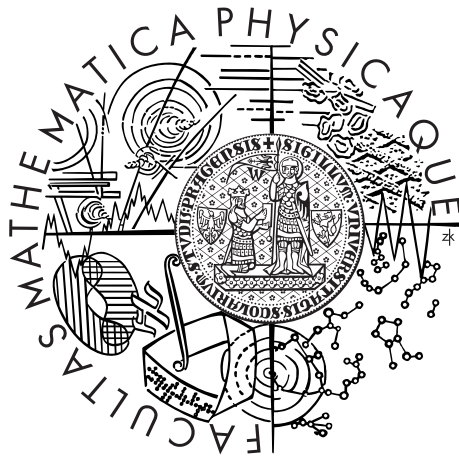


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko-fyzikální fakulta

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Lukáš Pilarčík

Fotometrický výzkum trpasličí novy EX Draconis

Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Marek Wolf CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astronomie a astrofyzika

Praha 2011

Chcem poďakovať svojmu vedúcemu doc. RNDr. Marku Wolfovi CSc. za celoročné vedenie pri spracovávaní meraní, cenné rady a trpezlivosť pri písaní tejto práce. Ďalej by som chcel poďakovať všetkým pozorovateľom, ktorí merali hviezdu EX Draconis: doc. RNDr. Marek Wolf, CSc., Kamil Hornoch, RNDr. Petr Zasche Ph.D., Pavol A. Dubovský a Radka Dančíková.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 14.4.2011

Podpis autora

Název práce: Fotometrický výzkum trpasličí novy EX Draconis

Autor: Lukáš Pilarčík

Katedra: Astronomický ústav

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Marek Wolf CSc., Astronomický ústav

Abstrakt: Fotometrické merania trpasličej novy EX Draconis boli získané na observatóriu AsÚ AVČR v Ondřejeve a Astronomickom observatóriu na Kolonickom sedle počas 63 nocí. Okamihy minima som určil dvomi metódami - zrkadliacou a derivačnou. Vzhľadom k väčším expozičným časom týchto meraní a tým menším pokrytím svetelenej krivky zákrytu je metóda zrkadlenia presnejšia. 53 nových okamihov minima a okamihy minima získané zo starších prác o EX Dra som vykreslil do O-C diagramu a preložil nimi funkciu sínus a teoretickú krivku LITE spôsobenú obehom tretieho telesa. Perióda cyklických zmien funkcie sínus mi vyšla 25 rokov narozdiel od starších prác, kde autorom vyšla 4 a 5 rokov. Perióda obehu tretieho telesa okolo dvojhviezdy je ~ 17 rokov a minimálna hmotnosť je $53.5 M_{\text{Jup}}$. Sumy štvorcov odchýlok sú 5x menšie pre LITE tretieho telesa. Ďalej som určil priemernú periódu vzplanutia pre tri pozorovacie obdobia a vykreslil fázový diagram vzplanutia. Nakoniec som určil krátke periódy svetelných zmien mimo zákryt.

Klíčová slova: trpasličie novy, EX Draconis, vzplanutie, akrečný disk

Title: Photometric study of dwarf nova EX Dra

Author: Lukáš Pilarčík

Department: Astronomical Institute

Supervisor: doc. RNDr. Marek Wolf CSc., Astronomical Institute

Abstract: Photometry of eclipsing dwarf-nova EX Draconis was performed at the observatory of Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic in Ondřejov and at the Astronomical Observatory on Kolonické sedlo during 63 nights. I calculated times of minimum light by two methods - the mirror method and the derivative method. The mirror method is more precise for these measurements with longer exposure time and smaller coverage of the light curve of eclipse. 53 new times of minima calculated by the mirror method and times of minima obtained from older articles about EX Dra were included in the O-C diagram and fitted by the sine function and theoretical curve of LITE caused by an unseen third body. Period of cyclic changes for the sine function is 25 years, instead of 4 or 5 years period given in older papers. Period of the third body orbit is approximately 17 years and its minimum mass is $53.5 M_{\text{Jup}}$. The sum of squared deviations is 5 times smaller for the LITE, which means that the LITE illustrates the O-C diagram better. I determined the average outburst period for three observational seasons and I drew the phase curve of outburst. Finally, I calculated the short period of the light changes outside eclipse.

Keywords: dwarf-novae, EX Draconis, outburst, accretion disc

Obsah

Úvod	2
1 Trpasličie novy	4
1.1 Klasifikácia dvojhviezd a kataklizmatických premenných hviezd	4
1.2 Zložky trpasličej novy	6
1.2.1 Rocheov model	6
1.2.2 Biely trpaslík	8
1.2.3 Červený trpaslík	8
1.2.4 Akrečný disk	9
1.2.5 Jasná škvrna	9
1.3 Vývoj trpasličích nov	11
1.3.1 Distribúcia orbitálnych periód. Periódová medzera	13
1.4 Vzplanutie	14
1.5 Magnetický cyklus	17
1.6 Flickering a oscilácie	19
2 EX Draconis	21
2.1 Prehľad	21
2.2 Meranie	23
2.3 Určovanie okamihov minima a O-C diagram	24
2.3.1 Metóda zrkadlenia	26
2.3.2 Derivačná metóda	27
2.3.3 O-C diagram	29
2.4 Možná prítomnosť tretieho telesa	33
2.5 Perióda vzplanutia	35
2.6 Flickering a oscilácie	41
2.7 Porovnanie EX Draconis s inými trpasličími novami	42
Záver	44
Zoznam použitej literatúry	46
Zoznam tabuliek	48
Zoznam použitých skratiek	49
Prílohy	50

Úvod

Historicky prvá trpasličia nova U Gem bola objavená v roku 1855. Jej jasnosť v kľudnom stave je ~ 14 mag a jasnosť v maxime vzplanutia dosahuje až 9 mag, čiže počas vzplanutia sa jasnosť celej sústavy zvýši až stonásobne. Tak ako u mnohých ďalších trpasličích nov nastávajú vzplanutia U Gem približne každých 100 dní. Vďaka týmto polopravidelným vzplanutiam sa táto hviezda stala lákavým objektom na pozorovanie pre amatérskych pozorovateľov, ktorí ju začali monitorovať.

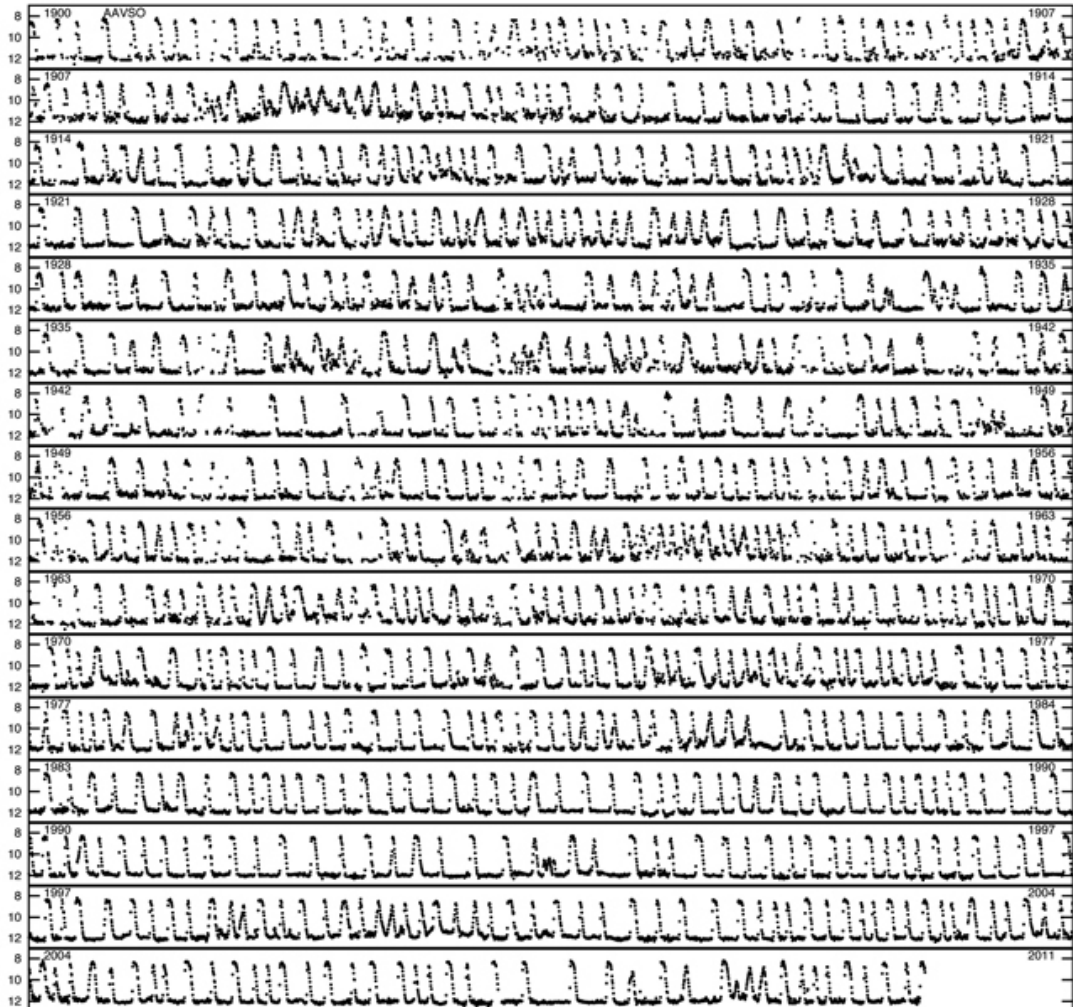
Čo sa za týmito polopravidelnými vzplanutiami skrýva, začali astronómia postupne odhaľovať až o sto rokov neskôr. Prví pozorovatelia trpasličích nov by boli určite veľmi prekvapení, keď by zistili, že za týmto nepravidelne meniacim sa svetelným bodom sa skrýva tesná dvojhviezda, v ktorej hmota z jednej zložky pomaly preteká na druhú zložku. Okolo druhej zložky sa z tohto prúdu hviezdnej hmoty vytvára disk. Stonásobné zjasnenie celej sústavy spôsobí disk, ktorý sa dostane do vzplanutia a nie hviezdy samotné.

Na obrázku 1 je historická svetelná krivka jednej z prvých objavených trpasličích nov SS Cyg zostavená z meraní pozorovateľov AAVSO¹ (*American Association of Variable Star Observers*) od roku 1900 dodnes.

V svojej diplomovej práci sa venujem trpasličím novám, ktoré patria medzi kataklizmatické premenné hviezdy. Prvá kapitola je venovaná teoretickým znalostiam o trpasličích novách. Na začiatku zatriedim trpasličie novy v systéme dvojhviezd a kataklizmatických premenných hviezd. Ďalej rozoberám jednotlivé zložky žiarenia, vývoj trpasličích nov spolu s príčinou vzniku tzv. periódovej medzery, vplyv magnetického cyklu červeného trpaslíka na orbitálnu periódu a pôvod flickeringu. V druhej praktickej kapitole som spracoval meranie hviezdy EX Draconis z observatória v Ondřejove a na Kolonickom sedle z rokov 2004-2011. Najprv rozoberám problematiku určovania okamihu minima spôsobenú veľkou nesymetriou zákrytu. Z určených okamihov minima som zostrojil O-C diagram a popísal som cyklické zmeny orbitálnej periódy funkciou sínus a možným tretím telesom v sústave. Z meraní som ďalej určil periódy vzplanutí v niekoľkých pozorovacích obdobiach. Nakoniec som sa pokúsil nájsť možné krátkoperiodické zmeny mimo zákryt a porovnal EX Draconis s ostatnými trpasličími novami.

¹<http://www.aavso.org/>

SS Cygni 1900-2010 (1-day means)



Obrázek 1: Historická svetelná krivka trpasličej novy SS Cyg od roku 1900 dodnes. Vzplanutia nastávajú polopravidelne každých 50 dní. Amplitúda vzplanutí je 4 mag. Prevzaté z www.aavso.org.

1. Trpasličie novy

Trpasličie novy sú tesné dvojhviezdy. Skladajú sa z bieleho a červeného trpaslíka. Okolo bieleho trpaslíka rotuje akrečný disk. Na okraji akrečného disku je jasná škvrna. Patria medzi kataklizmatické premenné hviezdy, ktoré sú zaujímavé hlavne svojimi vzplanutiami. U trpasličích nov sa vzplanutia opakujú priemerne každých 10–500 dní. Svetelná krivka trpasličích nov je veľmi pestrá, jej tvar ovplyvňujú vzplanutia, orbitálne hrby, rôzne odrazové efekty a u zákrytových trpasličích nov aj zákryty jednotlivých zložiek sústavy. O kataklizmatických hviezdach a ich podskupine - trpasličích novách píšem práve v tejto kapitole.

1.1 Klasifikácia dvojhviezd a kataklizmatických premenných hviezd

Rocheov model nahradzuje skutočný potenciál dvojhviezdy obiehajúcej okolo spoločného ťažiska. Potenciál je nahradený potenciálom dvoch hmotných bodov a potenciálom odstredivej sily obežného pohybu. Vzhľadom na silnú koncentráciu hmoty smerom do centra hviezd je možná aproximácia hviezdy hmotným bodom. Ekvipotenciálne plochy v blízkom okolí oboch hviezd sú najprv guľového tvaru, ďalej od hviezd sa splošťujú až sa nakoniec spoja do spoločnej ekvipotenciálnej plochy nazývanej Rocheova medz. Podľa toho ako jednotlivé zložky dvojhviezdy vyplňujú túto kritickú ekvipotenciálu, ich rozdeľujeme na:

- *oddelené dvojhviezdy*: Obe zložky sú vo vnútri Rocheovej medze
- *polodotykové dvojhviezdy*: Jedna zo zložiek vyplňuje Rocheovu medz a druhá je vo vnútri Rocheovej medze
- *kontaktné dvojhviezdy*: Obe zložky vyplňujú alebo presahujú Rocheovu medzu a majú spoločnú atmosféru

Pokiaľ pozorovateľ leží približne v orbitálnej rovine dvojhviezdy, tak je dvojhviezda navyše zákrytová. Dochádza k zákrytom jednej zložky druhou a naopak, a tým k poklesu celkovej jasnosti sústavy. Zákrytové dvojhviezdy sa podľa tvaru svetelnej krivky zákrytu delia nasledovne:

- *typ Algol*: Konštantná jasnosť mimo zákryt a počas úplnej časti zákrytu
- *typ β Lyrae*: Jasnosť sústavy sa mení počas celej periódy (aj mimo zákryt) a hĺbka miním je výrazne odlišná
- *typ W UMa*: Jasnosť sa plynulo mení počas celej periódy a hĺbka miním je približne rovnaká

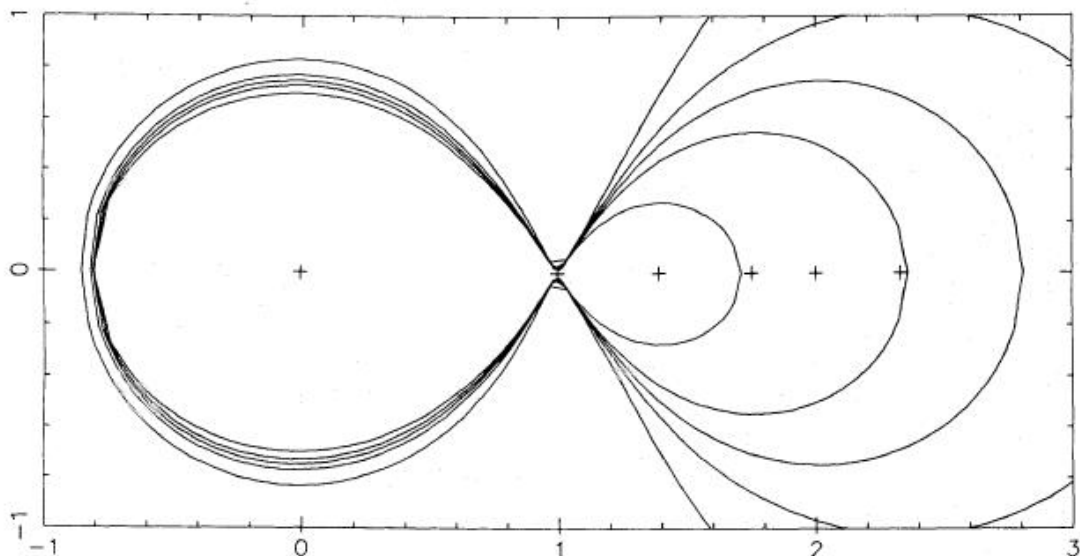
Kataklizmatické premenné hviezdy patria medzi polodotykové dvojhviezdy. Primárna zložka je horúci kompaktný objekt - biely trpaslík. Sekundárnou zložkou je chladná hviezda nazývaná červený trpaslík, u ktorej dochádza k rozpínaniu vrchnej vrstvy. Červený trpaslík vyplňuje svoju Rocheovu medz a cez Lagrangeov

bod L1 preteká tok hmoty na primárnu zložku. Ak je magnetické pole primárnej zložky veľmi slabé, tak sa v jej okolí z pretekajúcej hmoty vytvorí disk, ktorý nazývame akrečný disk. Spolu s pretokom hmoty sú ďalším charakteristickým znakom kataklizmatických premenných hviezd vzplanutia (po anglicky: *outbursts*). Kataklizmatické hviezdy delíme podľa rôzne silných a trvajúcich vzplanutí alebo rôzne silných magnetických polí primárnej zložky na (delenie podľa Warner (1995) [42]):

- *Klasické novy*: Pozorované bolo len jedno vzplanutie. Amplitúdy vzplanutí dosahujú 6 – 13 mag. Vzplanutia s veľkou amplitúdou majú krátke trvanie, jasnosť z maxima rýchlo klesá. Takéto klasické novy sa nazývajú rýchle novy. Naopak vzplanutia s menšou amplitúdou trvajú dlhšie a takéto novy nazývame pomalé. Erupcia vzniká náhlym spustením termonukleárnej reakcie spôsobenej nahromadením vodíkovej a héliovej hmoty na povrch bieleho trpaslíka.
- *Trpasličie novy*: Amplitúdy vzplanutí sú 2 – 5 mag (niektoré dosahujú až 8 mag). Intervaly medzi vzplanutiami sú od ~ 10 dní do niekoľkých desiatok rokov. Každá trpasličia nova má vlastné typické rozmedzie intervalov vzplanutí.
- *Rekurentné novy*: Vzplanutia sa opakujú ako u trpasličích nov. Rozdiel medzi rekurentnými a trpasličími novami je vidieť zo spektroskopie. U rekurentných nov je obálka vyvrhovaná vysokými rýchlosťami, kým trpasličie novy žiadnu obálku nestrácajú.
- *Novám podobné premenné hviezdy*: Zahrňujú všetky neeruptívne kataklizmatické hviezdy. Predpokladá sa, že takáto hviezda je v období pred výbuchom novy, po výbuchu novy alebo kataklizmatická hviezda podtypu Z Cam (viď rozdelenie trpasličích nov) v štádiu kľudu. Kataklizmatické premenné hviezdy sú sledované ~ 100 rokov, čo je ale krátke obdobie na to aby bol u niektorých z nich rozpoznávaný presnejší typ.
- *Magnetické kataklizatické premenné hviezdy*: Primárna zložka dvojhviezdy má silné magnetické pole, ktoré na zabráni vzniku akrečného disku (čiastočne alebo úplne). Delia sa na dva podtypy:
 - *Polary*: Majú silné magnetické pole. Akrečný disk sa nevyskytuje, hmota padá priamo po siločiarach magnetického poľa na póly primárnej zložky.
 - *Intermediálne polary*: Magnetické pole je slabšie a nezabráni vzniku aspoň čiastočného akrečného disku.

Samotné trpasličie novy sa ďalej delia na:

- + *typ Z Cam*: Objavujú sa u nich kľudné obdobia s jasnosťou ~ 0.7 mag menšou ako je maximálna jasnosť pri vzplanutí. Počas kľudných období sa vzplanutia nevyskytujú, tieto obdobia trvajú desiatky dní až niekoľko rokov.



Obrázek 1.1: Tvary Rocheových lalokov (kritických Rocheových ekvipotenciál) pre pomery hmotností $q = 0.1, 0.5, 1, 2, 10$. Vzdialenosť stredu primárnej zložky (vľavo, $[x,y]=[0,0]$) a vnútorného Lagrangeovho bodu L1 ($[x,y]=[1,0]$) je pre všetky q rovná jednej. Stred sekundárnej zložky (vpravo) sa pre rôzne q posúva. Z práce Horne (1985) [23].

- + *typ SU UMa*: Vyskytujú sa občasné super-vzplanutia, ktoré dosahujú o ~ 0.7 mag vyššiu jasnosť a trvajú dlhšie ako pri normálnych vzplanutiach.
- + *typ U Gem*: Tento podtyp obsahuje trpasličie novy, ktoré nepatria ani do Z Cam ani do SU UMa.

1.2 Zložky trpasličej novy

Trpasličie novy sa skladajú z bieleho trpaslíka a červeného trpaslíka. Z červeného trpaslíka preteká hmota z vnútorného Lagrangeovho bodu na bieleho trpaslíka. Okolo bieleho trpaslíka sa z pretekajúcej hmoty vytvoril akrečný disk. Jasná škrvna sa nachádza na okraji akrečného disku v mieste, kde dopadá hlavný prúd hmoty.

1.2.1 Rocheov model

Kataklyzmatické hviezdy patria medzi polodotykové dvojhviezdy, preto je potrebné najprv popísať ako vyzerá Rocheov model. Slapové sily spôsobia, že sekundárna hviezda začne rotovať synchronne s orbitálnym pohybom okolo primárnej hviezdy. Spolu so synchronnou rotáciou sa eliminuje excentrická orbita. Časová škála vzniku takejto sústavy je omnoho kratšia ako život kataklyzmatickej dvojhviezdy. Takže u trpasličích nov predpokladáme kruhovú orbitu a synchronnú rotáciu. Platí 3. Keplerov zákon

$$P_{\text{orb}}^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)}, \quad (1.1)$$

kde P_{orb} je orbitálna perióda, a je veľká poloosa, M_1 a M_2 sú hmotnosti oboch zložiek. Sekundárna zložka je veľmi podobná ako samostatná hviezda hlavnej postupnosti alebo obor, v ktorých je hmota silne koncentrovaná. V Rocheovom modeli obe hviezdy nahradíme hmotnými bodmi obiehajúcimi okolo seba uhlovou rýchlosťou $\omega = 2\pi/P_{\text{orb}}$. Zavedieme pomer hmotností $q = M_1/M_2$. Zvolíme neinerciálnu pravouhlú súradnú sústavu, ktorá má počiatok v bode M_1 , osa x leží medzi stredmi hmôt, osa z je kolmá na orbitálnu rovinu a osa y je kolmá na x a z . Celkový potenciál v ľubovľom bode (x, y, z) je súčtom gravitačných potenciálov oboch zložiek a rotačným potenciálom

$$\Phi_R = -\frac{GM_1}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} - \frac{GM_2}{[(x-a)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} - \frac{1}{2}\omega^2 [(x - \mu a)^2 + y^2], \quad (1.2)$$

kde $\mu = M_2/(M_1 + M_2)$. Z rovnice 1.1 vyjadríme

$$\omega^2 = \frac{4\pi^2}{P_{\text{orb}}^2} = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3} = \frac{GM_1(1+q)}{a^3}, \quad (1.3)$$

pre zjednodušenie $a = 1$. Ďalej si ešte zjednodušíme potenciál Φ_R na

$$\begin{aligned} \Omega &= \frac{\Phi_R}{GM_1} = \\ &= \frac{1}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \frac{q}{[(1-x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \frac{1+q}{2} [(x-\mu)^2 + y^2] = \\ &= \frac{1}{[x^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \frac{q}{[(1-x)^2 + y^2 + z^2]^{1/2}} + \\ &+ \frac{1+q}{2}(x^2 + y^2) - qx + \frac{q^2}{2(1+q)}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Rovnice ekvipotenciálnych plôch sú

$$\Omega = C, \quad (1.5)$$

kde C je konštanta pre danú plochu. Rovnice ekvipotenciálnych plôch (1.4) závisia len na q , preto ich tvar určuje iba pomer hmotností q a ich veľkosť závisí na a . V miestach, v ktorých je výsledná sila nulová musí platiť

$$\nabla\Omega = \left(\frac{\partial\Omega}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial\Omega}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial\Omega}{\partial z}\right) = 0. \quad (1.6)$$

Výsledkom rovnice 1.6 sú jednotlivé Langrangeove body L1 – L5. Aproximatívna rovnica pre vzdialenosť medzi primárnou zložkou a vnútorným Langrangeovým bodom L1 je (Plavec & Kratochvil (1963) [33])

$$\frac{R_{L1}}{a} = 0.500 - 0.227 \log q \quad 0.1 \leq q \leq 10. \quad (1.7)$$

Na sférickú aproximáciu sekundárnej zložky vyplňujúcej Rocheovu medz sa zavedie tzv. objemový polomer $R_L(2)$. Objem guľe s polomerom $R_L(2)$ je rovnaký ako objem vyplňujúci Rocheovu medz sekundárnej zložky. Aproximatívna rovnica pre $R_L(2)$ je (Eggleton (1983) [14])

$$\frac{R_{L(2)}}{a} = \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1+q^{1/3})} \quad 0 < q < \infty. \quad (1.8)$$

Na obrázku 1.1 sú zobrazené tvary Rocheových lalokov pre pomery hmotností $q = 0.1, 0.5, 1, 2, 10$.



Obrázek 1.2: Trpasličia nova. Vľavo dole je červený trpaslík, z ktorého preteká hmota cez vnútorný Lagrangeov bod L1 na bieleho trpaslíka. V okolí bieleho trpaslíka rotuje akrečný disk. Tam kde dopadá priamy prúd hmoty z červeného trpaslíka na akrečný disk sa vytvára jasná škvrna. Prevzaté z http://www.mssl.ucl.ac.uk/www_astro/gal/cv_beginners.html#dns, M. A. Garlick.

1.2.2 Biely trpaslík

Biely trpaslík (ďalej aj BT) je skolabované jadro hviezdy priemernej alebo podpriemernej hmotnosti. Je to hviezda s veľkou hustotou o veľkosti Zeme a hmotnosti Slnka.

Normálne hviezdy sú zložené hlavne z vodíku. V ich centre, kde je vysoký tlak a vysoká teplota, dochádza k termonukleárnym reakciám, pri ktorých sa spaľuje vodík na ťažšie prvky. Termonukleárny odpad sa zhromažďuje v jadre, kde sa zvyšuje hustota. Vodík sa v jadre spotrebuje, vonkajšie vrstvy expandujú, hviezda niekoľkonásobne zväčší svoj polomer. V priebehu spaľovania hélia hviezda odhodí svoje vonkajšie vrstvy, z ktorých vznikne planetárna hmlovina. Pozostatok je horúce jadro s veľmi veľkou hustotou a nazývame ho biely trpaslík.

Pokiaľ v jadre prebiehajú termonukleárne reakcie, jadro sa nezmenšuje. Ale v BT termonukleárne reakcie už neprebiehajú a jadro je malé a husté. BT je udržiavaný tlakom degenerovaného plynu. Horná hmotnostná hranica je pre BT $1.4 M_{\odot}$ a nazýva sa Chandrasekharova mez. Žiaden BT nemôže byť hmotnejší, preto máme pre všetky BT celkom dobrý hmotnostný odhad. Pokiaľ by bola hmotnosť väčšia, tlak gravitácie by prekonal tlak degenerovaného plynu, elektrón sa spojil s protónom a vznikol neutrón. Takúto hviezdu nazývame neutrónová. Väčšina BT má hmotnosti $0.5 - 0.6 M_{\odot}$ a skoro všetci sa nachádzajú v rozsahu $0.3 - 1.3 M_{\odot}$. BT pomaly vyžaruje žiarením čierneho telesa energiu nahromadenú počas aktívneho života a chladne až kým sa nestane tzv. čiernym trpaslíkom.

1.2.3 Červený trpaslík

Červený trpaslík (ďalej aj ČT) je malá a relatívne chladná hviezda hlavnej postupnosti spektrálneho typu K, M. Rozsah hmotností sa pohybuje medzi $0.08 M_{\odot} - 0.4 M_{\odot}$. Povrchová teplota je menšia 3500 K . Nukleárne reakcie v jadre sú pomalé, pretože teplota v jadre je nízka kvôli malej hmotnosti jadra a tak ČT

žiari tisíckrát menej ako naše Slnko. Vďaka pomalému nukleárnemu spaľovaniu majú ČT životnosť niekoľko desiatok miliárd až bilióny rokov. Od Veľkého tresku uplynulo málo času, aby hocijaký ČT stihol opustiť hlavnú postupnosť. ČT sú najbežnejšími hviezdami vo vesmíre.

V trpasličích novách ČT vyplňuje svoju Rocheovu medz a dochádza k akrecii hmoty cez akrečný disk na BT. Privrátená strana ČT je ožarovaná desiatkami tisíc Kelvinov od BT, žiarenie prijaté od BT reemituje. Teplota tejto strany ČT je vyššia ako na opačnej strane. Tento efekt sa nazýva odrazový efekt. Na svetelnej krivke sa toto prejaví u mnohých tesných dvojhviezdách zvýšením celkovej jasnosti sústavy, keď je táto ožiarená strana natočená do smeru pozorovateľa.

1.2.4 Akrečný disk

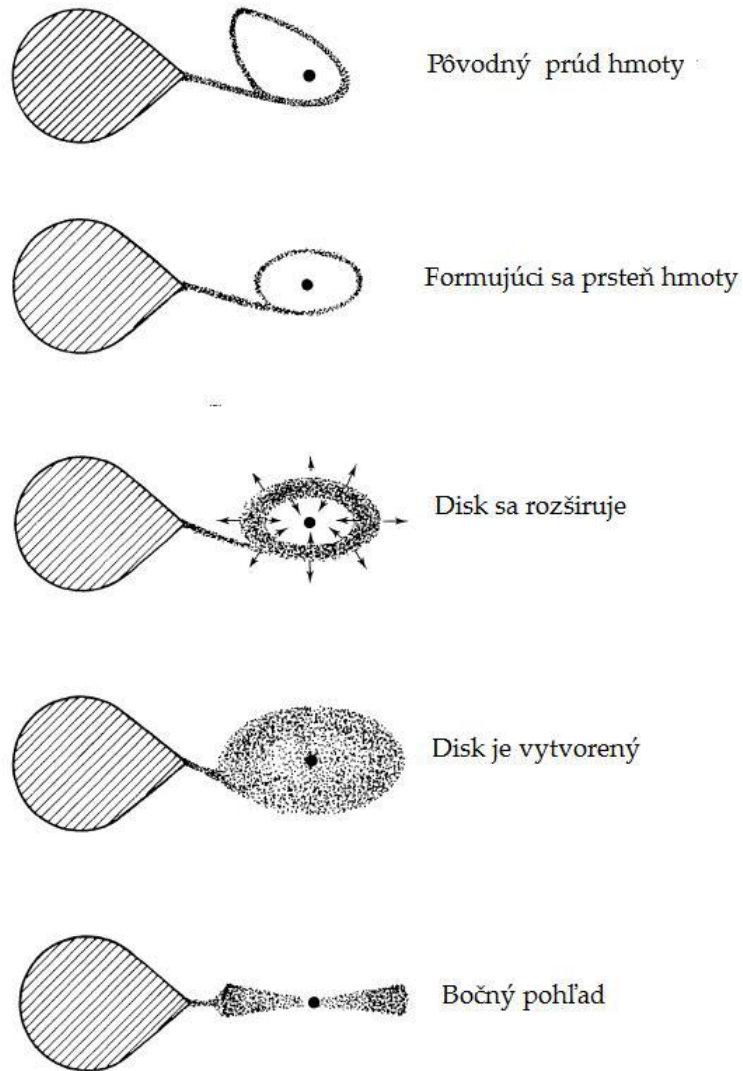
Z vnútorného Lagrangeovho bodu L1 preteká hviezdny materiál z ČT do Rocheovho laloku primárnej zložky. Materiál nesmeruje priamo k BT. Rýchlosť výtrysku hmoty je približne rovná rýchlosti zvuku v plyne. Samotný bod L1 sa pohybuje rýchlosťou približne 10x väčšou kolmo na rýchlosť výtrysku. Na hmotu teda pôsobí aj Coriolisova sila, ktorá vychýľuje tok od priameho smeru k BT. Dráha hmoty je určovaná počiatočnou rýchlosťou a gravitáciou primárnej zložky (gravitácia sekundárnej zložky sa stane rýchlo zanedbateľnou). Hmota obletí BT a začne do seba navzájom narážať, vznikne chaotický turbulentný tok, ktorý sa dá ukázať len počítačovými simuláciami (obrázok 1.3). Materiál sa nakoniec usadí na kruhovej dráhe, ktorá má najnižšiu energiu. Tenký disk sa postupne rozšíri, kým sa nedotkne povrchu BT. Z 3. Keplerovho zákona (1.1) vyplýva, že materiál na menšej kruhovej dráhe obieha rýchlejšie ako materiál na väčšej, a preto dochádza k treniu a zahrievaniu hmoty. Ak sa malá časť hmoty priblíži k centru primárnej hmoty, musí sa časť hmoty naopak vzdialiť, aby sa zachoval celkový uhlový moment. Materiál pomaly špiráluje cez disk a akreuje na BT. Pretokom novej hmoty cez Lagrangeov bod L1 akrečný je disk neustále udržiavaný.

Viac o procesoch v akrečných diskoch je v podkapitole 1.4. Akrečný disk sa nachádza vo vesmíre na viacerých miestach. Okrem kataklizmatických premenných hviezd sa vytvára aj v okolí novo sa formujúcich hviezd. Naša slnečná sústava sa vytvorila z disku. Žiarenie akrečných diskov nachádzajúci sa v okolí centier vzdialených galaxií alebo superhmotných čiernych dier je silnejšie ako žiarenie zvyšku galaxie. Skúmanie kataklizmatických premenných môže pomôcť k celkovému poznaniu akrečných diskov ako najenergetickejšieho fenoménu vo vesmíre.

1.2.5 Jasná škvrna

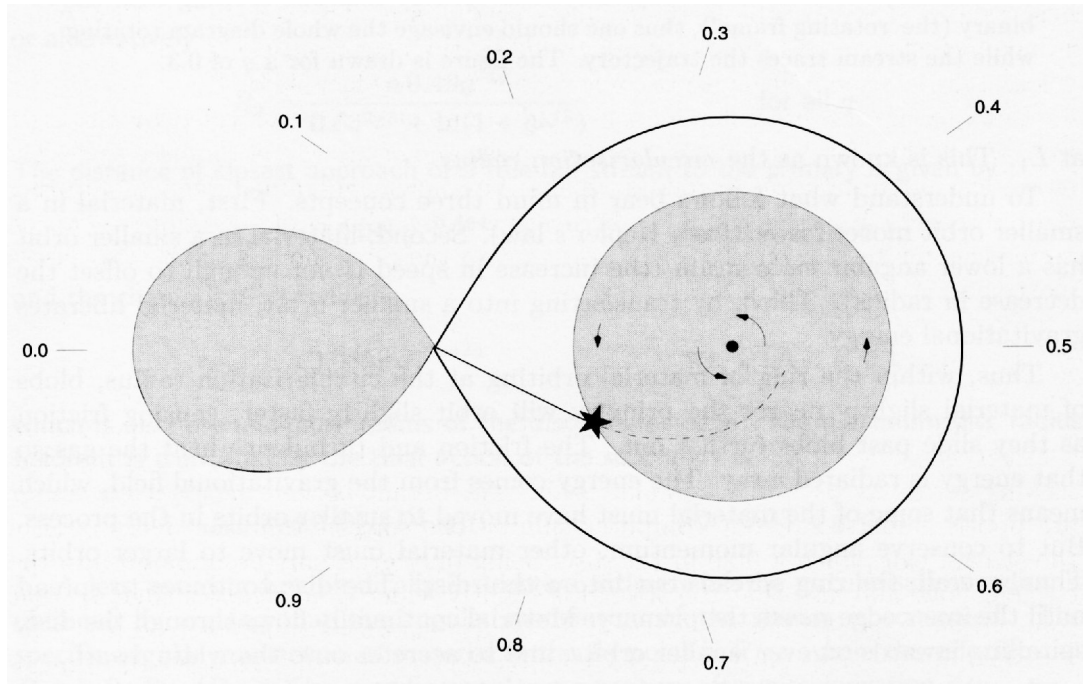
V mieste kde tok hmoty z ČT naráža do okraja disku sa vytvára jasná škvrna. Tento proces je slabo preskúmaný. Tok s veľmi hustým jadrom môže vytvoriť dieru do disku alebo ak je tok širší ako okraj disku, môže naopak pretiecť ponad a popod disk a pokračovať vo svojej pôvodnej trajektórii. Kinetická energia nárazu toku na disk sa premení na teplo a vyžiari sa.

U niektorých kataklizmatických premenných hviezd vyžaruje jasná škvrna až 30% z celkového žiarenia sústavy. Na svetelnej krivke sa to prejaví tzv. *orbitálnym hrbom*. Celkové žiarenie sústavy sa zvyšuje, keď sa sústava natáča k pozorovateľovi jasnou škvrnou, maximum orbitálneho hrbu nastáva keď jasná škvrna smeruje



Obrázek 1.3: Vývoj akrečného disku. Z pôvodného toku látky sa najprv sformuje prstenec, ktorý sa neskôr rozšíri. Na posledných dvoch obrázkoch je konečný akrečný disk v pohľade zhora (predposledný obrázok) a z boku (posledný obrázok). Z práce Verbunt (1982) [40].

k pozorovateľovi, čo je približne vo fáze 0.8 – 0.9, a postupne opäť klesá jasnosť. Ak je dvojhviezda zákrytová, tak po maxime orbitálneho hrbu dochádza najprv k zákrytu akrečného disku, postupne BT a nakoniec aj jasnej škvry. Spoza ČT najprv začne vychádzať BT, potom jasná škvry a nakoniec aj zvyšok akrečného disku, ktorý má z nich najväčšiu plochu. Na obrázku 1.4 je pohľad na trpasličiu novu zhora, pozorovateľ sa pozerá na sústavu v rovine papiera. Okolo obrázku sú zobrazené smery, z ktorých sa pozorovateľ pozerá počas jednotlivých fáz. Vo fáze 0 nastáva minimum. Na obrázku 1.5 je vidieť orbitálny hrb na svetelnej krivke hviezdy EX Draconis vo filtri V nameranej na observatóriu v Ondřejeve. Orbitálny hrb je najlepšie vidieť vo filtroch B alebo V, v ktorých je žiarenie jasnej škvry viditeľnejšie oproti ďalším zložkám sústavy.



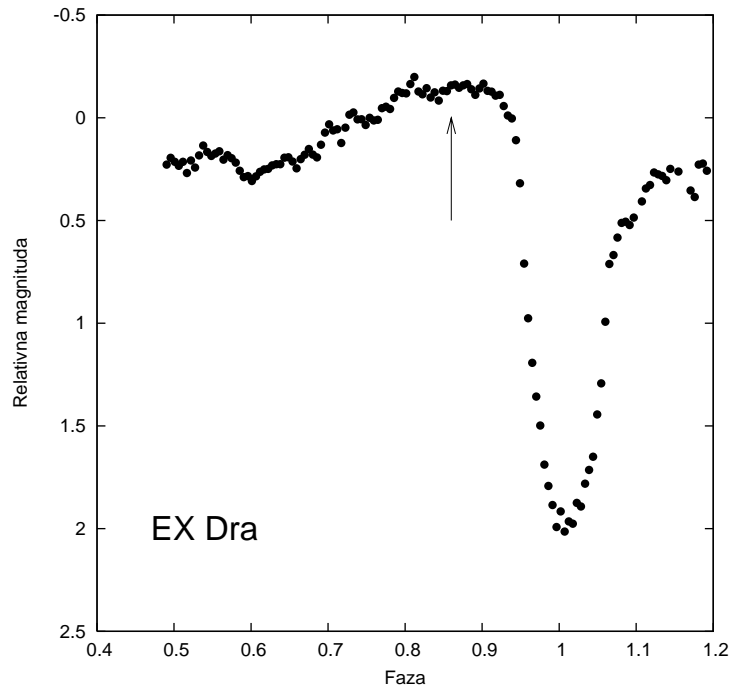
Obrázek 1.4: Pohľad na trpasličiu novu zhora. Pozorovateľ zákrytovej trpasličej novy sa pozerá na sústavu približne v rovine papiera. Okolo obrázku sú zobrazené smery, z ktorých sa pozorovateľ pozerá počas jednotlivých fáz. Vo fáze 0 nastáva minimum. Pred zákrytom (približne vo fáze 0.85) nastane maximum orbitálneho hrubu, pretože jasná škvrna je natočená k pozorovateľovi. Potom dochádza najprv k zákrytu akrečného disku (približne vo fáze 0.95), postupne BT a nakoniec aj jasnej škvrny. Spoza ČT najprv začne vychádzať BT, potom jasná škvrna a nakoniec aj zvyšok akrečného disku (približne vo fáze 0.05), ktorý má z nich najväčšiu plochu. Z práce Hellier (2001) [22].

1.3 Vývoj trpasličích nov

Hviezdy vznikajú z medzihviezdneho prachu a plynu, ktorý skolabuje pod vlastnou gravitáciou. Hmotnosť mraku je často niekoľko tisíc hmotností Slnka a vznikne z neho celá hviezdokopa mladých hviezd. Väčšina hviezd je viazaná do dvojhviezdnych, trojhviezdnych či viacnásobných sústav alebo párov dvojhviezd a iných kombinácií. Len menšia časť hviezd je osamotených ako naše Slnko.

Dvojhviezda, z ktorej vznikne kataklizmatická hviezda, sa najprv skladá z primárnej hviezdy s hmotnosťou väčšou ako $1 M_{\odot}$ a sekundárnej hviezdy s hmotnosťou menšou ako $1 M_{\odot}$. Zložky takejto dvojhviezdy sú od seba vzdialené stovky polomerov Slnka a obiehajú okolo seba desiatky rokov. Hmotnejšia hviezda sa vyvíja rýchlejšie a stane sa červeným obrom. Keď vyplní svoju Rocheovu medz, začne pretok hmoty na menej hmotnú zložku.

Nastane nestabilná situácia, pretože hmotnejšia hviezda je bližšie k ťažisku dvojhviezdy a hmota preteká na sekundárnu zložku, ktorá je ďalej od ťažiska. Týmto sa zvýši uhlový moment sústavy. Aby platil zákon zachovania uhlového momentu, musí sa zmenšiť vzdialenosť medzi ČT a ťažiskom a tým aj medzi hviezdami. Takéto priblíženie ale zmenší objem Rocheovho laloku hmotnejšej



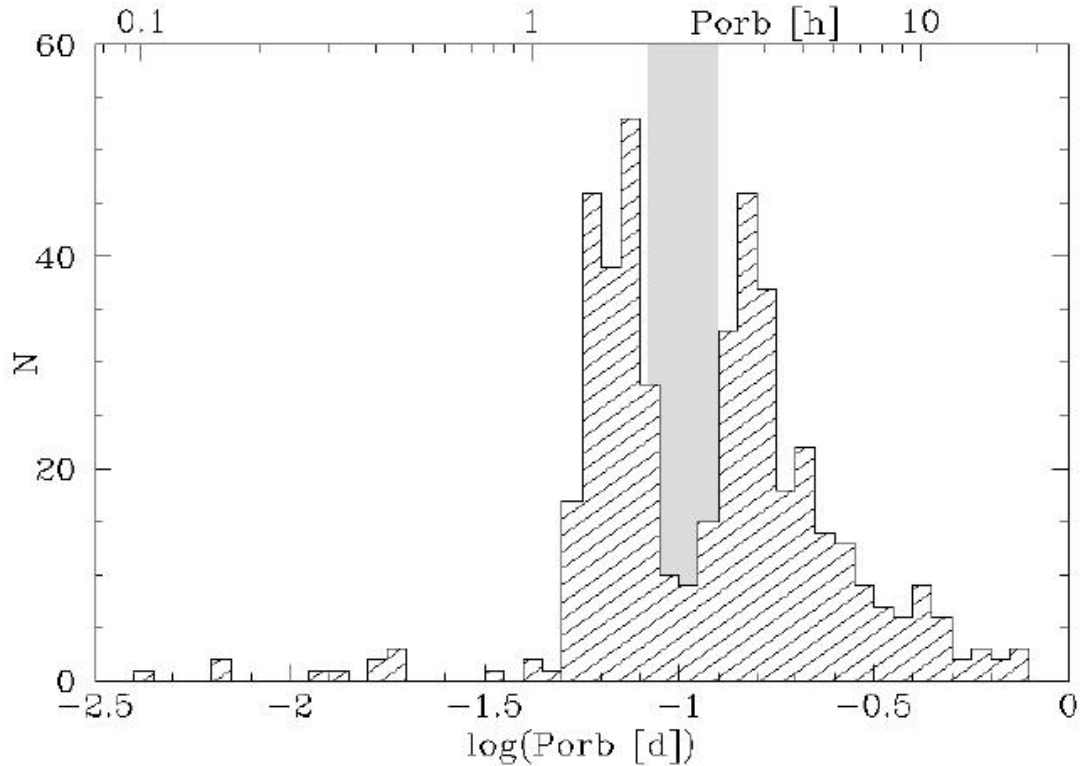
Obrázek 1.5: Ukážka orbitálneho hrbu na svetelnej krivke trpasličej novy EX Draconis nameranej 8. apríla 2010 na observatóriu v Ondřejeve vo filtri V. Orbitálny hrb začína vo fáze 0.6 a končí v 1.1 s maximom v 0.85, počas zákrytu je prekrytý červeným trpaslíkom.

hviezdy, primárna hviezda ešte viac vyplní svoj Rocheov lalok a zvýši sa veľkosť pretoku. Celá obálka hmotnejšej hviezdy preskočí na sekundár. Materiál vyplňuje oba Rocheove laloky, menej hmotná hviezda pláva v obálke hmotnejšej. Tento stav trvá len pár rokov, čiže strašne krátko v porovnaní s hviezdny vývojom.

Obálka brzdí sekundár a on sa stále približuje k hmotnejšej zložke až na vzdialenosť aká je bežná u kataklizmatických premenných hviezdach $\sim 1 R_{\odot}$. Toto trvá približne 1000 rokov. Sekundár pôsobí ako vrtuľa, pomáha pri odhadzovaní obálky, ktorá je nakoniec vyvrhnutá do medzihviezdneho priestoru a vytvorí sa planetárna hmlovina. Takto nakoniec vznikne kataklizmatická premenná hviezda.

U kataklizmatických premenných hviezd ale dochádza k pretoku hmoty z menej hmotnej zložky na hmotnejšiu, teda opačne ako pri jej vzniku. Pretokom hmoty bližšie k ťažisku sa znižuje uhlový moment sústavy a sekundár sa musí naopak vzdalovať od ťažiska a súčasne aj od BT. Zväčšením vzdialenosti hviezd sa zväčší Rocheov lalok, ČT sa môže oddeliť od Rocheovej medze a zastaví sa pretok hmoty. Aby pretok hmoty pokračoval ďalej musí existovať nejaký mechanizmus, ktorý opäť zmenší vzdialenosť medzi zložkami a stav pretoku hmoty sa tým udrží. Pravdepodobné sú dva mechanizmy straty uhlového momentu: magnetické brzdenie a gravitačné vyžarovanie.

Podľa všeobecnej teórie relativity hmota spôsobuje zakrivenie časopriestoru. Opakované obiehajúce dvoch hviezd spôsobuje zakrivovanie priestoru, ktorý vytvára periodické vlny smerom von. Tento dej sa nazýva *gravitačné vyžarovanie*. Energia spotrebovaná na vytvorenie týchto vln odíde zo sústavy, čo spôsobí pomalé približovanie hviezd. Relativistické efekty pri hmotných objektoch ako sú



Obrázek 1.6: Histogram periód kataklizmatických premenných hviezd. Šedou farbou je vyznačená periódová medzera. Vznik periódovej medzere a hornej a dolnej hranice distribúcie orbitálnych periód je vysvetlený v texte. Z práce Dillon (2008) [13].

čierne diery a neutrónové hviezdy sú výraznejšie ako u málo hmotných hviezdach ako ČT a BT. Ale obe zložky trpasličej novy sú veľmi blízko pri sebe a ich obežná rýchlosť je vysoká a gravitačné vyžarovanie je výraznejšie napriek ich malej hmotnosti.

Tok nabitých častíc (najmä elektrónov a protónov) uvoľnených z hviezdy nazývame hviezdny vietor. Spolu s magnetickým poľom ČT spôsobujú *magnetické brzdenie*. Nabité častice hviezdneho vetru sa pohybujú pozdĺž siločiar magnetického poľa. Magnetické pole rotuje spolu s ČT a preto aj častice hviezdneho vetru rotujú s ČT. Uniknuté nabité častice unášajú časť uhlového momentu ČT, ktorý ale rotuje viazane s BT. Aby sa viazaná rotácia zachovala, musí sa strata uhlového momentu ČT dodať z uhlového momentu orbitálneho pohybu a preto sa vzdialenosť medzi zložkami dvojhviezdy zmenší.

1.3.1 Distribúcia orbitálnych periód. Periódová medzera

Na obrázku 1.6 je zobrazený histogram orbitálnych periód kataklizmatických hviezd. Z histogramu je vidieť úbytok hviezd s periódami nad ~ 12 h. Dvojhviezdy s väčšou orbitálnou periódou majú väčšiu vzdialenosť (vyplýva to z 3. Keplerovho zákona (1.1)), tým aj väčšie Rocheove laloky. Aby ČT vyplnil veľký Rocheov lalok, musí byť viac hmotný. Maximálna hmotnosť BT je daná Chadrasekharovou medzou a ČT musí mať tiež menšiu hmotnosť ako je táto hranica. Týmto dostá-

vame maximálnu veľkosť Rocheoveho laloku kataklizmatických hviezd a tým aj maximálnu orbitálnu periódu, aby mohlo dojsť k pretoku hmoty.

Existuje niekoľko systémov s väčšou periódou ako ~ 12 h. ČT sa v takýchto systémoch už začal vyvíjať na červeného obra a tým stále udržuje kontakt s Rocheovou medzou.

Ak ČT ešte nevyplňuje Rocheov lalok (takéto sústavy nazývame pre-kataklizmatické hviezdy), tak sa vďaka magnetickému brzdeniu vzdialenosť oboch zložiek a tým aj Rocheov lalok postupne znižuje, až kým sa ČT nedotkne Rocheovej medze. Následne začne prenos hmoty a dvojhviezda sa stáva kataklizmatickou. Magnetické brzdenie ďalej znižuje vzdialenosť hviezd a udržuje prenos hmoty. Spolu so znižovaním vzdialenosti sa znižuje aj perióda až kým nedosiahne hodnoty ~ 3 h.

V rozsahu periód 2 – 3 h nastáva tzv. *periódová medzera*. Na histograme 1.6 je táto medzera označená šedou farbou. Po dosiahnutí periódy ~ 3 h sa zastaví magnetické brzdenie. Presný dôvod tohto zastavenia je stále neznámy. ČT stráca svoje vonkajšie vrstvy, tlak na jadro sa znižuje, a tým sa znižujú nukleárne reakcie v jadre. S menšou vygenerovanou energiou klesá tlak, hviezda pomaly kontrahuje a ČT sa oddelí od Rocheovej medze. Aby znovu začal prenos hmoty, musí sa opäť zmenšiť Rocheova medz. Gravitačným vyžarovaním sa znižuje vzdialenosť zložiek a od periódy ~ 2 h ČT opäť vyplní svoj Rocheov lalok a začne pretok hmoty. Od tejto periódy je pretok hmoty regulovaný gravitačným vyžarovaním.

Z obrázku 1.6 je vidieť, že niekoľko kataklizmatických premenných hviezd sa nachádza aj v periódovej medzere. Je to spôsobené tým, že v tomto rozmedzí periód vznikli a ČT ešte nestratil toľko hmoty z vonkajších vrstiev, aby sa znížila produkcia nukleárnych reakcií a stále vyplňuje Rocheov lalok. Gravitačným žiarením sa pomaly znižuje perióda až sa dostanú mimo periódovú medzeru do oblasti "normálnych" kataklizmatických hviezd.

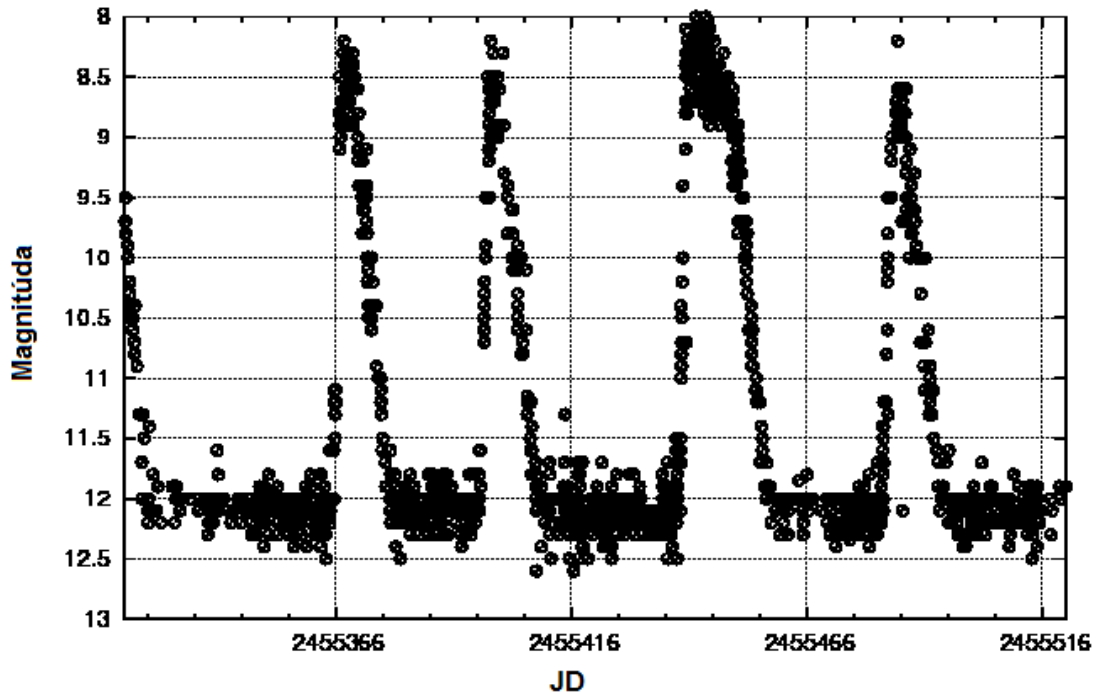
Postupným ubúdaním hmoty sa ČT sa začne správať ako BT, stane sa degenerovaným. Veľkosť hviezdy začne byť určovaná nie tlakom plynu ale tlakom degenerovaného plynu. U bielych trpaslíkov je to naopak ako u normálnych hviezd, čím má biely trpaslík väčšiu hmotnosť, tým má menší polomer a naopak. Preto začne sekundár znižovaním hmotnosti zväčšovať svoj objem. Počítačové modely ukazujú, že orbitálna perióda sa bude postupne zväčšovať a sekundár bude vďaka zväčšovaniu objemu stále vyplňovať Rocheov lalok. Hranica medzi znižovaním a následnom zväčšovaní periódy je ~ 78 min a je zreteľná aj na obrázku 1.6.

Opäť existuje niekoľko systémov s orbitálnou periódou menšou ako je minimálna perióda ~ 78 min. Sú to hviezdy typu AM CVn zložené najmä z hélia. Pretože hélium je ťažšie ako vodík sú tieto hviezdy s rovnakou váhou ako normálne vodíkové hviezdy kompaktnejšie a môžu mať menšie vzdialenosti a Rocheove laloky. Ich vývojová cesta je podobná, ale posunutá smerom k menším periódam.

Takto popisuje vývoj trpasličích nov a vznik periódovej medzery Hellier (2001) [22].

1.4 Vzplanutie

Kataklizmatické hviezdy sú zaujímavé hlavne kvôli svojim vzplanutiam. U trpasličích nov nastávajú tieto vzplanutia približne každých 10–500 dní. Vzplanutia sa opakujú polopravidelne, každá trpasličia nova má svoju vlastnú priemernú frek-



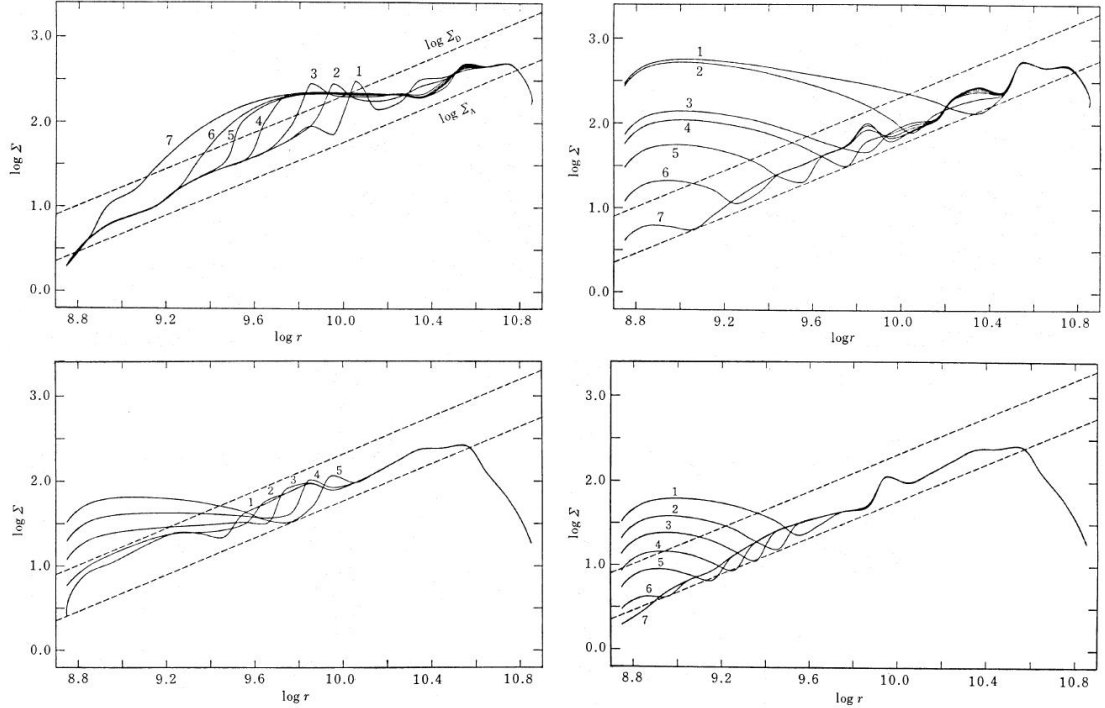
Obrázek 1.7: Vzplanutia trpasličej novy SS Cyg v priebehu 200 dní. Nastávajú približne každých 50 dní. Počas tretieho vzplanutia systém v maxime nejaký čas zotrval, takéto vzplanutia sa nazývajú vzplanutia s plató. Merania pochádzajú od vizuálnych pozorovateľov skupiny AAVSO. Prevzaté z www.aavso.org.

venciu vzplanutí. Na obrázkoch 1.7 a 1 je svetelná krivka jednej z trpasličích nov SS Cyg, u ktorej sa vzplanutia opakujú priemerne každých 50 dní.

Osaki (1974) [29] navrhol, že vzplanutie spôsobuje nestabilita v akrečnom disku. Ak je pretok látky konštantný a jeho hodnota je vyššia ako je disk schopný kvôli nízkej viskozite pretransformovať až k BT, tak sa disk preplní. Toto preplnenie môže spôsobiť nestabilitu disku, ktorá zvýši viskozitu, tým sa prudko zvýši transport uhlového momentu, nadmerný materiál sa začne prenášať k BT a do vonkajších častí disku (kvôli zachovaniu uhlového momentu). Zvýšená akrecia na BT zvýši luminozitu celého systému. Postupne sa ale látka v disku vyčerpá a disk prejde späť do kludného stavu s nízkou viskozitou.

Každý prstenec disku rotuje vlastnou Keplerovskou rýchlosťou (vyplýva z (1.1)). Hmota, ktorá je bližšie k BT obieha rýchlejšie ako hmota, ktorá je ďalej. Vonkajšia vrstva kľže po vnútornej, ale viskozita sa tomu snaží zabrániť tak, aby obe vrstvy korotovali. Vonkajšia vrstva sa zrýchli, vnútorná spomalí a vonkajšia vrstva si tým odnesie časť uhlového momentu. Zvýšenie viskozity teda spôsobuje tok uhlového momentu smerom von. Väčšina hmoty tečie smerom dnu uvoľňujúc gravitačnú energiu a menšina tečie smerom von a odnáša uhlový moment.

V kludnom stave je disk stabilný, chladný, neionizovaný a má nízku opacitu. Ak je pretok hmoty zo sekundárnej zložky väčší ako tok látky cez disk s nízkou viskozitou, tak sa disk postupne naplňuje, postupne sa zvyšuje povrchová hustota Σ a disk sa zahrieva. Keď vodíkový disk dosiahne teplotu ~ 7000 K, začne byť čiastočne ionizovaný. Ďalšie malé zvýšenie teploty spôsobí veľké zvýšenie ioniza-



Obrázek 1.8: Grafy závislosti povrchovej hustoty Σ na polomere v disku počas vzplanutia typu A (horné panely) a B typu (dolné panely). Vývoj povrchovej hustoty Σ pred maximom vzplanutia je na ľavých paneloch a po maxime je na pravých paneloch. Závislosti kritickej Σ_D a minimálnej Σ_A povrchovej hustoty na polomere sú vykreslené prerušovanou čiarou. Ak povrchová hustota v niektorom mieste disku prekročí kritickú hodnotu, disk prejde v tomto mieste do vzplanutia, ktoré sa rozširuje ďalej. Vzplanutie typu A vzniká vo vonkajšom disku a postupne prechádza aj do vnútorného disku. Naopak vzplanutie typu B vzniká vo vnútornom disku a rozširuje sa do vonkajších častí. Oba typy vzplanutí majú po maxime podobný priebeh, ochladzujúca vlna postupuje z vonkajšieho disku smerom do stredu disku. Časový vývoj vzplanutí je označený číslami postupne 1 až 7. Z práce Mineshige & Osaki (1985) [28].

cie. V čiastočne ionizovanom plyne závisí opacita až na desiatej mocnine teploty. Zväčšenie teploty spôsobí obrovské zväčšenie opacity, opacita zachytí teplo a teplota rastie ďalej. Keď sa plyn stane plne ionizovaným opacita sa prestane zvyšovať. Disk sa teraz stane vysoko viskóznym vďaka Balbus-Hawleyho nestabilite (Hawley & Balbus (1998) [20]), ktorá potrebuje aby látka v disku bola nabitá (čo je v plne ionizovanom disku splnené).

Zvýšená viskozita zvýši tok látky v disku (látka pretekajúca zo sekundárnej zložky nestíha dopĺňať hmotu) až kým sa povrchová hustota Σ nezmenší natoľko, že sa teplota disku zmenší tak, že sa látka v ňom stane opäť čiastočne ionizovaná. Ďalšie zmenšovanie opacity spôsobí ochladzovanie disku, spolu s tým ďalšie zmenšovanie ionizácie a viskozity. Časom sa disk dostane znovu do chladného, neionizovaného, nízko-viskózneho stavu.

Nestabilita nevznikne v celom disku naraz, ale najprv v jednom prstenci v disku. Vďaka vysokej viskozite sa potom rozšíri horúca látka do ďalších miest v dis-

ku. Výsledkom je zohrievajúca vlna, ktorá prejde celým diskom a celý disk prejde do vzplanutia.

Vývoj vzplanutia závisí od toho kde bol spustený. Ak dosiahne povrchová hustota Σ hodnotu väčšiu ako kritickú Σ_D na určitom polomere disku, vznikne tam nestabilný stav. Hodnota kritickej povrchovej hustoty Σ_D závisí na polomere v disku. Jej závislosť je zobrazená na obrázku 1.8 v ľavom hornom rohu. Keď povrchová hustota prekročí túto hranicu, tak na tom polomere prechádza disk do vzplanutia.

Ak je hodnota prenosu hmoty z ČT malá, látka sa pomaly viskózne rozširuje dovnútra disku, tam sa akumuluje a povrchová hustota dosiahne kritickú hodnotu na malom polomere. Naopak ak je hodnota prenosu hmoty veľká, látka sa nestihne rozšíriť dovnútra, nahromadí sa ešte vo vonkajšom disku a tam sa spustí nestabilita.

Ak je vzplanutie spustené vo vonkajšom disku, vzniká zohrievajúca vlna smerujúca dovnútra, ktorá postupne zvýši povrchovú hustotu v celom disku, naopak ak je vzplanutie spustené vo vnútornom disku, vzniká zvnútra von zohrievajúca vlna. Oba typy vzplanutí sú zobrazené na obrázku 1.8. Horné dva obrázky zobrazujú vzplanutie typu A so zohrievajúcou vlnou smerujúcou dovnútra a dolné dva B typ s vlnou smerujúcou zvnútra von. Ľavé obrázky zobrazujú začiatok vzplanutia po maximum a pravé od maxima po koniec vzplanutia. Kde sa rozšíri zohrievajúca vlna, tam sa zvýši viskozita, hmota začne prúdiť do vnútorných častí disku a povrchová hustota sa zvýši. Pri oboch typoch vzplanutí je konečný stav podobný, povrchová hustota je väčšia vo vnútornom disku.

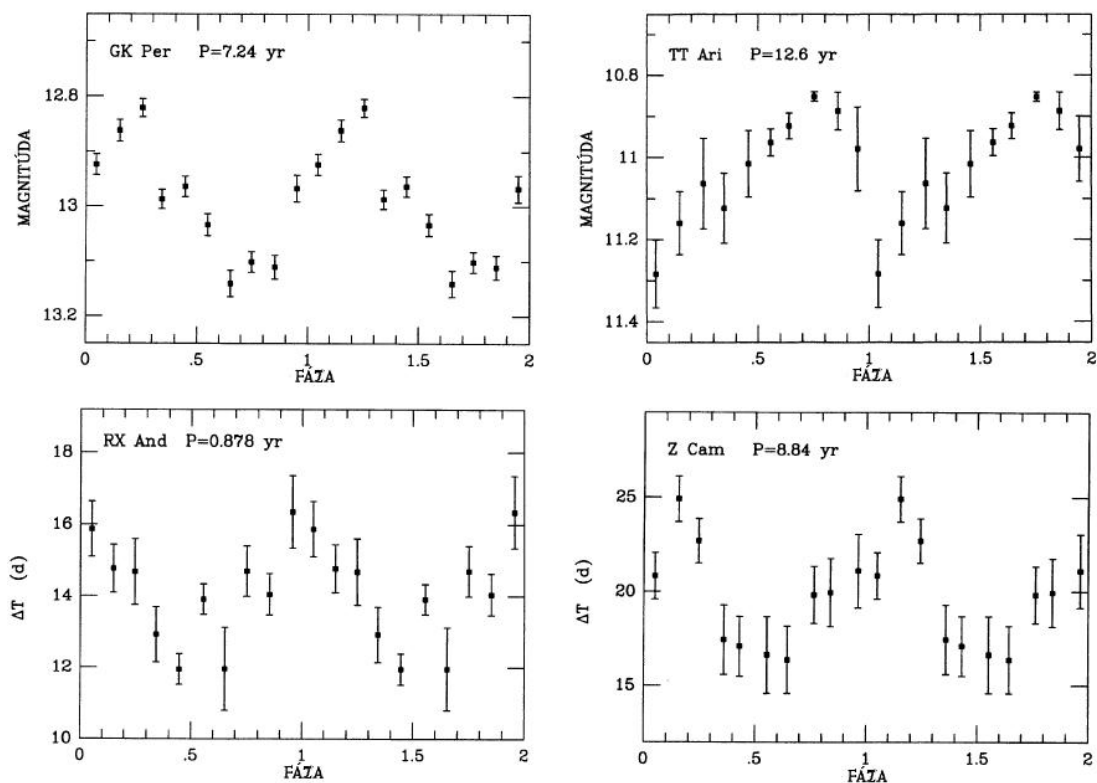
Zvýšená akrecia postupne odvádza hmotu na BT a tým sa znižuje povrchová hustota Σ , ktorá keď dosiahne hodnotu menšiu ako kritickú na určitom polomere v disku, tak tam disk prejde zo vzplanutia do kľudného stavu. Toto pri oboch typoch vzplanutia nastane vo vonkajšom disku a chladnúca vlna smeruje do vnútra disku, ktorý postupne prechádza do kľudného stavu v akom bol pred začiatkom vzplanutia. Počas celého vzplanutia sa naakreje na BT len 10% hmoty disku, zvyšok ostane v disku.

Svetelné krivky vzplanutí u trpasličích nov majú rôzne tvary. Prudký nárast vzplanutia spôsobuje dovnútra smerujúca zohrievajúca vlna, pomalší nárast vzplanutia spôsobuje zvnútra von zohrievajúca vlna. Ochladzujúca vlna má vždy pomalý pokles na svetelnej krivke. V maxime niektorých vzplanutí nastane tzv. plató, nastáva keď celý disk prejde do vzplanutia a zostane v ňom dlhšie, viac hmoty sa naakreje na BT.

Takto popisuje vznik a priebeh vzplanutia u trpasličích nov Hellier (2001) [22].

1.5 Magnetický cyklus

Cyklické zmeny v O-C diagrame sa vyskytujú u mnohých dvojhviezd a môžu mať rôzne príčiny. Jednou z nich je stáčanie priamky apsid (priamka spájajúca pericentrum a apocentrum), ktorá ale u tesných dvojhviezd nepripadá v úvahu, pretože zložky dvojhviezdy okolo sebe obiehajú vždy po kružniciach a nie po eliptických dráhach. Druhou možnou príčinou býva prítomnosť tretieho telesa, ktoré ale vyvoláva presne cyklické zmeny. U mnohých kataklizmatických hviezd ale tieto zmeny nie su presne cyklické. Väčšinou sa za príčinu kvázicyklických

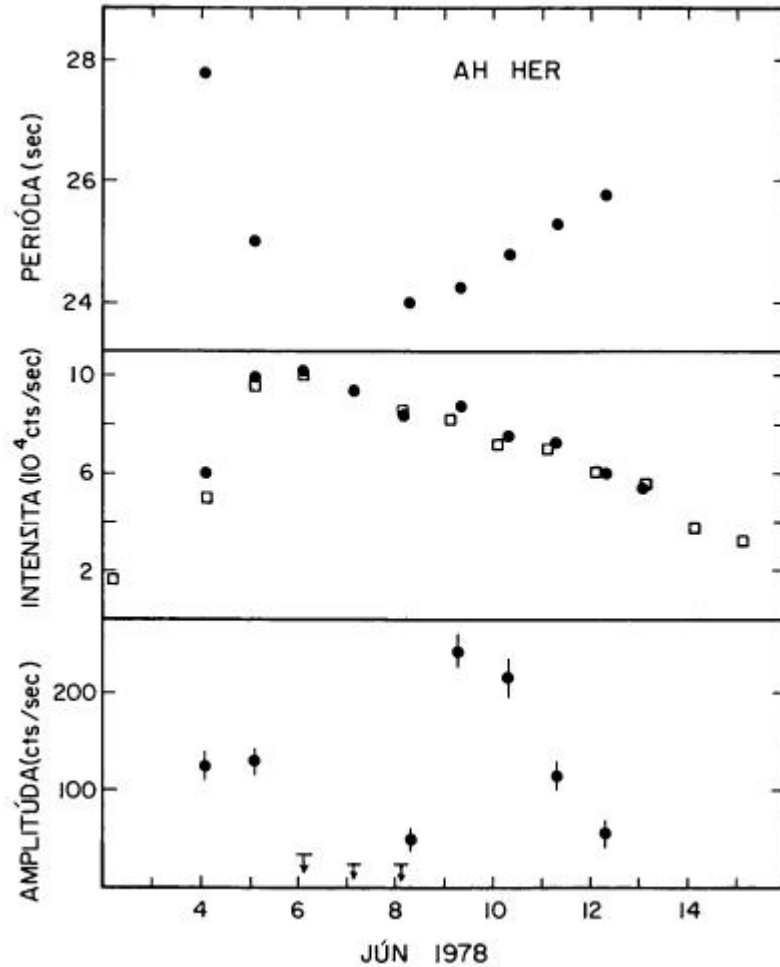


Obrázek 1.9: Horné dva panely zobrazujú priebeh zmien jasností sústavy v kludnom stave a dolné panely priebeh zmien časových intervalov medzi vzplanutiami. U mnohých trpasličích nov majú obe tieto zmeny rovnakú periódu ako kvázicyklické zmeny v O-C diagrame, čo podporuje súvislosť týchto zmien s magnetickým cyklom červeného trpaslíka. Z práce Bianchini (1990) [10].

zmien v O-C diagrame u kataklizmatických hviezd považuje magnetický cyklus sekundárnej zložky.

Sekundárna zložka kataklizmatických premenných hviezd je magneticky aktívna. Podobne ako má naše Slnko svoj 11-ročný magnetický cyklus, tak aj tieto hviezdy majú vlastný magnetický cyklus s periódami $P_{\text{magn}} \sim 5 - 50$ rokov. Takéto cyklické zmeny magnetickej aktivity menia distribúciu uhlového momentu združenú s rotáciou sekundáru a preto sa jeho tvar trochu zmení. Zmena tvaru sekundáru ovplyvní gravitačnú príťažlivosť medzi zložkami. Toto spolu s faktom, že orbitálny uhlový moment musí byť konštantný, zmení trochu orbitálnu periódu. Takto vysvetľuje zmeny orbitálnej periódy u tesných dvojhviezd Applegate (1992) [1]. Cyklická zmena orbitálnej periódy sa prejaví v O-C diagrame rovnako cyklicky.

Spolu s kvázicyklickými zmenami v O-C diagrame sa objavujú aj ďalšie zmeny, ktoré majú rovnakú periódu - zmeny jasnosti počas kludného stavu a zmeny priemerných periód vzplanutí (teda časosť vzplanutí sa mení). Ak ČT viac presahuje Rocheov lalok, pretok hmoty je väčší, akrečný disk obsahuje viac hmoty a viac žiari. Intervaly medzi vzplanutiami tiež nastávajú častejšie, keď je pretok hmoty väčší. Naopak ak je pretok hmoty menší, tak disk menej žiari a intervaly medzi



Obrázek 1.10: Zmeny periódy oscilácií trpasličích nov (DNO) počas 10-dňového vzplanutia hviezdy AH Her v júni 1978. V strednom paneli je zobrazená intenzita celej sústavy počas vzplanutia. Vrchný panel zobrazuje priebeh zmien periódy oscilácií trpasličích nov a spodný panel ich amplitúdu. Z práce Patterson (1981) [32].

vzplanutia sú menšie. Preto tieto zmeny sú ďalším dôkazom magnetického cyklu ČT a jeho vplyvu na orbitálnu periódu. Grafy oboch týchto cyklických zmien sú na obrázku 1.9. V hornej časti obrázku sú zmeny jasností počas kludného stavu a v dolnej časti sú zmeny frekvencií vzplanutí.

Jedno z prvých zhrnutí súvislostí kvázicyklických zmien v O-C diagrame a magnetického cyklu sa nachádza v práci od Warnera (1988) [41].

1.6 Flickering a oscilácie

Pod pojmom *flickering* sa v astronómii myslia neperiodické zmeny jasnosti prevažne krátkych periód, ktoré sú viditeľné priamo na svetelnej krivke. V periódograme sú obvykle viditeľné ako jemné zmeny sily frekvencie rastúce smerom k nízkym frekvenciám. Zo vzhľadu svetelnej krivky trpasličej novy U Gem War-

ner & Nather (1971) [43] usúdili, že flickering pochádza z jasnej škvry. Hviezda U Gem je zákrytová trpasličia nova so sklonom $\sim 70^\circ$, ktorý nie je dostatočný k tomu aby bol počas zákrytu zakrytý BT, ale len vonkajšie časti akrečného disku a jasná škvry. Flickering vymizol zo svetelnej krivky počas takéhoto zákrytu a z toho usúdili, že flickering pochádza z jasnej škvry. Ďalší výskum (Priedhorsky & Krzeminski (1978) [34] a Patterson (1979) [31]) ale ukázal, že na svetelných krivkách mnohých trpasličích nov flickering zmizne až po zakrytí vnútornej časti akrečného disku spolu s BT. Pôvod flickeringu nie je dodnes úplne vyriešený problém.

U trpasličích nov sa vyskytujú ešte *kváziperiodické oscilácie*. Sú to nie prísne periodické oscilácie. Trvajú len niekoľko cyklov a potom sa zmenia na oscilácie s inou blízkou frekvenciou alebo fázou. Kváziperiodické oscilácie majú periódy približne 30 – 300 sekúnd.

Ďalší typ oscilácií sa nazýva *oscilácie trpasličích nov (dwarf-novae oscillation - DNO)*. Tieto oscilácie sú viditeľné iba u trpasličích nov a iba počas vzplanutia. Periódy sa pohybujú v rozmedzí $\sim 7 - 30$ s, amplitúdy sú väčšie ako u kváziperiodických oscilácií a preto sú na svetelných krivkách viditeľnejšie. Oscilácie trpasličích nov sa objavujú na začiatku vzplanutia, postupne sa znižuje ich perióda. Minimum periódy dosiahnu blízko maxima vzplanutia a potom perióda začne rásť až kým nezmiznú na konci vzplanutia. Graf zmeny periódy a amplitúdy DNO počas 10-dňového vzplanutia trpasličej novy AH Her je na obrázku 1.10.

Obe oscilácie sú detailnejšie popísané v práci Patterson (1981) [32].

2. EX Draconis

EX Draconis (HS 1804+6753, GSC 4429-1070) je zákrytová trpasličia nova (podtyp U Gem) s orbitálnou periódou 5.04 h a s jasnosťou v rozmedzí $m_V = (13 \text{ mag} - 17 \text{ mag})$. Jej súradnice na oblohe sú $\alpha_{2000} = 18^h 04^m 15.1^s$, $\delta_{2000} = 67^\circ 54' 07''$. Je cirkumpolárna, čo znamená, že v našich zemepisných šírkach nikdy nezapadá. Najvhodnejšie obdobie na pozorovanie je od marca do októbra, kedy ju môžeme pozorovať prakticky celú noc. Napriek tomu, že je pomerne jasná a je často vo vzplanutí, tak bola objavená neskoro. Hĺbka primárneho zákrytu je počas vzplanutia až 2.5 mag a počas kludného stavu 1.3 mag. Amplitúda vzplanutí EX Draconis je len 1 mag, čo je možno práve dôvod prečo ju identifikovali až tak neskoro. Prvýkrát ju detekovali v Hamburgskej prehliadke kvazarov (*Hamburger Quasar Survey*) v roku 1989 [2]. Barwig a kol. (1993) [8] ju indentifikovali ako zákrytovú trpasličiu novu. Trpasličích nov poznáme veľa, ale len málo z nich sú súčasne aj zákrytové. EX Dra je práve zákrytová trpasličia nova, preto sa stala dosť sledovanou a študovanou.

V tejto kapitole prezentujem merania EX Draconis z observatória v Ondřejove a na Kolonickom sedle a ich spracovanie. Najprv ale popíšem predchádzajúci výskum tejto hviezdy.

Tabulka 2.1: EX Draconis - Základné údaje.

Rektascenzia	$\alpha_{2000} = 18^h 04^m 15.1^s$
Deklinácia	$\delta_{2000} = 67^\circ 54' 07''$
Orbitálna perióda	5.04 h
Jasnosť	$m_V = 13 \text{ mag} - 17 \text{ mag}$
Hmotnosť BT	$0.75 M_\odot$ [15]
Hmotnosť ČT	$0.56 M_\odot$ [15]
Vzdialenosť	$1.6 R_\odot$ [38]
Sklon dráhy	85° [15]

2.1 Prehľad

Fiedler a kol. (1996) [15] spracovali vysoko-rýchlostnú UBVRI fotometriu (s časom expozície len 2 s) z rokov 1991 – 1996 z 2.2-m teleskopu na observatóriu Calar Alto a 0.8-m teleskopu na observatóriu Wendelstein. Publikovali prvý zoznam okamihov minima a prvý O-C diagram. Efemerida minima im vyšla

$$Min = \text{HJD } 2448398.452908 + 0.2099370 \cdot E. \quad (2.1)$$

Stred minima určovali z okamihu odkryvu bieleho trpaslíka, ktorý vypočítali ako čas maxima derivácie vyhladenej svetelnej krivky. Ďalej spracovali spektroskopiu, ukázali spektrá v kludnom stave a vo vzplanutí. Ešte určili hmotnosti a polomery bieleho a červeného trpaslíka a sklon ich dráhy technikami Monte-Carlo.

Baptista, Catalán, Costa (2000) [6] spracovali fotometriu z rokov 1995 – 1996 z 0.9-m teleskopu James Gregory na Univerzitnom observatóriu St. Andrews vo filtroch V a R. Okamihy minima určovali rovnakým spôsobom ako v práci Fiedler

Tabulka 2.2: Prehľad článkov o EX Draconis.

Billington, Marsh, Dhillon	1996	[11]
Fiedler, Barwig, Mantel	1997	[15]
Baptista, Catalán, Costa	2000	[6]
Baptista, Catalán	2000	[4]
Joergens, Mantel, Barwig, Bärnbantner, Fiedler	2000	[24]
Joergens, Spruit, Rutten	2000	[25]
Baptista, Catalán	2001	[5]
Harlaftis, Papadimitriou, Steeghs, Sokoloski, Rutten, Niarchos, Gazeas, Manimanis, Boffin, Zurita	2002	[19]
Shafter, Holland	2003	[38]
Giannakis, Harlaftis, Papadimitriou, Niarchos, Gazeas, Manimanis, Steeghs, Boffin	2005	[16]
Papadimitriou, Harlaftis, Steeghs, Niarchos	2005	[30]
Halevin, Henden	2008	[18]

a kol. (1997) [15]. Do O-C diagramu pridali vlastné okamihy minima, efemerida im vyšla

$$Min = \text{HJD } 2448398.4530 + 0.20993698 \cdot E + 8.2 \times 10^{-4} \sin \left(2\pi \frac{E - 968}{7045} \right) d. \quad (2.2)$$

Z efemeridy a O-C diagramu je vidieť 4-ročná perióda cyklických zmien orbitálnej periódy, ktorú podľa nich môže spôsobovať magnetický cyklus červeného trpaslíka. Podobnou metódou ako v práci od Wooda a kol. (1986) [45] určili hmotnosti a polomery oboch zložiek dvojhviezdy, sklon ich dráhy a polomer akrečného disku. Tieto hodnoty im vyšli veľmi podobné ako v predchádzajúcej práci. Ďalej určili aj vzdialenosť od Zeme.

Nadväzujúc na svoje predchádzajúce práce [6] a [4] Baptista a Catalán (2001) [5] opäť spracovali svoje merania pomocou techniky zákrytových máp vytvorenej Horneom (1985) [23]. Zákrytové mapy ukázali jednoramennú štruktúru disku počas začiatkovej fázy vzplanutia a ako disk expanduje počas vzplanutia až kým skoro celý nezaplní Rocheovu mez. Zákrytové mapy ďalej ukázali prítomnosť zohrievajúcej vlny šíriacej sa zvnútra von počas vzplanutia a zvon dovnútra šíriacej sa ochladzujúcej vlny, ktorá má nižšiu rýchlosť, čo je v súlade s modelom diskovej nestability.

Ďalšie okamihy minim um určili Shafter & Holland (2003) [38] zo meraní vo filtroch B, V, R a I z 1-m teleskopu na observatóriu Mount Laguna z roku 2002 podobným spôsobom ako v predchádzajúcich prácach. Zostavili ďalší O-C diagram a efemeridu

$$Min = \text{HJD } 2448398.4524 + 0.20993718 \cdot E + 1.15 \times 10^{-3} \sin \left(2\pi \frac{E - 391}{8684} \right) d. \quad (2.3)$$

Periódou cyklických zmien im vyšla trochu väčšia a to 5-ročná. Hmotnosti, polomery oboch zložiek a sklon dráhy určili namodelovaním svetelnej krivky. Model sa skladal zo štyroch zložiek žiarenia: biely a červený trpaslík, akrečný disk a jas-

ná škvrna. Vo všetkých troch spomínaných prácach, v ktorých počítali parametre dvojhviezdnej sústavy, autorom vyšli podobné hodnoty tromi rôznymi metódami. Ešte určili aj vzdialenosť EX Draconis od Zeme.

Spektroskopiu z 2.5-m teleskopu Isaac Newton na La Palma (Kanárske ostrovy) z augusta 1994 skúmali Billington a kol. (1996) [11]. Zostavili Dopplerove mapy v H_α čiare. Spektrá z Fieldler a kol. [15] ešte raz detailnejšie analyzovali Joergens a kol. (2000) [24]. Vyhodnotili optické spektrá počas kludného stavu aj počas vzplanutia a vytvorili Dopplerovské mapy vo viacerých emisných čiarách.

Halevin & Henden (2008) [18] si všimli, že okolo roku 2004 EX Draconis zmenila svoje správanie. Od roku 2004 sú vzplanutia menšie a sú častejšie. Do roku 2004 bola amplitúda vzplanutia okolo 2.5 mag a vzplanutia sa opakovali priemerne každých 24 dní, od roku 2004 je amplitúda okolo 1.5 mag a vzplanutia priemerne každých 13 dní.

2.2 Meranie

Merania, ktoré som spracovával boli napozorované na observatóriu AsÚ AVČR v Ondřejove a na Astronomickom observatóriu na Kolonickom sedle. Ďalej som použil niekoľko meraní z databázy AAVSO¹ na určenie okamihov minima a na periódovú analýzu.

Na observatóriu AsÚ AVČR v Ondřejove je EX Dra pozorovaná od septembra 2004 dodnes. Na pozorovania sa používa zrkadlový ďalekohľad typu Cassegrain s priemerom 650 mm a ohniskovou vzdialenosťou 2350 mm. V jeho primárnom ohnisku bola umiestnená do roku 2007 CCD kamera Apogee AP7p² a od roku 2008 G2-3200 Moravské prístroje³. Ako porovnávacia hviezda bola pri všetkých meraniach použitá hviezda GSC 4429-1414 s jasnosťou $R = 13.89$ mag. Na obrázku 2.1 je CCD snímok hviezdneho poľa v okolí EX Draconis.

Na Astronomickom observatóriu na Kolonickom sedle bola EX Dra pozorovaná od júna 2008 do septembra 2009. Tu bola pozorovaná tromi ďalekohľadmi: VNT 1000/9000, Púpava 280/1500 a Hugo 265/1360. Boli používané tri kamery: Meade DSI Pro⁴, SBIG ST8⁵, FLI PL1001E⁶. Porovnávaciu hviezdu bola vždy tá istá a to hviezda GSC 4429-1551 s jasnosťou $V = 14.61$ mag.

CCD snímky boli upravené o tzv. dark frame a flat field. Dark frame je snímok exponovaný so zakrytým objektívom s rovnakým časom ako sú snímané hviezdne polia. Musí sa snímať každú noc. Flat field je snímok rovnomerne osvieteného čipu snímaný pomocou rovnomerne sa stmievajúcej oblohy alebo inej špeciálnej techniky. Stačí snímať niekoľkokrát za rok. Výsledný upravený snímok získame odčítaním dark frame-u od surového snímku a následným vydelením flat field-om (od ktorého bol predtým tiež odčítaný dark frame pre flat field).

Zoznam všetkých napozorovaných nocí z Ondřejova sa nachádza v tabuľke 2.3 a z Kolonického sedla na nachádza v tabuľke 2.4. V stĺpci Pozorovateľ sú uvedení pozorovatelia so skratkami: doc. RNDr. Marek Wolf, CSc. (MW), RNDr. Petr

¹<http://www.aavso.org/data-download>

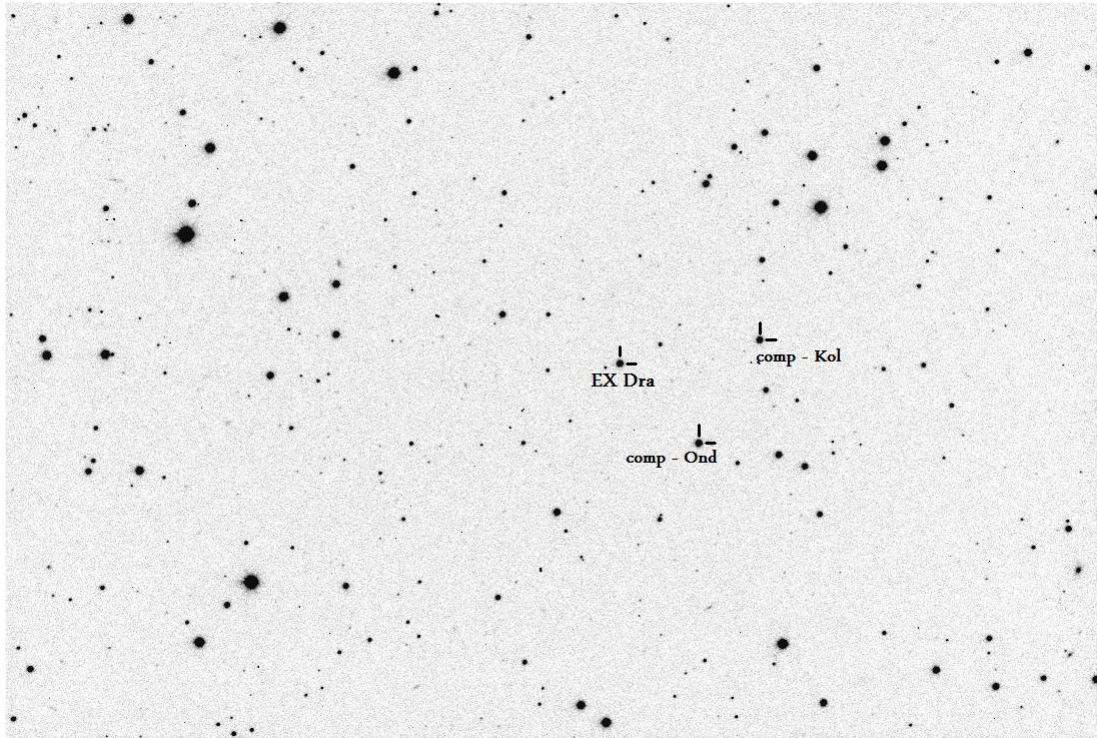
²<http://www.ccd.com/>

³<http://www.mii.cz/>

⁴<http://www.meade.com/>

⁵<http://www.sbig.com/>

⁶<http://www.flicamera.com/>



Obrázek 2.1: CCD snímok okolia EX Draconis. Sever je hore, východ je vpravo, rozmery snímku sú $20' \times 15'$. Okrem samotnej EX Draconis sú vyznačené aj použité porovnávacie hviezdy z Ondřejova a z Kolonického sedla.

Zasche Ph.D. (PZ), Kamil Hornoch (KH), Pavol A. Dubovský (PAD), Radka Dančíková (RD), Bc. Lukáš Pilarčík (LP). V poslednom stĺpci je poznamenané na čo bolo použité meranie z danej noci, na určenie okamihu minima (M) alebo na periódovú analýzu (P).

Na obrázku 2.2 a sú zobrazené všetky svetelné krivky namerané v Ondřejove a na Kolonickom sedle. Krivky sú zoradené pod seba podľa dátumu a nazované podľa orbitálnej periódy.

2.3 Určovanie okamihov minima a O-C diagram

Svetelná krivka počas zákrytu trpasličej novy je zložitejšia ako u oddelených dvojhviezdnych systémoch. Keďže ČT zakrýva nielen bieleho trpaslíka ale aj akrečný disk a jasnú škvrnu (dohromady nesymetrický útvar), tak svetelná krivka zákrytu je nesymetrická. ČT najprv zakryje vonkajšiu časť akrečného disku, postupne BT a nakoniec aj jasnú škvrnu. Spoza ČT najprv začne vychádzať BT, potom jasná škvrna a nakoniec aj zvyšok akrečného disku, ktorý má z nich najväčšiu plochu. Trpasličia nova EX Dra teda nemá symetrické zákryty a nie je jednoduché určiť jej stred zákrytu. Rôzne tvary zákrytových kriviek je vidieť z obrázku 2.2. Na obrázku 2.11 je vidieť ako sa tvar krivky zákrytu vyvíja počas vzplanutia (v ľavom hornom rohu každého grafu je vypísaná fáza vzplanutia), počas maxima vzplanutia je krivka symetrickejšia ako počas kľudného stavu. Je to spôsobené tým, že symetrický disk v maxime vzplanutia prežiari celú sústavu,

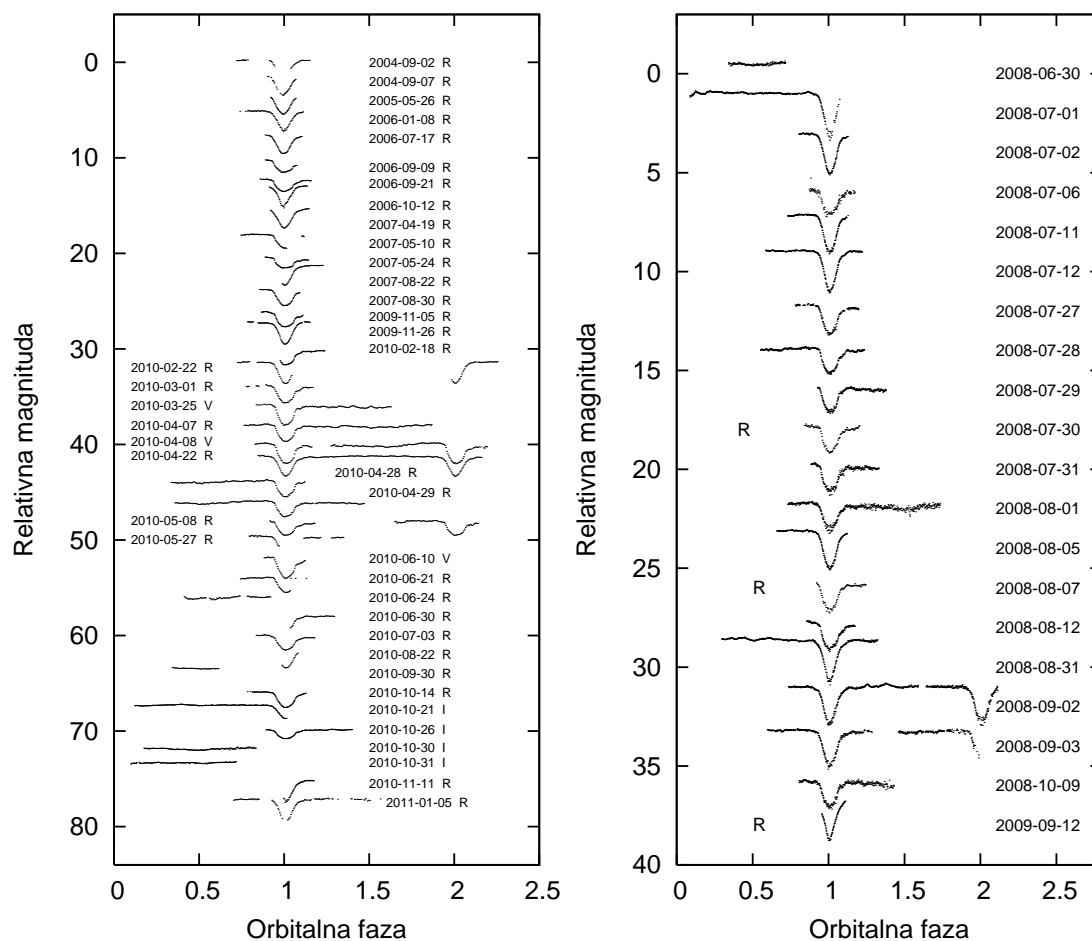
Tabulka 2.3: Prehľad meraní z Ondřejova. Skratky pozorovateľov sú vysvetlené v texte. V poznámke M znamená, že merania danej noci boli použité sa určenie okamihu minima a P znamená, že merania boli použité na periódovú analýzu.

Dátum	Začiatok merania [UT]	Čas expozície [s]	Počet meraní	Filter	Pozorovateľ	Poznámka
2004 Sep 02	19:20	60	43	R	MW	-
2004 Sep 07	21:10	60	31	R	MW	M
2005 May 26	20:07	60	38	R	MW	M
2006 Jan 09	03:53	80	73	R	MW	M,P
2006 Jul 17	23:26	60	53	R	MW	M,P
2006 Sep 09	22:20	60	47	R	MW	M,P
2006 Sep 21	21:22	60	74	R	MW	M,P
2006 Oct 12	21:29	60	57	R	MW	M,P
2007 Apr 19	20:10	60	58	R	MW	M,P
2007 May 11	00:11	60	71	R	MW	P
2007 May 24	21:26	60	65	R	MW	M,P
2007 Aug 22	23:27	60	61	R	MW	P
2007 Aug 30	22:15	60	60	R	MW	M,P
2009 Nov 05	16:34	60	68	R	MW	M,P
2009 Nov 26	16:00	60	92	R	MW	M,P
2010 Feb 18	21:25	60	72	R	MW	M,P
2010 Feb 22	19:53	90	104	R	KH	2M,P
2010 Mar 01	23:27	60	61	R	KH	M,P
2010 Mar 25	22:08	90	144	V	MW	M
2010 Apr 07	22:10	60	210	R	PZ,LP	M,P
2010 Apr 08	18:38	90	235	V	MW	2M
2010 Apr 22	20:19	90	250	R	MW	2M,P
2010 Apr 25	23:54	90	114	R	KH	M,P
2010 Apr 28	23:54	90	150	R	PZ	M,P
2010 Apr 29	21:10	90	210	R	MW	M,P
2010 May 08	19:35	90	145	R	MW	2M,P
2010 May 27	21:28	90	69	R	MW	P
2010 Jun 10	23:30	90	48	V	MW	M
2010 Jun 21	20:48	90	59	R	KH	P
2010 Jun 24	22:43	90	87	R	MW	P
2010 Jun 30	22:55	90	50	R	MW	P
2010 Jul 03	20:28	90	66	R	KH	M,P
2010 Aug 22	20:23	90	19	R	MW	M
2010 Sep 30	18:18	90	54	R	MW	P
2010 Oct 14	17:03	60	93	R	MW	M,P
2010 Oct 21	17:02	60	259	I	MW	
2010 Oct 24	18:00	60	103	I	MW	
2010 Oct 26	16:48	60	147	I	MW	M
2010 Oct 30	17:57	60	191	I	MW	
2010 Oct 31	18:45	60	175	I	MW	
2010 Nov 11	16:15	60	52	R	MW	P
2011 Jan 06	00:56	90	106	R	KH	M,P

Tabulka 2.4: Prehľad meraní z Kolonického sedla. Skratky pozorovateľov sú vysvetlené v texte. V poznámke M znamená, že merania danej noci boli použité sa určenie okamihu minima a P znamená, že merania boli použité na periódovú analýzu.

Dátum	Začiatok merania [UT]	Čas expozície [s]	Počet meraní	Filter	Pozorovateľ	Poznámka
2008 Jun 30	20:35	30	185	V	PAD	
2008 Jul 01	20:30	30	503	V	PAD	M,P
2008 Jul 02	20:16	30	182	V	PAD	M,P
2008 Jul 06	20:20	30	108	V	RD	M,P
2008 Jul 11	20:33	30	210	V	RD	M,P
2008 Jul 12	21:01	30	346	V	RD	M,P
2008 Jul 27	19:44	30	166	V	PAD	M,P
2008 Jul 28	19:46	30	147	V	PAD	M,P
2008 Jul 29	22:51	30	245	V	PAD	M,P
2008 Jul 30	23:37	60	93	R	PAD	M
2008 Jul 31	19:59	30	238	V	PAD	M,P
2008 Aug 01	20:24	30	501	V	PAD	M,P
2008 Aug 05	19:46	30	258	V	PAD	M,P
2008 Aug 07	23:28	60	84	R	PAD	M
2008 Aug 12	19:02	30	168	V	PAD	M,P
2008 Aug 31	18:43	30	541	V	PAD	M,P
2008 Sep 02	18:17	30	715	V	PAD	M,P
2008 Sep 03	18:46	30	550	V	PAD	M,P
2008 Oct 09	17:24	30	309	V	PAD	M,P
2009 Sep 12	18:08	30	90	R	PAD	M

kým počas kludného stavu je slabší ako BT a jasná škvrna, ktoré sú dohromady nesymetrické. Za stred zákrytu sa všeobecne považuje stred medzi vstupom a výstupom BT spoza ČT. Keďže akrečný disk mení svoj polomer počas jednotli-



Obrázek 2.2: Všetky svetelné krivky namerané v Ondřejove (vľavo) a na Kolonic-kom sedle (vpravo). Merania, ktoré nemajú označený filter sú merané vo filteri V. Svetelné krivky sú navzájom nafázované na spoločnú fázu a posunuté o 2 magnitúdy.

vých fáz vzplanutia, tak aj jasná škvrna mení svoju polohu, čiže stred zákrytu trpasličej novy nemôže byť určovaný zákrytom jasnej škvorny. Okamihy minima som určoval dvoma metódami. Obe sú popísané v ďalších podkapitolách. Pre obe metódy som zostavil tabuľku okamihov minima a O-C diagram.

2.3.1 Metóda zrkadlenia

Metóda spočíva v tom, že svetelná krivka spolu so zrkadlovo prevrátenou svetelnou krivkou sa posunú na seba, tak aby sa čo najlepšie prekrývali. Túto metódu využíva program FTmin⁷, ktorý je popísaný v [39]. Program v určenom čase zrkadlovo prevráti krivku, vznikne symetrická krivka. Polovicou takejto krivky preleží polynóm a vypočíta sumu štvorcov odchýlok. Ďalej po malých krokoch mení okamihy minima a hľadá kedy je suma štvorcov najmenšia. Pomocou tohto programu som určil okamihy mínim z nameraných svetelných kriviek z Ondřejova a Kolonického sedla. Okamih minima, epocha a filter, v ktorom bola svetelná

⁷<http://nyx.asu.cas.cz/ft>

Tabulka 2.5: Okamihy miním určené metódou zrkadlenia. O-C hodnoty sú počítane voči efemeride (2.4).

Čas minima HJD	Epocha	Filter	O-C [d]
2453256.40142	3723	R	-0.00122
2453517.35351	4966	R	-0.00132
2453744.71646	6049	R	-0.00057
2453934.49935	6953	R	-0.00109
2453988.45448	7210	R	0.00013
2454000.42036	7267	R	-0.00043
2454021.41359	7367	R	-0.00094
2454210.35785	8267	R	-0.00034
2454245.41815	8434	R	0.00042
2454343.45882	8901	R	0.00032
2454649.54772	10359	V	0.00049
2454650.38786	10363	V	0.00088
2454654.37666	10382	V	0.00087
2454659.41486	10406	V	0.00058
2454660.46479	10411	V	0.00082
2454675.37039	10482	V	0.00086
2454676.42017	10487	V	0.00096
2454677.46982	10492	V	0.00092
2454678.51929	10497	R	0.00070
2454679.35933	10501	V	0.00099
2454680.40891	10506	V	0.00089
2454684.39718	10525	V	0.00035
2454686.49691	10535	R	0.00070
2454691.32599	10558	V	0.00122
2454710.42957	10649	V	0.00050
2454712.31860	10658	V	0.00009
2454712.52856	10659	V	0.00011
2454713.36888	10663	V	0.00068
2454749.26815	10834	V	0.00066
2455087.26634	12444	R	-0.00037
2455141.22079	12701	R	0.00017
2455162.21425	12801	R	-0.00011
2455246.40033	13202	R	0.00108
2455250.38779	13221	R	-0.00028
2455250.59756	13222	R	-0.00044
2455257.52623	13255	R	0.00029
2455281.45925	13369	V	0.00045
2455294.47542	13431	R	0.00050
2455295.31572	13435	V	0.00105
2455295.52552	13436	V	0.00091
2455309.38086	13502	R	0.00039
2455309.59049	13503	R	0.00008
2455312.53008	13517	R	0.00054
2455315.46897	13531	R	0.00031
2455316.51867	13536	R	0.00032
2455325.33662	13578	R	0.00090
2455325.54627	13579	R	0.00062
2455358.50673	13736	V	0.00090
2455381.38958	13845	R	0.00058
2455431.35447	14083	R	0.00037
2455484.25873	14335	R	0.00040
2455496.22484	14392	I	0.00008
2455567.60348	14732	R	0.00000

krivka nameraná sú v tabulke 2.5. O-C hodnoty sú počítané voči efemeride

$$Min = \text{HJD } 2452474.80570 + 0.20993740 \cdot E. \quad (2.4)$$

Chyba určenia okamihu minima pre túto metódu je 8×10^{-4} d.

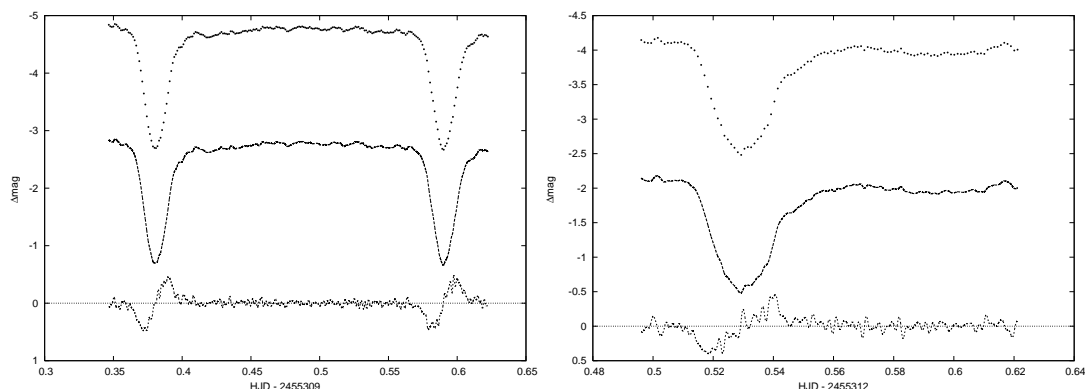
Nevýhodou tejto metódy je, že jednotlivé minimá v rôznych fázach vzplanutia môžu byť voči sebe systematicky posunuté, pretože metóda nezohľadňuje rôzne tvary svetelnej krivky počas vzplanutia. Pri určovaní minima som sa snažil zrkadlovo prevrátené krivky navzájom prekryvať v miestach, kde tvar krivky najviac ovplyvňuje zákryt BT a tým aspoň trochu eliminovať nesymetrickosť zákrytu.

2.3.2 Derivačná metóda

Základom tejto metódy je zderivovanie svetelnej krivky. Najprv sa môže svetelná krivka vyhladiť mediánovým filtrom (program v jazyku Pascal, ktorý som vytvoril na mediánové vyhladzovanie kriviek sa nachádza v prílohe 1). Mediánový filter s určitou hrúbkou vyberie za hodnotu jasnosti v danom čase medián hodnôt

Tabulka 2.6: Prehľad expozičných časov a filtrov meraní v starších prácach.

Autor	Čas expozície [s]	Filter
Fiedler a kol. [15]	2	UBVRI
Baptista a kol. [6]	15-40	VR
Shafter & Holland [38]	25-35	BVRI
Ondřejov	60-90	VRI
Kolonické sedlo	30-60	VR



Obrázek 2.3: Postup určovania okamihu minima derivačnou metódou. Svetelná krivka sa preloží spline funkciou a tá sa zderivuje. Stred minima je určený z okamihu odkryvu bieleho trpaslíka, ktorý je určený z času maxima zderivovanej krivky. Hore je samotná svetelná krivka. Pod ňou je o 2 mag posunutá svetelná krivka preložená spline funkciou a dole je derivácia tejto krivky (kvôli prehľadnosti je vydelená číslom 400 a posunutá o 2 mag nižšie).

v okolí daného času s danou hrúbkou. Výhodou mediánového filtru je, že ostré hrany na krivkách po vyhladení sa zachovávajú, čo je v tomto prípade veľmi dôležité. Potom sa vyhladená svetelná krivka jednoducho zderivuje. Jednotlivé maximá derivácie prislúchajúce vstupu a výstupu BT a jasnej škrvny za ČT sa označia a priemer medzi vstupom a výstupom BT za ČT je okamih minima. Derivačná metóda je podrobnejšie popísaná v práci od Wooda a kol. (1985) [46].

Táto metóda je presnejšia ako predchádzajúca metóda zrkadlenia, pretože určuje okamihy vstupu a výstupu ČT, ktoré sú v každej fáze vzplanutia stále. Samozrejme presnosť tejto metódy závisí na hustote bodov v svetelnej krivke, teda na tom, aká krátka je expozičná doba.

Touto metódou určovali okamihy minima vo svojich prácach Fiedler a kol. [15], Baptista a kol. [6] a Shafter & Holland [38]. V tabuľke 2.6 sú vypísané expozičné časy a filtre, ktoré pri svojich meraniach používali. Na porovnanie sú v tabuľke tieto hodnoty aj z Ondřejova a Kolonického sedla.

Presnosť tejto metódy dosť závisí od expozičnej doby meraní. Z tabuľky 2.6 je vidieť, že v starších prácach sú merania s približne polovičnými expozičnými dobami, dokonca v [15] len 2s expozičným časom. Spôsobené je to hlavne tým, že mali k dispozícii väčšie teleskopy.

Pri určovaní okamihov minima touto metódou som postupoval nasledovne.

Tabulka 2.7: Okamihy miním určené derivačnou metódou. O-C hodnoty sú počítane voči efemeride (2.5).

Čas minima HJD	Epocha	Filter	O-C [d]
2453744.71254	6049	R	-0.00334724
2453934.49556	6953	R	-0.0036816
2453988.45300	7210	R	-0.00013798
2454000.41949	7267	R	-0.00007636
2454210.35518	8267	R	-0.00172736
2454245.41663	8434	R	0.00018686
2454343.45637	8901	R	-0.00080892
2455141.21995	12701	R	0.00087608
2455246.39833	13202	R	0.00064774
2455257.52529	13255	R	0.00092372
2455281.45819	13369	V	0.00097296
2455294.47451	13431	R	0.00117988
2455295.31412	13435	V	0.00104052
2455295.52435	13436	V	0.00133418
2455312.52919	13517	R	0.00124764
2455325.33529	13578	R	0.0011629
2455325.54657	13579	R	0.00250556
2455315.46848	13531	R	0.00141488
2455316.51635	13536	R	-0.00040882
2455358.50520	13736	V	0.00098118
2455378.44805	13831	R	-0.00021912
2455381.38897	13845	R	0.00158012
2455484.25826	14335	R	0.00157352
2455496.22563	14392	I	0.00251414

Zo všetkých meraní som vybral len tie noci, u ktorých merania dosahovali menší rozptyl. Keďže merania z Kolonického sedla majú väčší rozptyl, tak som pre ne nepočítal okamihy miníma touto metódou. Jednotlivé body svetelnej krivky som pospájal kubickou spline funkciou pomocou programu, ktorý som napísal v jazyku Pascal. Kód programu je v prílohe 2. Následne som túto krivku zderivoval pomocou ďalšieho programu, jeho kód je v prílohe 3. Určil som čas miníma zderivovanej krivky. Od tohto času som odpočítal polovicu času celkovej doby zákrytu BT. Tento čas som získal z práce Shafter & Holland [38]. Celková doba zákrytu je $\Delta T = 0.022883 \text{ d} = 32.952 \text{ min}$. Zoznam všetkých okamihov miním určených touto metódou je v tabuľke 2.7. O-C hodnoty sú voči efemeride

$$Min = \text{HJD } 2452474.8049 + 0.20993734 \cdot E \quad (2.5)$$

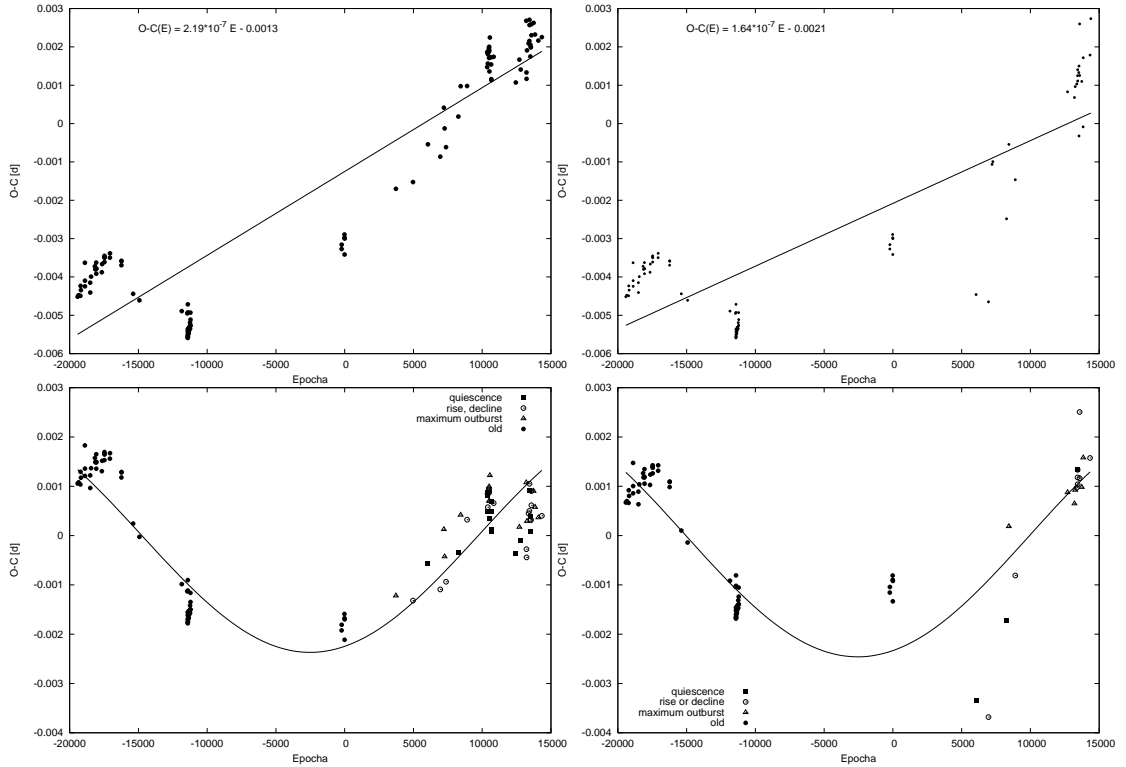
Chyba určenia okamihu miníma pre túto metódu je $1.5 \times 10^{-3} \text{ d}$. Na obrázku 2.3 je vykreslená pôvodná svetelná krivka, pod ňou je krivka s hodnotami pospájanými spline funkciou a pod tým je vykreslená jej derivácia. Jednotlivé krivky sú navzájom posunuté o 2 magnitúdy a kvôli lepšej prehľadnosti grafu je krivka derivácie v y-ovej osi 400 násobne zmenšená.

2.3.3 O-C diagram

$O - C$ (z anglického *observed minus calculated*) hodnota je rozdiel medzi namezaným a predpovedaným okamihom miníma. Graf, ktorý má na x-ovej osi epochu (poradové číslo orbitálneho cyklu) a na y-ovej osi hodnotu $O - C$ sa nazýva O-C diagram. Pomocou O-C diagramu sa dá o dvojhviezde zistiť viacero informácií ako napríklad správnosť určenia orbitálnej periódy, zmena orbitálnej periódy alebo prítomnosť tretieho telesa obiehajúceho okolo dvojhviezdy. U EX Draconis som určoval základnú epochu podľa rovnice

$$Min = \text{HJD } 2452474.807 + 0.20993718 \cdot E. \quad (2.6)$$

Jednotlivé hodnoty $O - C$ sú v tabuľkách 2.5 a 2.7.



Obrázek 2.4: Ľavé $O - C$ diagramy sú vykreslené z okamihov minima určených metódou zrkadlenia a pravé z okamihov minima určených derivačnou metódou. Horné $O - C$ diagramy sú vykreslené voči pôvodnej efemeride (2.6) odvodené z práce Shafter & Holland (2003) [38]. Perióda dolných diagramov je upravená o smernicu priamky určenej v horných diagramoch (smernica je vypísaná v ľavom hornom rohu). Ľavý dolný je vykreslený voči efemeride (2.4) a pravý voči efemeride (2.5). Dolné diagramy sú preložené funkciou sínus. *Quiescence* značí kľudný stav, *rise, decline* značí nárast a pokles do maxima, *maximum outburst* značí maximum vzplanutia a *old* sú označené hodnoty získané zo starších prác.

Ak má dvojhviezda určenú periódu o trochu dlhšiu alebo kratšiu ako skutočnú, v $O-C$ diagrame sa to prejaví tak, že body v diagrame sa budú hromadiť okolo priamky, ktorá nebude rovnobežná s x -ovou osou. Predpokladajme, že perióda P pre ktorú sme zostrojili $O-C$ diagram je o ΔP kratšia ako skutočná perióda $\Delta P + P$. Takže pre danú epochu bude platiť

$$O - C(E) = (T_0 + (P + \Delta P) \cdot E) - (T_0 + P \cdot E) = \Delta P \cdot E, \quad (2.7)$$

kde T_0 je okamih základného minima. ΔP je hodnota smernice priamky. Na spresnenie periódy stačí určiť smernicu priamky v $O-C$ diagrame a pripočítať ju k pôvodnej perióde.

Na obrázku 2.4 sú vykreslené $O-C$ diagramy vľavo pre metódu zrkadlenia a vpravo pre derivačnú metódu. V hornom riadku vykreslený $O-C$ diagram pre pôvodnú efemeridu 2.6 preložený priamkou metódou najmenších štvorcov. Pôvodná efemerida je získaná z Shafter & Holland (2003) [38]. O hodnotu smernice tejto priamky je upravená perióda a následne vykreslený diagram pre novú periódu v dolnom riadku. Tento diagram je preložený vhodnou funkciou $O - C(E) =$

Tabulka 2.8: Okamihy minim určené z databázy AAVSO určené metódou zrkadlenia. $O - C$ hodnoty sú počítané voči efemeride (2.4).

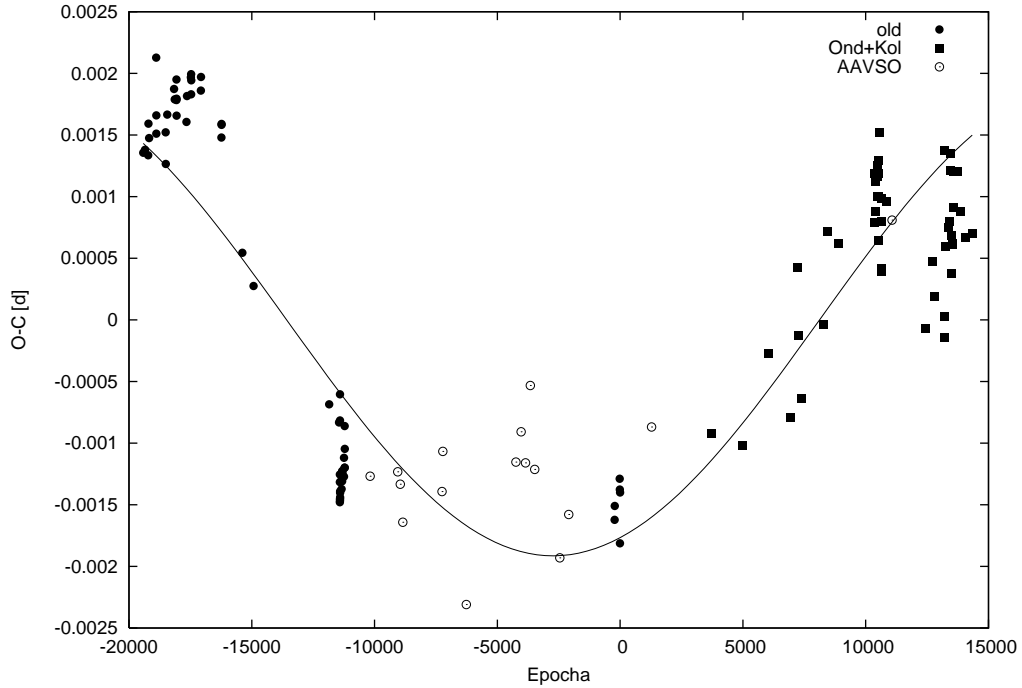
Čas minima HJD	Epocha	Filter	O-C [d]
2450337.64170	-10180	V	-0.001268
2450573.82131	-9055	V	-0.001233
2450595.65470	-8951	V	-0.001333
2450617.48788	-8847	V	-0.001642
2450951.70847	-7255	V	-0.001393
2450958.63673	-7222	V	-0.001067
2451159.54558	-6265	V	-0.002309
2451583.83022	-4244	V	-0.001154
2451628.75707	-4030	V	-0.000908
2451665.70580	-3854	V	-0.001160
2451706.64422	-3659	V	-0.000533
2451744.64221	-3478	V	-0.001213
2451958.77764	-2458	V	-0.001931
2452035.61508	-2092	V	-0.001579
2452743.73464	1281	V	-0.000869
2454799.44334	11073	V	0.000810

$A \cdot \sin(B \cdot E + C)$, kde A je amplitúda, B je kruhová frekvencia a C je fázový posun, pomocou metódy najmenších štvorcov. Sínusovú funkciu som zvolil preto, že u ČT v trpasličích novách sa často vyskytuje magnetický cyklus slnečného typu, čo spôsobuje práve zmeny cyklického charakteru, viac je o tom v podkapitole 1.5. Aj v ostatných starších prácach o trpasličích novách autori hľadajú prioritne sínusovú funkciu. V dolných diagramoch sú rozlíšené jednotlivé $O - C$ hodnoty z Ondřejova a Kolonického sedla podľa toho v ktorej časti vzplanutia boli namerané. *Quiescence* značí kľudný stav, *rise* a *decline* značí začiatok a koniec vzplanutia a *maximum outburst* značí maximum vzplanutia a ako *old* sú označené body prebrané zo starších prác [15], [6] a [38].

Z obrázku 2.4 je u oboch metódach vidieť, že $O - C$ hodnoty určené z okamihov minim prevzatých zo starších prác majú menší rozptyl ako $O - C$ hodnoty určené z minim z Ondřejova alebo z Kolonického sedla. Je to spôsobené kratším expozičným časom a teda väčším pokrytím svetelnej krivky a preto vyššou presnosťou určenia okamihu minima. Ďalej je z dolných grafov vidieť systematická chyba určenia okamihu minima, podľa toho v ktorej časti vzplanutia boli jednotlivé zákryty namerané. $O - C$ hodnoty minim nameraných v okolí maxima vzplanutia sú posunuté hore oproti minimám nameraných v kľudovom stave. To znamená, že okamihy minim v maxime vzplanutia sú systematicky určené neskôr oproti okamihom minim v kľudovom stave.

Ako presnejšiu metódu na určenie okamihov minima pre merania z Ondřejova a Kolonického sedla považujem metódu zrkadlenia napriek tomu, že v starších prácach [15], [6] a [38] používali pri vyhodnocovaní svojich meraní derivačnú metódu. Hlavný dôvod je ten, že expozičný čas je niekoľkokrát väčší ako v starších prácach a pri takýchto expozičných časoch je presnosť derivačnej metódy menšia ako metódy zrkadlenia. Je to vidieť aj na O-C diagramoch 2.4, kde diagramy vľavo spracovaná metódou zrkadlenia majú menší rozptyl. Takisto aj mnou určené chyby okamihov minima sú pre zrkadlacu metódu polovičné oproti derivačnej.

Z databázy AAVSO som vybral niekoľko meraní zákrytov EX Draconis, ktoré majú pokryté minimum minimálne 15 bodmi na svetelnej krivke a pridal ich do záverečného O-C diagramu. Autori týchto meraní sú Ronald Zissel z USA a Jani Virtanen z Fínska. Okamihy minima som určoval len metódou zrkadlenia, pre derivačnú metódu sú prakticky nepoužiteľné, kvôli dlhej expozičnej dobe a malom pokrytí svetelnej krivky. Spolu s epochou, filtrom a $O - C$ hodnotou



Obrázek 2.5: O-C diagram preložený funkciou sínus, ktorého bola určená efemerida (2.8). *Old* sú označené body určené z okamihov minima zo starších prác, *Ond+Kol* sú určené z okamihov minima z Ondřejova a Kolonického sedla, *AAVSO* z databázy AAVSO.

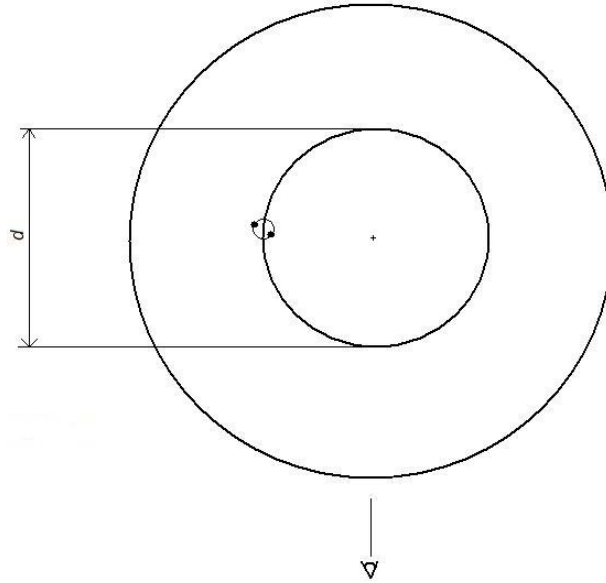
sú vypísané v tabuľke 2.8. Chyba určenia okamihu minima pre tieto merania je 1×10^{-3} d.

Záverečný O-C diagram s preloženou funkciou sínus je na obrázku 2.5. Konečná efemerida okamihov stredu zákrytu je daná rovnicou (2.8). Uvedené chyby sú smerodatné odchýlky určené programom Gnuplot⁸.

$$\begin{aligned} Min &= \text{HJD } 2452474.80570(\pm 12) + 0.20993740(\pm 1) \cdot E + \\ &+ 0.00191(\pm 12) \cdot \sin(0.000144(\pm 32) \cdot E - 7010(\pm 10)) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Periódca cyklických zmien orbitálnej periódy ako je vidieť z O-C diagramu 2.5 a z efemeridy (2.8) je $P_{\text{mod}} = 9160 \text{ d} \sim 25 \text{ yr}$. Tento výsledok je hlavný rozdiel oproti starším prácam od Baptistu a kol. [6] a Shafter & Holland [38]. V prvej z nich určili periódu týchto zmien 4 roky a v druhej 5 rokov. Takže sa ukázalo, že bolo potrebné túto hviezdu sledovať dlhšiu dobu na to, aby mohlo byť správne rozpoznané správne správanie dvojhviezdného systému. Samozrejme ani novo zistená 25-ročná perióda nemusí byť správna. EX Draconis bude treba sledovať ešte dlhšiu dobu na potvrdenie a spresnenie tejto periódy. Cyklické zmeny v O-C diagrame môžu byť spôsobené napríklad magnetickým cyklom alebo prítomnosťou tretieho telesa. K prvej príčine sa prikláňali práve v posledných dvoch uvádzaných prácach. Možnej prítomnosti tretieho telesa sa budem venovať v podkapitole 2.4.

⁸<http://www.gnuplot.info/>



Obrázek 2.6: Princíp vzniku LITE. Svetlo k pozorovateľovi letí rôznu dobu kvôli tomu, že tretie teleso gravitačne vychýľuje ťažisko dvojhviezdy z pohľadu pozorovateľa. Preto okamihy zákrytu nenastávajú z pohľadu pozorovateľa v rovnakých intervaloch, hoci v sústave spojenej s dvojhviezdou nastávajú v rovnakých intervaloch. Amplitúda LITE je $A = d/2c$, kde c je rýchlosť svetla.

2.4 Možná prítomnosť tretieho telesa

Obvykle má zákrytová dvojhviezda stálu periódu a stredy minima nastávajú v stálych intervaloch. Pokiaľ okolo takejto dvojhviezdy obieha ďalšie teleso, tak svojím pohybom okolo dvojhviezdy posúva jej ťažisko (ťažisko dvojhviezdy obieha okolo ťažiska celej hviezdnej sústavy). Z pohľadu zo Zeme je ťažisko dvojhviezdy niekedy ďalej a inokedy bližšie a svetlo k nám dochádza dlhšie a inokedy naopak kratšie, takže stredy minima nastávajú skôr alebo neskôr v sústave pozorovateľa napriek tomu, že v skutočnosti okamihy minima nastávajú v stálych intervaloch. V astronomickej literatúre sa tento efekt označuje ako *Light-Time Effect* alebo skrátene LITE. Na obrázku 2.6 je nakreslené ako LITE vzniká.

V O-C diagrame sa to prejaví cyklickými zmenami $O - C$ hodnôt podobnými funkcii sínus s periódou rovnakou ako je perióda obehu tretieho telesa okolo dvojhviezdy. Teoretická krivka v O-C diagrame sa dá popísať funkciou (Mayer (1990) [27])

$$O - C(\nu) = \frac{A}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}} \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \nu} \sin(\nu + \omega) + e \sin \omega \right], \quad (2.9)$$

kde A je amplitúda cyklických zmien, e je excentricita tretieho telesa, ω je dĺžka periastra a ν je pravá anomália. Vzťah medzi pravou a excentrickou anomáliou E je

$$\tan \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1 + e}{1 - e}} \tan \frac{E}{2}. \quad (2.10)$$

Tabulka 2.9: Zvolené počiatkové rozsahy parametrov dráhy tretieho telesa.

Parameter		dolná hranica	horná hranica
T_0	[HJD]	2452472.802	2452472.805
P	[d]	0.20993695	0.20993745
e	-	0.01	0.99
T_3	[HJD]	2452470	2462700
P_3	[yr]	13	28
ω	[deg]	0	360
A	[d]	0.001	0.0022

Vzťah medzi excentrickou anomáliou a strednou anomáliou M vyjadruje Keplerova rovnica

$$E - e \sin E = M, \quad (2.11)$$

ktorú môžeme riešiť iteračnou metódou, pokiaľ nedosiahneme požadovanú presnosť $p > |E_n - E_{n-1}|$ (v mojich výpočtoch $p = 0.1^\circ$)

$$\begin{aligned} M &= E_1 \\ E_n &= M + e \sin E_{n-1}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Strednú anomáliu určíme pomocou periódy tretieho telesa P_3 , okamihu priechodu periastra T_3 a okamihu minima $JD_{\min, \text{teor}}$ v Juliánskom dátume

$$M = \frac{2\pi}{P_3}(JD_{\min, \text{teor}} - T_3). \quad (2.13)$$

Spolu s periódou obehu dvojhviezdy P a okamihom základného minima T_0 dostávame sedem parametrov $[T_0, P, P_3, T_3, A, e, \omega]$, ktoré môžeme určiť z okamihov miním pomocou O-C diagramu.

Na určenie týchto parametrov som vytvoril program v prostredí Octave ⁹, ktorý je príloha 4. Do programu sa zadajú hraničné hodnoty jednotlivých parametrov a krok, potom program pre každú kombináciu parametrov vypočíta sumu štvorcov odchýlok medzi teoretickým okamihom minima $JD_{\min, \text{teor}}$ a nameraným okamihom minima $JD_{\min, \text{obs}}$. Program nakoniec vypíše parametre, ktoré majú túto sumu najmenšiu.

Na začiatku som určil počiatkový rozsah parametrov, ktoré sú podľa predchádzajúcich výpočtov a podľa O-C diagramu 2.5 reálne. Tieto rozsahy sa nachádzajú v tabuľke 2.9. Okamihom minima z Ondřejova, Kolonického sedla a zo starších prác som dal rovnakú váhu a minimá určené z databázy AAVSO som do výpočtov nepoužil kvôli ich väčšej chybe. Po 14 iteráciách (trvajúcich niekoľko hodín) programu postupným znižovaním hraničných hodnôt jednotlivých parametrov a fixovaním niektorých parametrov pri niektorých iteráciách (najčastejšie som fixoval parametre T_0 a P , inokedy zase ω a T_3 spolu alebo A , P_3 a e spolu) som došiel ku konečnej sade parametrov, ktoré sú vypísané v tabuľke 2.10. Chyby sú určené z rozdielu hodnôt parametrov poslednej iterácie a niekoľkých predchádzajúcich iterácií.

⁹<http://www.gnu.org/software/octave/>

Tabulka 2.10: Určené parametre dráhy tretieho telesa a minimálna hmotnosť tretieho telesa.

Parameter		Hodnota
T_0	[HJD]	2452472.8025(5)
P	[d]	0.20993738(1)
e	-	0.66(2)
T_3	[HJD]	2455280(30)
P_3	[yr]	17.15(2)
ω	[deg]	130(5)
A	[d]	0.00167(1)
$f(m_3)$	$[M_\odot]$	0.0001107(12)
$M_{3,\min}$	$[M_{\text{Jup}}]$	53.51

Tabulka 2.11: Sumy štvorcov odchýlok pre funkciu sínus a LITE tretieho telesa.

	$\sum [JD_{\min,\text{teor}} - JD_{\min,\text{obs}}]^2$
funkcia sínus	5.836×10^{-5}
tretie teleso	1.355×10^{-5}

Hmotnostná funkcia je definovaná

$$f(m_3) = \frac{(M_3 \sin i)^3}{(M_1 + M_2 + M_3)^2}. \quad (2.14)$$

Podľa práce Mayera (1990) [27] je vzťah pre hmotnostnú funkciu

$$f(m_3) = \frac{1}{P_3} \left[\frac{173.15A}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}} \right]^3, \quad (2.15)$$

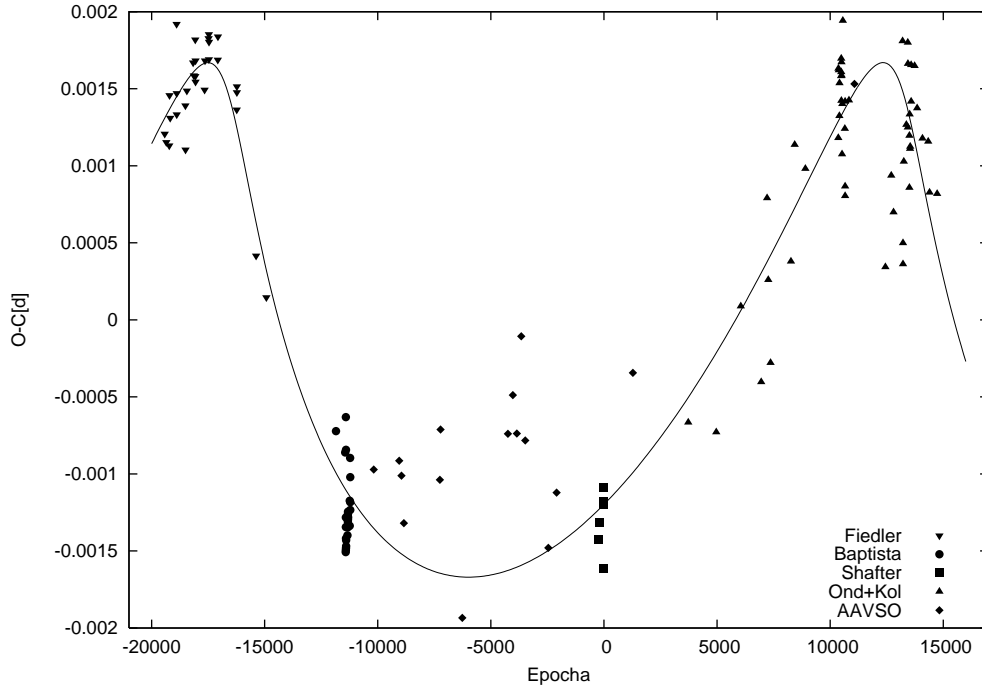
kde obežná doba tretieho telesa P_3 je v rokoch a amplitúda A je v dňoch. Ak rovnice (2.14) a (2.15) dáme do rovnosti, môžeme určiť hmotnosť tretieho telesa, za predpokladu, že dráhy všetkých troch telies sú v jednej rovine. Ak by bol sklon dráhy menší, hmotnosť tretieho telesa by bola väčšia. Takže môžeme určiť len dolnú hmotnostnú hranicu. Hodnoty hmotnostnej funkcie $f(m_3)$ a minimálnej hmotnosti telesa $M_{3,\min}$ sú v tabuľke 2.10. Tretie teleso so svojou minimálnou odhadnutou hmotnosťou $M_{3,\min} = 53.5 M_{\text{Jup}}$ je hnedý trpaslík.

Na obrázku 2.7 je O-C diagram s teoretickou krivkou pre tretie teleso s určenými parametrami a jednotlivé namerané $O - C$ hodnoty, ktoré sú zobrazené rôznymi symbolmi pre merania získané z rôznych zdrojov.

V tabuľke 2.11 sú pre vypísané sumy štvorcov odchýlok teoretických kriviek od nameraných hodnôt pre funkciu sínus z obrázku 2.5 a pre tretie teleso z obrázku 2.7. Pre tretie teleso vyšla suma štvorcov odchýlok 5x menšia, čiže O-C diagram lepšie popisuje prípad tretieho telesa ako funkcia sínus.

2.5 Perióda vzplanutia

U trpasličích nov nie sú intervaly medzi vzplanutiami stále. Každá trpasličia nova má svoju priemernú periódu okolo ktorej nastávajú vzplanutia. Čím väčší je



Obrázek 2.7: O-C diagram pre tretie teleso. Teoretická krivka je vypočítaná z rovnice (2.9). Body určené z okamihov miním v práci Fiedler a kol. (1997) [15] sú označené ako *Fiedler*, z práce Baptista a kol (2000) [6] sú označené ako *Baptista*, z práce Shafter & Holland (2003) [38] sú označené ako *Shafter*, body určené z meraní v Ondřejove a na Kolonickom sedle ako *Ond+Kol* a z meraní z databázy AAVSO ako *AAVSO*.

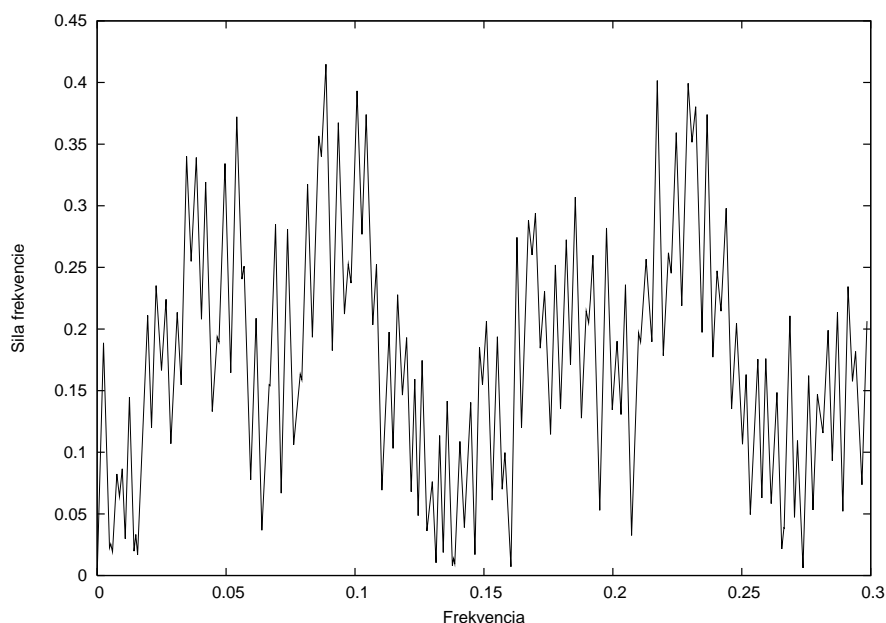
pretok hmoty z ČT na BT, tým častejšie nastávajú vzplanutia. Veľkosť pretoku hmoty sa mení v priebehu magnetického cyklu ČT a tým sa mení aj priemerná perióda outburstu. Rovnako ako magnetický cyklus aj zmena periódy vzplanutia by mala byť cyklická s rovnakou periódou ako perióda magnetického cyklu. Viac o tom je napísané v podkapitole 1.5. Z podkapitoly 2.3.3 vyplýva, že perióda magnetického cyklu je 25 rokov, teda aj priemerná perióda vzplanutia by sa mala meniť s touto periódou. Na potvrdenie týchto zmien u EX Draconis je potrebné mať dlhšiu sériu pozorovaní. Ja som vyhodnotil merania z Ondřejova a Kolonického sedla, ktoré pokrývajú len 7 rokov z 25-ročného cyklu.

Halevin & Henden [18] poukázali na náhlu zmenu priemernej periódy u EX Draconis v roku 2004 z 23.9 d na 12.7 d. Keďže všetky merania, ktoré vyhodnocujem boli namerané po roku 2004, tak som mohol počítať priemernú periódu až po tejto náhlej zmene.

Na určenie periódy som používal program Period04 [26]. Program je určený na štatistické spracovanie dlhých pozorovacích sérií. Najprv pomocou Fourierovej analýzy, ktorá je založená na algoritme diskkrétnej Fourierovej transformácii, určí jednotlivé frekvencie a potom tieto frekvencie ešte nafiťuje na namerané hodnoty podľa vzťahu

$$m(t) = Z + \sum_i A_i \sin(2\pi(\Omega_i t + \Phi_i)), \quad (2.16)$$

kde m je nameraná jasnosť čase t , Z je nulový bod, A_i je semiampplitúda zmien danej i -tej frekvencie, Ω_i je i -tá frekvencia a Φ_i fázový posun i -tej frekvencie, me-



Obrázek 2.8: Príklad výsledku Fourierovej analýzy pre obdobie 2009 – 2011.

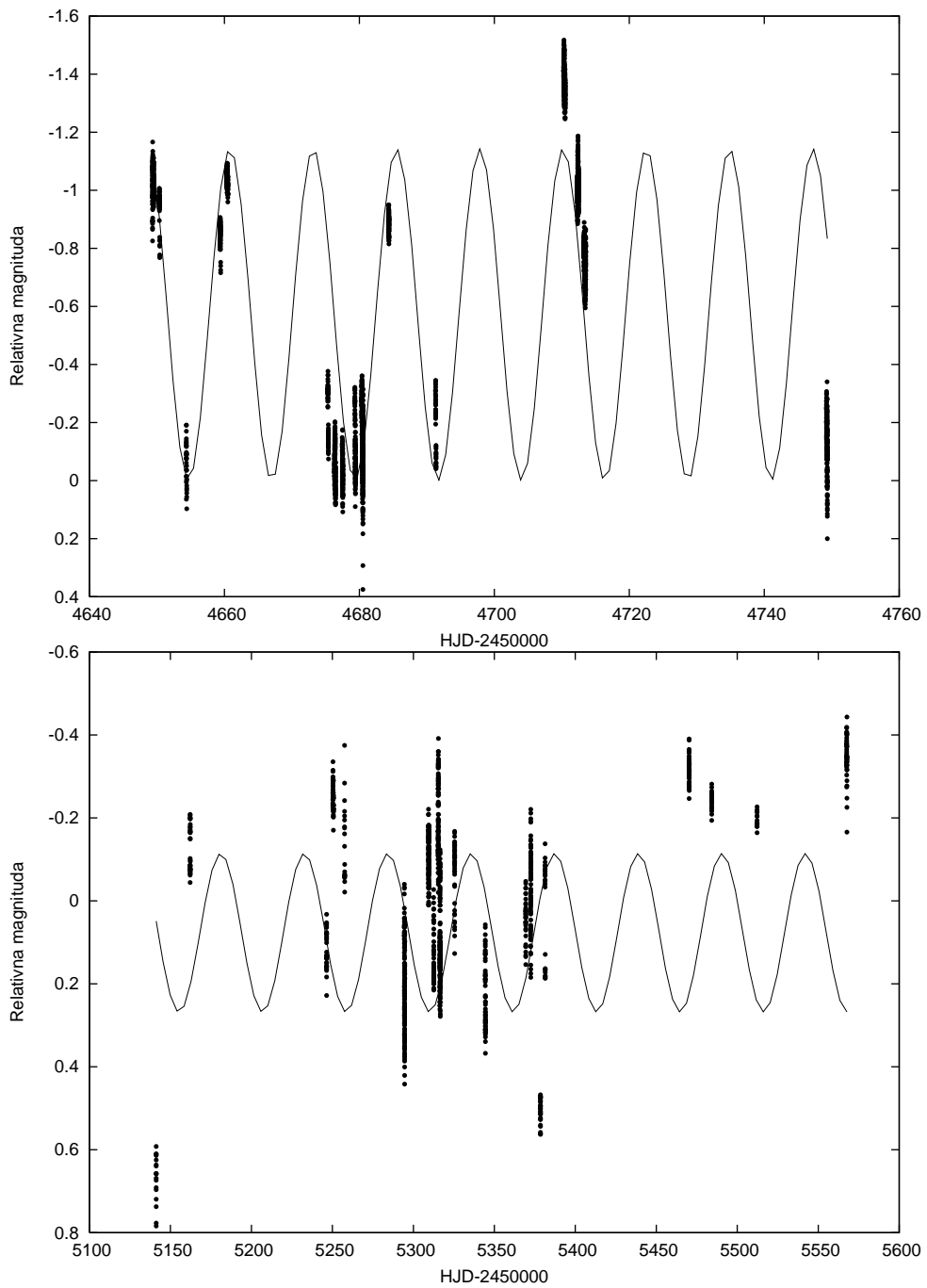
Tabulka 2.12: Periódny vzplanutí a možné druhé periódny počas jednotlivých pozorovacích období určené programom Period04.

Obdobie	Frek. 1 [Hz]	Per. 1 [d]	Ampl. 1 [mag]	Frek. 2 [Hz]	Per. 2 [d]	Ampl. 2 [mag]
2006 - 2007	0.0731(4)	13.68(7)	1.15(4)	0.0331(1)	30.21(9)	0.41(3)
2008	0.0810(7)	12.3(1)	1.14(1)	0.0111(3)	90(2)	0.974(4)
2009 - 2011	0.0885(5)	11.30(6)	0.782(2)	0.0194(5)	52(1)	0.40(1)

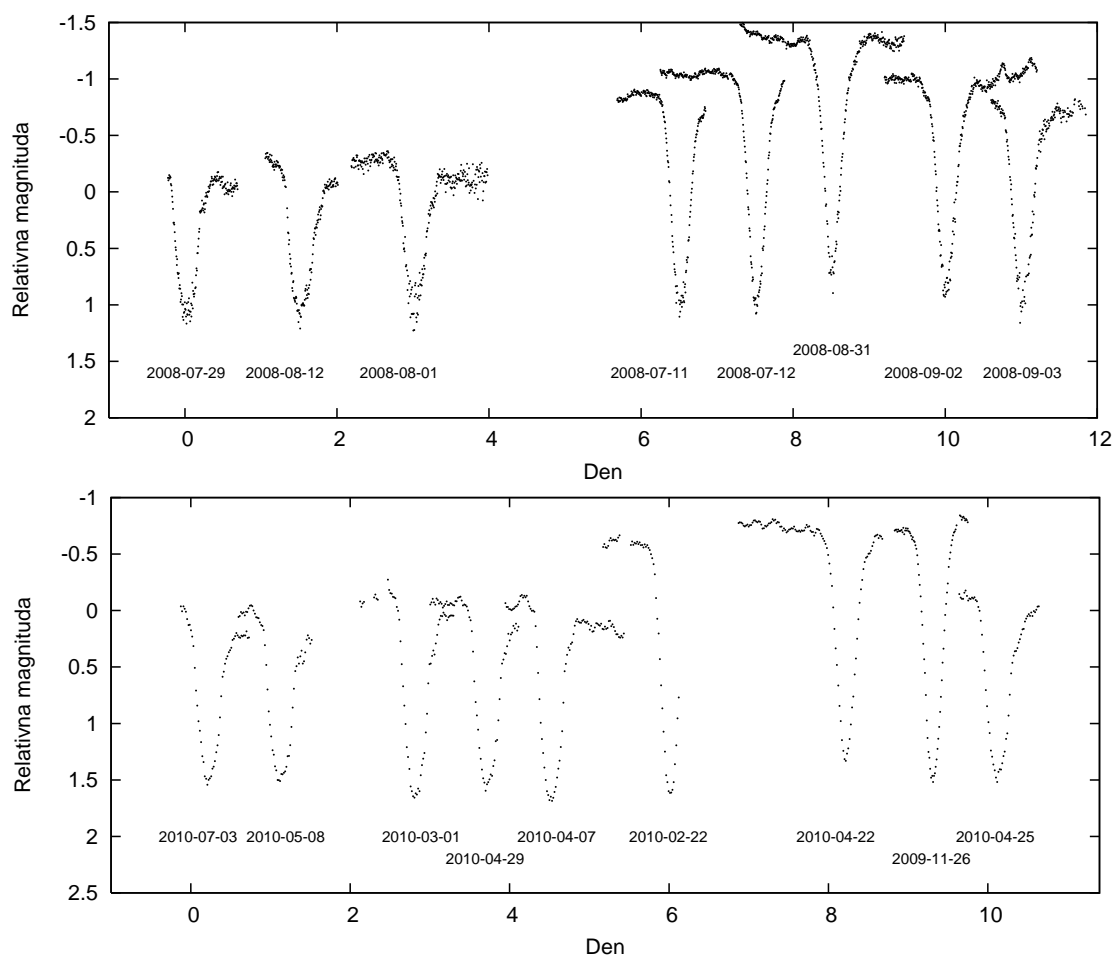
tódou najmenších štvorcov. Na určenie priemernej frekvencie som použil merania mimo zákryt. Z nocí, počas ktorých bol nameraný aj zákryt som zo svetelnej krivky orezal časť krivky počas zákrytu a ponechal len mimozákrytovú časť. Ondřejovské merania som rozdelil do dvoch období: roky 2006 – 2007 a roky 2009 – 2011. Obe obdobia som samostatne vyhodnotil a určil jednotlivé periódny. Na Kolonickom sedle bola EX Draconis meraná počas troch mesiacov v roku 2008, toto krátke obdobie som vyhodnotil samostatne. Periódny, ktoré vyšli pre jednotlivé obdobia sú v tabuľke 2.12. Príklad periodogramu z programu Period04 je na obrázku 2.8. Príklad svetelnej krivky orezanej o minimá a preloženej určenou periódou z obdobia 2009 – 2011 je na obrázku 2.9.

Pomocou programu Period04 som hľadal aj ďalšie frekvencie. Period04 samozrejme našiel aj ďalšie frekvencie, ktoré sa ale v jednotlivých obdobiach nezhadovali. Body svetelnej krivky po odčítaní prvej periódny druhá periódna moc nevystihovala, viď obrázok 2.9. Týmto som došiel k záveru, že žiadna ďalšia periódna neexistuje, čo je v súlade s teóriou vzplanutí u trpasličích nov.

Keď poznáme periódnu, môžeme vykresliť fázovú krivku vzplanutia. Určil som efemeridu maxima vzplanutia pre dve lepšie pokryté obdobia 2008 a 2009 – 2011 a podľa nej som vykreslil fázový diagram vzplanutia. Efemeridy maxima sú po-



Obrázek 2.9: Hore: Svetelné krivky orezané o zákrytovú časť krivky v období 2008, nimi je preložená funkcia sínus s periódou 1 a amplitúdou 1, ktorá je pre toto obdobie v tabuľke 2.12. Dole: Svetelná krivka po odčítaní funkcie sínus prvej periódy pre obdobie 2009 – 2011. Bodmi je preložená ďalšia funkcia sínus s periódou 2 a amplitúdou 2, ktorá je pre toto obdobie tiež v tabuľke 2.12.



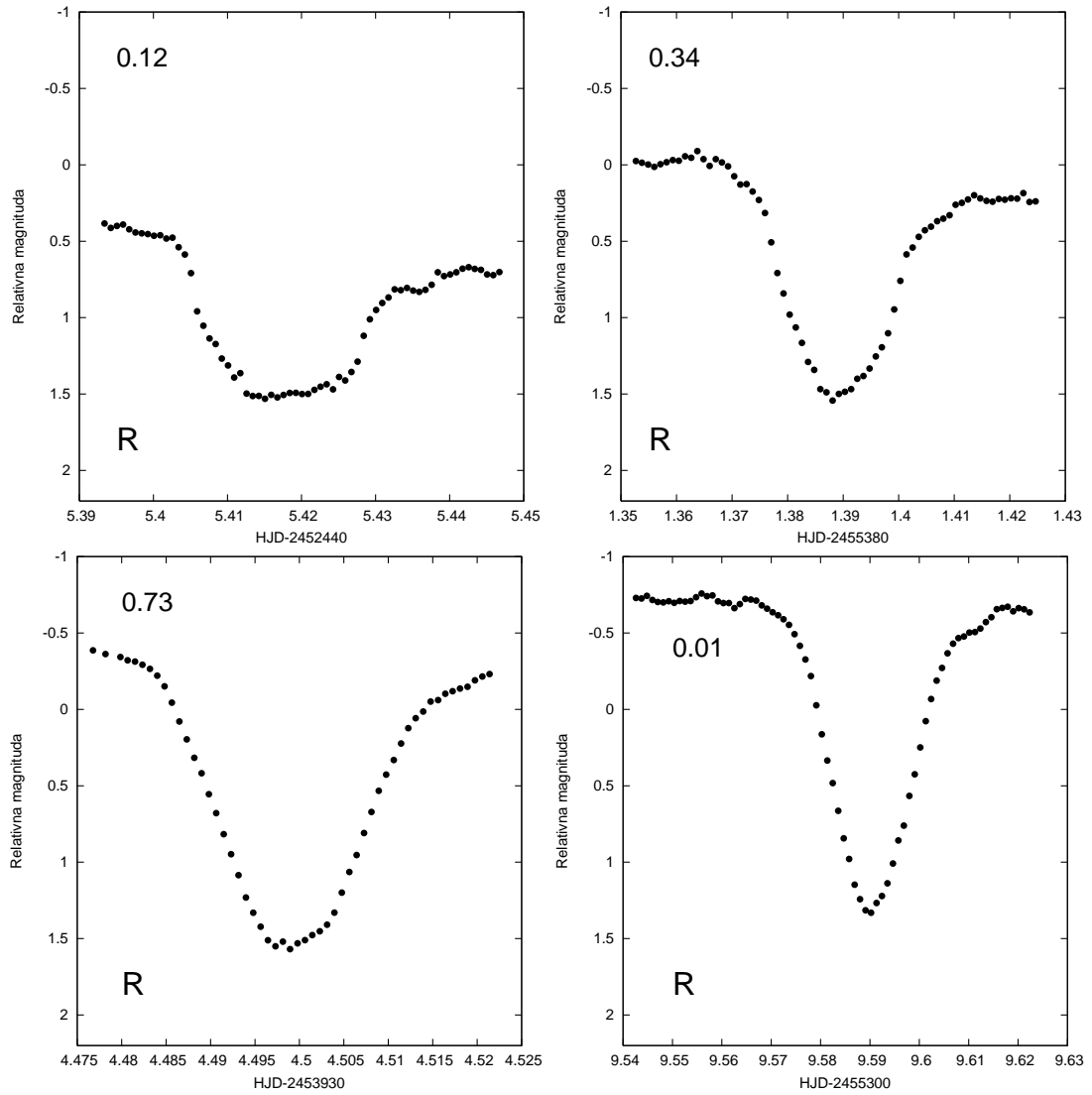
Obrázek 2.10: Fázová krivka vzplanutia pre obdobia 2008 (hore) a 2009 – 2011 (dole). Namiesto fázy je na x-ovej osi čas v dňoch, aby bolo názornejšie vidieť ako sa tvar minima mení v priebehu niekoľkých dní. Každá krivka je v časovej osi zväčšená trojnásobne, aby bol vidieť lepšie tvar minima. Počas vzplanutia sú minima hlbšie a v maxime vzplanutia najhlbšie. V maxime vzplanutia sú krivky zákrytu symetrickejšie ako v kludnom stave, pretože akrečný disk žiari rovnomernejšie na celej ploche ako v kludnom stave, keď tvar krivku viac ovplyvňuje biely trpaslík a jasná škrvna, ktoré spolu vytvárajú nesymetrický útvar, ako málo žiariaci disk. Kedy zakryje červený trpaslík jednotlivé zložky trpasličej novy a kedy sa odokryjú, je popísané na obrázku 1.4.

písané vzťahmi (2.17) pre obdobie 2008 a (2.18) pre obdobie 2009 – 2011.

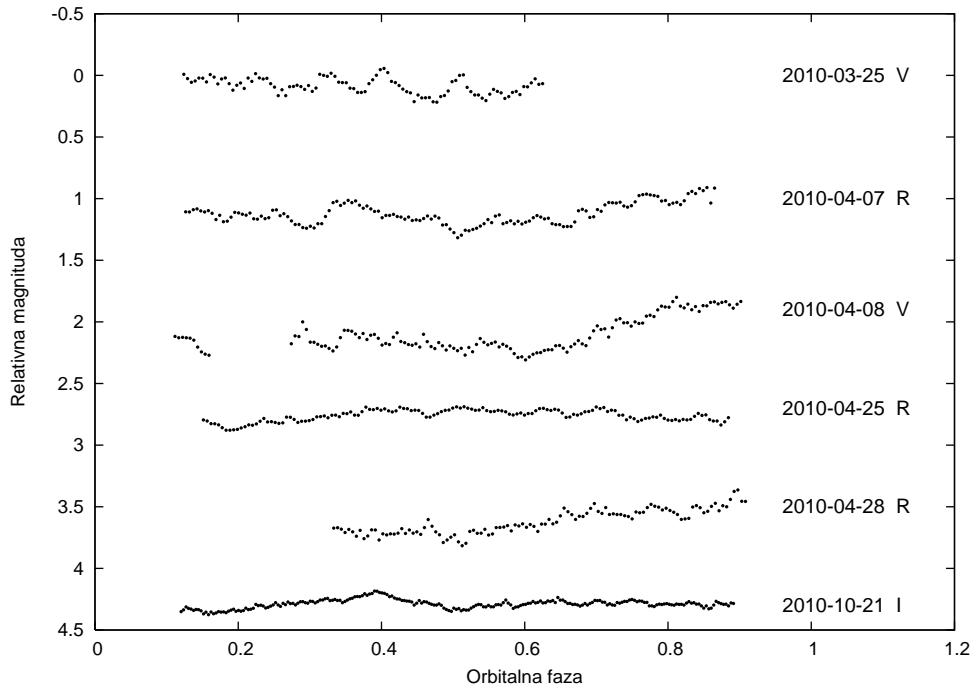
$$Max_{vzpl} = \text{HJD } 2454648.246 + 12.34 \cdot E, \quad (2.17)$$

$$Max_{vzpl} = \text{HJD } 2455343.610 + 11.30 \cdot E. \quad (2.18)$$

Fázové diagramy sú na obrázku 2.10. Kvôli lepšej názornosti tvaru svetelnej krivky zákrytu sú jednotlivé krivky na obrázku 2.10 v časovej ose zväčšené trojnásobne, reálne krivky zákrytu by boli užšie. Na x-ovej osi som vo fázovom diagrame použil čas namiesto fázy, aby bolo názornejšie vidieť ako sa v priebehu niekoľkých dní mení svetelná krivka zákrytu.



Obrázek 2.11: Vývoj tvaru míním počas vzplanutia. V hornom rohu každého grafu je napísaná fáza vzplanutia, v ktorej nastalo minimum a v dolnom rohu filter, v ktorom bolo meranie uskutočnené. O tvare a hĺbke míním platí to čo je napísané aj v popise obrázka 2.10.



Obrázek 2.12: Svetelné krivky flickeringu. Vedľa krivky je napísaný dátum a filter, v ktorom boli namerané. Jednotlivé krivky sú navzájom posunuté o 1 mag. Stredná chyba merania je 0.005 mag.

2.6 Flickering a oscilácie

Pod pojmom flickering sa skrývajú slabé svetelné zmeny prevažne nepravidelného charakteru. Flickering nastáva aj u EX Draconis. Amplitúda dosahuje až 0.4 mag. U trpasličích nov sa ešte zvyknú vyskytovať tzv. oscilácie trpasličích nov (DNO – dwarf-nova oscillation), ktoré majú periódy 7 – 30 s. Keďže najmenšie expozičné časy meraní z Ondřejova a Kolonického sedla dosahujú 30 s (viď tabuľku 2.6), tak sa z nich tieto oscilácie nedajú rozpoznať.

Pomocou programu Period04, ktorý je popísaný v predchádzajúcej podkapitole 2.5, som skúsil nájsť možné periódy takýchto menších svetelných zmien

Tabuľka 2.13: Určené frekvencie flickeringu jednotlivých nocí programom Period04. Frekvencie sú zoradené podľa sily frekvencie určenej programom.

Noc	Frek. 1 [d ⁻¹]	Ampl. 1 [mag]	Frek. 2 [d ⁻¹]	Ampl. 2 [mag]	Frek. 3 [d ⁻¹]	Ampl. 3 [mag]
02.09.2008	17.144	0.047	30.830	0.068	33.179	0.067
25.03.2010	50.804	0.054	5.531	0.042	84.947	0.037
07.04.2010	9.985	0.077	39.248	0.037	22.060	0.049
08.04.2010	11.328	0.085	55.311	0.031	18.698	0.023
22.04.2010	2.594	0.175	69.377	0.014	51.113	0.014
28.04.2010	3.697	0.148	43.060	0.029	16.620	0.035
21.10.2010	14.670	0.040	10.922	0.030	26.238	0.017

Tabulka 2.14: Orbitálne periódy, modulačné periódy a amplitúdy modulačnej periódy pre niektoré trpasličie novy. Z práce Borges a kol. (2008) [12].

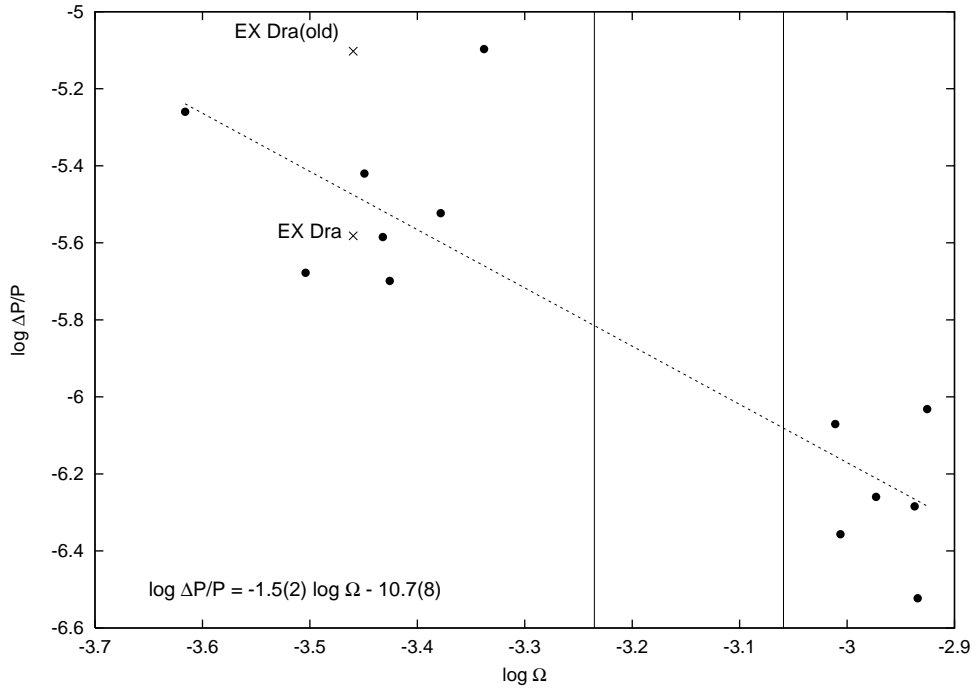
Objekt	P_{orb} [h]	P_{mod} [yr]	$\Delta(O - C)$ [$10^{-3} \times \text{d}$]	$\Delta P/P$ $\times 10^{-6}$	Referencie
V4140 Sgr	1.47	6.9	0.37	0.93	[3]
V2051 Oph	1.50	22	0.38	0.30	[3]
OY Car	1.51	35	1.05	0.52	[17]
EX Hya	1.64	17.5	0.55	0.55	[21]
HT Cas	1.77	36	0.92	0.44	[12]
Z Cha	1.79	28	1.38	0.85	[7]
IP Peg	3.80	4.7	2.18	8.00	[44]
U Gem	4.17	8	1.3	3.00	[41]
DQ Her	4.65	13.7	1.59	2.00	[47]
UX UMa	4.72	7.1, 10.7, 30.4	?	2.60	[37]
T Aur	4.91	23	5.08	3.80	[9], [12]
RW Tri	5.57	7.6, 13.6	?	2.10	[36]
AC Cnc	7.21	16.2	5.17	5.50	[35]
EX Dra(staré)	5.03	5	2.29	7.90	[38]
EX Dra(nové)	5.03	25	3.81	2.62	táto práca

u EX Draconis. Vybral som niektoré pozorovacie noci, počas ktorých boli merané dlhšie aj iné časti krivky ako je samotný zákryt a takto orezané merania danej noci som vložil do Period04. Noci vhodné na periódovú analýzu flickeringu sú: 2.9.2008, 25.3.2010, 7.4.2010, 8.4.2010, 22.4.2010, 28.4.2010 a 21.10.2010. Flickering posledných 6 vypísaných nocí je vykreslený na obrázku 2.12. Vpravo od každej krivky je zobrazený dátum a filter, v ktorom bola krivka nameraná. Hľadal som celý rozsah frekvencií väčších ako 1 d^{-1} . Nájdené periódy a ich amplitúdy sa nachádzajú v tabuľke 2.13. Žiadna z nájdených periód hociktorej noci sa nenašla u niektorej z ďalších nocí. Z tohto usudzujem, že flickering pravdepodobne nevykazuje nijakú periodicitu. Ani v predchádzajúcich prácach o EX Draconis sa ich autorom nepodarilo žiadnu takúto periódu nájsť.

2.7 Porovnanie EX Draconis s inými trpasličími novami

EX Draconis so svojou orbitálnou periódou okolo 5 hodín patrí medzi trpasličie novy nad periódovou medzerou. Trpasličie novy nad touto bariérou zvyknú mať väčšie amplitúdy cyklických zmien orbitálnej periódy ako trpasličie novy pod periódovou bariérou. Je to vidieť aj v tabuľke 2.14, kde sú vypísané trpasličie novy, ktoré majú určenú periódu cyklických zmien P_{mod} , jej amplitúdu $\Delta(O - C)$. V poslednom stĺpci tabuľky 2.14 je

$$\Delta P/P = 2\pi \frac{\Delta(O - C)}{P_{\text{mod}}} = 4\pi \frac{A}{P_{\text{mod}}}, \quad (2.19)$$



Obrázek 2.13: Graf závislosti $\Delta P/P$ na orbitálnej kruhovej frekvencii Ω pre jednotlivé trpasličie novy z tabuľky 2.14. Krížom je označená nová poloha aj stará (old) poloha (hodnoty starej polohy sú získané z práce Shafter & Holland (2003) [38]) EX Draconis, plnými krúžkami sú označené ostatné trpasličie novy. Zvislými plnými čiarami je označená periódová medzera. Z grafu je zrejmalá korelácia medzi týmito veličinami u trpasličích nov. Jednotlivé body som preložil lineárnou funkciou, jej parametre sú vypísané v ľavom dolnom rohu, chyby uvedené v zátvorkách sú smerodatné odchýlky určené programom Gnuplot. Nová poloha je bližšie k preloženej funkcii ako staršia poloha, čiže nové hodnoty by mali lepšie vystihovať zmeny orbitálnej periódy ako staršie.

kde $A = \Delta(O - C)/2$ je semiamplitúda cyklických zmien. Do tabuľky som napísal staré aj mnou novo určené hodnoty pre EX Draconis. Na obrázku 2.13 sú vykreslené tieto hodnoty pre trpasličie novy v logaritmickom merítku, na x-ovej osi je orbitálna kruhová frekvencia Ω a na y-ovej osi je pomer amplitúdy cyklických zmien ku modulačnej perióde $\Delta P/P$. Bodmi v grafe je preložená priamka. Je vidieť, že všetky trpasličie novy ako aj samotná EX Draconis sa nachádzajú v okolí tejto priamky. Nová hodnota $\Delta P/P$ pre EX Draconis je bližšie pri priamke ako hodnota zo starších prác, čiže nové hodnoty by mali lepšie vystihovať zmeny orbitálnej periódy ako staršie.

Záver

V priebehu riešenia diplomovej práce som dospel k nasledujúcim výsledkom:

1. Nové merania zákrytovej trpasličej novy EX Draconis boli uskutočnené na observatóriu AsÚ AVČR v Ondřejove a na Astronomickom observatóriu na Kolonickom sedle počas 63 nocí vo filtroch V, R, a I. Expozičné časy meraní boli v Ondřejove 60 – 90 s a na Kolonickom sedle 30 – 90 s.
2. Zo svetelných kriviek zákrytov som určil okamihy minima dvomi metódami - zrkadliacou a derivačnou. Pre merania s dlhšími expozičnými časmi 30 – 90 s považujem za presnejšiu metódu určenia stredu zákrytu zrkadliacu metódu, pretože svetelné krivky zákrytu s takýmito expozičnými časmi sú málo pokryté, čím sa výrazne znižuje presnosť derivačnej metódy. Mnou určená presnosť okamihy minima pre zrkadliacu metódu je 8×10^{-4} d a pre derivačnú metódu 1.5×10^{-3} d.
3. Nové okamihy minima (53) určené metódou zrkadlenia spolu s okamihmi minima získanými zo starších prác som vykreslil do O-C diagramu. Bodmi v O-C diagrame som preložil funkciu sínus a teoretickú krivku *light-time effect*-u spôsobenú obehom tretieho telesa. Perióda funkcie sínus mi vyšla ~ 25 rokov. Autori starších prác určili túto periódu ako 4 a 5-ročnú. O možnosti tretieho telesa neuvažovali, perióda obehu tretieho telesa mi vyšla ~ 17 rokov. Sumy štvorcov odchýlok meraní od teoretickej krivky LITE tretieho telesa sú 5x menšie ako sumy štvorcov odchýlok meraní od funkcie sínus, preto body v O-C diagrame lepšie popisuje LITE tretieho telesa.
4. Určil som parametre dráhy tretieho telesa. Perióda obehu tretieho telesa $P_3 = 17.15$ rokov, semiampplitúda zmien v O-C diagrame $A = 0.00167$ d. Tretie teleso so svojou minimálnou hmotnosťou $M_{3,min} = 53.5 M_{Jup}$ je pravdepodobne hnedý trpaslík.
5. Pre tri pozorovacie obdobia som určil priemernú periódu vzplanutia. Pre posledné dve lepšie pokryté obdobia som vykreslil fázovú krivku vzplanutia.
 - 2006 – 2007: $P_{vzpl} = 13.68$ d
 - 2008: $P_{vzpl} = 12.3$ d
 - 2009 – 2011: $P_{vzpl} = 11.30$ d
6. Pre 6 nocí, počas ktorých bola pozorovaná aj mimozákrytová časť svetelnej krivky, som určil krátke periódy svetelných zmien mimo zákryt.
7. Vytvoril som 3 programy, pomocou ktorých som určil okamih stredu zákrytu derivačnou metódou. Prvý program vyhladzuje svetelné krivky mediánovým filtrom, druhý preloží svetelnú krivku spline funkciou a tretí určí deriváciu svetelnej krivky. Ďalší program som vytvoril na určenie parametrov dráhy tretieho telesa z okamihov minima. Kódy všetkých programov sú v prílohe.

Autori starších prác zo svojich meraní z rokov 1991 – 2002 určili periódu cyklických zmien v O-C diagrame 4 – 5 rokov. So svojimi tvrdeniami sa unáhli a čas ukázal, že EX Draconis bolo potrebné sledovať ešte niekoľko rokov, aby sa táto perióda potvrdila. Vo svojej diplomovej práci som spracovával merania z obdobia 2004 – 2011 a celkové pozorovacie obdobie sa zvýšilo na 20 rokov. Nové okamihy minima som doplnil do O-C diagramu a ukázalo sa, že periódy určené v starších prácach nevystihujú správanie systému. Mne vyšla perióda cyklických zmien ~ 25 rokov. Za pozorovacie obdobie 20 rokov EX Dra teda ešte ani raz neprešla celým svojim cyklom, preto aj mnou určená perióda nemusí byť správna a moje tvrdenie taktiež môže byť unáhlené. Na potvrdenie je potrebné EX Dra sledovať ešte niekoľko desaťročí aby celkové pozorovacie obdobie bolo aspoň 2x dlhšie ako perióda zmien. Autori starších prác navyše vôbec neuvažovali o možnosti tretieho telesa v systéme. Teoretická krivka LITE tretieho telesa lepšie vystihuje zmeny v O-C diagrame a preto je viac pravdepodobné, že tieto zmeny sú spôsobené tretím telesom a nie magnetickým cyklom červeného trpaslíka. Zmeny v O-C diagrame môžu byť takisto aj kombináciou oboch efektov. Ďalším monitoringom tohto systému sa možno časom vyrieši záhada, či cyklické zmeny v O-C diagrame sú spôsobené magnetickým cyklom ČT alebo obhom tretieho telesa a teda či je EX Draconis dvojhviezda alebo trojhviezda skladajúca sa z troch trpaslíkov - bieleho, červeného a hnedého.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Applegate, J. H., 1992, ApJ, 385, 621
- [2] Bade, N., Hagen, H., Reimers, D., 1989, 23 Eslab Symp. ESA SP/296 p.883
- [3] Baptista, R., Borges, B.W., Bond, H.E a kol., 2003, MNRAS, 345, 889
- [4] Baptista, R., Catalán, M.S., 2000, ApJ, 539, L55
- [5] Baptista, R., Catalán, M.S., 2001, MNRAS, 324, 599
- [6] Baptista, R., Catalán, M.S., Costa, L., 2000, MNRAS, 316, 526
- [7] Baptista, R., Jablonski, F.J., Oliviera, E. a kol., 2002, MNRAS, 335, L75
- [8] Barwig, H., Fiedler, H., Reimers, D., Bade, N., 1993, Abstracts of IAU Symp. 165, Compact Stars in Binary Systems, p.89
- [9] Beuermann, K., Pakull, M.W., 1984 A&A, 136, 250
- [10] Bianchini, A., 1990, AJ, 99, 1941
- [11] Billington, I., Marsh, T.R., Dhillon, V.S., 1996, MNRAS, 278, 673
- [12] Borges, B.W., Baptista, R., Papadimitriou, C., Giannakis, O., 2008, A&A, 480, 481
- [13] Dillon, M., 2008, PhD. thesis, University of Warwick
- [14] Eggleton, P.P., 1983, ApJ, 268, 368
- [15] Fiedler, H., Barwig, H., Mantel, K.-H., 1997, A&A, 327, 173
- [16] Giannakis, O., Harlaftis, E., T., Papadimitriou, C., Niarchos, P. G., Gazeas, K., Manimanis, V., Steeghs, D., Boffin, H., 2005, ASPC, 330, 359
- [17] Greenhill, J.G., Hill, K.M., Dieters, S. a kol., 2006, MNRAS, 372, 1129
- [18] Halevin, A.V., Henden, A.A., 2008, IBVS, 5833, 1
- [19] Harlaftis, E., T., Papadimitriou, C., Steeghs, D., Sokoloski, J., L., Rutten, R., G., M., Niarchos, P., G., Gazeas, K., Manimanis, V., Boffin, H., Zurita, C., 2002, ASPC, 261, 481
- [20] Hawley, J. F., Balbus, S. A., 1998, ASP Conf, 137, 273
- [21] Helier, C., Sproats, L.N., 1992, IBVS, 3724, 1
- [22] Helier, C., 2001, Springer
- [23] Horne, K., 1985, MNRAS, 213, 129
- [24] Joergens, V., Mantel, K.-H., Barwig, H., Bärnbantner, O., Fiedler, H., 2000, A&A, 354, 579

- [25] Joergens, V., Spruit, H.C., Rutten, R.G.M., 2000, *A& A*, 356, L33
- [26] Lenz, P., Breger, M., IAU Symp., 224(Cambridge University Press), 786
- [27] Mayer, P., 1990, *Bull. Astr. Inst. Czech.*, 41, 231
- [28] Mineshige, S., Osaki, Y., 1985, *PASJ*, 37, 1
- [29] Osaki, Y., 1974, *PASJ*, 26, 429
- [30] Papadimitriou, C. J., Harlaftis, E. T., Steeghs, D., Niarchos, P. G., 2005, *ASPC*, 330, 395
- [31] Patterson, J., 1979, *ApJ*, 234, 978
- [32] Patterson, J., 1981, *ApJ Supp*, 45, 517
- [33] Plavec, M., Kratochvil, P., 1964, *Bull. Astr. Czech.*, 15, 165
- [34] Priedhorsky, W., Krzeminski, W., 1978, *ApJ*, 219, 597
- [35] Qian, S.-B., Dai, Y.-B., He, J.-J. a kol., 2007, *A&A*, 466, 589
- [36] Robinson, E.L., Shetrone, M.D., Africano, L.J., 1991, *AJ*, 102, 1176
- [37] Rubenstein, E.P, Patterson, J., Africano, J.L., 1991, *PASP*, 103, 1258
- [38] Shafter, A., Holland, J., 2003, *PASP*, 115, 1105
- [39] Šarounová, L., Wolf, M., 1997, *IBVS*, 4452, 1
- [40] Verbunt, F., 1982, *Sp. Sci. Rev.*, 32, 379
- [41] Warner, B., 1988, *Nature*, 336, 129
- [42] Warner, B., 1995, *Cataclysmic Variable Stars*, Cambridge Astrophysics Series 28., Cambridge Univ. Press, Cambridge
- [43] Warner, B., Nather, R. E., 1971, *MNRAS*, 152, 219
- [44] Wolf, S., Mantel, K.H., Horne, K. a kol., 1993, *A&A*, 273, 160
- [45] Wood, J.H., Horne, K., Berriman, G., Wade, R., O'Donoghue, D., Warner, B., 1986, *MNRAS*, 219, 629
- [46] Wood, J.H., Irwin, M.J., Pringle, J.E., 1985, *MNRAS*, 214, 475
- [47] Zhang, E., Robinson, E.L., Stiening, R.F, Horne, K., 1995, *ApJ*, 454, 447

Zoznam tabuliek

- 2.1 EX Draconis - Základné údaje
- 2.2 Prehľad článkov o EX Draconis
- 2.3 Prehľad meraní z Ondřejova
- 2.4 Prehľad meraní z Kolonického sedla
- 2.5 Okamihy minima určené metódou zkradlenia
- 2.6 Prehľad expozičných časov a filtrov meraní v starších prácach
- 2.7 Okamihy minima určené derivačnou metódou
- 2.8 Okamihy minima určené z databázy AAVSO
- 2.9 Zvolené počiatkové rozsahy parametrov dráhy tretieho telesa
- 2.10 Určenie parametre dráhy tretieho telesa
- 2.11 Sumy štvorcov odchýlok pre funkciu sínus a pre tretie teleso
- 2.12 Periódy vzplanutí a možné druhé periódy počas jednotlivých pozorovacích období určené programom Period04
- 2.13 Určenie frekvencie flickeringu jednotlivých nocí programom Period04
- 2.14 Orbitálne periódy, modulačné periódy a amplitúdy modulačnej periódy pre niektoré trpasličie novy

Zoznam použitých skratiek

AAVSO - American Association of Variable Star Observers

L1 - vnútorný Lagrangeov bod

BT - biely trpaslík

ČT - červený trpaslík

DNO - dwarf-novae oscillation (oscilácie trpasličích nov)

AsÚ AVČR - Astronomický ústav Akadémie vied Českej Republiky

JD - juliánsky dátum

HJD - heliocentrický juliánsky dátum

LITE - Light-Time Effect

Prílohy

Príloha 1

Program na vyhladenie svetelnej krivky mediánovým filtrom v jazyku Pascal

```
program median_filter;
var a,b:text;
    pom:real;
    w,i,j,k,x:integer;
    jd,mag,mag1:array[1..200] of real;

begin
    write('zadaj sirku w:');
    readln(w);
    assign(a,'C:\a\m_filter.dat');
    rewrite(a);
    assign(b,'C:\a\1.dat');
    reset(b);
    for i:=1 to w do begin
        read(b,jd[i]);
        read(b,mag[i]);
    end;

    x:=(w div 2)+1;
    while not eof(b) do begin
        for i:=1 to w do mag1[i]:=mag[i];
        for i:=1 to (w div 2)+1 do begin
            pom:=mag1[i];
            k:=i;
            for j:=i+1 to w do if mag1[j]<pom then
                begin
                    pom:=mag1[j];
                    k:=j;
                end;
            mag1[k]:=mag1[i];
            mag1[i]:=pom;
        end;
        writeln(a,jd[x],',',pom);
        for i:=2 to w do mag[i-1]:=mag[i];
        for i:=(w div 2)+2 to w do jd[i-1]:=jd[i];
        read(b,jd[w]);
        read(b,mag[w]);
    end;

    close(a);
    close(b);
end.
```

Príloha 2

Program na preloženie svetelnej krivky spline funkciou v jazyku Pascal

```
{program preklada krivkou spline function}
program spline_function;
var n,i,j:integer;
    t,u:text;
    g:string;
    krok,jd,mag,jd0:real;
    x,h,alpha,l,mi,z,a,b,c,d:array[0..1000] of real;
begin
    assign(t,'C:\a\1.dat');
    reset(t);
    n:=0;
    write('zadaj Juliansky den : ');
    readln(jd0);
    while not seekeof(t) do begin
        readln(t,g);
        n:=n+1;
    end;

    close(t);
    n:=n-1;
    assign(t,'C:\a\1.dat');
    reset(t);
    for i:=0 to n do begin
        read(t,x[i]);
        read(t,a[i]);
    end;

    close(t);
    for i:=0 to n do x[i]:=x[i]-jd0;
    for i:=0 to n-1 do h[i]:=x[i+1]-x[i];
    for i:=1 to n-1 do alpha[i]:=3*(a[i+1]-a[i])/h[i]-
    3*(a[i]-a[i-1])/h[i-1];
    l[0]:=1;
    mi[0]:=0;
    z[0]:=0;
    for i:=1 to n-1 do begin
        l[i]:=2*(x[i+1]-x[i-1])-h[i-1]*mi[i-1];
        mi[i]:=h[i]/l[i];
        z[i]:=(alpha[i]-h[i-1]*z[i-1])/l[i];
    end;

    l[n]:=1;
    z[n]:=0;
    c[n]:=0;
    j:=n-1;
    while j>-1 do begin
        c[j]:=z[j]-mi[j]*c[j+1];
```



```

        b[j] := (a[j+1] - a[j]) / (h[j] - h[j+1]) * (c[j+1] + 2 * c[j]) / 3;
        d[j] := (c[j+1] - c[j]) / (3 * h[j]);
        j := j - 1;
    end;
assign(u, 'C:\aa\1a.dat');
rewrite(u);
krok := 0.00001;
jd := x[0];
for i := 0 to n - 1 do begin
    while jd < x[i + 1] do begin
        mag := a[i] + b[i] * (jd - x[i]) + c[i] * (jd - x[i]) * (jd - x[i]) + d[i] *
            (jd - x[i]) * (jd - x[i]) * (jd - x[i]);
        writeln(u, jd, ' ', mag);
        jd := jd + krok;
    end;
end;
close(u);
end.

```

Príloha 3

Program na zderivovanie svetelnej krivky v jazyku Pascal

```
{derivacia svetelnej krivky}
program derivation;
var a,b:text;
    jd1,jd2,mag1,mag2,x,der:real;
begin
    {nacita sa vstupny a vystupny subor}
    assign(a,'C:\aa\1a.dat');
    reset(a);
    assign(b,'C:\aa\1aa.dat');
    rewrite(b);
    read(a,jd1);
    read(a,mag1);
    {zderivuje sa a vypise do vystupneho suboru}
    while not seekeof(a) do begin
        read(a,jd2);
        read(a,mag2);
        der:=(mag2-mag1)/(jd2-jd1);
        x:=(jd1+jd2)/2;
        writeln(b,x,' ',der);
        jd1:=jd2;
        mag1:=mag2;
    end;

    close(a);
    close(b);
end.
```

Príloha 4

Program na určenie parametrov dráhy tretieho telesa v prostredí Octave

```
%%%riesenie tretieho telesa
summin=1e20;
pocetminim=115;%musi sa zadat pocet minim!!!
format long;
%%%zadanie vstup. param.[T0, P, A, T3, P3, e, omega]:hranice a
%%%rozsah
%T0 je stred minima nulteju Julianskej epochy
%P je orbitalna perioda dvojhviezdy
%A je amplituda v O-C diagrame
%T3 je okamih priechodu perihelia tretieho telesa
%P3 je orbitalna perioda tretieho telesa
%e je excentricita tretieho telesa
%omega je argument perihelia tretieho telesa
T0=linspace(2452474.8052,2452474.8052,1);
P=linspace(0.20993738,0.20993738,1);
A=linspace(0.00160,0.00190,4);
T3=linspace(2455220,2455290,13);
P3=linspace(6260,6290,12);
e=linspace(0.63,0.67,11);
omega=linspace(2.2,2.3,12);
for i=1:length(T0);
    for j=1:length(P);
        for k=1:length(e);
            for l=1:length(T3);
                for m=1:length(P3);
                    for n=1:length(omega);
                        for o=1:length(A);
%%%vzdy na zaciatku za sum dosadi nulu
                            sum=0;
%%%otvori a nacita subor min.dat do vektoru min o velkosti
%%%pocetminim (predtym ho ale naplni nulami)
                                f=fopen('min.dat','r');
                                y=zeros(1,pocetminim);
                                for r=1:pocetminim;
                                    pom=fgets(f);
                                    min(r)=str2num(pom);
                                end;
                                fclose(f);
                                for q=1:pocetminim;
%%%vypocita M, potom iteraciou E a potom ni
                                    M=((2*pi)/P3(m))*(min(q)-T3(1));
                                    E1=M;
                                    chyba=1;
%%%iteracia, kym chyba nie je mensia ako chyba
```

