KATAKLIZMIČNE SPREMENLJIVE ZVEZDE

KRIŠTOF SKOK

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Kataklizmične spremenljivke so primer kratkoperiodičnih dvozvezdij. Najprej je opisana geometrija sistema in njegov časovni razvoj, ki ga določa prenos mase med zvezdama. Nato sta razložena primera nekonservativnega razvoja, pri katerem se vrtilna količina sistema izgublja preko sevanja gravitacijskih valov in magnetnega zaviranja. Nato sledi pregledna razlaga akrecijskega diska. Zadnji dve poglavji se osredotočata na dva pojava, ki sta povezana s kataklizmičnimi spremenljivkami — klasične nove, pri katerih se izsev sistema skokovito poveča zaradi termonuklearne eksplozije vodikove plasti na beli pritlikavki, in pritlikave nove, pri katerih se izsev akrecijskega diska preriodično spreminja zaradi spreminjanje njegove strukture in temperature.

CATACLYSMIC VARIABLE STARS

Cataclysmic variables are an example of short period binary stars. First the geometry of the system is discussed along with its time evolution which is determined by the mass transfer between the stars. Then follows the explanation of the non-conservative evolution where the system's angular momentum is lost by radiation of gravitational waves and magnetic braking. Later is an overview of accretion disks and the last two chapters focuse on two phenomena connected to cataclysmic variables — classical novea where the luminosity of the system is abruptly increased because of thermonuclear explosion of hydrogen layer on the white dwarf; and dwarf novea where the luminosity of the accretion disk periodically varies due to its varying structure and temperature.

1. Uvod

Kataklizmične spremenljivke (angl. cataclysmic variables — CV) so poseben tip dvozvezdij. Sestavljata ga bela pritlikavka in manj masivna zvezda glavne veje. Kot je navada v literaturi, bomo belo pritlikavko imenovali primarna zvezda in drugo zvezdo sekundarna. Medsebojna razdalja zvezd je primerljiva z velikostjo sekundarne zvezde, zato so obhodni časi ustrezno kratki, tipično manj od 12 ur. To so najkrajše razdalje in odhodni časi v dvozvezdjih in v teh sistemih najdemo pojave, specifične za te vrste sistemov. Zaradi majhne medsebojne oddaljenosti je gravitacijski privlak primarne zvezde tako močan, da se sekundarna oblikuje v obliko kapljice in primarna zvezda trga snov s sekundarne. Glede na pretok snovi se v literaturi primarna zvezda imenuje tudi akretor in sekundarna donor. Ta snov, ki je v glavnem vodik, pada proti primarni zvezdi in (v nemagnetnih sistemih, ki so obravnavani v članku) formira akrecijski disk. Ta pretvarja gravitacijsko energijo vpadne snovi v termično, ki se izseva v rentgenskem, ultravijoličnem in vidnem delu spektra. Struktura in izsev diska sta lahko časovno spremenljiva in to spremenljivost opazimo kot *pritlikavo novo*. Drug opazovalni pojav, ki je povezan s kataklizmičnimi spremenljivkami je *klasična nova*, pri čemer se izsev sistema poveča zaradi pobegle termonuklearne eksplozije plasti vodika na primarni zvezdi, ki se je nabral na njeni površini iz notranjega predela akrecijskega diska.

Povsem na mestu je vprašanje, kako sploh nastane dvozvezdje s tako kratko periodo. Odgovor je, da je tak sistem prešel ti. *fazo skupne ovojnice* (ang. *common envelope phase*). Na začetku imamo dve zvezdi glavne veje. Bodoča primarna zvezda je masivnejša od druge in zato prva nadaljuje svojo zvezdno evolucijo z razširjenjem zunanjih plasti. Njen polmer postane večji od razdalje do druge zvezde, ki se tako znajde znotraj ovojnice prve zvezde. Tako druga zvezda kroži po mediju, v katerem čuti upor, preko katerega prenaša svojo energijo in vrtilno količino na ovojnico prve zvezde. S tem ko zgublja energijo, postaja njena tirnica krožna (čemur pravimo *cirkularizacija*) in polmer kroženja se zmanjšuje. Ovojnica prejme dovolj energije, da jo odnese v okoliški prostor, ostaneta pa sekundarna zvezda in bela pritlikavka (jedro bivše prve zvezde) v vlogi primarne zvezde, ki krožita v dvozvezdju s kratko periodo.

2. Rochova geometrja

Z analitično obravnavo dvozvezdja se omejimo na omejen problem treh teles. To pomeni, da preučujemo gibanje testnega delca v gravitacijskem potencialu dveh masivnejših teles. Testni delec ima toliko manjšo maso, da ne vpliva na gibanje masivnejših teles. Zvezdi bomo obravnavali kot točkasti masi. Taka predpostavka je smiselna, saj je velikost bele pritlikavke dovolj majhna v primerjavi z dimenzijami celotnega dvozvezdja. Tudi za drugo zvezdo je predpostavka smiselna, saj je večina njene mase skoncentrirana v jedru zvezde. Druga predpostavka je, da zvezdi krožita po krožnih tirnicah, kar smo uvodnem poglavju utemeljili s cirkularizacijo tira v fazi skupne ovojnice.

Enačbe bomo zapisali v vrtečem sistemu z izhodiščem v težišču, ki se vrti skupaj z zvezdama, torej s krožno frekvenco, ki jo dobimo iz Keplerjevega zakona

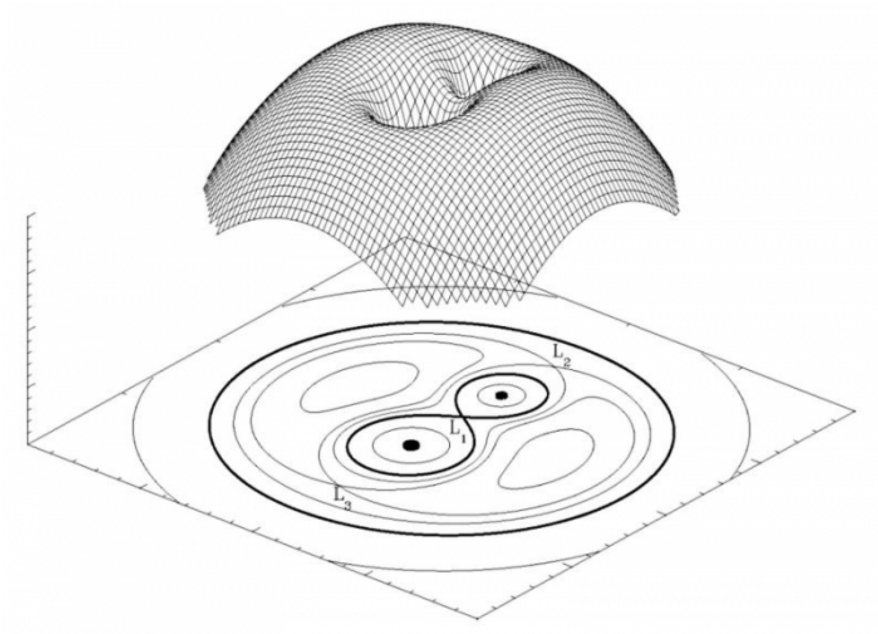
$$\omega = \sqrt{\frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}},$$

pri čemer je G gravitacijska konstanta, a razdalja med središčema zvezd, M_1 masa primarne zvezde ter M_2 masa sekundarne zvezde. Tako kot je navada v literaturi in je uporabljeno v nadaljevanju, se indeks 1 navezuje na primarno zvezdo, 2 pa na sekundarno. V vrtečem sistemu so prisotne sistemske sile. Za lažjo predstavo bomo centrifugalno silo zapisali, podobno kot gravitacijsko, kot gradient potenciala: $\vec{F}_{cfg} = -\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}) = -\nabla \left(1/2 \, (\vec{\omega} \times \vec{r})^2\right)$. Če ta potencialni člen prištejemo gravitacijskemu potencialu prve in druge zvezde, dobimo Rochov potencial

$$\Phi_R(\vec{r}) = -\frac{GM_1}{|\vec{r} - \vec{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\vec{r} - \vec{r}_2|} - \frac{1}{2}(\vec{\omega} \times \vec{r})^2 \tag{1}$$

$\vec{r}_1$ in $\vec{r}_2$ sta položaja središč zvezd. Vektor $\vec{\omega}$ kaže v normalni smeri glede na ravnino kroženja. Poleg centrifugalne sile je prisotna še Coriolisova, ki je ne moremo izraziti z gradientom potenciala. Tako se Newtonov zakon zapiše kot $\ddot{\vec{r}} = -\nabla\Phi_R(\vec{r}) - 2\vec{\omega} \times \dot{\vec{r}}$. Graf Rochovega potenciala v ravnini kroženja je na sliki 1. Pod tridimenzionalnem grafom so ekvipotencialne črte (oz. presečišča ekvipotencialnih ploskev z ravnino kroženja). Najzanimivejša točka je prva Lagrangeva točka, L_1. To je točka med zvezdama, v kateri je sedlo potenciala. Ekvipotencialna črta, ki gre skozi to točko, je na sliki označena z odebeljeno črto. Ekvipotencialni ploskvi okoli obeh zvezd, ki vključujeta to točko, se imenujeta *Rochov oval*. Presečišče Rochovih ovalov obeh zvezd z ravnino kroženja je na sliki 1 označeno z odebeljeno črto.

Rochov oval lahko definira obliko zvezde. Ko je dovolj majhna v primerjavi z Rochovim ovalom, je sferične oblike, kot bi bila izolirana zvezda. V tem primeru njeno obliko v glavnem definira njena lastna gravitacija, če se pa zvezda tekom svoje evolucije poveča, lahko zasede bolj ovalno obliko. Takemu sistemu, ko sta zvezdi dve fizično ločeni telesi, rečemo *ločen sistem*. Lahko se zgodi, da bo zvezda sčasoma zasedla celoten Rochov oval. Tedaj bo že majhna perturbacija povzročila, da bo plin v okolici L_1 točke prešel v Rochov oval primarne zvezde in se bo vzpostavil prenos mase s sekundarne zvezde na primarno. Opisan režim, ko samo ena zvezda napolnjuje Rochov oval, se imenuje *polločen sistem*, medtem ko obstajajo tudi kontaktne dvojne zvezde, ko obe zvezdi zapolnjujeta oval in sta v stiku v prvi Lagrangevi točki.



Slika 1. Graf Rochovega potenciala [6]

3. Prenos mase in konservativen razvoj sistema

Za nadaljnji matematični opis potrebujemo mero, ki bo podajala velikost Rochovega ovala. Uporabimo polmer krogle, ki ima enako prostornino kot Rochov oval. Zaradi zapletene oblike potenciala se je potrebno opreti na numerično pridobljene formule. Dober približek je Eggletonova formula, s katero izračunamo polmer Rochovega ovala sekundarne zvezde, kar enačimo s polmerom zvezde R_2, saj imamo situacijo, ko zvezda napolnjuje svoj Rochov oval. Eggletonova formula [1] je

$$\frac{R_2}{a} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}, \tag{2}$$

kjer je $q = M_2/M_1$, kar je tipična oznaka v literaturi, ter a razdalja med zvezdama. Zgornja formula je dober približek za numerične rezultate za vse q. Za $0.1 \lesssim q \lesssim 0.8$ lahko uporabimo formulo Paczynskega [1]

$$\frac{R_2}{a} = 0.462 \left(\frac{q}{1+q}\right)^{1/3}. \tag{3}$$

Zaradi prenosa mase se bo očitno zmanjšalo razmerje mas q. Temu sledi še sprememba orbitalne periode P in medsebojne razdalje a. Zapišimo vrtilno količino sistema

$$L = (M_1 a_1^2 + M_2 a_2^2)\omega,$$

pri čemer sta a_1 in a_2 razdalji primarne in sekundarne zvezde do težišča. Pri tem smo zapisali samo tirno vrtilno količino zvezd in zanemarili lastni, saj sta mnogo manjši od tirnih. Vstavimo zvezi $a_1 = aM_2/(M_1 + M_2)$ in $a_2 = aM_1/(M_1 + M_2)$ in dobimo

$$L = M_1 M_2 \sqrt{\frac{Ga}{M_1 + M_2}}. \tag{4}$$

Najprej se bomo omejili na konservativni razvoj sistema, pri čemer se skupna masa in vrtilna količina ohranjata: $\dot{M}_1 + \dot{M}_2 = 0$ ter $\dot{L} = 0$. Zavedati se moramo, da sekundarna zvezda maso izgublja:

$\dot{M}_2 < 0$. Zadnji izraz za vrtilno količino (4) logaritmiramo in odvajamo po času ter upoštevamo, da toliko mase kot donor izgubi, akretor prejme: $\dot{M}_1 = -\dot{M}_2 > 0$.

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{\dot{M}_1}{M_1} + \frac{\dot{M}_2}{M_2} + \frac{1}{2}\left(\frac{\dot{a}}{a} + \frac{\dot{M}_1 + \dot{M}_2}{M_1 + M_2}\right)$$

$$\frac{\dot{L}}{L} = \frac{-\dot{M}_2}{M_1} + \frac{\dot{M}_2}{M_2} + \frac{1}{2}\frac{\dot{a}}{a}$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2\dot{L}}{L} + \frac{2(-\dot{M}_2)}{M_2}(1-q) \tag{5}$$

Če zastavimo $\dot{L} = 0$, potem se zvezdi oddaljujeta ($\dot{a} > 0$), ko snov prehaja iz manj masivne zvezde k masivnejši ($M_2 < M_1, q < 1$). To si lahko intuitivno razlagamo, saj se masa prerazporedi od večje razdalje od osi vrtenja k manjši, kar pomeni zmanjšanje vztrajnostnega momenta. Zato se sekundarna zvezda pomakne na večjo orbito, da ohrani vrtilno količino. Obratno, prenos mase od masivnejše zvezde k manj masivni prinese zmanjšanje medsebojne razdalje. Če vstavimo logaritemski odvod formule Paczynskega za velikost Rochovega ovala (3)

$$\frac{\dot{R}_2}{R_2} = \frac{\dot{a}}{a} + \frac{\dot{M}_2}{3M_2}$$

v izraz (5), dobimo

$$\frac{\dot{R}_2}{R_2} = \frac{2\dot{L}}{L} + \frac{2(-\dot{M}_2)}{M_2}\left(\frac{5}{6} - q\right). \tag{6}$$

Glede na razmerje mas q ločimo dve situaciji. Če je $q > 5/6$, se pri konservativnem razvoju Rochov oval sekundarne zvezde zmanjšuje. Tako postane polmer ovala manjši od polmera zvezde in površje zvezde sega preko ovala. Takrat se prenos mase še ojača in zvezda intenzivno izgublja maso (in se q zmanjšuje) do trenutka, ko postane $q \lesssim 5/6$ in se Rochov oval začne povečevati. Tedaj zvezdino površje izgubi stik z Rochovim ovalom in prenos mase se ustavi. Vendar opazovanja temu nasprotujejo [1]. Večina kataklizmičnih spremenljivk ima $q < 5/6$, a se snov vseeno pretaka. To nakazuje, da donorska zvezda ostaja v stiku z Rochovim ovalom in da člen $\dot{R}_2/R_2$ v enačbi (6) v realnosti ni pozitiven. To pa lahko razložimo le, če je $2\dot{L}/L$ tudi negativen. Torej mora obstajati mehanizem, ki odnaša vrtilno količino iz sistema.

4. Nekonservativen razvoj

Nekonservativen razvoj se nanaša na razvoj sistema, pri katerem se vrtilna količina ne ohranja. Za to sta v glavnem odgovorna dva mehanizma: sevanje gravitacijskih valov in magnetno zaviranje.

4.1 Sevanje gravitacijskih valov

Za spreminjanje vrtilne količine v dvozvezdjih z najkrajšimi periodami ($P_{orb} \lesssim 3h$) ima lahko kvadrupolno sevanje gravitacijskih valov znaten vpliv [1, 4]. Po napovedih splošne teorije relativnosti podaja spreminjanje vrtilne količine sistema naslednja enačba

$$\frac{\dot{L}}{L} = -\frac{32G^3}{5c^2}\frac{M_1 M_2 (M_1 + M_2)}{a^4},$$

pri čemer je c svetlobna hitrost. V enačbi je močna odvisnost od razdalje med zvezdama a, torej ima ta vpliv glavno vlogo v končnih stadijih dvozvezdja, preden se zvezdi zlijeta v eno.

4.2 Magnetno zaviranje

Najprej opišimo pojav magnetnega zaviranja na primeru našega Sonca. Ko obravnavamo magnetno polje v plazmi in njeni okolici, je treba upoštevati Alfvénov teorem, ki pravi, da so magnetne silnice "primrznjene" na plazmo [3]. To pomeni, da se silnice gibljejo skupaj s plazmo po prostoru. Prav tak primer je površje zvezde. Zvezde, ki imajo v notranjosti konvektivno cono, tvorijo magnetna polja, ki sežejo daleč v prostor, tako kot naše Sonce. Sončevo površje je v osnovi nabita plazma, zato magnetne silnice korotirajo z njim [3].

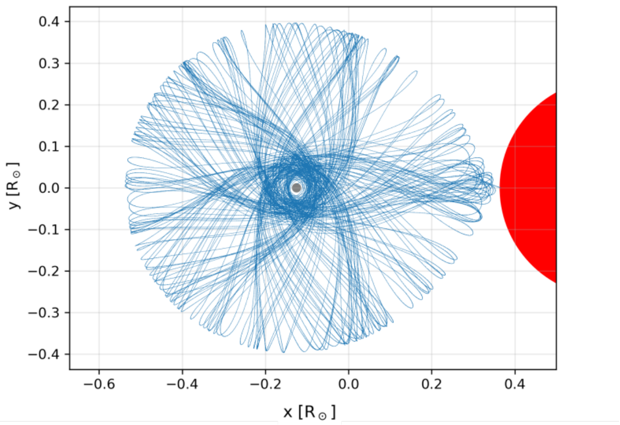
Površje Sonca stalno zapušča tok nabitih delcev kot Sončev veter. Ta snov je tudi vroča ionizirana plazma, ki je močno sklopljena z magnetnim poljem. Ker se ta vrti skupaj s Soncem, se material Sončevega vetra prav tako vrti z njim z enako kotno hitrostjo ($\omega = konst.$). Torej z oddaljevanjem pridobiva na vrtilni količini ($L = r\omega^2$). Delci so sklopljeni s poljem vse do točke, ko je energija magnetnega polja primerljiva s kinetično energijo delcev. Od te točke naprej se prosto gibljejo in s sabo odnesejo veliko vrtilne količine. V Osončju se to zgodi na pribl. 100 Sončevih polmerih, kjer je vrtilna količina na enoto mase 10.000-krat višja kot na Sončevem površju. Magnetno zaviranje je torej učinkovit mehanizem za odnašanje vrtilne količine s posameznih zvezd [5].

Opisan pojav deluje na posamezne zvezde, kar se v dvozvezdju prenese na celoten sistem. Vrtenje zvezd v dvozvezdju je ponavadi sinhronizirano s kroženjem okoli skupnega težišča. Do sinhronizacije (in cirkualizacije) pride v zgodnejših fazah razvoja dvozvezdja, ko ena zvezda deformira površje druge zaradi plimskih sil. Ta oval zaradi viskoznosti ne kaže točno proti drugi zvezdi, ampak prehiteva ali zaostaja. Takšen neporavnan oval deluje na zvezdo z navorom, ki njeno vrtenje sinhronizira s krožilno dobo in zmanjša ekscentričnost orbite [1] [1]. Zaradi te t.i. *plimske zaklenjenosti* se izguba vrtilne količine sekundarne zvezde manifestira kot izguba vrtilne količine celotnega sistema. V kataklizmični spremenljivki je bela pritlikavka ta, ki ima močno magnetno polje in posledično čuti magnetno zaviranje. Zmanjšanje njene lastne vrtilne količine se prenese na zmanjšanje tirne vrtilne količine celotnega sistema, saj sta zvezdi plimsko zaklenjeni. Bela pritlikavka bi se zaradi magnetnega zaviranja ustavljala, a jo plimske sile pospešijo, da je perioda njenega vrtenja sinhronizirana s periodo kroženja.

5. Akrecijski disk

Ko snov zapusti Rochov oval sekundarne zvezde preko prve Lagrangeve točke, se znajde v globokem potencialnem loncu primarne zvezde. Plin bi sicer morali obravnavati s hidrodinamskimi enačbami, vendar to ni potrebno. Potencial na drugi strani L_1 točke je tako strm, da se snov hitro pospeši do nadzvočne hitrosti in postane tlak v curku zanemarljiv. Gibanje snovi lahko obravnavamo balistično. Še ena primerjava nam malo poenostavi obravnavo. Plin v L_1 točki ima lahko neko hitrost v pravokotni smeri glede na zveznico zvezd, vendar ima ta hitrost zanemarljiv vpliv na nadaljnje gibanje, saj je veliko manjša od hitrosti, ki jo hitro pridobi v potencialnem loncu. Tirnico usmerja tudi Coriolisova sila, kar povzroči, da se curek kmalu preusmeri vstran od zveznice med zvezdama in da je skoncentriran v ravnini kroženja zvezd. Energija snovi se ohranja (zapisano na enoto mase: $1/2\, v^2 + \Phi_R = konst.$) in če snov začne potovati pri L_1 z zanemarljivo hitrostjo, potem se bodo delci od primarne zvezde lahko oddaljili najdlje do ekvipotencialne ploskve, ki tudi vsebuje L_1 točko, tj. njenega Rochovega ovala (slika 2).

[1] Podobno je Lunina rotacija sinhronizirana z revolucijo okoli Zemlje in Zemljina rotacija se ustavlja.



Slika 2. Primer tirnice gibanja delca v kataklizmični spremenljivki Z Chamaeleontis. V sredini je s sivo prikazana bela pritlikavka, na desni je shematično del rdeče orjakinje za primerjavo njenega polmera, njena oblika pa ni prava. Velikosti in razdalje so v razmerju. Enota osi je polmer Sonca.

Bela pritlikavka je dovolj majhna zvezda (polmer 10.000 km), da je tok snovi ne zadane in lahko zaokroži. Ker je gibanje ravninsko, bo enkrat zadel sam vase. To se zgodi pri nadzvočni hitrosti, kar povzroči šoke v plinu in ga segreje do visokih temperatur. Tak segret plin seva energijo, vendar se vrtilna količina ohranja. Sevanje segretega plina disipira odvečno energijo tako dolgo, da se krožeča snov izoblikuje obroč, saj je krožnica tir z najmanjšo energijo pri dani vrtilni količini. Radij tega obroča določa vrtilna količina plina v L_1 točki.

Obroč ima končno razsežnost v radialni smeri in se vrti diferencialno, saj imajo delci keplerjansko krožilno hitrost, ki je funkcija polmera

$$v(r) = \sqrt{\frac{GM_1}{r}}.$$

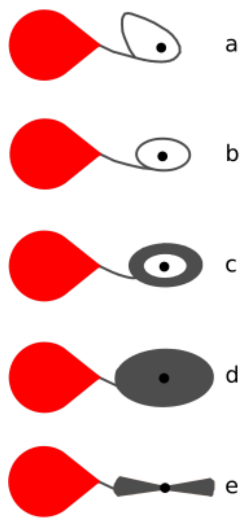
Ker kroženje ni togo, se plin enega kolobarja premika relativno glede na sosednje. S tem se pojavijo viskozni vplivi, ki pretvarjajo kinetično energijo krožeče snovi v notranjo, kar pomeni, da se plin segreje in seva del energije. Na izgubo energije se delci odzovejo s premikom globlje v gravitacijski potencial primarne zvezde, tj. krožijo na manjših krožnicah. Tam je njihova vrtilna količina manjša[2], zato mora nekaj delcev povečati svoje orbite, da ohranijo skupno vrtilno količino. Ta proces poteka dovolj počasi, da deli snovi ves čas zasedajo krožne orbite. Tako se obroč razleze v akrecijski disk. (slika 3)

Ta enostaven fenomenološki opis velja, vendar so podrobnosti prenosa vrtilne količine in disipacije energije težje razložljive in nedokončno poznane. Sama viskoznost plina ni zadostna, temveč so v igri turbulence in magnetne napetosti med sosednjimi kolobarji diska. Za razumevanje teh mehanizmov se je potrebno opreti na zahtevne magnetohidrodinamske simulacije. Akrecijski diski so torej posredniki mase od sekundarne na primarno zvezdo, kjer krožeča snov izgublja vrtilno količino, da lahko pade na primarno zvezdo.

6. Klasične nove

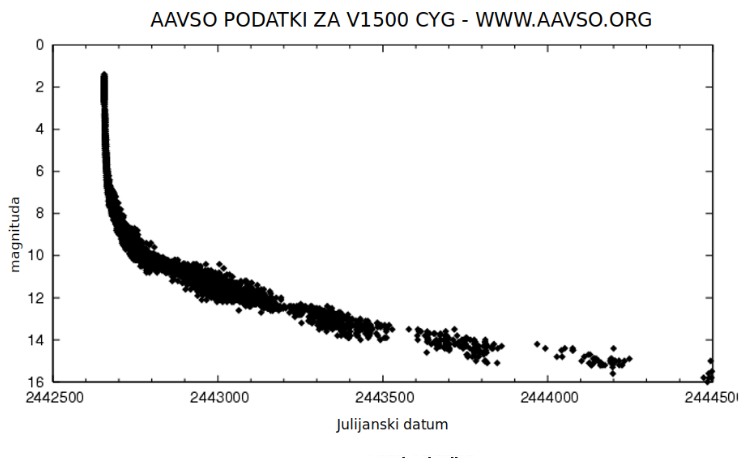
Bele pritlikavke v središču akrecijskega diska so sestavljene v glavnem iz helija, če je njihova masa manjša od 0,5 $M_\odot$, ali, če je zvezda masivnejša, iz ogljika in kisika. Na površje zvezde ves čas doteka vodik iz akrecijskega diska, ki se nabira v plast. Ta se sčasoma gosti in elektroni v ioniziranem

[2] $L = mrv = mr\sqrt{\frac{GM}{r}} = m\sqrt{GMr}$



Slika 3. Shematični prikaz nastanka in razvoja začetnega obroča v akrecijski disk. a — začetno injeciranje curka, b — nastane obroč, c — obroč se razleze v disk, d — razvit disk, e — stranski pogled. Slika prirejena po [1], str. 37.

vodiku postanejo degenerirani. Tlak degeneriranih elektronov postane dominanten tlak, ki kljubuje teži. Medtem ko se plast vodika debeli, temperatura na dnu plasti (torej na stiku s helijem ali mešanico ogljika in kisika) narašča, vse dokler ne doseže temperature za fuzijo vodika, tj. $15{\cdot}10^6$K. Tedaj se prične vodik zlivati v helij, vendar nadaljnje zlivanje ni stabilno kot v jedrih zvezd. Tam je dominanten tlak tlak idealnega plina, ki je odvisen od temperature. Segrevanje jedra pomeni dvig tlaka in jedro se razširi. Tako se moderira hitrost reakcij. V plasti vodika na površju bele pritlikavke pa ni tako, saj je tlak plina degeneriranih elektronov neodvisen od temperature ($p = (3\pi^2)^{2/3}\hbar^2/(5m_\mathrm{e})\ n_\mathrm{e}^{5/3}$). Začetek jedrskega zlivanja povzroči dvig temperature, ki ni moderiran s širjenjem plasti. Ta se segreva do temperature, ko se odpravi degeneracija elektronov in se snov začne obnašati kot idealni plin. Tako se snov pri zelo visoki temperaturi znajde v režimu, v katerem velja enačba stanja, pri kateri je tlak sorazmeren s temperaturo. Tlak skokovito naraste in površje zvezde eksplodira [5]. Del akumulirane plasti vodika odnese v okoliški prostor in tvori ovojnico, ki se sčasoma širi. Ovojnica ima visoko temperaturo in večjo površino od bele pritlikavke. Zato se v tej fazi izseva več svetlobe kot pred izbruhom. Temu dogodku rečemo *izbruh (klasične) nove*. Nato se ovojnica širi in postopoma ohlaja, novi na nebu pa sij upada. (slika 4)



Slika 4. Vir: Svetlobna krivulja klasične nove V1500 Cygni, ki temelji na vizualnih opazovanjih amaterskih astronomov združenja American Association of Variable Star Observers (AAVSO). [7]

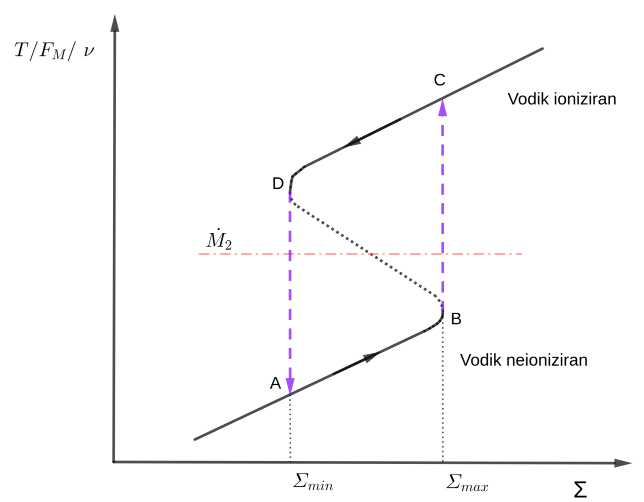
7. Pritlikave nove

Pritlikave nove so še en tip izbruhov, do katerih pride v kataklizmičnih spremenljivkah. Vendar tu ne gre za en posamičen izbruh, temveč za ponavljajoče pojave, torej je fizika delovanja drugačna. V tem primeru je povzročitelj spreminjajočega izseva akrecijski disk.

Glavni igralec pri spreminjanju strukture diska je viskoznost. Brez viskoznosti bi snov v disku krožila brez prenosa mase radialno navznoter po disku ter vrtilne količine navzven. Pretok mase po disku v radialni smeri bomo označili s količino F_M. Snov sicer kroži po krožnicah, vendar se polmer kroženja stalno zmanjšuje in snov se efektivno seli proti središču diska. To selitev snovi opisuje F_M. Torej če je $F_M > \dot{M}_2$, se več snovi prenaša iz diska na primarno zvezdo kot s sekundarne v disk. Če pa je $F_M < \dot{M}_2$, se snov v disku nabira in se površinska gostota [3] Σ povečuje.

Hkrati je viskoznost odgovorna za disipacijo energije, od te pa je odvisna temperatura snovi. Torej višja viskoznost snovi v disku pomeni višji pretok snovi po disku F_M in višjo temperaturo. Za ciklične spremembe v izsevu diska je odgovorno ciklično spreminjanje strukture diska. Za vertikalno strukturo diska je pomemben način prenosa energije v vertikalni smeri, ki je lahko v glavnem konvektiven ali sevalen. Obe rešitvi obstajata pri okoli 10.000 K, saj se pri tej temperaturi vodik ionizira in se prosojnost spremeni. Pri nižji temperaturi je vodik nevtralen, disk konvektiven, viskoznost in F_M sta nižja. Pri višji temperaturi je vodik ioniziran, disk sevalen, viskoznost in F_M sta višja. Stanje diska lahko shematično predstavimo v faznem diagramu, na katerem je na abscisi površinska gostota Σ, na ordinati pa so hkrati viskoznost, temperatura in pretok snovi skozi disk F_M (slika 5). Če narišemo točke, ki ustrezajo stanjem, ki so v termičnem ravnovesju, dobimo ti. *s-krivuljo* (ang. *s-curve*). V termičnem ravnovesju je segrevanje diska zaradi viskoznih vplivov uravnoteženo z ohlajanjem zaradi sevanja. Če je disk v stanju, ki je v diagramu desno od s krivulje, se segreva bolj, kot se ohlaja. Segreva se tako dolgo, da doseže ravnovesno stanje na zgornjem delu s-krivulje. Podobno, če se disk znajde v stanju, ki ustreza točki levo od s-krivulje, se ohlaja tako dolgo, da doseže stanje na spodnjem delu krivulje.

Čeprav so stanja na s krivulji v termičnem ravnovesju, niso vsa stanja stabilna. Nestabilna stanja so na odseku BD. Če povečamo površinsko gostoto diska, se disk segreje. Ampak na tem odseku krivulje je $\mathrm{d}T/\mathrm{d}\Sigma < 0$, tako da disk preide v neravnovesno stanje. Odsek BD torej ustreza termično nestabilnim stanjem.

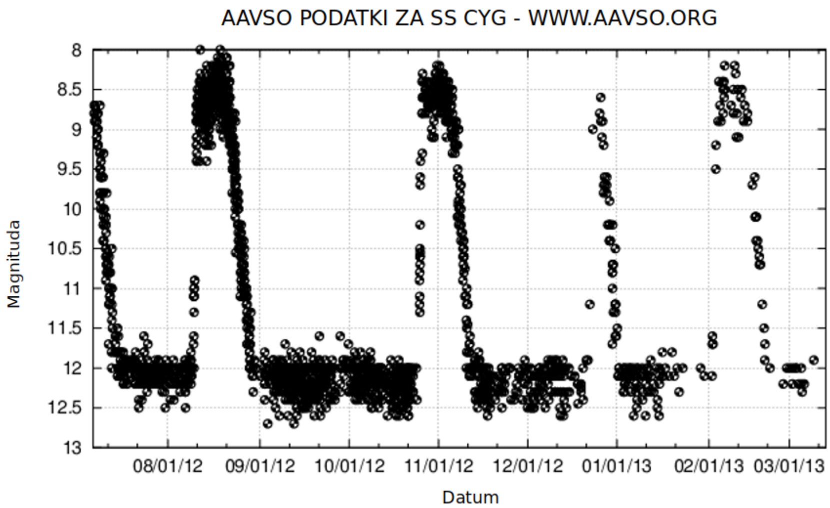


Slika 5. S-krivulja je področje v faznem diagramu, kjer je disk v termičnem ravnovesju. Na odseku AB se snov nabira v disku in ta se segreva. Potem se disk segreva do točke C, kjer je spet v ravnovesju in neto izgublja maso, ter se s tem ohlaja do točke D. Nato se ohladi do točke A. Slika povzeta po [5].

[3] $\Sigma\,(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho\,(x, y, z)\,dz$

Zamislimo si, da je stanje diska na AB odseku s krivulje. Takrat je prenos mase po disku manjši od količine snovi, ki jo disk prejema od sekundarne zvezde: $F_M < \dot{M}_2$. Tako se snov v disku nabira in se površinska gostota Σ povečuje. Sistem se po spodnji veji krivulje pomika proti točki B, ampak ko jo doseže, je še vedno $F_M < \dot{M}_2$. Tedaj ni več v ravnovesju in se pomika po diagramu v področju, v katerem je segrevanje večje od ohlajanja. Pomika se do točke C, kjer je spet v termičnem ravnovesju. Takrat so viskoznost, temperatura in prenos mase v disku povečani in velja $F_M > \dot{M}_2$. Snov iz diska odteka in sistem potuje po zgornjem delu s krivulje do točke D. V tej točki še vedno želi zmanjševati maso, vendar se znajde v neravnovesnem režimu. Tokrat se bolj ohlaja kot segreva. Sistem potuje po diagramu do točke A. Od tam naprej se cikel ponovi.

Stanje sistema lahko povežemo z opazovanji pritlikavih nov. Na sliki 6 je primer svetlobne krivulje, tj. grafa svetlosti v odvisnosti od časa. Del krivulje AB ustreza neaktivnosti (ang. *quiescence*), prehod iz B v C dvigu v maksimum oz. prehod v izbruh, del krivulje CD je počasno upadanje sija med izbruhom, prehod iz D v A pa je vrnitev v neaktivnost. Ker je viskoznost na zgornjem delu s krivulje lahko za faktor 100 večja, je dinamika v tem delu diagrama hitrejša in sistem se manj časa nahaja v izbruhu, kar je skladno z opazovanji [1, 5].



Slika 6. Svetlobna krivulja pritlikave nove SS Cygni, ki temelji na vizualnih opazovanjih amaterskih astronomov združenja American Association of Variable Star Observers (AAVSO). [8]

8. Zaključek

Kataklizmične spremenljivke so pomemben vir informacij v raziskavah v astrofiziki. S spektroskopskim in fotometričnim spremljanjem njihovega razvoja lahko opazujemo pojave, ki so posledica kompleksnih mehanizmov, v katerih igrajo glavno vlogo turbulence, magnetna polja, ki so vpeta v plazmo, sevalni in konvektivni prenosi energije ter še vrsta pojavov, ki niso bili omenjeni — kolektivni hidrodinamski efekti, valovi v disku, precesija diska itd. Ti sistemi so zanimivi za obravnavo, saj združujejo poznavanje več področij astrofizike in fizike na sploh: struktura in evolucija sekundarne zvezde, struktura bele pritlikavke, hidrodinamika in magnetohidrodinamika, fizika plazme, elektromagnetno polje itd. So tudi izzivalno področje raziskav s stališča opazovalnih tehnik, potrebno je združiti opazovanja v različnih delih spektra in preverjati njihovo skladnost z numeričnimi rezultati glede na uporabljene modele.

LITERATURA

[1] Warner, B. (1995). Cataclysmic Variable Stars (Cambridge Astrophysics). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511586491

[2] Frank J., King A. R., Raine D. J. (1992). Accretion power in astrophysics, Second edition (Cambridge Astrophysics). Cambridge: Cambridge University Press.

[3] Carroll B. W., Ostlie D. A. (1996). Introduction to modern stellar astrophysics. Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

[4] Fedorova, A. V.; Bisikalo, D. V.; Boyarchuk, A. A.; Kuznetsov, O. A.; Tutukov, A. V.; Yungel'Son, L. R. Nonconservative Evolution of Cataclysmic Binaries. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003452, 21.5.2018

[5] Connon Smith R. Cataclysmic variables. https://arxiv.org/abs/astro-ph/0701654, 21.5.2018

[6] https://en.wikipedia.org/wiki/Roche_lobe#/media/File:RochePotential.jpg, 21. 2. 2019

[7] https://en.wikipedia.org/wiki/V1500_Cygni, 21. 2. 2019

[8] https://www.gaia.ac.uk/science/guest-stars-gaia/variable-stars, 21. 2. 2019