

Радослав Заманов, Николай Томов,
Кирил Стоянов, Мима Томова

ВЗАИМОДЕЙСТВАЩИ ДВОЙНИ ЗВЕЗДИ С АКРЕЦИЯ ОТ ЗВЕЗДЕН ВЯТЪР

Изследването на взаимодействащи двойни звезди е една от основните теми в съвременната астрофизика. Двойните звездни системи осигуряват широки възможности за изследване на процесите на загуба на маса и на акреция, на структурата и формирането на околозвездни обвивки и мъглявини, на механизмите на еруптивна активност, генериране на излъчване с висока енергия в рентгеновия и гама диапазона и еволюцията на звездите. Обект на нашите изследвания са взаимодействащи двойни звезди, в които компактен обект (бяло джудже, неутронна звезда или черна дупка) акретира от вятъра на Ве звезда или червен гигант. Процесите в тези обекти са нестационарни и се проявяват в изхвърляне на маса от компактният обект, изменения на болометричната светимост, преразпределение на енергията в спектъра на избухващия обект и възникване на сложни профили на спектралните линии.

ВЕ-РЕНТГЕНОВИ ДВОЙНИ ЗВЕЗДИ

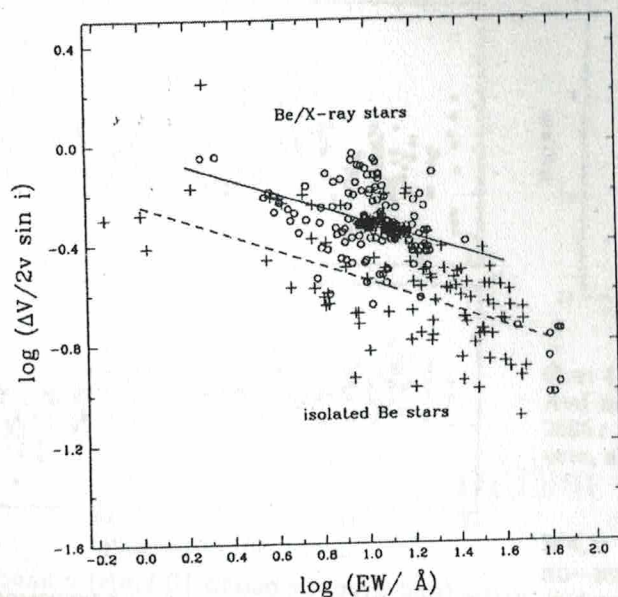
Рентгеновите двойни звезди се състоят от нормална звезда — донор на маса и компактен обект (неутронна звезда или черна дупка). Те се разделят на два класа — масивни рентгенови двойни, при които звездата донор е с маса 5–15 M_{\odot} и малко масивни рентгенови двойни, където донора е с маса около 1 M_{\odot} . Ве рентгеновите двойни спадат към двойните с голяма маса и се състоят от Ве звезда и неутронна звезда (в редки случаи черна дупка), която акретира от звездния вятър на Ве звездата [1]. Ве звездите са обекти, които показват емисия в линиите от Балмеровата серия. Тези емисионни линии и силният инфрачервен експес, сравнено с нормалните звезда от В спектрален клас, се дължат на околозвезден материал във формата на диск около звездата. Основните причините за възникване на околозвездните дискове са бързо въртене и нерадиални пулсации. Ултравиолетовите спектри показват, че загубата на маса от Ве звездите е двукомпонентна: вятър с ниска плътност и висока скорост

вен поток (със скорост около 10 km/s) с висока плътност в екваториалните части, който образува диска. Имплзията на ядрото на първоначално по-масивната звезда в двойката поражда избухване на свръхнова, при което се изхвърля по-голяма част от материята и на нейно място остава неутронна звезда или черна дупка. Избухването на свръхнова е събитието, предхождащо появата на рентгеновите двойни.

Рентгеновата активност в Ве рентгеновите двойни звезди се дължи на компактният обект. В повечето случаи около компактният обект се образува акреционен диск — диск от горещ газ, който се движи по спирала към повърхността на компактният обект. Акреционният диск е механизма, чрез който газът от донора попада на повърхността на другия компонент. В много системи дискът достига почти до повърхността на компактният обект, а в други — неговите вътрешни части са разрушени от магнитното поле на компактният обект.

Първите системни изследвания в Института по астрономия на Ве рентгеновите двойни звезди започнаха през 1990 г. с 2-метровия RCC телескоп в Националната Астрономическа Обсерватория — Рожен. След 1993 г., с инсталирането на ССД приемници в Куде спектрографа, тези обекти станаха един от приоритетите на сектор „Звездни атмосфери и обвивки“.

На основата на спектрални наблюдения на емисионната линия $Na\,I$ в 10 Ве рентгенови двойни направихме сравнение на околозвездния диск на Ве рентгеновите двойни с единичните Ве звезди. Получените резултати показват, че глобалната структурата (въртене и температура) на диска при Ве звезди в двойни системи е подобна на тази в изолираните Ве звезди. Наред с приликите в нашите изследвания бяха открити и съществени различия: плътността на диска на Ве рентгеновите двойни е около два пъти по-голяма от плътността на диска на единичните Ве звезди (фиг.1). Размерът на диска е по-малък, като причината за това е влиянието на компактният обект. На практика компактният обект „отрязва“ външните части на диска [2].



Фиг. 1. Параметрите на линията $H\alpha$, свързани с плътността на околосвръзвения диск. Кръгчетата представят Ве рентгеновите двойни звезди, кръстчетата — изолираните Ве звезди. Линиите са линейни апроксимации: непрекъснатата линия описва Ве рентгеновите двойни, а прекъснатата — изолираните Ве звезди. Добре се вижда, че кръгчетата са отместени нагоре, което показва, че дисковете на Ве рентгенови двойни са около два пъти по-плътни

Една от най-атрактивните Ве рентгенови двойни е галактичният микроквazar LSI+61°303. Тази звезда има радио избухвания всеки 26,5 дни, което е орбиталният период на двойката. Обектът се намира на разстояние от Земята 2,3 крс [3]. Нетоплинния радиоизточник в системата е идентифициран като бързо прецесиращи релативистки джетове, което означава, че компактният обект в LSI+61°303 е най-вероятно черна дупка с малка маса (около 2 слънчеви маси), която се движи по ексцентрична орбита около Ве звездата. Такива обекти се наричат микроквазари, т.е. черна дупка с малка маса, която действа като нискомасивен аналог на свръхмасивните черни дупки в квазарите [4]. LSI+61°303 е също източник на променливо рентгеново и гама излъчване. Системата най-вероятно е изхвърлена от близкия куп IC 1805 при избухването на свръхнова [5].

За периода 1993—2007 г., получихме около 120 спектъра в НАО-Рожен. Комбинирайки нашите наблюдения с тези на колеги от Испания, Великобритания и Украйна, показахме, че емисионната линия $H\alpha$ показва променливост с 26,5-дневен период, практически същият както наблюдавания в радио и рентгеновото излъчване [6].

Радиоизлъчването и някои от параметрите на емисионната линия на $H\alpha$ варират също и с характерно време около 1600 дни [7]. Комбинирайки На спектроскопия от НАО — Рожен и радио наблюдения от интерферометъра Green Bank (USA), показахме, че включването на радиоизбухванията и тяхната амплитуда се променя следвайки промените в $H\alpha$. Това е първата наблюдавана

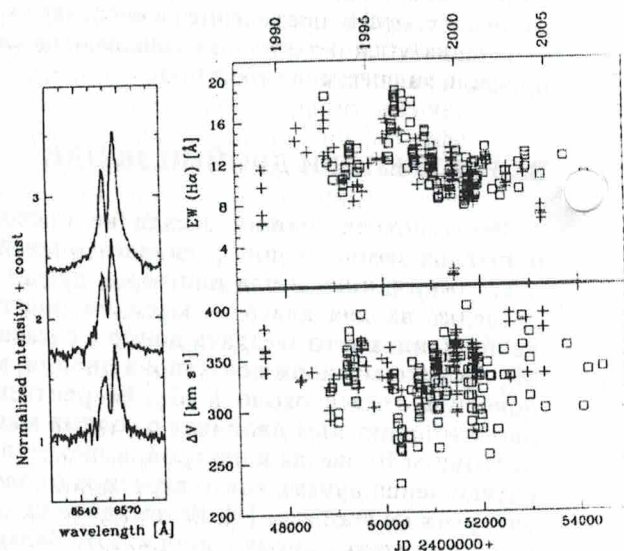
корелация между околосвръзвения диск и излъчването на компактен обект в Ве рентгенова двойна.

Докато 26,5-дневният период отразява орбиталното движение, то произходът на 1600-дневната модулация е мистерия. Причините за 1600-дневната цикличност може да са следните: (1) прецесиращите релативистки джетове; (2) квазициклични промени в обвивката на Ве звездата; (3) прецесия на Ве звездата; (4) движение на плътен ринг в Ве диска; (5) променливост в темпа на загуба на маса от Ве звездата.

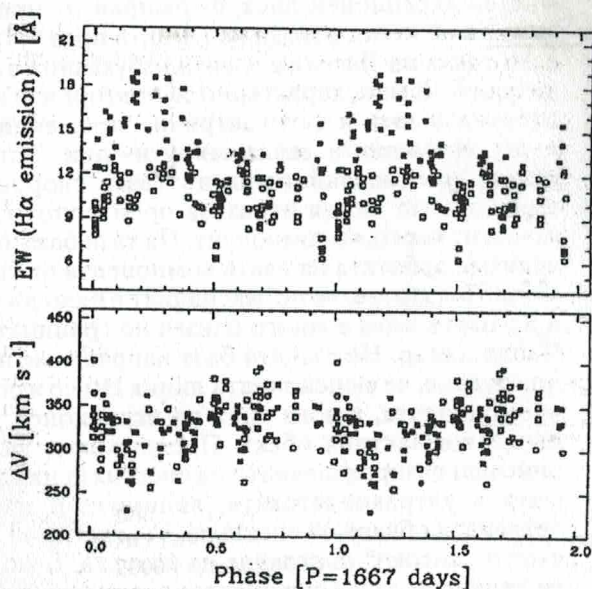
Околосвръзвеният диск в Ве рентгеновите двойни е „отрязан“ от компактният обект [8]. Много вероятно при LSI+61°303 някакъв вид прецесия да води до промени във външния радиус на диска (радиуса на отрязване), което комбинирано с променлив темп на загуба на маса води до променливостта на $H\alpha$ и радиоизлъчванията с период от 4,5 години. Интересно дали тази променливост се отразява на излъчването в рентгенови и гама лъчи и на темпа на акреция?

Еквивалентната ширина (EW) на $H\alpha$ достига до стойности от около 18 Å при два максимума около 1993 г. и 1997 г. На фиг. 2 се забелязват и 3 минимума на стойностите на EW до 7—8 Å. През последните 7 години не наблюдавахме нов ясно изразен максимум, както би могло да се очаква, ако процесът е периодичен. При разделянето на пиковите обаче се забелязва минимум през 2001 г. със стойност около 280 km/s.

На фиг. 3 са нанесени данните за EW и разделянето на пиковите, използвайки радиопериода от 1667 дни. Всички данни, както и извадките от ниски и високи стойности на EW показват



Фиг. 2. В лявата част са показани няколко примера на емисионната линия $H\alpha$ в спектъра на LSI+61°303. На всички наши спектри линията е емисионна с два пика. На десните панели е показана променливостта на еквивалентната ширина (EW) и на разстоянието между пиковите. Квадратчетата отразяват наблюденията, получени с 2-метровия телескоп на НАО — Рожен, кръстчетата — данни от други телескопи



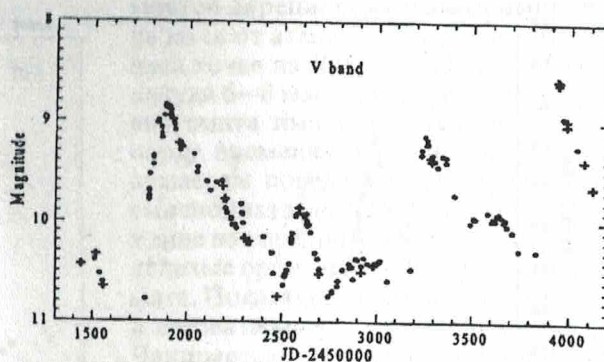
Фиг. 3. Променливост на параметри на H α емисията в спектъра на LSI+61°303 с 1667-дневния период. Празните квадратчета представляват моментите, когато $EW < 12,5$ Å, черните — $EW \geq 12,5$ Å. Ясно се вижда модулация. Дали тази модулация се дължи на периодичен процес ще покажат бъдещите наблюдения

1667-дневната модулация. Разделението на пикове е свързано с външния радиус на околозвездния диск. Приемайки за радиуса на типична B0V звезда — 10 слънчеви радиуса (R_{\odot}), може да се пресметне радиусът на диска. За LSI +61 303 получихме стойности от 37 до 77 R_{\odot} . Имайки предвид, че компактният обект (черната дупка) се движи на разстояние от B звездата от 30 R_{\odot} до 120 R_{\odot} , това означава, че външният радиус на диска е ограничен от орбитата на B звездата и остава винаги заключен между периастръ и апоастръ [9].

СИМБИОТИЧНИ ЗВЕЗДИ

Симбиотичните звезди са взаимодействащи системи, чиито компоненти се намират на късен стадий на звездната еволюция. Те се състоят от червен гигант (III или II клас светимост) или мирида, и компактен обект (субджудже, бяло джудже), акретиращо вещество от вятъра на гиганта. В резултат на акрецията върху компактния обект се развиват еруптивни процеси, наблюдавани се като избухвания в оптичната, радио-, рентгеновата и ултравиолетовата област от спектъра и характеризирани се в редица случаи с интензивно изхвърляне на маса. Симбиотичните звезди са приоритетни обекти на изследванията, провеждани в сектор „Звездни атмосфери и обвивки“ в Института по астрономия от първите дни на функциониране на спектрографа на 2-метровия телескоп на НАО — Рожен.

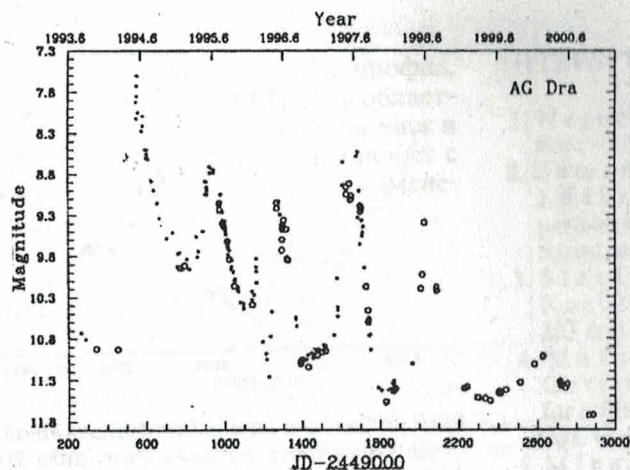
Системата Z And е класическа симбиотична звезда, състояща се от нормален гигант от клас



Фиг. 4. Крива на блясъка на симбиотичната двойна Z And по време на нейната активна фаза през 2000—2006 г. Данните от НАО — Рожен са показани с кръстчета, а тези от други автори с точки

M4,5, и горещ компактен обект с температура по-висока от 90 000 K и мощна газова мъглявина, частично йонизирана от излъчването на компактният обект. Претърпяла е няколко фази на активност (след 1915, 1939, 1960, 1984 и 2000 г.); характеризирани се с по няколко избухвания с амплитуди до 2—3 mag. През последната активна фаза системата претърпя четири последователни избухвания, чиито максимуми на блясъка бяха през декември 2000 г. ($V \sim 8,8$ mag), ноември 2002 г. ($V \sim 9,8$ mag), септември 2004 г. ($V \sim 9,1$ mag) и юли 2006 г. ($V \sim 8,6$ mag) (фиг. 4).

По времето на тази фаза бяха проведени спектрални, с високо разрешение, и фотометрични UVJHKLM наблюдения в НАО — Рожен и в Кримската станция на Астрономическия институт Щернберг в Москва. На базата на получените по време на първите две избухвания данни са реализирани следните резултати. Нарастването на блясъка по време на първото избухване се определя главно от интензивно изтичане на маса от компактния обект, формиращо оптически плътна обвивка с характеристики на фотосфера с размер 40 пъти превишаващ радиуса на компактния обект. Скоростта на изтичащото вещество е в границите 60—80 km/s като вероятно нараства в полярните области. Паралелно с това изтичане се наблюдават и несиметрични, бързоменящи се с времето изхвърляния с висока скорост, достигаща до 400—500 km/s. Определихме темпа на загуба на маса, който възлиза на около $1,2 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/\text{год}$. За нарастването на блясъка допринася и излъчването на околозвездната мъглявина, което, от своя страна, се определя от нарастналата Лайманова светимост на компактния обект. Нарастването на блясъка по време на второто избухване се определя главно от нарастналото излъчване на мъглявината. Компактният обект претърпява малко разширение и радиусът на наблюдаемата фотосфера се увеличава не повече от 2 пъти. Това се дължи вероятно както на нарастания темп на акреция, така и на високо-скоростно оптически тънко изтичане на газ (звезден вятър). Скоростта достига до около 1200 km/s. Определен е темпът на загуба на маса, който в



Фиг. 5. Крива на бляска на симбиотичната двойна AG Dra по време на нейната активна фаза през 1994—2000 г. Данните от НАО — Рожен са показани с кръгчета, а тези от други автори с точки

този случай е по-голям — около $1,7 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/yr$. Направено е заключение, че избухванията най-вероятно се дължат на промяна на режима на акреция в процеса на устойчиво горене на водорода на повърхността на компактният обект [10; 11; 12].

Системата AG Dra се състои от К гигант със сравнително висока светимост, горещ компактен обект с температура, по-висока от 100 000 K, и протяжна газова мъглявина. Претърпяла е множество активни фази. През 1994 г. навлезе в нова фаза на повишена активност, характеризираща се с няколко последователни оптически избухвания, интервалите от време между максимумите на които бяха по около 1 година (фиг. 5). Нарастването на бляска за всяко от петте избухвания в интервала 1994—1998 г. се дължи главно на повишеното излъчване на околозвездната мъглявина.

Получена е мярата на емисия, даваща информация за количеството йонизирано вещество в мъглявината за всеки момент на максимум. Оказва се, че тя се е увеличила съответно 36, 13, 8, 15 и 7 пъти в сравнение със стойностите през спокойно състояние на системата.

След моментите на максимум на избухванията през 1996 и 1997 г. бе наблюдаван оптически тънък звезден вятър с висока скорост от 1100—1300 km/s, формиращ широк емисионен компонент на линията HeII 4686. Вятърът се генерира най-вероятно от компактният спътник. Получен е темпът на загуба на маса на спътника, който през разглеждания период е бил в границите $1-2 \cdot 10^{-7} M_{\odot}/год$. Стига се до заключение, че избухванията са термоядрени по своята природа и се дължат на промяна на режима на акреция в процеса на устойчиво горене на водорода на повърхността на компактен обект [13; 14].

Симбиотичната система T CrB е повторна нова, състояща се от нормален гигант от спектрален клас M4,5III, запълващ своята област на Рош и бяло джудже с оптически плътен високосвети-

мостен акреционен диск, формиран от преноса на маса от атмосферата на гиганта през вътрешната точка на Лагранж. Освен избухвания с амплитуда 6—8 маг., характерно за повторните нови, системата има и фотометрична променливост върху временната скала минути—дни. Установихме, че поведението на лъчевата скорост на емисионната линия отразява орбиталното движение на горещия компонент. На тази база определихме орбитата на двата компонента на системата. Показахме, че по-масивният е бяло джудже и неговата маса е много близка до границата на Чандрасекар. На същата база направихме предположение, че емисионната линия H α се излъчва във външната, газова част на акреционен диск около компактният обект. Предложихме модел, описващ разпределението на енергията на системата в ултравиолетовата, видимата и инфрачервената област от спектъра, съответно за „ниско“ и „високо“ състояние на бляска. В модела се включват три компонента: оптически плътен акреционен диск, околозвездна мъглявина и нормален червен гигант. На тази база е обяснен дълговременната фотометрична променливост. Предполага се, че тя се дължи на промяна на състоянието на диска, което пък, от своя страна, се определя или от флуктуации в преноса на маса, или от нестабилност в самия диск [15]. Изследвахме поведението на емисионната линия HeII 4686 от спектъра на системата T CrB. Нейният профил и лъчева скорост предлагат възможната интерпретация, че тя се излъчва от вятър от диска. Допуска се, че линията се формира в частта от вятъра, обърната към наблюдателя, тъй като останалата част се затъмнява от самия диск [16].

Друг представител на класа повторни нови измежду симбиотичните звезди е системата RS Oph. Тя се състои от M0III гигант и горещ компонент, най-вероятно масивно бяло джудже. На базата на спектрални наблюдения, получени в Европейската южна обсерватория (ESO, La Silla), анализирахме емисионните линии H α и HeII4686 от нейния спектър по време на спокойно състояние [17].

Профилът на линията H α е двукомпонентен, състоящ се от двупиков тесен централен компонент и силно променлив широк компонент, чиято ширина на нивото на континуума достига ~4600 km/s. Тъй като ширината на централния компонент е сравнително голяма, неговият произход вероятно не е небулярен, а се излъчва във външните газови части на оптически плътен акреционен диск около компактният обект в системата. За обяснение на неправилната форма на профила и силната променливост на широкия компонент са представени две хипотези: те се дължат или на изхвърляне на дискретни части от веществото („blobs“) на акреционния диск от бързовъртящата се магнитосфера на бялото джудже, или на променлив вятър от диска. Оценена е мярата на емисия на един среден „blob“. При допускане на определена област от плътности на газа е пресметната и неговата маса, възлизава средно на около $10^{-10} M_{\odot}$.

Линията HeII 4686 има небулярен профил. Предполага се, че тя се излъчва главно в областта на граничния слой между акреционния диск и бялото джудже и нейната бърза променливост с характерно време 1 ден се определя от изменението на условията в тази област [17].

ИЗСЛЕДОВАТЕЛСКИ ПЛАНОВЕ

Задача на бъдещите изследвания е изясняване на физическите механизми и природата на процесите и явленията, формиращи излъчването на разглежданите обекти по време на активни и спокойни фази на базата на анализ на наблюдения от различни спектрални области:

1. Получаването на нови спектроскопични данни за рентгеновите двойни LSI +61°303, LSI +65°010, X Persei, за симбиотичните звезди AG Dra, AG Peg, Z And и за повторните нови RS Oph и T CrB.

2. През 2006 г. ние наблюдавахме последното избухване на системата Z And. Възникнаха високоскоростни абсорбционни и емисионни компоненти на спектралните линии, каквито не са наблюдавани до сега. Тяхното изследване е от принципно значение за изучаване на процесите на взаимодействие в тази система. По същото време в състояние на избухване бе и системата AG Dra. В нейния линеен спектър възникнаха профили от типа P Cуг, индикиращи изтичане на оптически плътно вещество. Описаното поведение се наблюдава за първи път по линии от видимата област.

3. В началото на 2006 г. бе максимумът на блясъка по време на последното избухване на системата RS Oph. Ние имаме възможността да наблюдаваме определени области от нейния спектър по време на намаляването на блясъка след максимума. Изключително интересни промени са регистрирани в линията H α , които могат да дадат съществена информация за природата и еволюцията на околосвездните газови структури след термоядреното избухване.

4. Комбиниран анализ на нашите оптически наблюдения със спътникови и наземни наблюдения в рентгеновия, гама- и радиодиапазоните. Теоретично моделиране на процесите на взаимодействие в различните акретиращи обекти. Търсене на прилики в процесите, които протичат около различни компактни обекти — бели джуджета, неутронни звезди, черни дупки със звездна маса и свръхмасивни черни дупки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Negueruela, I. On the nature of Be/X-ray Binaries. — *A&A*, 1998, 338, 505-510.
2. Zamanov, R. K., P. Reig, J. Martí, M. J. Coe, J. Fabregat, N. A. Tomov, T. Valchev. Comparison of the H α Circumstellar disks in Be/X-ray binaries and Be Stars. — *A&A*, 2001, 367, 884-890.
3. Steele, I. A., I. Negueruela, M. J. Coe, P. Roche. The distances to the X-ray binaries LSI +61 303 and A0535+262. *MNRAS*, 1998, 297, L5.
4. Massi, M., M. Ribo, J. M. Paredes, S. T. Garrington, M. Peracaula, J. Martí. Hints for a fast precessing relativistic radio jets in LSI +61 303. — *A&A*, 2004, 414, L1.
5. Mirabel, I. F., I. Rodrigues, Q. Z. Liu. A microquasar shot out from its birth place. — *A&A*, 2004, 422, L29.
6. Gregory, P. C. Bayesian analysis of radio observations of the Be/X-ray binary LSI+61°303. — *ApJ*, 2002, 580, 1133.
7. Zamanov, R. K., J. Martí, J. M. Paredes, J. M. Fabregat, M. Ribo, A. E. Tarasov. Evidence of H α periodicities in LSI +61°303. — *A&A*, 1999, 351, 543-550.
8. Okazaki, A. T., I. Negueruela. A natural explanation for periodic X-ray outbursts in Be/X-ray binaries. — *A&A*, 2001, 377, p. 161.
9. Zamanov, R. K., K. A. Stoyanov, N. A. Tomov, H α observations of the galactic microquasar LSI +61°303. *IBVS*, 2007, 5776, 1.
10. Tomov, N., O. Taranova, M. Tomova. Mass ejection by the symbiotic binary Z And during its 2000-2002 outburst. — *A&A*, 2003, V. 401, 669-676.
11. Tomov, N., M. Tomova, O. Taranova. Broad-band multicolour observations of the symbiotic binary Z And during quiescence and its activity at the end of 2002. — *A&A*, 2004, V. 428, 985-992.
12. Tomov, N., M. Tomova, O. Taranova. 2005 in ASP Conf. Ser., The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects. (Eds. J. M. Hameury, & J. P. Lasota). V. 330, 465-466.
13. Tomova, M., N. Tomov. Spectral observations of AG Draconis during quiescence and outburst (1993—1995). — *A&A*, 1999, V. 347, 151-163.
14. Tomov, N., M. Tomova. Hydrogen and helium emission of the symbiotic binary AG Draconis during an active phase (1996—1997). — *A&A*, 2002, V. 388, 202-212.
15. Stanishchev, V., R. Zamanov, N. Tomov, P. Marziani. H-alpha variability of the recurrent nova T Coronae Borealis. — *A&A*, 2004, V. 415, p. 609.
16. Zamanov, R., M. Bode, N. Tomov. HeII4686 observations of T Coronae Borealis. — *IBVS*, No. 5497, 2004.
17. Zamanov, R., M. Bode, N. Tomov, J. Porter. Emission line variability of RS Ophiuchi. — *MNRAS*, 2005, V. 363, L26-L30.

Radoslav Zamanov, Nikolay Tomov,
Kiril Stoyanov, Mima Tomova

INTERACTING BINARY STARS WITH ACCRETION FROM STELLAR WIND

(Summary)

We present the most important investigations of Be/X-ray binaries and symbiotic stars performed in the Institute of Astronomy of Bulgarian Academy of Sciences during the period 1993-2007. They are based on observations obtained with the 2-m telescope of the National Astronomical Observatory Rozhen, 2.2-m telescope (ESO), Green Bank interferometer (USA) and a few other telescopes. Our results include: (1) comparison of

the circumstellar disks of the Be/X-ray binaries with those of Be stars; (2) systematic investigations of the H-alpha emission of the Be/X-ray binary and galactic microquasar LSI+61°303; (3) investigation of the mechanisms of the outbursts of the symbiotic stars AG Dra and Z And and structure their envelopes; (4) investigation of the circumstellar structures and mass loss from the recurrent novae RS Oph and T CrB.

Адрес на авторите:

Ст.н.с. д-р Радослав Заманов;
ст.н.с. д-р Николай Томов;
Кирил Стоянов — докторант;
Мима Томова — физик,
1784 София, бул. „Цариградско шосе“ 72,
Институт по астрономия при БАН