasegawa Y, Muto T, Pavlyuchenkov Y, Wilner D, Akiyama E, Tamura M, Wisniewski J. "The Eccentric Cavity, Triple Rings, Twoarmed Spirals, and Double Clumps of the MWC 758 Disk." *ApJ* 860, no. 2 (2018a): 124.
- Dong R, Najita JR, Brittain S. "Spiral Arms in Disks: Planets or Gravitational Instability?" *ApJ* 862 (2018b): 103.
- 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.
- Dzib, S., Loinard, L., Mioduszewski, A. J., Boden, A. F., Rodriguez, L. F., Torres, R. M. "VLBA ASTROMETRY OF THE AeBe STAR EC 95 IN SERPENS." *RevMexAA (Serie de Conferencias)* 40 (2011): 231.
- 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., Krushevskaya, V., et al. "The stellar content of the young open cluster Trumpler 37." *AN* 334 (2013): 673.
- Fairlamb JR, Oudmaijer RD, Mendigut'ia I, Ilee JD, van den Ancker ME . "A spectroscopic survey of Herbig Ae/Be stars with X-shooter - I. Stellar parameters and accretion rates. ." *MNRAS* 453 (2015): 976.
- Fairlamb JR, Oudmaijer RD, Mendigutia I, Ilee JD, van den Ancker ME. "A spectroscopic survey of Herbig Ae/Be stars with X-Shooter - II. Accretion diagnostic lines. ." *MNRAS* 464 (2017): 4721.

- Findeisen K., Hillenbrand L., Ofek E., Levitan D., Sesar B., Laher R., Surace J. *ApJ* 768 (2013): 93.
- Finkenzeller, U., Mundt, R. "The Herbig Ae/Be stars associated with nebulosity." *A&AS* 55 (1984): 109.
- Follette KB, Rameau J, Dong R, Pueyo L, Close LM, Duch[^]ene G, Fung J, Leonard C, Macintosh B, Males JR, Marois C, Millar-Blanchaer MA, Morzinski KM, Mullen W, Perrin M, Spiro E, Wang J, Ammons SM, Bailey VP, Barman T, Bulger J, Chilcote J, Cotten T, et al. "Complex Spiral Structure in the HD 100546 Transitional Disk as Revealed by GPI and MagAO." *AJ* 153 (2017): 264.
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. "Gaia Data Release 2." *A&A* 616 (2018): A1.
- Garufi A, Quanz SP, Avenhaus H, Buenzli E, Dominik C, Meru F, Meyer MR, Pinilla P, Schmid HM, Wolf S. "Small vs. large dust grains in transitional disks: do different cavity sizes indicate a planet?. SAO 206462 (HD 135344B) in polarized light with VLT/NACO." *A&A* 560 (2013): A105.
- 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.
- Ginski C, Stolker T, Pinilla P, Dominik C, Boccaletti A, de Boer J, Benisty M, Biller B, Feldt M, Garufi A, Keller CU, Kenworthy M, Maire AL, M[^]enard F, Mesa D, Milli J, Min M, Pinte C, Quanz SP, van Boekel R, Bonnefoy M, Chauvin G, Desidera S, et al. "Direct detection of scattered light gaps in the transitional disk around HD 97048 with VLT/SPHERE." *A&A* 595 (2016): A112.
- 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.
- Graham, J., & Frogel, J. "An FU Orionis star associated with Herbig-Haro object 57." *ApJ* 289 (1985): 331.
- 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.
- Grinin, V. P. *Aston. Astrophys. Trans.* 3 (1992): 1.
- Grosso, N., Hamaguchi, K., Kastner, J. H., Richmond, M. W. and Weintraub, D. A. "few days before the end of the 2008 extreme outburst of EX Lupi: accretion shocks and a smothered stellar corona unveiled by XMM-Newton." *A&A* 522 (2010): A56.
- Gullbring, E., Hartmann, L., Briceño, C., & Calvet, N. "Disk Accretion Rates for T Tauri Stars." *ApJ* 492 (1998): 323.
- H., Herbig G. "EX Lupi: History and Spectroscopy." *AJ* 133 (2007): 2679.
- Hales, A. S., Pérez, S., Saito, M., Pinte, C., Knee, L. B. G., de Gregorio-Monsalvo, I., Dent, B., López, C., Plunkett, A., Cortés, P., Corder, S. and Cieza L. "The Circumstellar Disk and Asymmetric Outflow of the EX Lup Outburst System." *ApJ* 859 (2018): 111.
- Hales, A. S., Pérez, S., Saito, M., Pinte, C., Knee, L. B. G., de Gregorio-Monsalvo, I., Dent, B., López, C., Plunkett, A., Cortés, P., Corder, S. and Cieza, L. "The Circumstellar Disk and Asymmetric Outflow of the EX Lup Outburst System." *ApJ* 859 (2018): 111.
- Hartmann L, Calvet N, Gullbring E, D'Alessio P. "Accretion and the Evolution of T Tauri Disks." *ApJ* 495 (1998): 385.
- 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.
- Harvey, P. M., Huard, T. L., Jørgensen, J. K., Gutermuth, R. A., Mamajek, E. E., Bourke, T. L., Merín, B., Cieza, L., Brooke, T., Chapman, N., Alcalá, J. M., Allen, L. E., Evans II, N. J., Francesco, J. D., and Kirk, J. M. "The Spitzer Survey of Interstellar Clouds in the Gould Belt. I. IC 5146 Observed With IRAC and MIPS." *ApJ* 680 (2008): 495.
- Hashimoto J, Tamura M, Muto T, Kudo T, Fukagawa M, Fukue T, Goto M, Grady CA, Henning T, Hodapp K, Honda M, Inutsuka S, Kokubo E, Knapp G, McElwain MW, Momose M, Ohashi N, Okamoto YK, Takami M, Turner EL, Wisniewski J, Janson M, Abe L, Brandner W, et al. "Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae." *ApJ* 729, no. 2 (2011): L17.
- Henning, T., Semenov, D. *Chemical Reviews* 113 (December 2013): 9016-9042.
- Herbig, G. H. *AdA&A* 1 (1962): 47.
- Herbig, G. H. "HISTORY AND SPECTROSCOPY OF EXor CANDIDATES." *AJ* 135 (2008): 637.
- Herbig, G. H., & Dahm, S. E. "The Pre-Main-Sequence Population of L988." *AJ* 131 (2006): 1530.

- 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., Petrov, P. P., & Duemmler, R. "High-Resolution Spectroscopy of FU Orionis Stars." *ApJ* 595 (2003): 384.
- Herbig, G.H. *ApJ* 217 (1977): 693.
- 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.
- Hillenbrand, L., & Findeisen, K. "A SIMPLE CALCULATION IN SERVICE OF CONSTRAINING THE RATE OF FU ORIONIS OUTBURST EVENTS FROM PHOTOMETRIC MONITORING SURVEYS." *ApJ* 808 (2015): 68.
- 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.
- Juhász, A., Dullemond, C. P., van Boekel, R., Bouwman, J., Ábrahám, P., Acosta-Pulido, J. A., Henning, Th., Kóspál, A., Sicilia-Aguilar, A., Jones, A., Moór, A., Mosoni, L., Regály, Zs., Szokoly, Gy. and Sipos N. "THE 2008 OUTBURST OF EX Lup—SILICATE CRYSTALS IN MOTION." *ApJ* 744 (2012): 118.
- Kaltcheva, N., & Hilditch, R. "The distribution of bright OB stars in the Canis Major-Puppis-Vela region of the Milky Way ." *MNRAS* 312 (2000): 753.

- Kamezaki, T., Imura, K., Omodaka, T., Handa, T., Tsuboi, Y., Nagayama, T., Hirota, T., Sunada, K., Kobayashi, H., Chibueze, J. O. "ANNUAL PARALLAX DETERMINATION TOWARD A NEW X-RAY-EMITTING CLASS 0 CANDIDATE WITH THE WATER MASER IN THE NGC 2264 STAR-FORMING REGION." *ApJS* 211 (2014): A18.
- Kim, B. G., Kawamura, A., Yonekura, Y., & Fukui, Y. "13CO (J=1–0) Survey of Molecular Clouds toward the Monoceros and Canis Major Region ." *PASJ* 56 (2004): 313.
- Kochanek, C. S. ; Shappee, B. J. ; Stanek, K. Z. ; Holoien, 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.
- Kopatskaya, E N; Grinin, V P; Shakhovskoi, D N; Shulov, O S. "Results of Photometric and Polarimetric Observations of the Fuor V1057 Cyg from the Time of an Outburst to the Present." *Astrophysics* 45, no. 2 (2002): 143.
- 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.
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Csengeri, T., Gorti, U., Henning, Th., Moór, A., Semenov, D. A., Szűcs, L. and Güsten R. "COLD CO GAS IN THE DISK OF THE YOUNG ERUPTIVE STAR EX LUP." *ApJL* 821 (2016): L4.
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Goto, M., Regály, Zs., Dullemond, C. P., Henning, Th., Juhász, A., Sicilia-Aguilar, A., van den Ancker, M. "Near-infrared Spectroscopy of EX Lupi in Outburst." *ApJ* 736 (2011): 72.
- Kóspál, Á., Mohler-Fischer, M., Sicilia-Aguilar, A., Ábrahám, P., Curé, M., Henning, Th., Kiss, Cs., Launhardt, R., Moór A. and Müller A. "Radial velocity variations in the young eruptive star EX Lupi." *A&A* 561 (2014): A61.
- Kounkel, M., Hartmann, L., Loinard, L., Ortiz-León, G. N., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., Dzib, S. A., Torres, R. M., Pech, G., Galli, P. A. B., Rivera, J. L., Boden, A. F., Evans II, N. J., Briceño, C. "THE GOULD'S BELT DISTANCES SURVEY (GOBELINS). II. DISTANCES AND STRUCTURE TOWARD THE ORION MOLECULAR CLOUDS." *ApJ* 834 (2017): A142.
- Kreplin A., Madlener D., Chen L., Weigelt G., Kraus S., Grinin V., Tambovtseva L., Kishimoto M. *A&A* 590 (2016): A96.
- Kreplin, A. "UX Ori objects: From an interferometric perspective." *The 2-nd international Workshop "The UX Ori type stars and related topics", September 30 – October 4, 2019. St. Petersburg, 2019.*
- Kun, M. "Star Formation in the Cepheus Flare Molecular Clouds. I. Distance Determination and the Young Stellar Object Candidates." *ApJS* 115 (1998): 59.

- 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." *AAP* 292 (1994): 249.
- Kun, M., Szegedi-Elek, E., & Reipurth, B. "The star formation environment of the FU Ori type star V582 Aur." *MNRAS* 468, no. 2 (2017): 2325.
- 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.
- Kusakabe N, Grady CA, Sitko ML, Hashimoto J, Kudo T, Fukagawa M, Muto T, Wisniewski JP, Min M, Mayama S, Werren C, Day AN, Beerman LC, Lynch DK, Russell RW, Brafford SM, Kuzuhara M, Brandt TD, Abe L, Brandner W, Carson J, Egner S, Feldt M, Goto M, et al. "High-contrast Near-infrared Polarization Imaging of MWC480." *ApJ* 753, no. 2 (2012): 153.
- Lada, C. J., Lombardi, M., & Alves, J. F. *ApJ* 703 (2009): 52.
- Landolt, A.U. *AJ* 104 (1992): 340-371.
- Larson, R. B. "The FU Orionis mechanism." *MNRAS* 190 (1980): 321.
- Laugalys, V., Straizys, V., Vrba, F. J., Boyle, R. P., Davis Philip, A. G., & Kazauskas, A. *BaltA* 15 (2006): 483.
- 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, Jocu L, Juhasz A, Kraus S, Lachaume R, M´enard F, Millan-Gabet R, Monnier JD, Moulin T, Perraut K, et al. "Structure of Herbig AeBe disks at the milliarcsecond scale . A statistical survey in the H band using PIONIER-VLTI." *A&A* 599 (2017): A85.
- Li ZY, Banerjee R, Pudritz RE, Jørgensen JK, Shang H, Krasnopolsky R, Maury A. "The Earliest Stages of Star and Planet Formation: Core Collapse, and the Formation of Disks and Outflows." Edited by Klessen RS, Dullemond CP, Henning T Beuther H. *Protostars and Planets VI*. 2014. 173.
- Liu, H. B., Dunham, M. M., Pascucci, I., Bourke, T. L., Hirano, N., Longmore, S., Andrews, S., Carrasco-González, C., Forbrich, J., Galván-Madrid, R., Girart, J. M., Green, J. D., Juárez, C., Kóspál, Á., Manara, C. F., Palau, A., Takami, M., Testi, L., Vo. "A 1.3 mm SMA survey of 29 variable young stellar objects." *A&A* 612 (2018): A54.
- Loinard, L., Torres, R. M., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L.F., González-Lópezlira, R.A., Lachaume, R., Vázquez, V. and González, E. "VLBA Determination of the Distance to Nearby Star-forming Regions. I. The Distance to T Tauri with 0.4% Accuracy." *ApJ* 671 (2007): 546.
- 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.
- Lorenzetti, D., Larionov, V. M., Giannini, T., Arkharov, A. A., Antonucci, S., Nisini, B., Di Paola, A. "Near-Infrared Spectroscopic Monitoring of EXor Variables: First Results." *ApJ* 693 (2009): 1056.
- 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.
- Marigo, P. ; Girardi, L. ; Bressan, A. ; Rosenfield, Ph. ; Aringer, B. ; Chen, Y. ; Dussin, M. ; Nanni, A. ; Pastorelli, G. ; Rodrigues, Th. S. ; Trabucchi, M. ; Bladh, S. ; Dalcanton, J. ; Groenewegen, M. A. T. ; Montalbán, J. ; Wood, P. R. "A New Generation of PARSEC-COLIBRI Stellar Isochrones Including the TP-AGB Phase." *ApJ* 835, no. 1 (2017): 77.
- Marino, S. ; Perez, S.; Casassus, S. "Shadows Cast by a Warp in the HD 142527 Protoplanetary Disk." *ApJL* 798, no. 2 (2015): L44.
- Marino, S., Perez, S., & Casassus, S. "Shadows Cast by a Warp in the HD 142527 Protoplanetary Disk." *ApJ* 798 (2015): L44.
- 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.
- McKee C.F., Ostriker E.C. "Theory of Star Formation." *ARA&A* 45, no. 1 (2007): 565.
- Mendigutia I, Calvet N, Montesinos B, Mora A, Muzerolle J, Eiroa C, Oudmaijer RD, Merin B. "Accretion rates and accretion tracers of Herbig Ae/Be stars." *A&A* 535 (2011): :A99.
- 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.
- Meyer, M. R., Calvet, N., & Hillenbrand, L. A. "Intrinsic Near-Infrared Excesses of T Tauri Stars: Understanding the Classical T Tauri Star Locus." *AJ* 114 (1997): 288.
- Mooley K, Hillenbrand L, Rebull L, Padgett D, Knapp G. "B- and A-type Stars in the Taurus-Auriga Star-forming Region." *ApJ* 771, no. 2 (2013): 110.
- Munari, U., Castellani, F., Giannini, T., Antonucci, S., Lorenzetti, D. "A sudden brightness decrease of the young pre-MS object GM Cep." 2017.

- Murdin, P., and Penston, M. V. "The Lambda Orionis association." *MNRAS* 181 (1977): 657.
- Muro-Arena GA, Benisty M, Ginski C, Dominik C, Facchini S, Villenave M, van Boekel R, Chauvin G, Garufi A, Henning T, Janson M, Keppler M, Matter A, M'énard F, Stolker T, Zurlo A, Blanchard P, Maurel D, Moeller-Nilsson O, Petit C, Roux A, Sevin A, Wildi F. "Shadowing and multiple rings in the protoplanetary disk of HD 139614." *A&A* 635 (2020): A121.
- Muro-Arena GA, Dominik C, Waters LBFM, Min M, Klarmann L, Ginski C, Isella A, Benisty M, Pohl A, Garufi A, Hagelberg J, Langlois M, Menard F, Pinte C, Sezestre E, van der Plas G, Villenave M, Delboulb'e A, Magnard Y, M'oller-Nilsson O, Pragt J, et al. "Dust modeling of the combined ALMA and SPHERE datasets of HD 163296. Is HD 163296 really a Meeus group II disk?" *A&A* 614 (2018): A24.
- 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, Testi L, Randich S 8. "Accretion in the ρ -Ophiuchi pre-main sequence stars." *A&A* 452, no. 1 (2006): 245.
- 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.
- Natta, A., Whitney, B.A. *A&A* 364 (2000): 633.
- Neuhäuser, R., Errmann, R., Berndt, A., et al. "The Young Exoplanet Transit Initiative (YETI)." *AN* 332 (2011): 547.
- Ortiz-León, G. N., Dzib, S. A., Kounkel, M. A., Loinard, L., Mioduszewski, A. J., Rodríguez, L. F., Torres, R. M., Pech, G., Rivera, J. L., Hartmann, L., Boden, A. F., Evans II, N. J., Briceño, C., Tobin, J. J. and Galli, P. A. B. "THE GOULD'S BELT DISTANCES SURVEY (GOBELINS). III. THE DISTANCE TO THE SERPENS/AQUILA MOLECULAR COMPLEX." *ApJ* 834 (2017): A143.
- P., Grinin V. *Soviet Astronomy Letters* 14 (1988): 27.
- Palla F, Stahler SW. "The Pre-Main-Sequence Evolution of Intermediate-Mass Stars." *ApJ* 418 (1993): 414.

- 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.
- Petrov, P. P. *Ap* 46 (2003): 506.
- Petrov, P. P., & Herbig, G. H. "LINE STRUCTURE IN THE SPECTRUM OF FU ORIONIS." *AJ* 136 (2008): 676.
- Petrov, P. P., & Herbig, G. H. "On the Interpretation of the Spectrum of FU Orionis." *ApJ* 392 (1992): 209.
- Pfalzner, S. "Encounter-driven accretion in young stellar clusters – A connection to FUors?" *A&A* 492 (2008): 735.
- Pohl A, Benisty M, Pinilla P, Ginski C, de Boer J, Avenhaus H, Henning T, Zurlo A, Boccaletti A, Augereau JC, Birnstiel T, Dominik C, Facchini S, Fedele D, Janson M, Keppler M, Kral Q, Langlois M, Ligi R, Maire AL, M´enard F, Meyer M, Pinte C, et al. "The Circumstellar Disk HD 169142: Gas, Dust, and Planets Acting in Concert?" *ApJ* 850, no. 1 (2017): 52.
- Prusti, T. "Gaia and young stars." *The 2-nd international Workshop "The UX Ori type stars and related topics"*. St. Petersburg, 2019 .
- Racine, R. "Stars in reflection nebulae." *AJ* 73 (1968): 233.
- Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler, A., Zheng, X. W., Dame, T. M., Xu, Y., Wu, Y., Zhang, B., Sanna, A., Sato, M., Hachisuka, K., Choi, Y. K., Immer, K., Moscadelli, L., Rygl, K. L. J., and Bartkiewicz, A. "TRIGONOMETRIC PARALLAXES OF HIGH MASS STAR FORMING REGIONS: THE STRUCTURE AND KINEMATICS OF THE MILKY WAY." *ApJ* 783 (2014): 130.
- Reipurth, B. Edited by B., Mirzoyan, L., Tsvetkov, M. Pettersen. *IAU Symp. 137 Flare Stars in Star Clusters, Associations and the Solar Vicinity*. Boston: Kluwer, 1990. 229.
- Reipurth, B., & Aspin, C. "The FU Orionis Binary System and the Formation of Close Binaries." *ApJL* 608 (2004): L65.
- Reipurth, B., Aspin, B. Edited by H., Michaelian, A., Terzian, Y. Harutyunyan. *Evolution of Cosmic Objects through their Physical Activity*. Yerevan: Gitutyun, 2010. 19.
- Reipurth, B., Aspin, C., Beck, T., Brogan, C., Connelley, M. S. and Herbig, G. H. "V733 Cep (Persson's Star): A New FU Orionis Object in Cepheus." *AJ* 133 (2007): 1000.
- Reipurth, B., Hartmann, L., Kenyon, S., Smette, A., & Bouchet, P. "Evolution of the Fu Orionis Object BBW 76." *AJ* 124 (2002): 2194.
- Rieke, G. H., & Lebofsky, M. J. "The interstellar extinction law from 1 to 13 microns." *ApJ* 288 (1985): 618.
- Rigliaco, E., Gratton, R., Kóspál, Á., Mesa, D., D’Orazi, V., Ábrahám, P., Desidera, S., Ginski, C., van Holstein, R. G., Dominik, C., Garufi, A., Henning, T., Menard, F., Zurlo, A., Baruffolo, A., Maurel, D., Blanchard P. and Weber, L. "The circumstellar environment of EX Lupi: SPHERE and SINFONI views." *A&A* 641 (2020): A33.

- Rodriguez, J. E., Pepper, J., Stassun, K. G., et al. "V409 TAU AS ANOTHER AA TAU: PHOTOMETRIC OBSERVATIONS OF STELLAR OCCULTATIONS BY THE CIRCUMSTELLAR DISK." *AJ* 150 (2015): 32.
- Rodriguez, J. E., Reed, P. A., Siverd, R. J., et al. "RECURRING OCCULTATIONS OF RW AURIGAE BY COAGULATED DUST IN THE TIDALLY DISRUPTED CIRCUMSTELLAR DISK." *AJ* 151 (2016): 29.
- Romanova, M. M., Ustyugova, G. V., Koldoba, A. V., & Lovelace, R. V. E. "Warps, bending and density waves excited by rotating magnetized stars: results of global 3D MHD simulations." *MNRAS* 430, no. 1 (2013): 699.
- 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.
- Schöller M, Pogodin MA, Cahuasqu'í JA, Drake NA, Hubrig S, Petr-Gotzens MG, Savanov IS, Wolff B, González JF, Mysore S, Ilyin I, Järvinen SP, Stelzer B. "Spectroscopic signatures of magnetospheric accretion in Herbig Ae/Be stars. I. The case of HD 101412." *A&A* 592 (2016): :A50.
- 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., Jencson, 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.

- Shulman, S. G. Grinin, V. P. "UX Ori Stars Eclipses by Large-Scale Disc Perturbations." *MHPAC*, 2022.
- Sicilia-Aguilar, A. ; Fang, M. ; Roccatagliata, V. ; Collier Cameron, A. ; Kóspál, Á. ; Henning, Th. ; Ábrahám, P. ; Sipos, N. "Accretion dynamics of EX Lupi in quiescence. The star, the spot, and the accretion column." *A&A* 580 (2015): A82.
- 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., Kóspál, Á., Setiawan, J., Ábrahám, P., Dullemond, C., Eiroa, C., Goto, M., Henning, Th., Juhász, A. "Optical spectroscopy of EX Lupi during quiescence and outburst. Infall, wind, and dynamics in the accretion flow." *A&A* 544 (2012): A93.
- Sicilia-Aguilar, A., Merín, B., Hormuth F., Ábrahám, P., Henning T., Kun M., Patel N., Juhász 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.
- Sipos, N. ; Ábrahám, P. ; Acosta-Pulido, J. ; Juhász, A. ; Kóspál, Á. ; Kun, M. ; Moór, A. ; Setiawan, J. "EX Lupi in quiescence." *A&A* 507 (2009): 881.
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., et al. "The Two Micron All Sky Survey (2MASS)." *AJ* 131 (2006): 1163.
- Straizys, V., Cernis, K., & Bartasiute, S. "Interstellar extinction in the area of the Serpens Cauda molecular cloud." *BaltA* 5 (1996): 125.
- Tang YW, Guilloteau S, Dutrey A, Muto T, Shen BT, Gu PG, Inutsuka Si, Momose M, Pietu V, Fukagawa M, Chapillon E, Ho PTP, di Folco E, Corder S, Ohashi N, Hashimoto J. "Planet Formation in AB Aurigae: Imaging of the Inner Gaseous Spirals Observed inside the Dust Cavity." *ApJ* 840, no. 1 (2017): 32.
- Terquem, C., & Papaloizou, J. C. B. "The response of an accretion disc to an inclined dipole with application to AA Tau." *A&A* 360 (2000): 1031.
- Testi L, Birnstiel T, Ricci L, Andrews S, Blum J, Carpenter J, Dominik C, Isella A, Natta A, Williams JP, Wilner DJ. "Dust Evolution in Protoplanetary Disks." Edited by Klessen RS, Dullemond CP, Henning T Beuther H. *Protostars and Planets VI*. 2014. 339.
- Thé 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.

- van der Marel N, Mulders GD. "A Stellar Mass Dependence of Structured Disks: A Possible Link with Exoplanet Demographics." *AJ* 162, no. 1 (2021): 28.
- 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, Guimarães MM, da Silva L. "Investigation of 131 Herbig Ae/Be Candidate Stars." *AJ* 126, no. 6 (2003): 2971.
- Villebrun F, Alecian E, Hussain G, Bouvier J, Folsom CP, Lebreton Y, Amard L, Charbonnel C, Gallet F, Haemmerli L, Böhm T, Johns-Krull C, Kochukhov O, Marsden SC, Morin J, Petit P. "Magnetic fields of intermediate-mass T Tauri stars. I. Magnetic detections and fundamental stellar parameters." *A&A* 622 (2019): A72.
- Vioque M, Oudmaijer RD, Schreiner M, Mendigutía I, Baines D, Mowlavi N, Pérez-Martínez R. "Catalogue of new Herbig Ae/Be and classical Be stars. A machine learning approach to Gaia DR2." *A&A* 638 (2020): A21.
- 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.
- Vorobyev, E., Elbakyan, V., Hosokawa, T., Guedel, M., Yorke, H. "Accretion bursts and their effect on the pre-main-sequence stellar evolution." *The 2-nd international Workshop "The UX Ori type stars and related topics"*. St. Petersburg, 2019.
- Vorobyov, E. I., & Basu, S. "VARIABLE PROTOSTELLAR ACCRETION WITH EPISODIC BURSTS." *ApJ* 805 (2015): A115.
- Voshchinnikov, N. V. *Astrofizika* 30 (1989): 509.
- Wachmann, A. A. *IAU Circ.* 738 (1939): 1.
- Wachmann, A. A. *ZfA* 35 (1954): 74.
- Walter, L.B.F.M. and Waelkens, C. *ARA&A* 36 (1998): 233.
- Waters LBFM, Waelkens C. "Herbig Ae/Be Stars." *ARA&A* 36 (1998): 233.
- Welin, G. *A&A* 12 (1971): 312.
- Wenzel, W., Dorschner, J., Friedemann, C. *AN* 292 (1971): 221.
- Wheelwright, H.E., Oudmaijer, R.D., Goodwin, S.P. "The mass ratio and formation mechanisms of Herbig Ae/Be star binary systems." *MNRAS* 401 (2010): 1199.
- White RJ, Basri G. "Very Low Mass Stars and Brown Dwarfs in Taurus-Auriga." *ApJ* 582, no. 2 (2003): 1109.

- Wichittanakom C, Oudmaijer RD, Fairlamb JR, Mendigut'ia I, Vioque M, Ababakr KM . "The accretion rates and mechanisms of Herbig Ae/Be stars. ." *MNRAS* 493, no. 1 (2020): 234.
- Williams, J. P. & Best, W. M. J. "A Parametric Modeling Approach to Measuring the Gas Masses of Circumstellar Disks." *ApJ* 788 (2014): 59.
- 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.
- Zhu, Z., Hartmann, L., Calvet, N., Hernandez, J., Tannirkulam, A.-K., and D'Alessio, P. "Long-Wavelength Excesses of FU Orionis Objects: Flared Outer Disks or Infalling Envelopes?" *Apj* 684 (2008): 1281.
- Zhu, Z., Hartmann, L., Gammie, C., & McKinney, J. "TWO-DIMENSIONAL SIMULATIONS OF FU ORIONIS DISK OUTBURSTS." *ApJ* 701 (2009): 620.