

Авторска справка за основните научни приноси

на дфн Николай Александров Томов,

доцент в ИА с НАО, БАН

Симбиотичните звезди са дългопериодични взаимодействащи двойни, състоящи се от хладен гигант от III – II клас светимост или мирида и компактен обект (субджудже, бяло джудже, неутронна звезда), акретиращ маса от атмосферата на хладния компонент. Изследвани са редица системи от различни подкласове на тази група обекти. Основните приноси и резултати са изложени по-долу. В квадратни скоби са номерата на цитираните публикации съгласно списъка с публикации.

Изследване на системата EG And

1. Орбиталната променливост на оптичните и ултравиолетови линии на симбиотичната двойна EG And се интерпретира в рамките на модела на взаимодействащи ветрове. По границата на стълкновение на ветровете възниква небулярна област с форма, близка до конус. Тъй като импулсът на вятъра на компакния обект е по-малък, коничната повърхнина обхваща областта зад компакния обект и в резултат на орбиталното движение се изкривява в посока, обратна на движението. Освен коничната област, компакният обект йонизира и част от вятъра на гиганта. Предполага се, че спектралната линия H алфа се възбужда както в коничната област, така и в йонизираната част от вятъра на гиганта. Тя е повлияна от самопоглъщане поради нарастващата плътност във вятъра на гиганта и нейният профил се мени с орбиталната фаза. С параметрите на вятъра на гиганта е пресметнат H алфа потокът, който възлиза на около $1 \cdot 10^{-10} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ и е в добро съгласие с наблюдаемия поток от $5 \cdot 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Разликата се дължи главно на самопоглъщането в газа [20, 78].

Симбиотичната система AG Peg претърпя най-продължителното измежду всички симбиотични избухване и основните резултати от нейното изследване на финалния етап на избухването са както следва:

1. На базата на фотографски спектрални данни с високо разрешение, получени в периода 1985-1988 г. е анализиран линейния спектър в синята област в течение на орбиталния период. Получени са профили, лъчеви скорости и потоци енергия в емисионните линии. По фотосферния спектър на хладния гигант е определена спектралната орбита на системата. Орбиталните криви на лъчеви скорости на групите на водородните, хелиевите, забранените, а също и на линиите на елементи от висока степен на йонизация имат едно и също фазово отместване спрямо орбиталната крива на хладния гигант. Всички тези данни показват, че в системата се реализира крупномасщабно движение на газ с определено фазово отместване спрямо движението на компонентите и газът се движи към наблюдателя на орбиталните фази след долното съединение на гиганта. Различните амплитуди на кривите на лъчеви скорости показват, че в газът съществува стратификация на излъчването по скорости и температури. Поведението на интензивностите на линиите в течение на орбиталния период позволява да се направи извода, че системата не е затъмнителна, което е в съгласие с фотометричните данни [13, 14, 16, 17].

2. Орбиталната променливост на линейния спектър в синята област на симбиотичната система AG Peg се интерпретира в рамките на модела на взаимодействащи ветрове. Горещият спътник има силен звезден вятър с висока скорост от 900 km/s, формиращ широки емисионни компоненти на линиите H гама, HeII 4686 и H бета и по този начин горещият вятър доминира по своя импулс над вятъра на гиганта. Границата на ветровете (ударната област) има форма, близка до конус, разполага се зад гиганта и в резултат на орбиталното движение се отклонява в обратна посока. Газът в тази област тече с ниска скорост навън от системата и в различните и части се възбуждат различните групи линии [15,18].

3. От потока енергия в широкия емисионен компонент на линиите H бета, H гама и HeII 4686 от спектъра на AG Peg, наблюдавани през 1995 г., е получен тампа на загуба на маса на избухналия компактен обект, който е в добро съгласие с темпа, получен от ултравиолетови данни по същото време. Той се сравнява с една по-ранна стойност, получена на базата както на оптически, така и на ултравиолетови данни, девет години преди този момент и се оказва, че е намалял 1.8 пъти. Намаляването на темпа променя геометрията на ударната област на ветровете, което предлага обяснение на променената лъчева скорост на линиите на някои елементи. Пресметнати са енергетичните потоци на 24 оптически линии. Те са намалели средно около 2 пъти в сравнение с техните стойности през 1986 г. Заключават се, че това намаляване се дължи главно на намаляването на Лаймановата фотонна светимост на избухналия компактен обект, която се е променила в същото съотношение [26]. Поради намаляване на Лаймановата светимост намалява и небулярния континуум на системата. Съотношението на U потоците в момента на фотометричен максимум през 1986 г. и 1995 г. е равно на съотношението на намаляване на Лаймановата светимост [28].

4. В рамките на модела на взаимодействащи ветрове се обясняват както фотометричните орбитални U изменения, така и отслабването на U блясъка върху дълга времева скала от десетилетия на симбиотичната двойна AG Peg. Използват се орбиталните изменения, причинени от окултация на плътна ярка област от гиганта в системата за определяне на геометрията и средната плътност на тази област. Допуска се, че тя възниква близо до гиганта, от страната на горещия спътник, в резултат на сблъскването на ветровете и на йонизиране от спътника. Нейната средна плътност и излъчване намаляват с времето, причинявайки отслабване на U блясъка върху дълга времева скала. Получена е за даден момент средната плътност, която възлиза на (2-4) 10^{10} cm^{-3} . Предполага се, че неправилните изменения на U блясъка на AG Peg в орбиталните минимум и максимум се определят от окултация на динамически нестабилната област на взаимодействие на ветровете, чиято плътност се променя. Допуска се, че когато намаляващият темп на загуба на маса на горещия спътник падне под около $5.0 \cdot 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$ само вятърът на гиганта ще съществува в системата и тогава ярката област, възникнала от сблъскване на ветровете ще изчезне [33, 78].

Симбиотичната двойна AG Dra претърпя активна фаза в периода 1994-1998 г., състояща се от пет оптически избухвания. Основните резултати от нашето изследване на системата в спокойния период преди тази фаза и по време на активността са както следва:

1. Определени са U потоците на компонентите на системата в нейното спокойно състояние в момент на орбитален фотометричен максимум. На базата на потоците на хладния гигант и околосвездната мъглявина, при допускане за сферична симетрия и постоянна скорост на вятъра на гиганта, са определени радиуса на гиганта и

разстоянието до системата, които възлизат съответно на $28-32 R_{\odot}$ и $1560-1810$ pc. Пресметнати са масата и болометричната светимост на гиганта, които са съответно $1.1-1.5 M_{\odot}$ и $242-316 L_{\odot}$. Пресметнати са за полученото разстояние и болометричната светимост и темпа на акреция на компактния спътник, които възлизат съответно на $967-1302 L_{\odot}$ и $(1.2-1.7) 10^{-8} M_{\odot}/\text{yr}$. С използване на връзката маса-светимост на ядрото на акретиращи компактни обекти (Yungelson et al. 1996) бе получена масата на компактния спътник от $0.3 M_{\odot}$. Оказва се, че темпът на акреция е вътре в интервала на режима на стационарно горене на водорода на повърхността на бяло джудже с маса от $0.3 M_{\odot}$.

Достигнато е до заключение, че формата на орбиталната U фотометрична крива се определя от окултация на ярка газова област разположена близо до полусферата на гиганта от към компактния спътник. U потокът на тази област е около 3 пъти по-голям от потока на неокултираната част на окологвездната мъглявина [32].

2. По времето на три последователни избухвания на системата AG Dra през 1995, 1996 и 1997 г. на базата на потока енергия в широкия емисионен компонент на линиите H гама и HeII 4686 е получен темпа на загуба на маса на избухващия компактен обект, възлизащ на $(1-2) 10^{-7} (d/1.7 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$. Загубата на маса на компактния обект по времето на всяко избухване протича за характерно време от няколко месеца. Тъй като периодът на загуба на маса в този случай е близък до периода на акреция, според еволюционните модели на акретиращо бяло джудже (Shara et al. 1993, Kato & Hachisu 1994, Yungelson et al. 1995) темпът на акреция трябва да е близък до темпа на загуба и да е също от около $1 10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$. Обаче, когато темпът на акреция е $10^{-8}-10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$ се реализира стационарно горене на водорода вместо термоядрено избухване (Mikolajewska & Kenyon 1992). Следователно компактният обект в симбиотичната двойна AG Dra по времето на нейните оптически избухвания през 1995, 1996 и 1997 г. е бил по-скоро в състояние на стационарно горене на водорода на неговата повърхност и вероятно не е претърпявал термоядрено избухване [30, 36].

3. Предлага се сценарий за интерпретация на нарастването на оптическия блясък на системата AG Dra по време на активни фази. Нарастването на мярата на емисия на окологвездната мъглявина на тази система по време на активна фаза е много по-голямо от нарастването на Лаймановата фотонна светимост на избухващия компактен спътник. Ето защо се предполага, че спътникът е с много висока светимост, което му дава възможност да йонизира цялата мъглявина с изключение на малка област зад гиганта и се предполага също така, че нарастването на мярата на емисия в този случай се дължи на нарастването на темпа на загуба на маса на гиганта. Блясъкът се променя на два етапа: в началото той расте поради нарастване на темпа на загуба на маса на гиганта и след акрецията на известно количество газ – поради нарастване на Лаймановата светимост на спътника, което поражда допълнителна йонизация. Намалването на темпа на загуба на маса на гиганта до неговата начална стойност и изгарянето на акретираната обвивка на спътника определят връщането на блясъка на нивото на спокойно състояние на системата [36, 78].

Основни резултати от изследването на симбиотични повторни нови

1. Привеждат се аргументи в подкрепа на предположението за акреционен диск около компактния обект в повторната нова T CrB, който е по-масивният в системата. Предполага се, че едновременните изменения на еквивалентната ширина на линията H алфа, U потока и ултравиолетовия поток в интервала $1250-3200 \text{ \AA}$ върху дълга времева скала от около 15 години се дължат на промени в светимостта на диска поради промяна

в темпа на акреция, предизвикани от своя страна от промени в преноса на маса от хладния спътник или нестабилност в диска. Анализирани са спектралното разпределение на енергията в спектъра на системата като е построен моделен континуум, излъчван от акреционен диск, околосвездна мъглявина и червен гигант съответно за ниско и високо състояние на светимостта на диска. Разпределението на енергията в двете състояния е почти едно и също, което означава, че то не се променя съществено при прехода между тях. Получени са параметрите на компонентите на системата. Оказва се, че мярата на емисия на околосвездната мъглявина е значителна, а от друга страна, Балмеровите линии са слаби. Това се обяснява с формирането им в оптически плътна среда. Предположението за присъствие на акреционен диск за обяснение на описаното поведение се подкрепя и от факта, че орбиталната лъчева скорост на линията H алфа се изменя в антифаза с орбиталната скорост на хладния гигант, което означава, че преобладаващата част от излъчването в линията идва от близка до горещия компактен обект област – най-вероятно външните части на акреционен диск [41].

2. Изследва се линията H алфа на симбиотичната повторна нова RS Oph по дванадесет спектъра с високо разрешение, получени през спокойно състояние на системата в периода 1986-2004 г., като повечето от тях са получени през 2004 г. На всички спектри линията има двукомпонентен емисионен профил, състоящ се от интензивен централен двупиков компонент с ширина FWHM ~ 220 km/s и силно променлив широк компонент с неправилна форма и ниска интензивност, чиято ширина на нивото на континуума беше FWZI ~ 4600 km/s. Предположението за излъчване на двупиковия компонент от акреционен диск среща затруднения. В широкия компонент се наблюдават дискретни „bumps” с променящи се скорости и данните от 2004 г. показват променливост на широкия компонент върху времева скала от един месец. Предполага се, че той се излъчва от материал от акреционен диск около компактия обект, изхвърлян от бързовъртящата се магнитосфера на компактия обект, формираща по този начин „блובה”, излъчващи дискретните „bumps”, или се дължи на променлив вятър от акреционния диск. Пресметнати са мярата на емисията и масата на един среден блоб при допуснати средна електронна температура и средна плътност в излъчващия газ. Масата на един изхвърлен среден блоб по този начин възлиза на $10^{-10} M_{\odot}$ [48].

Прототипът на класическите симбиотични звезди Z And претърпя последната си активна фаза в периода 2000-2013 г., състояща се от седем индивидуални оптически избухвания. Основните резултати от нашето изследване на системата по време на тази активна фаза са както следва:

1. На базата на широкоивична UBVR_IJHKLM фотометрия е анализирано разпределението на енергията в континуума на системата през спокойно състояние и по време на нейното голямо избухване в периода 2000-2002 г. Получени са основните параметри на нейните компоненти. За хладния гигант е получена ефективна температура от 3400 K и фотосферен радиус от 85 ($d/1.12$ kpc) R_{\odot} . Мярата на емисия на околосвездната мъглявина нарастна 4.4 пъти от спокойно състояние до максимума на блясъка, а електронната температура не се промени, оставайки 20000 K. Горещият компактен обект претърпя силно разширение при което фотосферният радиус нарастна около 40 пъти, а ефективната температура многократно намаля. Тези данни предлагат нарастване на болометричната светимост до около четири пъти. Получените параметри показват, че нарастването на оптическия блясък се дължи на нарастване на болометричната светимост на спътника, преразпределение на енергията в неговия континуум и нарастване на небулярния континуум [39, 43, 52].

2. Чрез съпоставяне с резултати от газодинамично моделиране на структурата на движение на газа в системата Z And е анализирана детайлна крива на нейния оптически блясък, получена в периода 2000-2002 г. за изследване развитието на избухването. Анализът показва, че акреционните процеси не могат да обеспечат наблюдаемата енергетика на избухването. Като възможен механизъм се разглежда „комбиниран” модел, където нарастването на темпа на акреция в резултат на разрушаването на акреционния диск в системата води до нарастване на темпа на водородно горене. Многоетапният характер на нарастването на оптическия блясък се обяснява в рамките на модела на взаимодействащи ветрове при нарастване на болометричната светимост на спътника и флуктуации в неговия темп на загуба на маса.

Теоретичният сценарий е в добро съгласие с наблюдателните данни – той е в съответствие както с наблюдаемите времеви характеристики на индивидуалните етапи на нарастването на блясъка, така и с техните амплитуди, а така също и с мащаба на ударната йонизация. Появяването на структури (области) на ударни вълни в модела беше наблюдателно потвърдено от детектиране на ударна йонизация в мъглявината. Съотношението на потоците в небулярния континуум, обусловени от ударна и радиативна йонизации е приблизително 1/3.

Наблюдателните данни, получени по време на следващите избухвания на Z And през активната и фаза в периода 2000-2013 г. отново разкриха както нарастване на болометричната светимост, така и разширение на избухващия акретор. Ето защо предложеният “комбиниран” модел може да се използва за интерпретация на поведението на блясъка по времето и на тези избухвания, а възможно и на избухванията на други класически симбиотични звезди [49].

3. Анализирани са спектрални данни с високо разрешение, получени в областта на линиите H γ , HeII 4686 и H α от спектъра на симбиотичната двойна Z And по време на нейното голямо избухване в периода 2000-2002 г. Профилите на линиите съдържат индикации за звезден вятър в двускоростен режим от избухващия компактен спътник: оптически тънък вятър с висока скорост от около 500 km/s, формиращ широк емисионен компонент на линиите H γ и HeII 4686, и оптически плътен P Cyg вятър с ниска скорост от около 60 km/s, наблюдаван в линиите на H β и HeI. Получен е темпът на загуба на маса на спътника по потока енергия в широкия компонент, който намалява от $2.4 \cdot 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$ в максимума на блясъка до $1.0 \cdot 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$ през октомври 2001 г. Спектралните данни се интерпретират в рамките на модел на избухващия компактен спътник с акреционен диск и високоскоростен звезден вятър, който модел се свързва с първия етап от общия сценарий за обяснение на линейния спектър на системата през активната и фаза в периода 2000-2013 г. [40, 55, 56].

4. На базата на широкоивична UBVRJHKLM фотометрия е анализирано разпределението на енергията в континуума на Z And по време на нейното малко избухване в края на 2002 г., а също и в моменти на спокойно състояние преди и след него. Получени са параметрите на околосвездната мъглявина и избухващия компактен спътник. Мярата на емисия на мъглявината нарастна 2.5 пъти в сравнение със стойността си през спокойно състояние, а електронната температура не се промени. Спътникът претърпя слабо разширение, като остана горещ компактен обект както в спокойно състояние на системата. Болометричната светимост нарастна не повече от два пъти, което е в границите на наблюдателната грешка, но нарастването на излъчването на мъглявината показва, че количеството йонизиращи кванти зад Лаймановата граница на водорода се е увеличило. Оптическия блясък нарастна основно за сметка на мъглявината [44, 45].

5. Анализирани са данни с високо разрешение в областта на линиите H γ , HeII 4686 и H α от спектъра на Z And, получени по време на нарастването на блясъка и в неговия максимум на малкото избухване в края на 2002 г. Балмеровите профили бяха дупикови. Допуска се, че е възможно да се излъчват от протяжна небулярна дискообразна структура около компакния спътник или да се дължат единствено на самопоглъщане в газа. През периода на нарастване на блясъка и в неговия максимум линията HeII 4686 имаше широк емисионен компонент. Изследването показва, че той се дължи най-вероятно на оптически тънък звезден вятър от спътника [58, 59]. От енергетичния поток на този компонент е получена горната граница на темпа на загуба на маса, която възлиза на $1.7 \cdot 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$ [46].

6. Най-забележителното измежду избухванията на Z And от активната и фаза в периода 2000-2013 г. беше това, с начало и максимум през 2006 г. Профилите на Балмеровите линии в момента на максимума бяха многокомпонентни, състоящи се от интензивна тясна централна емисия, широки крила, синьо отместена абсорбция и високоскоростни сателитни абсорбционни/емисионни компоненти от двете страни на централната емисия със скорости 1200-1500 km/s, представляващи индикация за двуполусно колимирано изхвърляне от компакния обект в системата. Широките емисионни крила и сателитните емисии се виждаха до края на декември 2006 г. Ширината на крилата на различните Балмерови членове, обаче, беше различна. Синьо отместената P Cug абсорбция се виждаше до началото на октомври 2006 г.

През 2006 г. линиите на HeI се състояха от тясна емисия, разположена около лабораторната дължина и синьо отместена абсорбция. В момента на максимален блясък абсорбцията на някои от хелиевите линии беше многокомпонентна, заемайки широк интервал по скорости подобно на H γ . Компонентът с най-голямо синьо отместване имаше същата скорост като сателитния компонент. След това широката абсорбция се трансформира в тесен низкоскоростен детайл в спектъра, който се виждаше до началото на декември 2006 г.

През октомври и декември 2006 г. линията HeII 4686 беше двукомпонентна, състояща се от централна тясна емисия и широк емисионен компонент с ниска интензивност, дължащ се на звезден вятър. Темпът на загуба на маса на компакния спътник беше оценен по потока енергия в широкия компонент и сателитните компоненти. Той намаля от $4-5 \cdot 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$ в максимума на блясъка до около $1 \cdot 10^{-7} (d/1.12 \text{ kpc})^{3/2} M_{\odot}/\text{yr}$ през декември 2006 г.

Поведението на линейния спектър се интерпретира в светлината на модела на колимиран звезден вятър, който се свързва с втория етап от общия сценарий за обяснение на линейния спектър на системата през активната и фаза в периода 2000-2013 г. [51, 53, 60, 65, 68, 72, 80].

7. Сравнение на оптически спектрални данни с високо разрешение с резултати от газодинамично моделиране осигурява възможността да се предложи сценарий за обяснение на спектралното поведение на симбиотичния прототип Z And по време на нейната последна активна фаза в периода 2000 – 2013 г., в който сценарий се обясняват разликите в нейното поведение по време на различните избухвания от активната фаза. Основните моменти от този сценарий са следните:

- В системата съществува диск от акреция от вятър.
- По време на избухване газът, изтичащ с висока скорост от компакния обект, се сблъсква с акреционния диск. В резултат неговата скорост близо до орбиталната

равнина намалява, но остава непроменена на по-високи звездни ширини. Това определя възникването на два компонента на вятъра с различни скорости.

- По време на избухване вятърът от компактния обект частично разрушава диска. Определена част от неговата маса (а също и от масата на вятъра) остава в потенциалната яма на компактния обект и след като вятърът се преустанови, започва да акретира отново. Поради запазване на началния си ъглов момент акретиращото вещество формира една обвивка, покриваща първоначалния диск и простираща се на по-голямо разстояние от орбиталната равнина.

- Поради съществуването на центробежна бариера възникват два кухи конуса около оста на въртене, които предоставят възможност за появяване на колимирано изтичане по време на повторните избухвания. Това изтичане може да се наблюдава като високоскоростни компоненти от двете страни на централната емисия.

- Колимираното изтичане възниква когато плътността на дискообразната обвивка е достатъчно висока, за да осигури колимация и темпът на загуба на маса на компактния обект е също така висок. По този начин високоскоростни сателитни компоненти се очакват по време на избухвания, съпътствани със загуба на маса с висок темп, предшествани от подобни силни избухвания.

Този сценарий осигурява възможност за обяснение на всички спектрални характеристики на Z And, наблюдавани по време на активната фаза. Неговият общ характер позволява да се допусне, че подобен сценарий е възможен и за други класически симбиотични звезди [60, 62, 63, 64, 72, 78].

Основни резултати от изследване на симбиотични двойни със спектрална индикация за колимирано изтичане

1. Четири от общо пет симбиотични системи, чиито оптически спектрални линии съдържат сателитни компоненти – индикация за колимирано изхвърляне, имат допълнителна абсорбция от типа P Cyg с различна скорост. Тези системи са Z And, Hen 3-1341, StHalфа 190 и BF Cyg. Показано е, че профилите на линиите на всяка от системите Hen 3-1341, StHalфа 190 и BF Cyg може да се интерпретират в рамките на модела на колимиран звезден вятър, който осигурява по-добра интерпретация на компонентите на линиите от традиционния модел с магнитен акреционен диск [69, 70, 71, 72, 78].

2. Оптическата крива на блясъка на затъмнителната симбиотична двойна BF Cyg по време на нейното последно избухване в периода 2006-2017 г. се интерпретира в рамките на модела на колимиран звезден вятър. Предполага се, че измененията на дълбочината на орбиталния фотометричен минимум се дължат на възникването и еволюцията на протяжна дискообразна обвивка, покриваща акреционния диск на избухващия компактен обект и колимираща неговия звезден вятър. Възникването на обвивката (нейната незатъмнена част) е отговорно за първоначалното намаляване на дълбочината на орбиталния минимум, а нейното последващо разрушаване – за нарастването отново на дълбочината на минимума. Пресметнатите $UBVR_{CI}$ потоци на незатъмнената част във всеки от минимумите са в съгласие с наблюдаемите разлики на дълбочините на всеки от минимумите с първия минимум. Според получените параметри на обвивката, през по-голямата част от нейното съществуване тя трябва да е главната излъчваща област на линията H алфа, но H алфа профилът се определя малко от нейното въртене и повече от други механизми. От потока енергия в сателитните H алфа компоненти е получен темпа на загуба на маса на избухващия спътник и общата

загубена от него маса за периода 2006-2014 г., която възлиза на около $10^{-5} M_{\odot}$. Заклучава се, че обвивката е преходна небулярна формация и нейното разрушаване заедно с преразпределението на енергията на избухналия спътник към малките дължини на вълните определят падането на оптичския блясък до 2014 г. [76, 78, 79, 81].

Освен описаните резултати имам и други, които не представям тука, тъй като се базират на по-къси работи, отнасящи се до по-ограничено изследване без задълбочена физическа интерпретация. Една част от тях са също по симбиотични звезди, а друга – по други типове променливи, Ве звезди, а също и по фотометрия на галактики. Участвам и в няколко работи по изследване на рентгенови двойни, но тъй като в тях не съм „PI” и личният ми принос е свързан главно с наблюденията, също не представям техните основни резултати.

Библиография

Kato, M. & Hachisu, I. 1994, ApJ 437, 802

Mikolajewska, J., & Kenyon, S.J. 1992, MNRAS 256, 177

Shara, M., Prialnik, D., Kovetz, A. 1993, 406, 220

Yungelson, L., Livio, M.; Tutukov, A.; Kenyon, S. J. 1995 ApJ 447, 656

Yungelson, L., Livio, M., Truran, J.W., Tutukov, A., Federova, A. 1996, ApJ 466, 890