

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО АСТРОНОМИЯ
С НАЦИОНАЛНА АСТРОНОМИЧЕСКА ОБСЕРВАТОРИЯ

**Фотометрично и спектрално изследване
на симбиотичната двойна Z And
в периода на активност 2000 – 2003 г.**

Мима Тодорова Томова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователната и научна степен
„доктор“

София, 2014 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 2014 г. от часа в зала на бул. "Цариградско шосе" № 72. Материалите по защитата са на разположение на интересующите се в библиотеката на ИА с НАО, БАН и на адрес

<http://www.astro.bas.bg/~mtomova/PhD/>

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО АСТРОНОМИЯ
С НАЦИОНАЛНА АСТРОНОМИЧЕСКА ОБСЕРВАТОРИЯ

**Фотометрично и спектрално изследване
на симбиотичната двойна Z And
в периода на активност 2000 – 2003 г.**

Мима Тодорова Томова

АВТОРЕФЕРАТ на ДИСЕРТАЦИЯ
за присъждане на образователната и научна степен
„доктор“

Професионално направление 4.1 „Физически науки“
01.04.02 Астрофизика и звездна астрономия

Научен консултант:
проф. дфн Невена Маркова

Рецензенти:

проф. дфн Диана Кюркчиева
доц. д-р Иванка Статева

София, 2014 г.

Дисертационният труд съдържа 91 страници, включващи 16 фигури, 12 таблици и 92 цитирани източника. Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита от обединения научен семинар на Института по астрономия с Национална астрономическа обсерватория – БАН и Катедрата по Астрономия – СУ, проведен на 30.06.2014 г. Дисертантът работи като асистент в Института по Астрономия с Национална астрономическа обсерватория – БАН, отдел „Звезди и звездни системи“. Основната част от наблюдателните данни, които се анализират в това изследване, са получени в Национална астрономическа обсерватория „Рожен“.

Съдържание

1	Въведение	1
1.1	Формулиране на проблема и цел на изследването	4
1.2	Структура на дисертацията	5
2	Наблюдения и редукция	5
2.1	Широкоивични <i>UBVRJHKLM</i> фотометрични данни	5
2.2	Спектрални данни с висока дисперсия	8
3	Фотометрично изследване на системата по време на избухването в периода 2000 – 2002 г.	10
3.1	Анализ на разпределението на енергията	10
3.2	Дискусия	13
4	Спектрално изследване на системата по време на избухването в периода 2000–2002г.	15
4.1	Анализ на линейния спектър	15
4.2	Темп на загуба на маса	18
4.3	Модел	18
5	Фотометрично и спектрално изследване по време на избухването в края на 2002 г.	20
5.1	Анализ на разпределението на енергията	20
5.2	Анализ на спектралната линия He II 4686 и темп на загуба на маса на спътника	25
6	Заклучение, основни резултати и приноси	26
7	Публикации, на които се основава дисертацията	28
	Литература	29
	Abstract	31

Благодарности

За мене е удоволствие да благодаря на колегите наблюдатели в Куде за ценните насоки и дискусии, свързани с анализирането на спектралните данни, както и за помощта при наблюденията. На проф. дфн Н. Маркова изказвам своята признателност за всестранината подкрепа – с професионални и приятелски съвети. Благодаря и на всички колеги, които по време на съвместната ни работа са ме подкрепяли и насърчавали, без което тази дисертация нямаше да стане факт.

Благодаря на ръководството на проект BG051PO001-3.3.06-0047 „Повишаване на професионалните умения в теорията и практиката на астрономията чрез многопрофилно и интерактивно обучение“, осъществяващ се с финансовата подкрепа на Оперативна програма „РЧР“, за възможността да посещавам част от обученията по проекта и съдействието за получаване на сертификат от ЦО-БАН.

Благодаря най-сърдечно на ръководството на Института по океанология, БАН – гр. Варна за любезното съдействие и финансова подкрепа за включването ми в интензивен курс по английски език, проведен в института.

Част от изследването, представено в тази дисертация, е реализирано с финансовата подкрепа на ФНИ по договор ДНТС/Словакия 01–14/13.12.2011 г.

За изследването в тази дисертация са използвани ресурси на интернет, преди всичко базите данни *ADS* и *SIMBAD*.

1 Въведение

Симбиотичните звезди са група еруптивни двойни, чийто горещ компактен компонент (субджудже, бяло джудже, неутронна звезда) акретира маса от атмосферата на хладен гигант от III – II клас светимост или мирида. Третият компонент на тези системи представлява плътна газова мъглявина, възникнала в резултат на загубата на маса на единия или двата звездни компонента. Загубата на маса се реализира на определени етапи от тяхната еволюция и определя режима на взаимодействието им. В резултат на акрецията върху компактния обект протичат еруптивни процеси, наблюдаващи се като оптически избухвания и характеризирани се в редица случаи с интензивно изхвърляне на маса под различни форми – оптически плътни обвивки, звезден вятър, дискретни изхвърляния (блобове), колимирани струи.

Симбиотичните звезди се класифицират в три групи в зависимост от броя и продължителността на избухванията:

- *Класически симбиотични звезди* – за прототип на тази група се счита звездата Z And. Активните фази на класическите симбиотични звезди се реализират върху времева скала от няколко години, когато претърпяват по няколко отделни избухвания с амплитуди $1 - 3^m$.
- *Симбиотични нови* – с прототип AG Peg. Симбиотичните нови са претърпели единствено продължително избухване с амплитуда до около 3^m и времетраене от едно до няколко десетилетия.
- *Повторни нови* – за прототип на тази група се счита звездата T CrB. Повторните нови претърпяват оптически избухвания през къси интервали от време от няколко десетки години.

Системата Z And се състои от нормален хладен гигант от спектрален клас M4.5 (Mürset & Schmid 1999), горещ компактен компонент с температура по-висока от 10^5 K (Fernandez-Castro et al. 1988) и протяжна околосвездна мъглявина, формирана от ветровете на компонентите и частично йонизирана от компактния обект. Орбиталният период е $758^d.8$ (Formigini & Leibowitz 1994; Mikołajewska & Kenyon 1996; Fekel et al. 2000) получен както от фотометрични данни, така и от лъчеви скорости.

Последната активна фаза на системата Z And започна в края на август 2000 г. В тази фаза до сега се включват седем последователни оптически избухвания. След максимума на първото избухване блясъкът постепенно намаля до своите характерни за спокойно състояние стойности в *UBVR* областта през лятото на 2002 г. (Skopal et al. 2000, 2002; Skopal 2003). През август 2002 г. липсваше всякаква индикация за активност на системата и блясъкът беше в дълбок минимум. След това той нарастна отново и достигна максимална стойност през ноември, но *UBV* амплитудите не бяха големи – около 1^m . В същото време обаче, инфрачервеното

излъчване (в системите *JHKLM*) беше силно увеличено – до ниво, близко до това през декември 2000 г. Звездата претърпя избухване отново, но то се различаваше от голямото избухване, когато *UBV* излъчването на горещия компонент доминираше по своето разпределение на енергията – относително слаб *UBV* континуум и силен *JHKLM* континуум. По време на своите избухвания в периода 2000 – 2003 г. системата Z And бе изследвана в работите на Sokoloski et al. (2006); Bisikalo et al. (2006) и Skopal et al. (2006).

Sokoloski et al. (2006) представиха резултати от наблюдения в радиообластта с телескопите *VLA* и *MERLIN*, в далечната ултравиолетова област със спътника *FUSE* и в рентгеновата област със спътниците *Chandra* и *XMM*. В допълнение на данните от тези наблюдения те получиха детайлни криви на *UBV* блясъка, а също и данни от оптическа спектроскопия с ниско разрешение. На базата на анализа те достигнаха до извода, че избухването в периода 2000 – 2002 г. е от нов тип и се дължи на комбинираното действие на два механизма – нестабилност в акреционен диск около компактен обект и нарастване на темпа на термоядрено горене в слоев източник на неговата повърхност. Съгласно съвременната теория първият от тези механизми определя избухването на новите-джуджета, а вторият – на класическите нови. По тази причина авторите стигнаха до заключението, че Z And е взаимодействираща двойна от нов тип и я нарекоха комбинационна нова (combination nova). Те предложиха модел, в рамките на който избухването се реализира в три последователни етапа.

Първият етап се определя от нестабилност в диска, а оптическият блясък нараства основно за сметка на неговата светимост, а така също и поради акреционната светимост. Нарастването на темпа на акреция води до нарастване на темпа на термоядрено горене и отделената енергия изхвърля част от повърхностните слоеве на звездата. Вторият етап започва с изтичането на вещество и в този момент блясъкът спира да расте, тъй като темпът на горене започва да се увеличава след характерен интервал от време след акретиране на достатъчно количество вещество. Реализира се плато (хоризонтален участък). Според авторите този интервал е около месец и е в добро съгласие с кривата на блясъка. Нарастването на оптиическия блясък през втория етап се определя не само от преразпределение на енергията в континуума вследствие разширението и охлаждането на оптически плътната обвивка (псевдофотосфера), но и от нарастване на болометричната светимост, която в максимума достига стойност около $10^4 L_{\odot}$, превишаваща неколкостранно светимостта в спокойно състояние. Авторите стигнаха до заключението, че третият етап се определя от преустановяване режима на изтичане, което дава възможност отново да се наблюдава директно бялото джудже. Присъствието по това време обаче, в техните данни на P Cyg профили на линията P V 1117 и на линиите на He I (Tomov et al. 2003; Skopal et al. 2006), поставя под съмнение това заключение.

Идеята за нарастване на темпа на горене стои в основата и на модела на взаимодействиращи ветрове на Bisikalo et al. (2006), предложен за обяснение на раз-

витието на избухването. В качеството на възможен механизъм е разгледан комбинираният случай, когато увеличаването на темпа на акреция вследствие разрушаването на диска около компактния спътник води до нарастване на темпа на горене. В рамките на този модел е обяснен поетапния характер на нарастването на оптическия блясък.

Промяната на скоростта на вятъра на хладния гигант от 20 до 30 km s^{-1} води до разрушаване на акреционния диск. Съдържащото се в него вещество предизвиква скокообразно нарастване на темпа на акреция над стойността му в спокойно състояние. Той надхвърля горната граница на диапазона за устойчиво горене на водорода и се реализира натрупване на вещество. Възниква горещ вятър и в системата се формира високотемпературна област със значителна светимост. Взаимодействието на този вятър с вятъра на хладния гигант (а също и с акреционния диск) поражда област на ударни вълни с електронна температура $\sim 10^6 \text{ K}$ и рентгенова светимост $10^{31} - 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$. Акретираното вещество се оказва достатъчно за нарастване на температурата и налягането в обвивката на повърхността на бялото джудже до стойности, осигуряващи нарастване на темпа на горене.

В рамките на този сценарий кривата на оптическия блясък се интерпретира по следния начин. Нарастването в началния етап се определя от нарастване на акреционната светимост. В момента на възникване на вятъра блясъкът спира да расте. Темпът на горене обаче, започва да расте след изтичане на времето необходимо за акретирането на достатъчно количество вещество – реализира се плато. След първото плато блясъкът нараства в резултат както на нарастналата светимост и преразпределението на енергията на компактния обект, така и поради излъчването на горещия вятър. В определен момент разширението на псевдофотосферата може да бъде заместено от свиване, дължащо се на намаляване на темпа на загуба на маса на спътника. Това свиване води до преразпределение на енергията в обратен ред и намаляване на оптическия поток. По този начин се формира второ плато. Нарастването на блясъка започва отново с нарастване на темпа на загуба на маса. В същото време светимостта на спътника и излъчването на неговия вятър продължават да нарастват. Заедно с тях обаче, се развива и област на ударни вълни в мъглявината. Оптическият блясък достига своя максимум.

Skopal et al. (2006) анализираха спектрални данни в далечната ултравиолетова област, получени със спътника *FUSE*, данни от оптическа спектроскопия с ниско и високо разрешение, а също така и *UBVR* фотометрични данни. Основните характеристики на излъчването според тези данни са следните.

Спектърът съдържа индикации за режим на излъчване с две температури: от една страна наличие на сравнително не гореща фотосфера с ефективна температура около $30\,000 \text{ K}$, а от друга – присъствие на емисионни линии от висока степен на йонизация и възбуждане на He II и O VI . Звездна фотосфера с температура $30\,000 \text{ K}$ не може да създаде условия за възбуждане на тези линии, тъй като нейният континуум не съдържа необходимото високоенергетично излъчване. Тяхното присъствие означава наличие в системата на йонизиращ източник с

висока температура – около 10^5 K, който не се „вижда“ директно от наблюдателя (т.е. неговият континуум не присъства в спектъра).

По отношение на индикациите за загуба на маса авторите констатирали наличието на два вида: P Cyg профили на триплетните линии на хелия, показващи скорости на изтичане около 100 km s^{-1} и широки емисионни крила на линията $\text{H}\alpha$, достигащи скорости до 2000 km s^{-1} .

Авторите предложиха следния модел на избухващия компактен компонент. Двутемпературният режим на излъчване се обяснява с присъствието на оптически плътна дискообразна обвивка около компактният обект, която играе ролята на наблюдаема фотосфера (псевдофотосфера). Предполага се, че ниската скорост на изтичане (наблюдавана по P Cyg линиите) се отнася до областта на орбиталната равнина, а високата скорост (за която се съди по крилата на линията $\text{H}\alpha$) е на по-високи звездни ширини. Наклонът на орбитата дава възможност дискообразната обвивка да окултира компактният обект, който остава „невидим“ за наблюдателя, но в същото време неговото йонизиращо излъчване прониква в мъглявината на по-високи звездни ширини и създава условия за възбуждане на наблюдаваните линии от висока степен на йонизация.

1.1 Формулиране на проблема и цел на изследването

Наблюдателните данни, както фотометрични, така и спектрални, показват, че основна характеристика на поведението на системата Z And в периода на активност 2000 – 2003 г. е загубата на маса. По тази причина спектралните линии, индикатори на загуба на маса, играят ключова роля за създаването на модел на избухващия компактен обект. В рамките на предходните изследвания техните профили не са детайлно анализирани и не се предлага възможност за интерпретация на различните им компоненти. Това определи главната цел на нашето изследване, а именно да се предложи модел за обяснение на данните от многоцветна фотометрия и спектралните данни с висока дисперсия. Една допълнителна цел е да се изследва процеса на загуба на маса. За построяването на модел е необходимо да се получат и основните параметри на компонентите на системата в различни състояния.

За постигането на тази цел предприехме изследване върху оригинален наблюдателен материал. Проведохме анализ на континуума в широк спектрален диапазон и получихме основните параметри на компонентите на системата. Беше проведен и детайлен анализ на профилите на някои оптически линии и бяха предложени възможности за излъчване на различните им компоненти. Разделянето на линиите на компоненти, от своя страна пък, позволи да се получат скоростта на вятъра и темпа на загуба на маса на избухващия компактен обект.

1.2 Структура на дисертацията

Съдържанието на дисертационния труд е оформено в пет глави и заключение.

В *първа глава* се обосновава актуалността на темата, представя се въведение в проблематиката, излагат се основните резултати от предходните изследвания и се формулира целта на изследването. Във *втора глава* се описват проведените наблюдения, използваните наблюдателни данни и тяхната редукция. В *трета глава* се разглежда фотометричното поведение на звездата Z And по време на нейното голямо оптическо избухване в периода 2000 — 2002 г. в областта на системите *UBVJHKLM*. В *четвърта глава* се анализира спектралното поведение на системата по време на същото избухване в областите на линиите H_{α} , He II 4686 и H_{γ} . В *пета глава* се разглежда фотометричното поведение в областта на системите *UBVRJHKLM* и спектралното поведение в областта на линията He II 4686 по време на избухването на системата в края на 2002 г. В *заключението* се формулират основните резултати и изводи, получени в дисертационния труд. Накрая се представят публикациите, на които се основава дисертацията и резюме на английски език.

2 Наблюдения и редукция

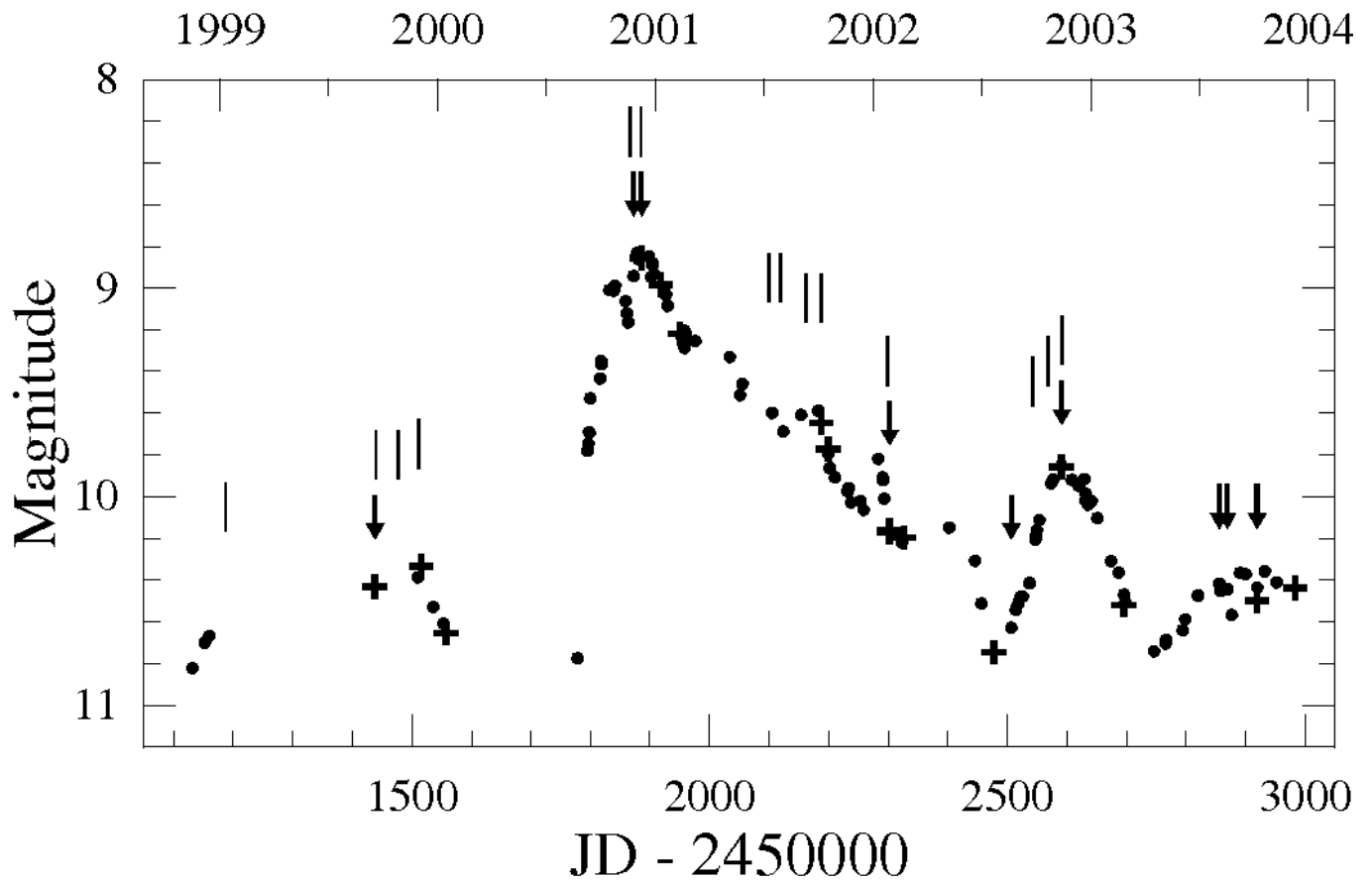
2.1 Широкоивични *UBVRJHKLM* фотометрични данни

За нуждите на настоящето изследване бяха проведени широкоивични *JHKLM* наблюдения с InSb фотометър на 125 cm телескоп на Кримската станция на Астрономическия институт Щернберг и *UBV* наблюдения с едноканалния фотоелектричен фотометър, поставен в „Касегрен“ фокуса на 60 cm телескоп на Националната астрономическа обсерватория Рожен. Като звезда за сравнение за получаване на инфрачервените данни беше използвана звездата BS 8860 с величини $J = 1^m46$, $H = 0^m62$, $K = 0^m37$, $L = 0^m25$ и $M = 0^m67$ (Johnson et al. 1966). H величината беше пресметната от спектралния клас с използване на данните на Koorneef (1983). Като звезда за сравнение за получаване на *UBV* данните беше използвана звездата BD +48°4090 с величини $V = 9^m01$, $B - V = 0^m48$ и $U - B = -0^m06$ (Belyakina 1970), а като контролна звезда – BD +47°4192.

По време на голямото избухване в периода 2000 – 2002 г. инфрачервени данни бяха получени на 1.10.1999 г., 20.11.2000 г., 24.12.2000 г. и 4.02.2002 г., а *UBV* данни – на 15.09.1999 г., 6.12.2000 г. и 27.01.2002 г.

По време на избухването в края на 2002 г. инфрачервени данни бяха получени на 29.08.2002 г., 11.12.2002 г., 22.07.2003 г., 15.08.2003 г. и 13.10.2003 г., а *UBV* данни – на 21.07.2002 г., 12.11.2002 г. и 6.10.2003 г.

Комбинирането на фотометрични данни във видимата и инфрачервената област предоставя възможността за анализиране на блясъка в широка спектрална



Фигура 2.1: V крива на блясъка на Z And през 2000 – 2003 г. Данните означени с точки са взети от Skopal et al. (2002, 2004), а тези с кръстчета са наши данни. Стрелките показват моментите на фотометричните наблюдения, а вертикалните линии – на спектралните.

област. Ние комбинирахме получените в близки моменти инфрачервени и UBV данни. За моментите, в които не разполагахме с UBV данни, използвахме такива от статиите на Skopal et al. (2002, 2004). В някои моменти (6.12.2000 г., 12.11.2002 г. и 6.10.2003 г.) използвахме средната стойност от нашите UBV оценки и получените на същата дата от посочените статии. По този начин разполагахме с $UBVJHKLM$ данни, отнасящи се до четири момента по време на голямото избухване в периода 2000 – 2002 г. (първият е в спокойно състояние преди избухването) и до още пет момента по време на избухването в края на 2002 г., като четири от тях са в ниското състояние на блясъка, а петият – в максимума на избухването. Данните бяха отнесени към моментите на получаване на UBV величините, тъй като инфрачервените величини се изменят по-малко. Тези данни са представени в Табл. 2.1, а моментите им на получаване са отбелязани на Фиг. 2.1. Ние използвахме и R фотометрични данни от Skopal (2003) и Skopal et al. (2004). Тези данни също са включени в Табл. 2.1.

Таблица 2.1: Многоцветна фотометрия

Дата ггггммдд	JD— 2 450 000	Фаза	U	B	V	R ^a	I ^a	J	H	K	L	M
19990915	1437.383	0.560	10.81	11.53	10.43	8.80	7.20	6.23	5.28	4.97	4.76	4.99
Quiescent			±0.03	±0.02	±0.03	±0.02	±0.01	±0.02	±0.03	±0.01	±0.03	±0.08
20001122	1871.313	0.131	8.60	9.41	8.94			6.05 ^b	5.22 ^b	4.90 ^b	4.64	4.91
Active			±0.01	±0.01	±0.01						±0.01	±0.02
20001206	1885.229	0.150	8.40	9.30	8.86			6.02 ^b	5.20 ^b	4.86 ^b	4.61	4.93
Active			±0.01	±0.01	±0.01						±0.01	±0.02
20020127	2302.224	0.699	10.01	10.93	10.17			6.21	5.31	4.98 ^b	4.76	5.03
Active			±0.03	±0.02	±0.03			±0.02	±0.01		±0.01	±0.03
20020819	2506.451	0.960	11.41	11.79	10.63	9.42		6.22	5.28	4.95	4.77	5.06
Quiescent			±0.02	±0.02	±0.02	±0.02		±0.01	±0.01	±0.01	±0.02	±0.04
20021112	2591.308	0.080	10.10	10.76	9.85	8.80		6.10 ^d	5.21 ^d	4.88 ^d	4.62	4.92
Active			±0.02	±0.02	±0.02	±0.02					±0.01	±0.02
20030804	2855.525	0.428	10.72	11.50 ^c	10.42 ^c	9.14 ^c		6.25 ^d	5.35	5.00	4.77	5.02
Quiescent			±0.02						±0.01	±0.01	±0.01	±0.06
20030817	2869.400	0.447	10.70	11.52 ^c	10.45 ^c	9.15 ^c		6.26 ^d	5.35	4.99 ^d	4.81	5.08
Quiescent			±0.02						±0.01		±0.01	±0.08
20031006	2919.294	0.512	10.65	11.50	10.47	9.15 ^c		6.24	5.33 ^d	4.99	4.77	5.01
Quiescent			±0.03	±0.02	±0.03			±0.01		±0.01	±0.01	±0.04

^a Данните са от работите на Belyakina (1992), Skopal (2003) и Skopal et al. (2004) (виж текста).

^b Вътрешната неточност е около 0^m001.

^c Вътрешната неточност е 0^m005.

^d Вътрешната неточност е около 0^m01.

Звездните величини бяха трансформирани в потоци в континуума с помощта на калибровъчните потоци от Mihailov (1973).

U потокът беше коригиран за разпределението на енергията в областта на Балмеровия скок в континуума на Z And. Необходимо е да се коригират също UBV потоците за емисионните линии, тъй като системата има силни емисионни линии във видимата част от спектъра и неотчитането на тяхното излъчване ще доведе до завишаване на потоците в континуума. За тази цел използвахме UBV данните и потоците на емисионните линии от Mikołajewska & Kenyon (1996). Получихме, че светлината излъчена в линиите, е съответно 3 %, 9 % и 1 % от UBV потоците на фази, близки до орбиталния максимум в спокойно състояние и в момента JD 2446723, когато системата се връщаше в спокойно състояние след активната фаза в периода 1984 – 1986 г. По този начин бяха коригирани потоците от първата и четвъртата UBV оценки, а също и петте оценки от избухването в края 2002 г., поради факта, че относителните интензивности на емисионните линии в този период бяха практически същите, както в спокойно състояние.

Нашите спектрални данни (виж Гл. 4) показват, че в максимума на блясъка през 2000 г. всички емисионни линии отслабнаха по отношение на локалния континуум и по тази причина UBV потоците за 22.11.2000 г. и 6.12.2000 г. не бяха коригирани за емисионните линии.

2.2 Спектрални данни с висока дисперсия

По време на голямото избухване в периода 2000–2002 г. и в спокойния период преди него бяха получени спектрални данни в областите на линиите H_{α} , $He\ II\ 4686$ и H_{γ} . По време на избухването в края на 2002 г. бяха получени спектрални данни в областите на линиите $He\ II\ 4686$ и H_{γ} . Всички наблюдения бяха проведени с 1024×1024 CCD камера Photometrics AT200 (с размер на пиксела $24\ \mu m$), поставена в Куде спектрографа на 2m RCC телескоп в НАО Рожен. Всяка спектрална област обхващаше около $200\ \text{\AA}$. Спектралното разделяне беше $0.2\ \text{\AA}/px$. В случаите, когато бяха направени повече от една експозиция на нощ, спектрите бяха събрани, за да се подобри съотношението сигнал/шум. Спектралните данни са представени в Табл. 2.2 и моментите им на получаване са показани на Фиг. 2.1. За първичната обработка на данните, както и за получаване на дисперсионната крива, корекция за движението на Земята и пресмятане на лъчевите скорости и еквивалентните ширини бяха използвани стандартните процедури и пакета IRAF¹.

Грешката при построяването на локалното ниво на континуума се определя от съотношението сигнал/шум на дадения спектър. В оптичния спектър на Z And има множество слаби емисионни линии, както и слаби абсорбционни линии на М гиганта. По тази причина във всяка спектрална област първоначално бяха подбрани участъци, свободни от емисионни линии, а след това тези участъци

¹The IRAF package is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under contract with the National Sciences Foundation.

Таблица 2.2: Спектрални данни

Дата ггггммдд	JD – 2 450 000	Орб. фаза	Спектрална област
19990107	1186.50	0.228	H α , He II λ 4686, H γ
19990917	1439.48	0.562	H α , He II λ 4686, H γ
19991025	1477.36	0.612	H α
19991127	1510.24	0.656	H α , He II λ 4686, H γ
20001117	1866.36	0.125	H α , He II λ 4686, H γ
20001205	1884.35	0.148	H α , He II λ 4686, H γ
20001206	1885.38	0.150	H α , He II λ 4686, H γ
20010708	2098.54	0.432	H α , He II λ 4686, H γ
20010728	2118.58	0.457	H α
20010907	2160.44	0.512	H α , He II λ 4686
20011003	2186.47	0.547	H α , He II λ 4686, H γ
20020123	2298.25	0.694	H α , He II λ 4686, H γ
20020925	2543.35	0.017	He II λ 4686, H γ
20021020	2568.37	0.050	He II λ 4686, H γ
20021112	2591.20	0.080	He II λ 4686, H γ

бяха използвани за построяването на локалното ниво на континуума. Грешката в еквивалентната ширина на линията се определя от локалното ниво на континуума и се изменя в широки граници, в зависимост от относителната интензивност на линиите. За най-силната емисия в спектъра – линията H α , тя е 1–2 % и нараства до около 20 % за най-слабите измервани от нас линии.

За да пресметнем потока енергия в дадена спектрална линия в абсолютни единици, трябва да разполагаме освен с нейната еквивалентна ширина и с потока в континуума на дължината на вълната на линията. Потоките в континуума в областите на линиите He II 4686 и H γ бяха пресметнати чрез линейна интерполация на потоците B и V , получени в същите или близки ноци. В спокойно състояние на системата потокът в континуума на дължината на H α беше пресметнат чрез линейна екстраполация на потоците V и R . По време на избухването формата на континуума се промени и за пресмятане на H α потока беше използван фотометричният поток R . Грешката в потока енергия в линиите е $< 5\%$ за H α и достига 20–25 % за най-слабите линии.

Всички потоци бяха коригирани за междузвездното почервяване $E(B - V)$. Тази величина беше определяна в редица статии и различните автори предлагат относително близки стойности. Ние възприехме стойността 0.30. Всички потоци от видимата и ултравиолетовата област, използвани в настоящето изследване, са коригирани по метода на Seaton (1979), а тези от инфрачервената – по метода на Johnson (1966).

За нуждите на изследването използвахме елементите на блясъка

$$\text{Min(vis.)} = \text{JD } 2\,442\,666^{\text{d}} + 758^{\text{d}}.8 \times E,$$

от (Formigini & Leibowitz 1994; Mikołajewska & Kenyon 1996; Fekel et al. 2000).

3 Фотометрично изследване на системата по време на избухването в периода 2000 – 2002 г.

3.1 Анализ на разпределението на енергията

Главната цел на нашето фотометрично изследване е да получим параметрите на горещия звезден компонент и околосвездната мъглявина по време на избухването. Тези параметри може да се определят от излъчването им в континуума, което от своя страна изисква наличието на фотометричните потоци на всеки компонент на системата. Потоците на хладния гигант може да се пресметнат от нашите инфрачервени величини, получени в спокойно състояние, тъй като в тази област той е единственият източник на излъчване. Визуалните потоци на горещия компонент в спокойно състояние може да се намерят от неговите ултравиолетово излъчване и оценка на температурата при допускане, че излъчва като абсолютно черно тяло (АЧТ). Наличието на звездните потоци дава възможност да се получи излъчването на околосвездната мъглявина и на негова база – електронната температура и мярката на емисия в спокойно състояние.

По време на избухването ние можем да определим потоците в континуума на всеки компонент на системата, използвайки само нашите данни и обстоятелството, че в някои фотометрични ивици излъчват само два от компонентите и приносът на единия от тях е известен. Наблюдаемите, както и моделните потоци на излъчването в континуума на системата Z And са представени в Табл.3.1.

3.1.1 Спокойно състояние

Ефективната температура на хладния гигант беше определена от неговия спектрален клас $M(4.5 \pm 0.2)$ (Mürset & Schmid 1999) с помощта на съвременната калибровка за нормални гиганти на Belle et al. (1999), $T_{\text{eff}} = 3400 \pm 270$ K. Наблюдаемият болометричен поток на гиганта бе получен чрез сумиране на излъчването в две спектрални области – *UBVRI* и *JHKLM* областите. В първата от тях гигантът не излъчва планковски и континуумът бе пресметнат чрез линейна интерполация на *UBVRI* потоците. Във втората континуумът бе получен чрез интегриране на функция на Планк с температура 3100 K. В резултат на сумирането получихме наблюдаем болометричен поток $(2.221 \pm 0.048) \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Радиусът на гиганта беше получен от болометричния поток и ефективната тем-

пература с помощта на връзката $R = d(F_{\text{bol}}/\sigma T_{\text{eff}}^4)^{1/2}$ и разстояние до системата 1.12 крс (Fernandez-Castro et al. 1988, 1995). Този радиус възлиза на $(85 \pm 4) (d/1.12 \text{ крс}) R_{\odot}$.

UBV потоците на горещата звезда в спокойно състояние бяха определени с допускането за излъчване като АЧТ и използвайки съотношенията на потоците на дължина λ 1270 Å и на дължините на *UBV* системите на АЧТ със същата температура и наблюдаемия поток на λ 1270 Å (Fernandez-Castro et al. 1995), където континуумът на мъглявината е пренебрежимо малък.

За нашите пресмятания възприехме температура 150 000 К. *UBV* потоците, получени на базата на тази стойност, са представени в Табл. 3.1. Температурата и използваният ултравиолетов поток водят до радиус $R = 0.06 (d/1.12 \text{ крс}) R_{\odot}$ (Табл. 3.2) с грешка $< 0.01 R_{\odot}$, определяща се от тази на потока.

UBV потоците на околосвездната мъглявина се получават чрез изваждане на звездните потоци от наблюдаемите. Фитирането на небулярните потоци дава като резултат електронната температура и мярата на емисия на мъглявината. Оказа се, че небулярното излъчване на системата в спокойно състояние в областта на фотометричните системи *UBVRI* се фитира най-добре с газов континуум с електронна температура $T_e = 20\,000 \pm 1000$ К и $n_e^2 V = (4.7 \pm 0.3) \times 10^{59} (d/1.12 \text{ крс})^2 \text{ cm}^{-3}$ (Табл. 3.2, Фиг. 3.1). Небулярните потоци в спокойно състояние в Табл. 3.1 се отнасят за тези параметри.

3.1.2 Активна фаза

Разпределението на енергията на горещия компонент претърпя драстична промяна по време на избухването и неговото излъчване достигна инфрачервената област. В момента на максимума на блясъка само областта на системите *L* и *M* остана свободна от горещото излъчване. Околосвездната мъглявина имаше принос в континуума в *L* областта. Отначало ние получихме една приблизителна оценка за мярата на емисия, използвайки електронната температура за спокойно състояние и *L* потока, от който беше изваден приносът на гиганта. След това тези параметри бяха коригирани с използването на всички фотометрични данни.

В момента на нашето последно наблюдение *H*, *K* и *L* потоците достигнаха своите характерни за спокойно състояние стойности, което означава, че само хладният гигант е излъчвал в тяхната област (Табл. 3.1). *UBV* потоците обаче, имаха все още високи стойности в сравнение с тези от спокойно състояние. *J* потокът беше също над своята стойност от спокойно състояние и допуснахме, че допълнителното излъчване принадлежи само на околосвездната мъглявина. Използвайки това излъчване, ние получихме приблизителна оценка за мярата на емисия, която по-късно беше коригирана с помощта на *UBV* данните. Параметрите, следващи от най-доброто фитиране, за всеки момент от избухването на звездата, са представени в Табл. 3.2.

Таблица 3.1: Потоци в континуума на компонентите на системата по време на избухването през 2000–2002 г. в единици $10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$.

Дата ггггммдд	КС ^a	U	B	V	R	I	J	H	K	L	M
19990915 Quiescent	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.755	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
	Hot	0.030	0.014								
	Neb.	1.012	0.293	0.257	0.195	0.157	0.056	0.032	0.020		
	TF	1.062	0.467	0.633	0.905	1.912	1.399	0.888	0.459	0.113	0.034
	OF	0.988	0.497	0.625	1.093	1.870	1.347	0.877	0.432	0.105	0.023
		± 0.022	± 0.010	± 0.017	± 0.020	± 0.017	± 0.025	± 0.023	± 0.004	± 0.003	± 0.001
	r	7	−6	1	−17	2	4	1	6	8	48
20001122 Active	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.755	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
	Hot	5.537	2.934	1.336	0.730	0.340	0.063	0.022	0.007		
	Neb.	1.983	0.717	0.631	0.547	0.432	0.147	0.081	0.051	0.020	
	TF	7.540	3.811	2.343	1.987	2.527	1.553	0.959	0.497	0.133	0.034
	OF	7.205	3.848	2.492			1.591	0.927	0.461	0.117	0.024
		± 0.054	± 0.036	± 0.022			± 0.002	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
	r	5	−1	−6			−2	3	8	14	42
20001206 Active	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.755	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
	Hot	6.257	3.315	1.510	0.826	0.384	0.071	0.024	0.008		
	Neb.	2.382	0.861	0.758	0.657	0.519	0.176	0.098	0.061	0.024	
	TF	8.659	4.336	2.644	2.192	2.658	1.590	0.978	0.508	0.137	0.034
	OF	8.662	4.257	2.682			1.635	0.944	0.478	0.120	0.024
		± 0.064	± 0.039	± 0.023			± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
	r	0	2	−1			−4	4	6	14	42
20020127 Active	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.755	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
	Hot	1.247	0.629	0.274	0.146	0.066	0.012				
	Neb.	0.622	0.140	0.123	0.107	0.084	0.029	0.016	0.010	0.004	
	TF	1.889	0.929	0.773	0.963	1.905	1.384	0.872	0.449	0.117	0.034
	OF	2.067	0.863	0.795			1.372	0.853	0.428	0.105	0.022
		± 0.044	± 0.018	± 0.022			± 0.025	± 0.007	± 0.001	± 0.001	± 0.001
	r	−9	8	−3			1	2	5	11	54

^a Компоненти на системата, TF=Cool+Hot+Nebular: пълен поток; OF: наблюдаем поток; r=(TF−OF)/OF в %.

Таблица 3.2: Параметри на горещия звезден и небулярния компонент на системата по време на избухването през 2000–2002 г.

Дата ггггммдд	Компонент на системата	T_{eff} (K)	$R(d/1.12 \text{ kpc})$ ($R_{\odot}$)	T_e (K)	$n_e^2 V(d/1.12 \text{ kpc})^2$ $\times 10^{59} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
19990915	Hot	150 000 ^a	0.06 ^a		
Quiescent	Nebular			20 000 $\pm$ 1000	4.7 $\pm$ 0.3
20001122	Hot	35 000 $\pm$ 1000	2.22 $\pm$ 0.06		
Active	Nebular			20 000 $\pm$ 1000	17.4 $\pm$ 0.6
20001206	Hot	35 000 $\pm$ 1000	2.36 $\pm$ 0.07		
Active	Nebular			20 000 $\pm$ 1000	20.9 $\pm$ 0.5
20020127	Hot	58 000 ⁺²⁰⁰⁰ ₋₃₀₀₀	0.72 ^{+0.04} _{-0.03}		
Active	Nebular			20 000 $\pm$ 2000	3.4 $\pm$ 0.4

^a Получени от UV данни (Nussbaumer & Vogel 1989; Fernandez-Castro et al. 1988, 1995; виж текста).

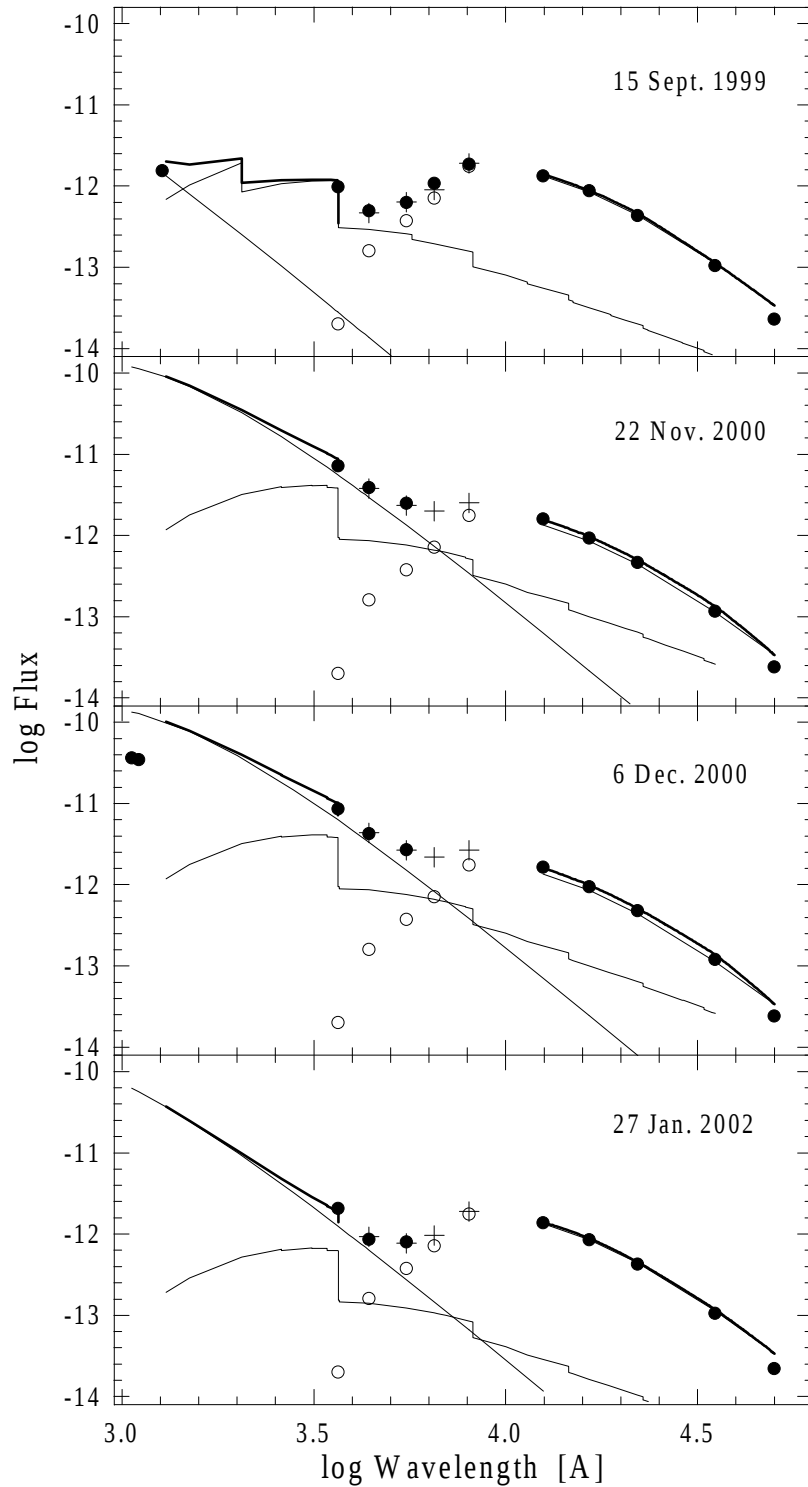
Оказа се, че в момента на максимален блясък мярата на емисия е нарастнала 4.4 пъти в сравнение със стойността си в спокойно състояние на фаза, близка до тази на орбиталния фотометричен максимум (Табл. 3.2).

UBVJHK потоците на горещия компонент по време на избухването бяха получени след изваждане на потоците на гиганта и мъглявината от наблюдаемите. Потоците на горещия компонент за всеки момент бяха фитирани с планковски континуум на звезда (Фиг. 3.1), чиито температура и радиус са представени в Табл. 3.2. Данните в Табл. 3.1 предлагат драстично нарастване на звездния радиус в сравнение със стойността му в спокойно състояние.

3.2 Дискусия

Нашите фотометрични данни предлагат силно преразпределение на енергията в наблюдаваната област от спектъра по време на нарастването на блясъка – поведение, типично за системи, съдържащи гореща звезда с висока светимост, а не акреционен диск (Mikołajewska & Kenyon 1992). Стойността на радиуса, която получихме за момента на максимален блясък, показва увеличение около 40 пъти и вероятно се отнася за изхвърлена обвивка с фотосферни характеристики.

Температурата и радиусът на горещия компонент в спокойно състояние, възприети от нас, водят до болометрична светимост $L_{\text{bol}} = 1600 L_{\odot}$, а тези в момента на максимален блясък – до забележителната стойност $L_{\text{bol}} = 7200 L_{\odot}$. При това положение не може да се твърди, че избухването се реализира при постоянна болометрична светимост, а по-скоро тя нараства. Нашите резултати са в добро съгласие с получените по-късно от други автори (Sokoloski et al. 2006; Skopal et al. 2006), които оценяват болометричната светимост в максимума на блясъка да е близка до $10^4 L_{\odot}$. Понастоящем е общоприето становището, че болометричната



Фигура 3.1: Разпределение на енергията в спектъра на Z And в спокойно състояние и в различни моменти от избухването през 2000–2002 г. Наблюдаемите потоци са представени с точки. Континуумът на всеки от компонентите на системата е показан с тънка линия, а *UBVRI* потоците на гиганта – с кръгчета. Резултантният континуум е показан с дебела линия, а в *BVRI* областта – с кръстчета, поставени на позициите на фотометричните системи, тъй като в тази област гигантът не излъчва като АЧТ. В панела за 15.09.1999 г. са показани и UV поток от Fernandez-Castro et al. (1995) и *RI* потоци от Belyakina (1992), а в панела за 6.12.2000 г. – UV потоци от Sokoloski et al. (2002). Потоците са в единици $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$.

светимост на Z And нарастна през активната фаза след 2000 г. (Bisikalo et al. 2002, 2006; Sokoloski et al. 2006), а не остана постоянна съгласно теорията на устойчивото горене на водорода върху компактен обект (Paczynski & Zytlow 1978; Fujimoto 1982).

4 Спектрално изследване на системата по време на избухването в периода 2000–2002г.

4.1 Анализ на линейния спектър

4.1.1 Линии с профил от тип P Cyg

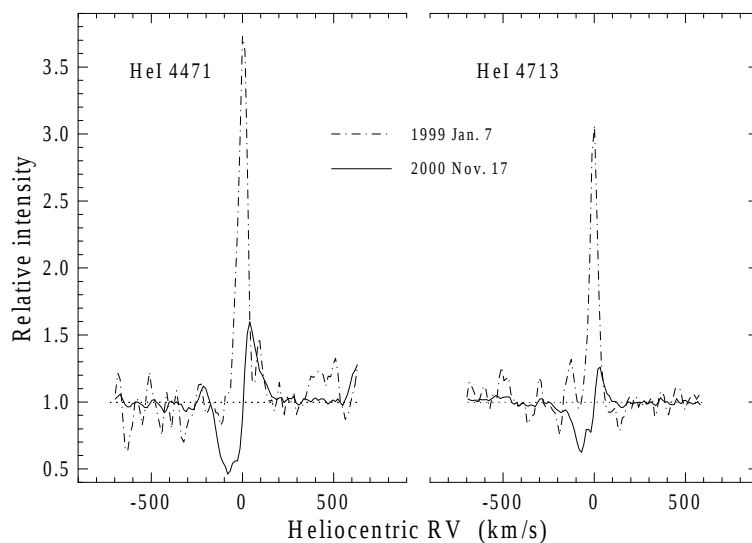
В спокойно състояние на системата триплетните линии на хелия He I 4471 и He I 4713 имаха чисто емисионен профил и $\text{FWHM} = 45\text{--}50 \text{ km s}^{-1}$. През ноември и декември, по времето на максимален блясък, се появи синьо отместена абсорбция. През ноември тази абсорбция имаше двукомпонентна структура (Фиг. 4.1). Линията He I 4471 достигна остатъчна интензивност 0.46 през ноември и 0.60 през декември. Тъй като приносът на континуума на хладния гигант в същото време беше около 0.07 – 0.08 от общия континуум на системата на дължините на тези линии (Tomov et al. 2003), те може да се свържат с горещия компонент. Ние наблюдавахме системата на орбитални фази близо до спектралното съединение, където лъчевата скорост на спътника е близка до 0 km s^{-1} (Mikołajewska & Kenyon 1996). Тогава скоростта на абсорбционния компонент от около -60 km s^{-1} вероятно се отнася до изтичащо вещество от спътника. В такъв случай може да се направи единственото допускане, че фотосферата на спътника се е разширявала и ние сме наблюдавали звезден вятър от тип P Cyg.

4.1.2 Линии съдържащи широк емисионен компонент

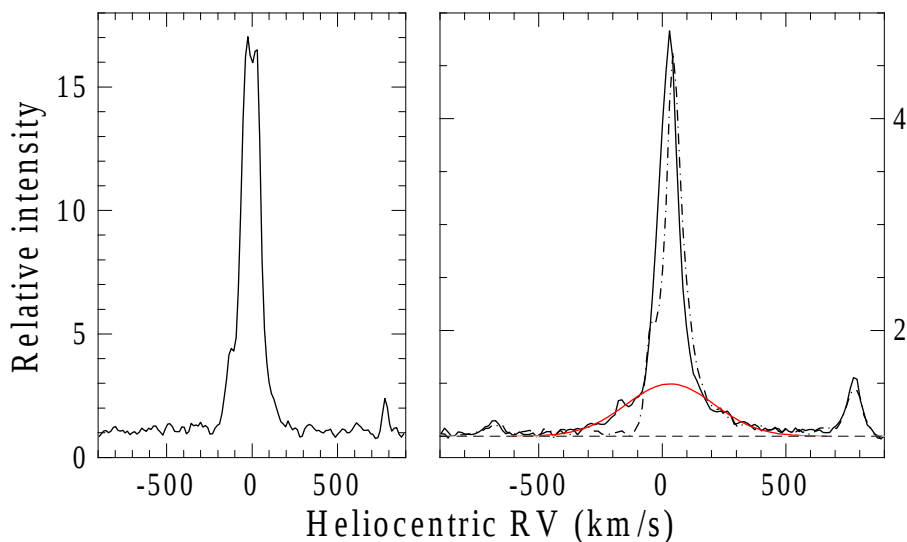
Профилът на линията H_γ в спокойно състояние и по време на избухване е показан на Фиг. 4.2. В спокойно състояние на системата пълната ширина на нулева интензивност (FWZI) на линията достигаше около 500 km s^{-1} . Тази ширина, както и синият компонент могат да се интерпретират с принос в линията на оптически тънък акреционен диск.

По време на избухването наред с тесния компонент на линията се виждаше и допълнителна емисия с ниска интензивност, с височина около 0.5 над локалния континуум и $\text{FWZI} = 1000 \text{ km s}^{-1}$ (Фиг. 4.2). Интензивността на широката емисия достигна максималната си стойност в момента на максимален блясък, докато поведението на тесния компонент беше различно. Ето защо ние считаме, че линията H_γ се състоеше от тесен компонент от небулярен тип и широк компонент.

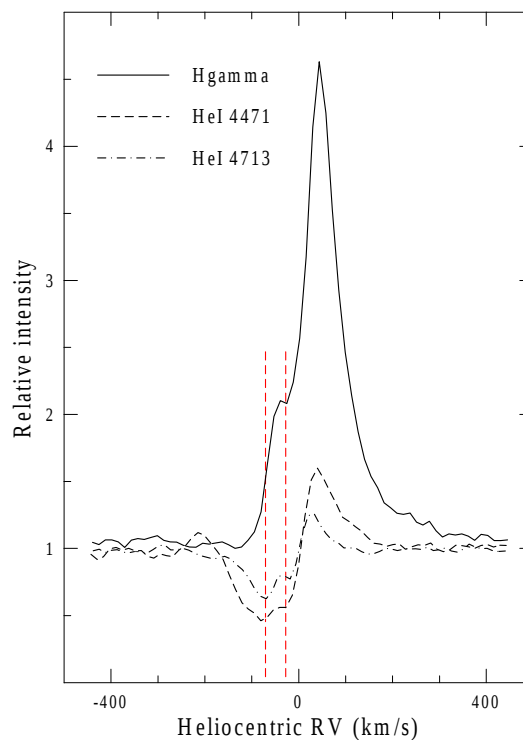
През ноември 2000 г. тесният компонент имаше рамо от късовълновата си страна, което вероятно се появи поради присъствието на депресия в емисионния профил. Тази депресия имаше приблизително същата позиция по скорост като



Фигура 4.1: Профили на триплетните линии на He I в спокойно състояние (прекъсната линия с точки) и в активна фаза (непрекъсната линия).



Фигура 4.2: Профил на линията H_{γ} . В левия панел е показан спектърът от 7.01.1999 г., получен в спокойно състояние на системата. В десния панел са показани спектрите от 17.11.2000 г. (прекъсната линия с точки) и 5.12.2000 г. (непрекъсната линия), получени по време на избухването. Показана е и гаусовата функция от фитиране на широкия компонент. Нивото на локалния континуум е означено с прекъсната линия.

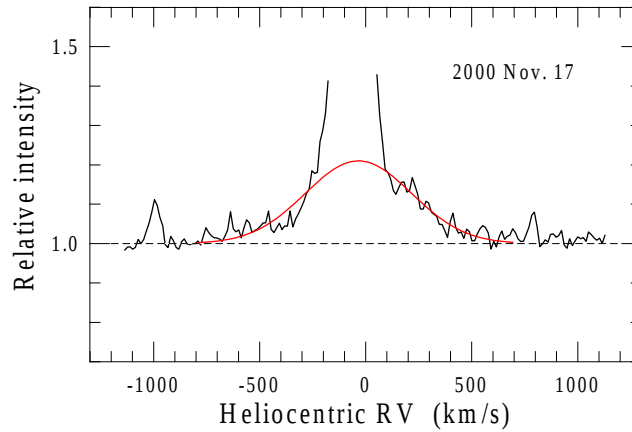


Фигура 4.3: Профили на линиите $H\gamma$, He I $\lambda 4471$ и He I $\lambda 4713$ на 17.11.2000 г. Позициите на двата компонента на абсорбцията на хелия са отбелязани с вертикални прекъснати линии.

червения компонент на абсорбцията на Р Суг линиите (Фиг. 4.3), показващи звезден вятър с ниска скорост от компакния спътник в системата. Това означава, че вятърът поглъща и част от излъчването в $H\gamma$. Голямата положителна скорост на линията на тази дата също може да се обясни с присъствието на тази депресия.

Широкият емисионен компонент беше анализиран чрез фитиране с гаусова функция (Фиг. 4.2). Грешката на еквивалентната ширина достига до 20 %, а на потока в линията – до 25 %.

Синьото крило на широкия компонент не се виждаше през ноември 2000 г. (Фиг. 4.2), което вероятно е в резултат на поглъщане от звездния вятър, формиращ Р Суг линиите. Ние считаме, че широкият емисионен компонент на линията $H\gamma$ се определя от оптически тънък звезден вятър с висока скорост около 500 km s^{-1} от компакния спътник в системата. Този вятър беше наблюдаван също и в линията He II 4686, съдържаща също така широк емисионен компонент с ниска интензивност и пълна ширина на нулева интензивност достигаща около 1200 km s^{-1} (Фиг. 4.4). В определени моменти обаче, поведението на високоскоростната емисия в тези две линии беше различно, което означава, че те възникват в различни области от вятъра.



Фигура 4.4: Областта на крилата на линията He II $\lambda 4686$, в която се вижда широкият компонент. Показана е и гаусовата функция от фитирането му.

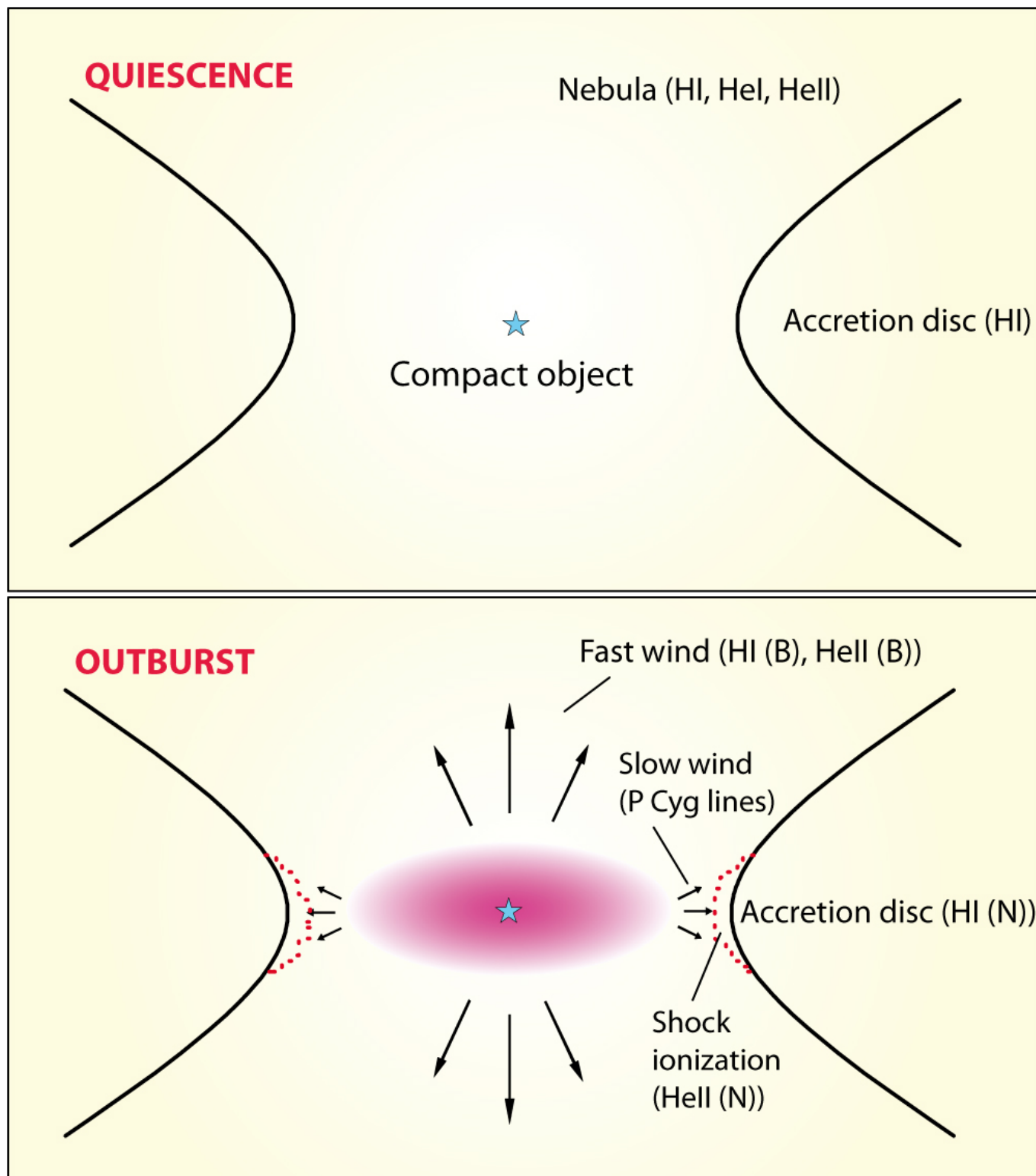
4.2 Темп на загуба на маса

Темпът на загуба на маса на спътника в резултат на високоскоростния вятър беше пресметнат от потока енергия на широкия компонент на линиите H_γ и He II 4686 при допускането, че изтичането има сферична симетрия и постоянна скорост и използвайки небулярния подход, т.е. предполагайки, че газът е прозрачен за собственото си излъчване.

Нашите спектрални данни ни предоставиха възможността да оценим темпа на загуба на маса по две спектрални линии – H_γ и He II 4686. Данните предлагат намаляване на темпа от декември 2000 г. до октомври 2001 г. в близки съотношения, но темпът, получен по линията H_γ , е систематично по-висок – около 1.6 до 1.8 пъти. Ние приемаме този темп за краен резултат, тъй като широкият H_γ компонент е по-интензивен и неговата еквивалентна ширина и поток в линията се измерват с по-добра точност. Получихме, че от момента на максимум на блясъка до октомври 2001 г. темпът е намалял от $2.4 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ до $1.0 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$.

4.3 Модел

По време на избухването освен високоскоростен вятър, беше наблюдавано и изтичане на маса с ниска скорост от около 60 km s^{-1} от спътника по Р Суг линиите на He I. За обяснение на нашите данни предлагаме модела, показан на Фиг. 4.5. Някои теоретични резултати (Bisikalo et al. 2006) показват, че в определени периоди е възможно в системата да съществува акреционен диск. Ние допускаме, че по време на избухването такъв диск (или небулярно вещество с повишена плътност в орбиталната равнина) съществува и възпрепятства звездния вятър в равнината на орбитата, където неговата скорост намалява от около 500 km s^{-1} до около 60 km s^{-1} . На по-високи звездни ширини скоростта на вятъра не се променя, оставайки 500 km s^{-1} . В такъв случай близо до орбиталната равнина, където скоростта намалява след сблъскване с диска, плътността на изтичащия газ ще е висока и



Фигура 4.5: Схематичен модел на горещия компонент на системата Z And в равнина перпендикулярна на орбиталната.

нивото на наблюдаемата фотосфера (псевдофотосфера) се разполага далече от компактния обект. На по-високи звездни ширини скоростта на вятъра е висока, плътността е ниска и нивото на наблюдаемата фотосфера се разполага близо до компактния обект. По този начин в областта на орбиталната равнина възниква оптически плътна дискообразна обвивка, която окултира компактния обект. Тъй като тя има много по-ниска ефективна температура от тази на компактния обект в спокойно състояние, причинява силно преразпределение на енергията в континуума и нарастване на оптическия поток. Ниската ефективна температура на наблюдаемата фотосфера на спътника около 35 000 K, получена от анализа на разпределението на енергията в континуума (Гл. 3; Skopal et al. 2006), може да бъде отнесена към тази дискообразна обвивка. Р Суг абсорбцията се формира в изтичащото вещество, проектиращо се върху обвивката.

Съгласно теоретичния резултат на Bisikalo et al. (2006) в мястото на сблъскване на вятъра с диска се формира гореща област на ударна йонизация, чиято температура може да достигне 10^6 K и допускаме, че тесният емисионен компонент на линията He II 4686 е свързан с тази област.

В рамките на този модел е пресметнато *UBV* излъчването на вятъра. Оказва се, че около 90 % от това излъчване е от плътната екваториална част, възникнала в резултат на сблъскването с диска. Приносът на целия вятър в *UBV* потоците на околозвездната мъглявина е около 20 %.

5 Фотометрично и спектрално изследване на системата по време на избухването в края на 2002 г.

5.1 Анализ на разпределението на енергията

5.1.1 Спокойно състояние

В моментите 19.08.2002 г., 4.08., 17.08. и 6.10.2003 г. (Табл. 2.1) системата имаше характерните си за спокойно състояние *UBVRJHKLM* величини и по тази причина ще считаме, че в тези моменти е била в спокойно състояние. В Гл. 3.1.1 бяха пресметнати потоците и параметрите на нейния хладен гигант от данните от 15.09.1999 г., а също планковските потоци и параметрите на компактния спътник в спокойно състояние.

Потоците на околозвездната мъглявина бяха получени след като звездните потоци бяха извадени от наблюдаемите. Електронната температура и мярата на емисия на мъглявината бяха пресметнати чрез фитиране на нейните потоци с небулярен континуум. Резултатите са представени в Табл. 5.1. Потоците за спокойно състояние в Табл. 5.1 и на Фиг. 5.1 се отнасят до съответните параметри в Табл. 5.2.

Таблица 5.1: Потоци в континуума на компонентите на системата по време на избухването в края на 2002 г. в единици $10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$. Потоците на гиганта и „спокойните“ потоци на горещия компонент са същите както в Гл. 3.

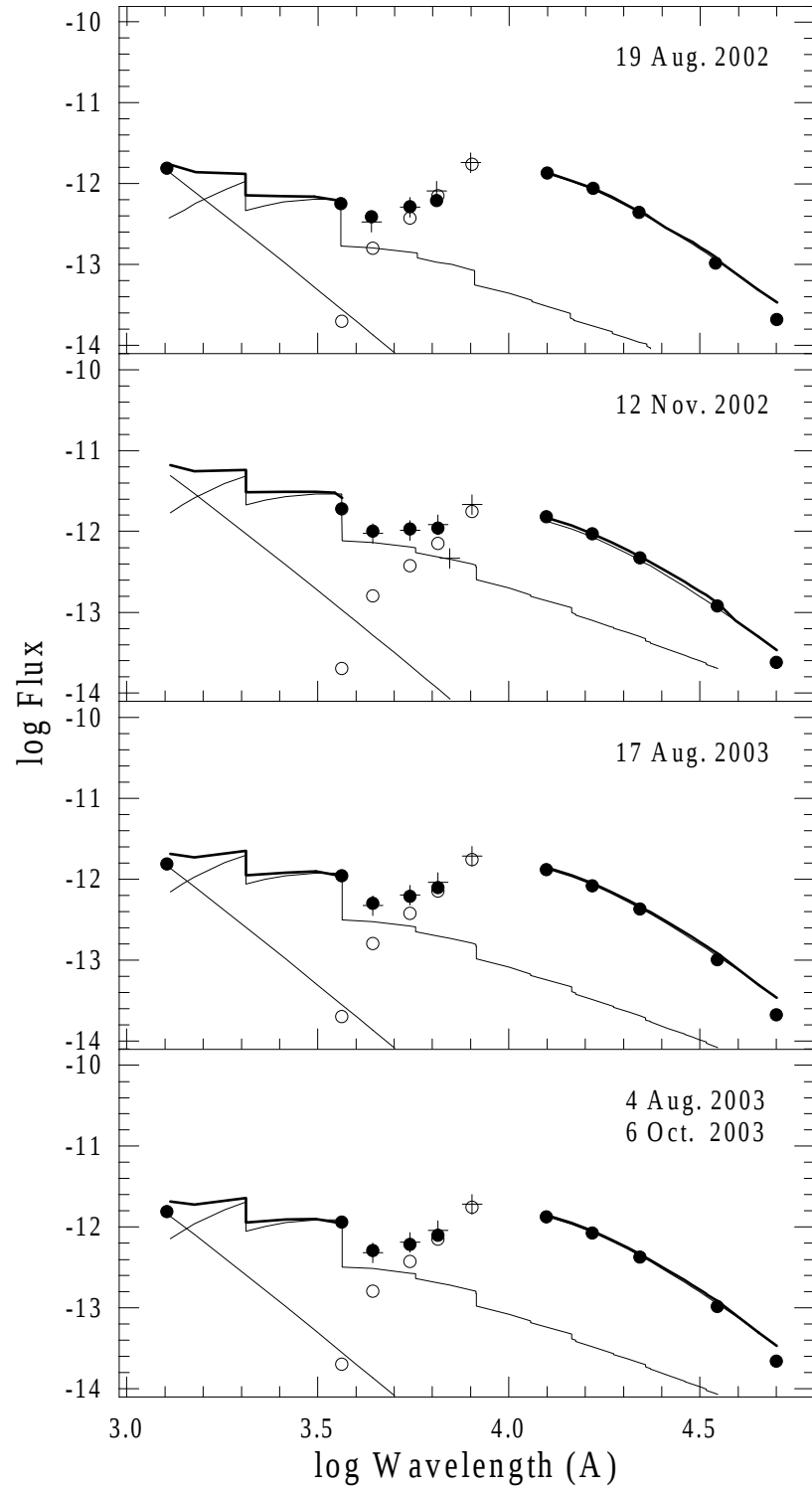
Дата ггггммдд	SC ^a	U	B	V	R	J	H	K	L	M
20020819	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
Quiescent	Hot	0.030	0.014							
	Neb.	0.560	0.162	0.142	0.108	0.031	0.018	0.011	0.004	
	TF	0.580	0.322	0.518	0.818	1.374	0.874	0.450	0.117	0.034
	OF	0.569	0.391	0.520	0.617	1.359	0.878	0.440	0.104	0.021
		± 0.009	± 0.007	± 0.008	± 0.012	± 0.012	± 0.009	± 0.004	± 0.002	± 0.001
	r	2	−18	0	32	1	0	2	12	62
20021112	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
Active	Hot	0.107	0.052	0.022						
	Neb.	1.639	0.730	0.640	0.485	0.138	0.079	0.050	0.020	
	TF	1.766	0.942	1.038	1.195	1.481	0.935	0.489	0.133	0.034
	OF	1.902	1.010	1.068	1.093	1.518	0.936	0.470	0.119	0.024
		± 0.033	± 0.021	± 0.021	± 0.021	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
	r	−7	−7	−3	9	−2	0	4	12	42
20030804	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
Quiescent	Hot	0.030	0.014							
	Neb.	1.055	0.306	0.268	0.203	0.058	0.033	0.021	0.008	
	TF	1.105	0.480	0.644	0.913	1.401	0.889	0.460	0.121	0.034
	OF	1.075	0.511	0.631	0.798	1.323	0.822	0.420	0.104	0.022
		± 0.020	± 0.003	± 0.003	± 0.003	± 0.012	± 0.007	± 0.004	± 0.001	± 0.001
	r	3	−6	2	14	6	8	10	16	54

продължава на следващата страница

Таблица 5.1: *продължение*

Дата ггггммдд	SC ^a	U	B	V	R	J	H	K	L	M
20030817	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
Quiescent	Hot	0.030	0.014							
	Neb.	1.033	0.299	0.262	0.199	0.057	0.032	0.020	0.008	
	TF	1.083	0.473	0.638	0.909	1.400	0.888	0.459	0.121	0.034
	OF	1.095	0.501	0.614	0.791	1.311	0.822	0.424	0.100	0.021
		± 0.020	± 0.002	± 0.003	± 0.004	± 0.012	± 0.007	± 0.004	± 0.001	± 0.002
	r	−1	−6	4	15	7	8	8	21	62
20031006	Cool	0.020	0.160	0.376	0.710	1.343	0.856	0.439	0.113	0.034
Quiescent	Hot	0.030	0.014							
	Neb.	1.055	0.306	0.268	0.203	0.058	0.033	0.021	0.008	
	TF	1.105	0.480	0.644	0.913	1.401	0.889	0.460	0.121	0.034
	OF	1.146	0.511	0.603	0.791	1.335	0.838	0.424	0.104	0.022
		± 0.026	± 0.010	± 0.016	± 0.004	± 0.012	± 0.001	± 0.004	± 0.001	± 0.001
	r	−4	−6	7	15	5	6	8	16	54

^a Компоненти на системата, TF=Cool+Hot+Nebular: общ поток; OF: наблюдаем поток; r=(TF−OF)/OF в %.



Фигура 5.1: Разпределение на енергията в спектъра на Z And по време на избухването в края на 2002 г. Означенията са същите, както на Фиг. 3.1. Континуумите на гиганта и горещия компонент в спокойно състояние са същите като в Гл. 3. Потоците са в единици $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$.

Таблица 5.2: Параметри на горещия звезден и небулярния компонент на системата по време на избухването в края на 2002 г.

Дата ггггммдд	Компонент на системата	T_{eff} (K)	$R(d/1.12 \text{ kpc})$ ($R_{\odot}$)	T_e (K)	$n_e^2 V(d/1.12 \text{ kpc})^2$ $\times 10^{59} (\text{cm}^{-3})$
20020819	Hot Quiescent	150 000 ^a	0.06 ^a	20 000 $\pm$ 1000	2.6 $\pm$ 0.1
20021112	Hot ^b Active	125 000 $\pm$ 3000	0.13 $\pm$ 0.01	20 000 $\pm$ 1000	11.7 $\pm$ 0.3
20030804	Hot Quiescent	150 000 ^a	0.06 ^a	20 000 $\pm$ 1000	4.9 $\pm$ 0.1
20030817	Hot Quiescent	150 000 ^a	0.06 ^a	20 000 $\pm$ 1000	4.8 $\pm$ 0.1
20031006	Hot Quiescent	150 000 ^a	0.06 ^a	20 000 $\pm$ 1000	4.9 $\pm$ 0.2

^a Получени от UV данни (Nussbaumer & Vogel 1989; Fernandez-Castro et al. 1988, 1995; виж текста).

^b Получените стойности на параметрите са горна граница.

5.1.2 Активна фаза

След момента на орбитален минимум през август 2002 г. блясъкът нарастна отново по две причини – нарастване на неокултираната част на мъглявината и развитие на активност. Най-характерното за фотометричното поведение на Z And в края на 2002 г. беше нейното силно инфрачервено излъчване, чиято интензивност беше много близка до тази в момента на максимален блясък през декември 2000 г. *UBV* излъчването, от своя страна, нарастна малко в сравнение с предишното избухване. Когато анализирахме нашите данни от ноември 2002 г., ние постъпихме по следния начин. Отначало извадихме потоците на хладния гигант от наблюдаемите. Оказа се, че останалото излъчване в областта *RJHK* се фитира много добре с небулярен континуум. В *UBV* областта обаче, присъстваше допълнително излъчване от трети компонент (Табл. 5.1).

Небулярното излъчване на системата в областта *UBVRJHKL* се фитира най-добре с газов континуум с $T_e = 20\,000 \pm 1000$ K и $n_e^2 V = (11.7 \pm 0.3) \times 10^{59} (d/1.12 \text{ kpc})^2 \text{ cm}^{-3}$ (Фиг. 5.1, Табл. 5.2). Небулярните потоци в Табл. 5.1 се отнасят до тези параметри.

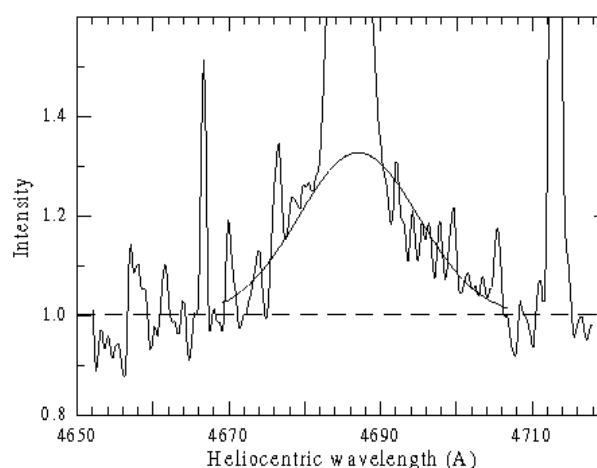
Този резултат показва, че нарастването на блясъка на Z And се дължеше главно на небулярното излъчване, а разпределението на енергията на нейния компактен компонент беше характерно за горещ обект, излъчващ преимуществено в ултравиолетовата област, както и в спокойно състояние. Тъй като не разполагахме с UV-данни, определихме една горна граница на параметрите на компактия обект на базата на съображението, че неговата Лайманова фотонна светимост

нараства в същото съотношение като мярата на емисия на мъглявината, ако в нея не се развива процес на ударна йонизация. В мъглявината обаче, в резултат на сблъскването на ветровете, възниква и ударна йонизация (Bisikalo et al. 2006) и следователно получената по този начин стойност на Лаймановата светимост е само горна граница.

Използвайки така получената стойност на Лаймановата светимост ($2.36 \pm 0.19) \times 10^{47} \text{ phot s}^{-1}$ и наблюдаемите *UBV* потоци, за горната граница на радиуса и ефективната температура в момента на оптическия максимум получаваме $0.13 \pm 0.01 R_{\odot}$ и $125\,000 \pm 3000 \text{ K}$. Тези параметри са представени в Табл. 5.2 и потоците на горещия компонент (Табл. 5.1, Фиг. 5.1) са пресметнати на тяхна база.

5.2 Анализ на спектралната линия He II 4686 и темп на загуба на маса на спътника

По време на нарастването на блясъка линията He II 4686 се състоеше от два емисионни компонента – тесен централен компонент с ширина $\text{FWHM} = 90 - 100 \text{ km s}^{-1}$ и широк компонент с $\text{FWZI} = 2100 - 2400 \text{ km s}^{-1}$ (Фиг. 5.2). За произхода на широкия компонент съществуват три възможности – електронно разсейване, излъчване от Кеплеров акреционен диск или излъчване от звезден вятър с висока скорост около $1050 - 1200 \text{ km s}^{-1}$. Ние изследвахме първите две и заключихме, че произходът на линията не е свързан с тях, а най-вероятно тя се излъчва от звезден вятър.



Фигура 5.2: Областта на крилата на линията He II 4686 на CCD спектъра от 12.11.2002, където се вижда широкият компонент. Нивото на локалния континуум е означено с прекъснатата линия.

Ние пресметнахме горната граница на темпа на загуба на маса на компактният спътник използвайки потока енергия в широкия компонент на линията He II 4686 и същия подход (Vogel & Nussbaumer 1994), както в случая на голямото избухване, описан в Гл. 4.2. Темпът на загуба бе пресметнат само за момента на

максимален блясък 12.11.2002 г., тъй като само за този момент имаме получен фотосферния радиус на спътника. За горната граница на темпа на загуба на маса получихме стойността $\dot{M} = 1.74 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ крс})^{3/2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, която е близка до тази в момента на максимума на блясъка на голямото избухване.

6 Заключение, основни резултати и приноси

Основните резултати и приноси са обобщени както следва:

1. На базата на спектралния клас M4.5 (Murset&Schmid99) на хладния гигант в системата Z And и калибровъчната зависимост „спектрален клас – ефективна температура“ за нормални гиганти на Belle et al. (1999) е получена неговата ефективна температура $3400 \pm 270 \text{ K}$. На базата на фотометрични *UBVRIJHKLM* данни е получен наблюдаемият болометричен поток на гиганта $(2.221 \pm 0.048) \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Тези данни предлагат радиус на гиганта $(85 \pm 4) (d/1.12 \text{ крс}) R_{\odot}$.
2. Получени са електронната температура и мярата на емисия на околозвездната мъглявина в пет момента, в които блясъкът във всички фотометрични системи имаше характерните си за спокойно състояние стойности. Два от тези моменти са близо до фазата на орбиталния фотометричен максимум, а един от тях – близо до фазата на орбиталния минимум.

Електронната температура и мярата на емисия са получени и в четири момента на активност. В момента на максимум на блясъка през декември 2000 г. мярата на емисия нарастна 4.4 пъти в сравнение със стойността си в спокойно състояние, достигайки $(20.9 \pm 0.5) \times 10^{59} (d/1.12 \text{ крс})^2 \text{ cm}^{-3}$, а електронната температура остана същата като в спокойно състояние $20\,000 \pm 1000 \text{ K}$.

3. По време на нарастване на блясъка през 2000 г. горещият компонент претърпя разширение и радиусът на наблюдаемата фотосфера нарастна около 40 пъти, достигайки стойност в максимума $(2.36 \pm 0.07) (d/1.12 \text{ крс}) R_{\odot}$. Ефективната температура в този момент беше оценена на около $(35\,000 \pm 1000) \text{ K}$. Тези данни водят до болометрична светимост $L_{\text{bol}} = 7200 L_{\odot}$, която превъзхожда неколkokратно „спокойната“ светимост $L_{\text{bol}} = 1600 L_{\odot}$. Съгласно теорията, компактните обекти, компоненти на класическите симбиотични звезди, се намират в режим на стационарно горене на водорода на тяхната повърхност и по време на избухване еволюират при постоянна болометрична светимост. Полученият резултат повдига въпроса за преразглеждане на теорията.

Наблюдаван е двускоростен режим на изтичане на маса от горещия компактен спътник – оптически плътен P Cug вятър с ниска скорост от 60 km s^{-1} ,

проявяващ се в линии на He I и H I и оптически тънък звезден вятър с висока скорост от 500 km s^{-1} , формиращ широките емисионни компоненти на линиите H_γ и He II 4686.

Получен е темпът на загуба на маса на спътника по енергетичния поток в широките емисионни компоненти на линиите H_γ и He II 4686 при допускането, че тези компоненти са оптически тънки. Оказва се, че темпът намалява от $2.4 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ в максимума на блясъка до $1.0 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ през октомври 2001 г. Показано е, че получените по съвършено независими един от друг подходи – **радиус** на наблюдаемата фотосфера от една страна (по данни от многоцветна фотометрия) и **скорост** на P Cug вятъра и **темп на загуба на маса** на спътника от друга (по спектрални данни с високо разрешение), са в добро съгласие.

За обяснение на линейния спектър по време на избухването е предложен модел на системата с акреционен диск (или небулярно вещество с повишена плътност в орбиталната равнина) и скорост на вятъра от спътника 500 km s^{-1} . Вятърът се сблъсква с диска, в резултат на което скоростта му намалява до около 60 km s^{-1} в областта на орбиталната равнина, където се формира оптически плътна дискообразна обвивка, играеща ролята на наблюдаема фотосфера. На по-високи звездни ширини скоростта не се променя, оставайки 500 km s^{-1} . Този модел осигурява обяснение и на нарастването на размера на наблюдаемата фотосфера, получено от многоцветна фотометрия.

В рамките на този модел е пресметнато UBV излъчването на вятъра, което съставлява около 20 % от общото небулярно излъчване на системата. Оказва се, че около 90 % от излъчването на вятъра е от плътната екваториална част.

4. В момента на максимум на блясъка през ноември 2002 г. мярата на емисия на мъглявината нарастна 2.5 пъти в сравнение със стойността си в спокойно състояние, достигайки $(11.7 \pm 0.3) \times 10^{59} (d/1.12 \text{ kpc})^2 \text{ cm}^{-3}$, а електронната температура не се промени.
5. По време на нарастването на блясъка в края на 2002 г. спътникът претърпя слабо разширение, като остана горещ компактен обект както в спокойно състояние на системата. Получена е горната граница на радиуса и ефективната му температура, която е $(0.13 \pm 0.01) (d/1.12 \text{ kpc}) R_\odot$ и $125\,000 \pm 3000 \text{ K}$, съответно.

През същия период на нарастване на блясъка бе наблюдаван широк емисионен компонент на линията He II 4686, показващ скорости $1050 \div 1200 \text{ km s}^{-1}$, за който се предполага, че се дължи най-вероятно на оптически тънък звезден вятър от спътника.

Получена е горната граница на темпа на загуба на маса на спътника в момента на максимума на блясъка по енергетичния поток в тази линия, която възлиза на $1.7 \times 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$.

7 Публикации, на които се основава дисертацията

1. Tomov, N., Taranova, O., Tomova, M. "Mass ejection by the symbiotic binary Z And during its 2000-2002 outburst", 2003, A&A 401, 669-676
2. Tomov, N., Tomova, M., Taranova, O. "Broad-band multicolour observations of the symbiotic binary Z And during quiescence and its activity at the end of 2002", 2004, A&A 428, 985-992
3. Tomov, N., Tomova, M., Taranova, O. "The HeII 4686 line of the symbiotic binary Z And during its outburst at the end of 2002", 2005 in ASP Conf. Ser., The Astrophysics of Cataclysmic Variables and Related Objects, eds. J. M. Hameury, & J. P. Lasota, 330, 465-466
4. Tomov, N.A., Tomova, M.T., Bisikalo, D.V. "Spectral indications of ejection of mass by the symbiotic binary Z And during its 2000–2002 outburst", 2008, MNRAS 389, 829-838
5. Tomov, N.A., Tomova, M.T., Bisikalo, D.V. "Symbiotic Stars with Similar Line Profiles during Activity", 2013, AIP Conf. Proc. 1551, 30-45
6. Tomova, M.T., "Wind's emission of the compact secondary in Z And during its 2000–2002 outburst", 2014, BlgAJ 21, in press

Литература

- van Belle, G. T., Lane, B. F., Thompson, R. R., et al. 1999, *AJ*, 117, 521
- Belyakina, T. S. 1970, *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.*, 41–42, 275
- Belyakina, T. S. 1992, *Izv. Krym. Astrofiz. Obs.*, 84, 49
- Bisikalo, D. V., Boyarchuk, A. A., Kilpio, E. Yu., & Kuznetsov, O. A. 2002, *ARep* 46, 1022
- Bisikalo, D.V., Boyarchuk, A.A., Kilpio, E.Yu., Tomov, N.A., Tomova, M.T. 2006, *ARep* 50, 722
- Fekel, F. C., Hinkle, K. H., Joyce, R. R., & Skrutskie, M. F. 2000, *AJ* 120, 3255
- Fernandez-Castro, T., Cassatella, A., Gimenez, A., & Viotti, R. 1988, *ApJ* 324, 1016
- Fernandez-Castro, T., Gonzalez-Riestra, R., Cassatella, A., Taylor, A., & Seaquist, E. R. 1995, *ApJ* 442, 366
- Formiggini, L., & Leibowitz, E. M. 1994, *A&A* 292, 534
- Fujimoto, M. Y. 1982, *ApJ* 257, 767
- Johnson, H. L. 1966, *ARA&A* 4, 163
- Johnson, H. L., Mitchel, R. I., Iriarte, B., & Wisniewski, W. Z. 1966, *Comm. Lunar and Planet. Lab.*, 4, 99
- Kharitonov, A. V., Tereshchenko, V. M., & Knyazeva, L. N. 1988, *Spectrophotometric Catalogue of Stars*. Nauka, Alma-Ata
- Koorneef, J. 1983, *A&A* 128, 84
- Mihailov, A. A. 1973, *Kurs astrofiziki i zvezdnoj astronomii*. Nauka, Moscow, in russian
- Mikołajewska, J., & Kenyon, S. J. 1992, *MNRAS* 256, 177
- Mikołajewska, J., & Kenyon, S. J. 1996, *AJ* 112, 1659
- Mürset, U., & Schmid, H. M. 1999, *A&AS* 137, 473
- Nussbaumer, H., & Vogel, M. 1989, *A&A* 213, 137
- Paczynski, B., & Zytlow, A. 1978, *ApJ* 222, 604
- Seaton, M. J. 1979, *MNRAS* 187, 73p

Skopal, A. 2003, A&A 401, 17L

Skopal, A., Chochol, D., Pribulla, T., & Vanko, M., 2000, IBVS 5005

Skopal, A., Vanko, M., Pribulla, T., et al. 2002, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 32, 1

Skopal, A., Pribulla, T., Vanko, M., et al. 2004, Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 34, 45

Skopal, A., Vittone, A., Errico, L., Otsuka, M., Tamura, S., Wolf, M., & Elkin, V.G. 2006, A&A 453, 279

Sokoloski, J. L., Kenyon, S. J., Kong, A. K. H., et al. 2002, in The Physics of Cataclysmic Variables and Related Objects, ed. B. T. Gänsicke, K. Beuermann, & K. Reinsch, ASP Conf. Ser. 261, 667

Sokoloski, J.L., et al. 2006, ApJ 636, 1002

Tomov, N. A., Tomova, M. T., & Zamanov, R. K. 2003, in Symbiotic Stars Probing Stellar Evolution, ed. R. L. M. Corradi, J. Mikołajewska, & T. J. Mahoney, ASP Conf. Ser. 303, 254

Vogel, M., & Nussbaumer, H. 1994, A&A 284, 145

Abstract

Broad-band *UBVJHKLM* photometry and high-resolution data taken in the region of the lines H_α , He II 4686 and H_γ of the spectrum of the symbiotic binary Z Andromedae were performed in the quiescent state of the system and during its phase of activity in 2000–2003 including two optical maxima – in December 2000 and November 2002. Broad-band *RI* photometry from the literature was also used. The parameters of the system's components were obtained from its spectral energy distribution based on the multicolour photometry and UV fluxes. These data suggest that during the first optical maximum in December 2000 the hot compact component of the system has undergone a major expansion and the emission measure of the circumbinary nebula has also strongly increased. During the second maximum in November 2002 the outbursting component changed very little – it remained a hot object emitting mostly in the UV, as in the quiescent state of the system, and the growth of the optical light was mainly due to the nebular emission.

The spectral data propose two-velocity regime of the mass-outflow by the outbursting component during the first eruption. The triplet lines of He I had P Cygni profiles indicating stellar wind with a velocity of about 60 km s^{-1} from the hot secondary. This wind created an absorption dip in the emission profile of the line H_γ . The lines H_γ and He II $\lambda 4686$ had broad emission component indicating optically thin stellar wind with a velocity of about 500 km s^{-1} . The intensity of the broad component reached its maximum together with the optical light. To explain the observations a model with an accretion disc was proposed where the velocity of the wind from the accretor is supposed to be 500 km s^{-1} . The accretion disc is responsible for the breaking of the stellar wind close to the orbital plane where its velocity decreases to about 60 km s^{-1} . The mass-loss rate of the accretor at the time of a maximal light was obtained of $2.4 \times 10^{-7} (\text{d}/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ and decreased to $1.0 \times 10^{-7} (\text{d}/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ in October 2001.

The upper limit of the mass-loss rate at the time of the second optical maximum was $1.7 \times 10^{-7} (\text{d}/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ which was close to the rate during the first eruption.