

Rozprava o symbiotických hviezdach: II. Svetelné krivky

1. Úvod

Pojem svetelná krivka je v astronomickej praxi veľmi rozšírený. Znázorňuje priebeh jasnosti astronomického objektu na čase. Jasnosť zvyčajne vyjadrujeme vo hviezdnych magnitúdach a čas sa udáva vo forme tzv. Juliánskeho dátumu (JD), čísla, ktoré rovnomerne narastá s jednotkou 1 dňa. Najčastejšie, najmä v amatérskej astronómii, sa svetelná krivka používa na štúdium zmien jasnosti vo viditeľnej oblasti spektra. Hovoríme tak o vizuálnej, U, B alebo V svetelnej krivke. V odbornej literatúre sa však závislosť na oblasti vlnových dĺžok veľmi nerešpektuje – termín svetelná krivka sa používa v jeho všeobecnom význame. Môžeme sa tak stretnúť aj s označením ultrafialová, infračervená alebo rádiová svetelná krivka, ktoré často reprezentujú funkčnú závislosť tokov žiarenia v danej oblasti vlnových dĺžok, alebo aj len v spektrálnych čiarach. V tejto kapitole našich rozpráv budeme uvažovať výlučne len prípad svetelných kriviek v ich pôvodnom ponímaní, ako závislosť jasnosti v optickej oblasti svetla, vyjadrenej v hviezdnych magnitúdach, na čase. Niekedy je výhodné použiť ako časovú jednotku obežnú periódu dvojhviezdy. Potom hovoríme o tzv. fázovej svetelnej krivke, alebo diagrame. V takom prípade totiž možno lepšie študovať svetlo sústavy v rôznych polohách voči vonkajšiemu pozorovateľovi, čo uľahčuje odlíšiť svetlo, ktoré sa mení práve len v dôsledku obežného pohybu zložiek dvojhviezdy.

Svetelné krivky symbiotických hviezd majú veľmi komplikovaný a najmä neočakávaný priebeh. Je to dané tým, že do viditeľnej oblasti spektra prispievajú výrazným podielom všetky tri základné zložky žiarenia, ako sme si ich predstavili v I. časti. Napríklad, kombináciou zdrojov svetla extrémne rozdielnych teplôt (horúci objekt, chladný obor) a aj podstaty (hmlovinná a hviezdna zložka) vznikajú také farebné indexy, ktoré sa výrazne odlišujú od štandardných hodnôt meraných pre väčšinu astronomických objektov. K tomu pristupujú optické vlastnosti hmloviny, jej tvarovanie a lokalizácia v sústave, čo spôsobuje dodatočné variácie svetla, ktoré závisia od smeru pozorovania dvojhviezdy. Navyše, nie zriedkavo pozorujeme vzplanutia, pri ktorých sa jasnosť sústavy zvyšuje až o niekoľko magnitúd a dochádza k výraznému prerozdeleniu energie v spektre. Všeobecne sa najvýraznejšie zmeny prejavujú v krátkovlnnej časti vizuálnej oblasti, najmä teda vo fotometrickom filtri U. V tomto pásme je zvyčajne dominantným zdrojom svetla hmlovina, ktorá najcitlivejšie reaguje na zmeny energetickej rovnováhy v symbiotickej sústave. Rozmanitosť zmien, ktoré sú zaznamenané v svetelných krivkách symbiotických hviezd, je preto obrovská. Mnohým zatiaľ celkom nerozumieme, niektorým len z časti a pre iné len zvažujeme možnosti ich pôvodu.

V tejto rozprave si predstavíme aspoň najvýraznejšie charakteristické zmeny, pozorované v svetelných krivkách symbiotických hviezd a pokúsime sa o vysvetlenie ich podstaty. Pri interpretácii budeme vychádzať z rozdelenia energie vo vizuálnej oblasti vlnových dĺžok tak, ako sme ho predstavili v I. časti. Keďže významnú úlohu hrá hmlovinná zložka žiarenia, bližšie si vysvetlíme aj najjednoduchší model ionizačnej štruktúry symbiotických hviezd. V nasledujúcej kapitole najprv predstavíme prehľad základných charakteristík ich svetelných kriviek.

2. Základná klasifikácia svetelných kriviek symbiotických hviezd

Tabuľka 1 zhŕňa prehľad hlavných variácií pozorovaných v svetelných krivkách klasických symbiotických hviezd. V podstate možno rozlíšiť dva typy zmien – 1. *periodické* a 2. *nepravidelné*. V rámci periodických variácií rozlišujeme tie, ktoré nejako súvisia s obežným pohybom zložiek dvojhviezdy a tie, ktoré s ním nesúvisia. Periodické, orbitálne viazané variácie sú prítomné takmer v každej svetelnej krivke symbiotickej hviezdy – patria k ich najvýraznejším rysom. Počas pokojných fáz pozorujeme vlnový profil svetelnej krivky, v ktorom minimá a maximá nastávajú v okolí konjunkcií zložiek dvojhviezdy. Spodná konjunkcia obra (t.j. keď sa nachádza medzi horúcou hviezdou a pozorovateľom) odpovedá minimu (orbitálna fáza $\varphi \sim 0$) a naopak, pri jeho hornej konjunkcii (horúca hviezda je vpredu) pozorujeme maximum svetla ($\varphi \sim 0.5$). Obrázok 1 ukazuje príklad tohto typu svetelných variácií pre BF Cyg (obsahuje červeného obra spektrálneho typu M5; $T_g \sim 3400$ K) a AG Dra (žltý obor K2; $T_g \sim 4300$ K). Je charakterizovaný veľmi veľkým rozdielom svetelných zmien, $\Delta m \sim 1 - 2$ mag, odpovedajúcich minimu a maximu jasnosti. Vo všetkých prípadoch je táto „amplitúda“ vždy väčšia v modrej časti spektra než v červenej, teda $\Delta U > \Delta B > \Delta V$. Je to prirodzený dôsledok silnejšieho príspevku žiarenia obra vo filtri V než v U, ako je zreteľne vidieť z rozdelenia energie v spektre (Obr. 1). Svetlo obra je totiž nezávislé od orbitálnej fázy a výrazne sa zosilňuje smerom k dlhším vlnovým dĺžkam, zatiaľ čo žiarenie hmloviny má opačný priebeh (dominuje v U pásme a je slabšie vo V) a je príčinou orbitálne viazanej variácie (viď kapitola 3). Keďže v optickej oblasti spektra je výsledné žiarenie dané prakticky len príspevkami obra a hmloviny, amplitúda svetelných zmien sa znižuje s narastajúcou vlnovou dĺžkou, kde konštantná zložka žiarenia chladnej hviezdy je čoraz silnejšou. V prípadoch tzv. žltých symbiotických hviezd (obsahujú obra spektrálneho typu K až G) je príspevok chladnej zložky vo V oblasti veľmi silný, čo spôsobuje podstatne menšie zmeny vlnových variácií jasnosti vo V filtri než v U, teda $\Delta U/\Delta V \gg 1$. Pokiaľ sústava obsahuje červeného obra, nie je jeho príspevok vo V pásme až taký silný ako pre žlté symbiotické hviezdy, čiže pozorujeme $\Delta U/\Delta V \geq 1$. V príklade na Obr. 1 je $\Delta U/\Delta V \sim 1.4$ pre BF Cyg, zatiaľčo pre žltú symbiotickú hviezdu AG Dra je $\Delta U/\Delta V \sim 10$. Teda, ak nám fotometrické meranie ukáže výrazný rozdiel amplitúd v U (prípadne B) a V (prípadne R) filtroch, je to signál toho, že ide o žltú symbiotickú hviezdu.

Počas aktívnych fáz sústav s vysokým sklonom obežnej dráhy dochádza ku náhlej zmene profilu mínim – široké minimá tvaru vlny sa menia na úzke. Sú spôsobené zákrytom aktívneho horúceho objektu hviezdny diskom chladného obra. Zo spektroskopických pozorovaní vieme, že počas aktivity sa okolo centrálnej horúcej hviezdy vytvára opticky hrubá obálka, tzv. falošná fotosféra (viď Rozpravu I.), ktorá sústreďuje do jej blízkosti podstatnú časť žiarenia. Keďže falošná fotosféra svieti pri výrazne nižšej teplote (okolo 22 000 K) než v pokojnej fáze (okolo 100 000 K), maximum jej žiarenia sa posúva ku dlhším vlnovým dĺžkam (Wienov posunovací zákon). Tento efekt spôsobí, že príspevok takejto falošnej fotosféry sa výrazne zvýši v optickej oblasti spektra, najmä v U, kde sa stáva dominantným zdrojom – prevyšuje svetlo hmloviny a obra. Pretože polomer falošnej fotosféry je malý, okolo 1 polomeru Slnka (viď obr. 3 v Rozprave I.), potom v okolí orbitálnej fázy 0 ju obria chladná hviezda ľahko zakryje na čas približne jednej desatiny obežnej periódy (cca. 2 až tri mesiace), čo zodpovedá ich polomerom a veľmi dlhým obežným periódam. Aj v tomto prípade hĺbka mínim spĺňa vzťah: $\Delta U > \Delta B > \Delta V$, lebo príspevok horúceho objektu klesá smerom k červenému konci spektra a žiarenie obra, ktoré nie je predmetom zákrytu, tu naopak narastá.

Periodické variácie, ktoré nesúvisia s orbitálnym pohybom zložiek dvojhviezdy, sú najvýraznejšie v červenej časti spektra (vo filtroch V, R, I). Ich typické periódy sa pohybujú od desiatok po stovky dní. Tieto vlastnosti naznačujú, že môžu byť spôsobené vlastnou premennosťou obrích chladných zložiek. Najdiskutovanejšou príčinou sú ich pulzácie (napr. CH Cyg, CI Cyg, AG Dra a symbiotické miridy). Vzťah medzi vlastnou premennosťou obrov v symbiotických hviezdach a aktivitou horúcich zložiek nebol zatiaľ preukázaný.

Nepravidelné a v podstate nepredvídateľné zmeny jasnosti na dlhých časových škálach sú najčastejšie spôsobené vzplanutiami. Štúdium podstaty vzplanutí patrí v súčasnosti k hlavným problémom v porozumení symbiotického javu. Energetická bilancia vzplanutí navrhuje len základné možnosti – zapálenie termonukleárneho horenia vodíka na povrchu bieleho trpaslíka a/alebo nestabilitu akréčného disku. Súčasné teoretické znalosti však nedokážu uspokojivo vysvetliť, napríklad, častú opakovanosť a nízku amplitúdu vzplanutí klasických symbiotických hviezd.

Medzi nepravidelnými zmenami jasnosti na časových škálach sekúnd až hodín je najznámejší tzv. flickering (blikanie). Zmeny jasnosti dosahujú až niekoľko desiatín magnitúdy a sú najvýraznejšie v modrej oblasti spektra. Flickering bol dobre pozorovaný pre CH Cyg a symbiotické rekurentné novy T CrB a RS Oph. Podľa analógie s kataklyzmickými premennými hviezdami by zdrojom flickeringu mohla byť horúca škvrna na okraji akréčného disku, kde dochádza ku zrážke prúdu hmoty, prenášaného cez vnútorný Lagrangeho bod L_1 . Pre symbiotické dvojhviezdy však táto interpretácia naráža na hlavný problém vypĺňania Rocheovho laloku chladným obrom, ktoré dosiaľ nebolo jednoznačne preukázané pre žiadnu symbiotickú sústavu.

3. O podstate vlnových variácií

3.1. Efekt odrazu

Na vysvetlenie vlnových, orbitálne viazaných variácií svetla symbiotických hviezd bol pôvodne navrhnutý efekt odrazu. V rámci tohto modelu horúca hviezda ožaruje a zohrieva privrátenú pologuľu obra, ktorá potom spôsobuje vlnovú moduláciu jasnosti tým, že sústavu pozorujeme v rôznych orbitálnych polohách, z ktorých vidíme rozdielne časti ožiarenej pologule obra. V princípe je to to isté, ako keď pozorujeme fázy Mesiaca. V spodnej konjunkcii obra ($\varphi \sim 0$; analógia novu Mesiaca) pozorujeme minimum svetla, a opačne, okolo hornej konjunkcie obra ($\varphi \sim 0.5$; analógia splnu Mesiaca) maximum. Schému efektu odrazu znázorňuje ľavý panel Obr. 2. Pre symbiotické hviezdy však toto prirodzené vysvetlenie nemá fyzikálne opodstatnenie. Napríklad, model odrazu nie je schopný vysvetliť príliš veľkú amplitúdu pozorovaných zmien jasnosti, ale predovšetkým je v rozpore s ich základným ionizačným modelom (pravý panel Obr. 2). Pokúsme si predstaviť len okrajové situácie. V prípade čistého odrazu svetla závisí zmena jasnosti na vzájomnej vzdialenosti zložiek dvojhviezdy, ich svietivostiach a polomere obra. Pre charakteristické hodnoty týchto parametrov symbiotických hviezd čistý odraz môže spôsobiť moduláciu jasnosti s amplitúdou maximálne 0.1 magnitúdy. V prípade zohrievania (dopadajúce žiarenie je transformované na zohrievanie pologule obra) sa teplota pologule obra, privrátenej ku horúcej hviezde, zvýši maximálne len o niekoľko desiatok stupňov. Dá sa jednoducho odhadnúť, že takýto malý teplotný rozdiel medzi zohriatou a odvrátenou pologuľou obra nemôže spôsobiť pozorovanú amplitúdu v svetelných krivkách. Všeobecne, hlavným problémom efektu odrazu je, že predpokladá jestvovanie emisnej oblasti na fotosfére obra alebo v jej blízkosti.

Takáto oblasť je príliš malá na to, aby bola schopná vyvolať pozorovanú zmenu jasnosti 1 – 2 mag, ale hlavne jej vznik na povrchu obrej hviezdy odporuje podmienkam ionizácie v symbiotických hviezdach. V ceste žiarenia od horúcej hviezdy smerom ku obrovi totiž „stojí“ značné množstvo neutrálnych atómov, produkovaných masívnym hviezdny vetrom obra, ktoré spotrebovávajú výraznú časť energie horúceho žiarenia na svoju ionizáciu, čím dáva vznik hmlovinnému žiareniu. Vidíme, že k správnej interpretácii periodických vlnových variácií potrebujeme poznať, ako vlastne hmlovina vyzerá a svieti. Preto si predstavíme najjednoduchší model ionizačnej štruktúry v symbiotických hviezdach.

3.2. Ionizačný model symbiotických hviezd

Pri zrážke fotónu s neutrálnym atómom môže dôjsť k oddeleniu elektrónu, tzv. ionizácii atómu. Podmienkou je, aby fotón mal dostatočnú energiu. Pre naše úvahy plne postačí uvažovať len atómy neutrálneho vodíka, ktorých početnosť medzi ostatnými prvkami je výrazne najvyššia (až 90 percent). V tomto prípade k ionizácii potrebujeme fotóny s energiou aspoň 13.6 eV (1 elektronVolt = 1.6×10^{-19} J), respektíve žiarenie s vlnovou dĺžkou kratšou ako 912 Å. Sú horúce hviezdy v symbiotických sústavách silným zdrojom takého žiarenia? Odpoveď je, áno. Vieme, že počas pokojných fáz svietia pri veľmi vysokých teplotách nad 100 000 K, a to s obrovskou svietivosťou okolo 1 000 Slnk (viď Rozprava I.). Ľahko sa presvedčíme (napr. nakreslením odpovedajúcej Planckovej krivky), že pri takých teplotách viac ako 90 percent z celkového žiarenia má vyššiu energiu ako je ionizačná energia atómu vodíka, teda je vyžarované v oblasti s $\lambda < 912$ Å, t.j. v ďalekej až extrémnej UV oblasti a v oblasti žiarenia X. Pre naše úvahy je užitočné si vyjadriť túto energiu počtom fotónov. Každéj vlnovej dĺžke odpovedajú fotóny určitej energie ($= h.c/\lambda$). Keďže vieme, aká energia je v danej vlnovej dĺžke vyžarovaná (zo svietivosti a rozloženia energie), jej pomer ku energii jedného fotónu určuje ich počet. Súčtom týchto počtov pre všetky vlnové dĺžky od 0 po 912 Å, potom dostaneme celkový počet fotónov schopných ionizovať atóm vodíka. V našom prípade, typická horúca hviezda v symbiotickej sústave produkuje každú sekundu rádovo 10^{43} až 10^{44} ionizujúcich fotónov! Aby bolo možné odhadovať geometrickú štruktúru ionizovanej oblasti, potrebujeme poznať množstvo neutrálnych atómov vodíka, ktoré v danom mieste s ionizujúcim žiarením interaguje. Sú chladní obri v symbiotických dvojhviezdach dostatočne silným zdrojom atómov neutrálneho vodíka? Odpoveď je taktiež, áno. Vieme, že rýchlosť straty hmoty hviezdny vetrom chladných zložiek je v priemere niekoľko krát 10^{-7} hmotností Slnka za rok, čo je rádovo 10^{19} gramov za sekundu. Nakoľko hmotnosť jedného atómu vodíka je približne 10^{-24} gramov, je tok neutrálnych atómov hviezdneho vetra obrov rádovo 10^{43} častíc za každú sekundu. Takéto dva silné zdroje – ionizujúceho žiarenia a neutrálneho vodíka – spôsobujú vznik veľmi kompaktnej (koncentrácia častíc vetra medzi zložkami dvojhviezdy sa pohybuje medzi 10^9 až 10^{13} v kubickom centimetri) a svietivej (okolo 100 Slnk) hmloviny. Takými vlastnosťami sa hmlovina v symbiotickej sústave výrazne odlišuje od planetárnych hmlovín, ktoré sú podstatne rozsiahlejšie s koncentraciami len 10^3 – 10^6 častíc v kubickom centimetre.

Štruktúra hmloviny v symbiotickej hviezde je určená hranicou medzi ionizovanou a neutrálnou časťou hviezdneho vetra obra, na ktorej nastáva rovnováha medzi tokom ionizujúcich fotónov a tokom atómov neutrálneho vodíka. Nakoľko sú zdroje ionizujúceho žiarenia a častíc fyzicky oddelené (horúca a chladná hviezda), je zrejmé, že tvar hmloviny nebude sféricky symetrický. Obrázok 2 na pravom paneli

ukazuje príklady štruktúry symbiotických hmlovín, vznikajúcich ionizáciou vodíka, pre stacionárny prípad (dvojhviezda nerotuje a vplyv gravitačného poľa horúcej hviezdy na častice vetra sa zanedbáva). V prípade, keď ionizačná schopnosť horúcej hviezdy vysoko prevyšuje produkciu neutrálnych atómov hviezdny vetrom, hmlovina (t.j. ionizovaná časť vetra) zaberá podstatnú časť celej sústavy; neutrálna časť vetra predstavuje viac či menej otvorený kužeľovitý útvar obsahujúci chladného obra pri jeho vrchole. Keď sú oba toky – častíc a fotónov – približne rovnaké, hranica ionizácie je kolmá na spojnicu zložiek a nachádza sa približne v jej polovici. V prípade veľmi nízkej ionizačnej schopnosti hmlovina môže byť uzavretá, t.j. obklopená neutrálnymi atómami. V každom prípade je hmlovina fyzicky oddelená od povrchu chladného obra, pričom svojou veľkosťou výrazne prevyšuje jeho polomer. Hmlovina je významným zdrojom svetla, ktorého intenzitu a variácie zaznamenávame v svetelných krivkách. Táto skutočnosť jednoznačne vylučuje efekt odrazu, ako správnu interpretáciu vlnových, orbitálne viazaných variácií v svetelných krivkách. Čo teda spôsobuje tento druh variácií? Ako hmlovina v symbiotickej sústave môže ovplyvňovať pozorované svetlo?

3.3. Vplyv hmloviny na profil svetelných kriviek

Počas pokojných fáz, vykazuje rozdelenie energie v optickej oblasti spektra, meraného v rôznych polohách sústavy, rovnakú závislosť príspevku hmloviny, akú pozorujeme v svetelných krivkách. Maximum, respektíve minimum žiarenia hmloviny pozorujeme v okolí konjunkcií zložiek dvojhviezdy, podobne ako pre periodickú vlnovú variáciu fotometrických magnítud (viď kapitola 2). Obrázok 3 ukazuje príklad rozdelenia energie v spektre symbiotickej sústavy V1329 Cyg v okolí konjunkcií jeho zložiek. Z obrázku je vidieť, že v dolnej ($\varphi \sim 0$), respektíve hornej ($\varphi \sim 0.5$) konjunkcii obra je miera emisie hmloviny minimálna, respektíve maximálna, a v svetelnej krivke pozorujeme minimum, respektíve maximum. Možno teda uzavrieť, že príčinou vlnových, orbitálne viazaných variácií svetla sú variácie príspevku hmloviny v spektre. Keď je tomu tak, potom musí existovať vzťah medzi jasnosťou sústavy vyjadrenou v magnítudach a mierou emisie hmloviny (EM). Za predpokladu, že v danom fotometrickom páse prevláda svetlo hmloviny, prevedením toku žiarenia na magnítudy pomocou Pogsonovej rovnice, je možné ukázať, že, napríklad pre fotometrický pás U, platí

$$m_U = -2.5 \log(EM) + C_U, \quad (1)$$

kde konštanta C_U závisí od emisného koeficientu hmloviny a príspevku magnítudy 0. Jej vyjadrenie je odvodené v pôvodnej práci autora (Astronomy & Astrophysics, 366, 157-165 [2001]). Tento vzťah umožňuje rekonštrukciu svetelnej krivky zo spektroskopických pozorovaní, z ktorých vieme určiť mieru emisie hmloviny. Na Obr. 3 v hornom paneli sme takto odhadli B magnítudy z IUE spektier pre V1329 Cyg. V danom prípade bolo potrebné urobiť dodatočnú korekciu o konštantný príspevok obra v B filtri, ktorý mierne znížil amplitúdu. Vidíme, že súhlas medzi fotometrickými hodnotami magnítud a tými, určenými podľa vzťahu (1), je veľmi dobrý. Výsledok tak potvrdzuje jednoznačnú súvislosť medzi variáciami príspevku hmloviny a fotometrickými meraniami, najmä v U a B filtroch, v ktorých je žiarenie hmloviny najsilnejšie.

Poslednou otázkou zostáva, „čo je príčinou, že sa pozorovaný príspevok žiarenia hmloviny mení s orbitálnou fázou dvojhviezdy?“ Je pravdepodobné, že ide len

o zdanlivé zmeny emisie hmloviny, ktoré sú dôsledkom jej pozorovania z rôznych smerov orbitálnych fáz. To znamená, že časť prostredia, ktoré toto žiarenie produkuje, musí byť opticky hrubé. Ináč povedané, určitá časť hmloviny s najvyššími hustotami je nepriezračná pre fotóny, ktoré vznikajú vo väčších vzdialenostiach v smere pozorovania, teda ako keby ich zakrývala. Pokiaľ je hmlovina sféricky nesymetrická, ľahko si predstaviť, že množstvo takto „zakrývaného“ žiarenia bude závisieť na smere pozorovania, a tak vytvárať fázovo závislú moduláciu jasnosti sústavy. V rámci nášho jednoduchého ionizačného modelu (Obr. 3, pravý panel) sa opticky hrubá časť hmloviny bude rozkladať medzi horúcou hviezdou a hranicou ionizácie, kde možno očakávať najvyššie hustoty. Vieme totiž, že koeficient nepriezračnosti ionizovaného prostredia je úmerný koncentrácii častíc, ktorá v našom prípade klesá so štvorcom vzdialenosti od obra, ktorý tieto častice produkuje. V prípade rozsiahlych hmlovín bude opticky hrubá časť formovaná v tvare akéhosi klobúka vypuknutého v smere ku horúcej hviezde (Obr. 3). Takýto útvar bude zakrývať (utlmovať) najväčšie množstvo zvyšného žiarenia vo fáze 0 (t.j. keď dvojhviezdu pozorujeme zo strany obra) a najmenšiu časť vo fáze 0.5, keď je vpredu horúca hviezda, čo je v súhlase s fotometricky pozorovanými zmenami jasnosti. V prípade kompaktnej (uzavretej) hmloviny, môže byť maximum svetla v okolí $\varphi \sim 0.5$ veľmi široké, niekedy sa môže vytvoriť aj plytké sekundárne minimum (napr. AX Per, CI Cyg). Tento najjednoduchší idealizovaný prípad tvarovania hmloviny v symbiotickej sústave umožňuje kvalitatívne vysvetliť len najzreteľnejšie rysy svetelných kriviek, ako práve popísanú vlnovú variáciu. Presná ionizačná štruktúra symbiotickej sústavy, ktorá by zahŕňala efekt rotácie a gravitačného pôsobenia horúcej hviezdy, zatiaľ nebola teoreticky skúmaná. Z pozorovaní vieme, že pri prechode z pokojnej do aktívnej fázy a opačne, dochádza ku drastickým zmenám vlastností hmloviny (viď Rozprava I.). Okrem výraznej zmeny profilu miním – zo širokých na úzke a opačne – bol objavený aj efekt systematickej zmeny polôh miním. V nasledujúcej kapitole si tento efekt bližšie vysvetlíme.

4. Zdanlivé zmeny orbitálnych periód

Všeobecne, tvar a poloha minima v svetelnej krivke sú určené geometriou a rozložením hlavného zdroja optického žiarenia v zákrytovej dvojhviezde. Pre dvojhviezdy so slabou interakciou je tento zdroj identický s fotosférou svietivejšej zložky. V prípade symbiotických hviezd je dominantným zdrojom viditeľného svetla (najmä v pokojných fázach) hmlovina, ktorej najsvietivejšie časti sú lokalizované medzi obrom a horúcou hviezdou, a ktorej štruktúra sa výrazne mení počas aktívnych fáz. Preto možno očakávať výrazné zmeny ako tvaru tak *polohy* miním. Tieto efekty sú najzreteľnejšie u zákrytových symbiotických sústav. V kapitole 2 sme popísali zmeny širokých miním vlnového profilu na úzke minimá v dôsledku tvorby falošnej fotosféry počas aktívnych fáz. Systematické zmeny v ich polohách ukážeme na svetelnej krivke BF Cyg, ktorá pokrýva obdobie pred, počas a po vzplanutí. Obrázok 4 ukazuje O – C diagram pre pozorované minimá. Vidíme, že časové rozdiely medzi pozorovanými (O) a predpovedanými (C) okamihmi miním dosahujú až 60 dní, čo je takmer 0.1 orbitálnej fázy. Pre výpočet polôh miním sme použili efemeridu s priemernou periódou 757.3 dní, určenú zo všetkých dostupných miním historickej svetelnej krivky monitorovanej od roku 1890. Je pravdepodobné, že takto určená perióda bude odpovedať reálnej orbitálnej periódke zložiek dvojhviezdy. Skutočne, pred nedávnom, americký astronóm Fekel so spolupracovníkmi určil pre

BF Cyg orbitálnu periódu 757.2 dní a to úplne nezávisle z radiálnych rýchlostí červeného obra. Pokiaľ by sme k určeniu periódy použili polohy minim meraných v rokoch 1991, 1993 a 1995, zistili by sme periódu len 730 dní, ktorá tak predstavuje *zdanlivú* orbitálnu periódu. Nakoľko úzke minimum nastáva presne v dolnej konjunkcii obra (zakrýva sa falošná fotosféra horúcej hviezdy), nasledovné široké minimum, ktorých poloha indikuje kratšiu periódu, nastávajú ešte pred konjunkciou. V tomto prechodnom období, z aktívnej do pokojnej fázy, sa falošná, relatívne chladná fotosféra postupne rozplýva (expanzia je zreteľná zo spektroskopických pozorovaní), čo spôsobuje zvyšovanie teploty horúceho objektu, a tak aj produkcie ionizujúceho žiarenia. Dôsledkom tohto procesu sa príspevok hviezdneho žiarenia v optickej oblasti spektra znižuje, a naopak narastá príspevok hmloviny. Hlavný zdroj viditeľného svetla sa fyzicky presúva z blízkeho okolia horúcej hviezdy do širokého okolo-hviezdneho priestoru, t.j. poloha minima sa presúva mimo čas konjunkcie, podľa toho ako sú formované oblasti hmloviny s najvyššou hustotou. Pri opačnom prechode, z pokojnej do aktívnej fázy, sa falošná fotosféra vytvorí relatívne rýchlo, teda aj zmena polohy minima je náhla, a znamená zdanlivé predĺženie periódy (viď pozorovanie pred hlavným vzplanutím BF Cyg na Obr. 4). Tento efekt zároveň naznačuje, že hmlovina nie je osovo symetrická tak, ako ukazuje Obr. 3 pre stacionárny prípad, pre ktorý by minimum nastávali presne v konjunkcii, a teda žiadnu zdanlivú zmenu periódy by sme nemohli neregistrovať. Je pravdepodobné, že v dôsledku rotácie dvojhviezdy bude hranica ionizácie v rovine dráhy stočená do písmena „S“, idúca zo strany horúcej hviezdy, ktorá predchádza jej orbitálnemu pohybu, cez spojnicu zložiek na stranu chladného obra oproti jeho pohybu (Obr. 4). Takéto tvarovanie je podporované spektro-polarimerickými meraniami alebo aj hydrodynamickými výpočtami zrážky hviezdnych vetrov, ktoré ukazujú na prítomnosť hustej zrážkovej zóny podobného tvaru. V takom prípade možno očakávať, že najhustejšie, a teda najsvietivejšie oblasti takto tvarovanej hmloviny budú na jej čelnej strane pred horúcou hviezdou, ktorá je v dôsledku orbitálneho pohybu obohacovaná o častice vetra obra (ako keby „zametala“ častice vetra). Potom najvyššiu optickú hrúbku a najmenší geometrický priemet v smere pozorovania bude mať hmlovina v polohách *pred* konjunkciou ($\varphi \sim 0.9$) – v svetelnej krivke budeme pozorovať minimum. V ostatných fázach sa priemet hmloviny do smeru pozorovania bude zvyšovať, jej optická hrúbka znižovať a množstvo registrovaného svetla hmloviny narastať. V niektorých prípadoch sa pozorujú aj sekundárne minimum komplikovaných profilov, ktorých príčinou môže byť zvýšená nepriezračnosť hmloviny v okolí fáze 0.5 (Obr. 4, spodný panel). Kvantitatívny model optických vlastností hmloviny, ktorý by zahŕňal aj gravitačné pôsobenie horúcej hviezdy nebol zatiaľ vypracovaný. Podrobnejší popis podstaty zdanlivých zmien orbitálnych períod v symbiotických dvojhviezdach je uvedený v pôvodnej práci autora publikovanej v časopise *Astronomy & Astrophysics*, 338, 599-611 (1998).

Záverom by som poznamenal, že dlhodobé pozorovanie vybraných symbiotických sústav na observatóriách AsÚ SAV patrí k jeho nosným projektom. Z hľadiska celosvetovej astronómie ide o ojedinelý projekt lebo jeho splnenie vyžaduje systematické meranie na časových škálach desiatok rokov, čo pre veľké observatóriá s obmedzeným pridelovaním pozorovacieho času je nespĺniteľná podmienka. Svetelné krivky najobľúbenejších symbiotík autora budú diskutované individuálne. V nasledujúcej časti „Rozpravy o symbiotických hviezdach“ si predstavíme efekty Raman–Rayleighovho rozptylu.

Augustin Skopal

Obrázok 1. Svetelné krivky BF Cyg a AG Dra v U a V filtroch. Zákrytová sústava BF Cyg ukazuje počas aktivity relatívne úzke minimum – zákryt (označený E) a počas pokoja výraznú vlnovú variáciu s amplitúdou $\Delta U \sim \Delta V \sim 1.5$ mag. Žltá symbiotická hviezda AG Dra nie je zákrytová. Amplitúdy jej vlnových variácií sú výrazne rozdielne: $\Delta U \sim 1$ mag, $\Delta V \sim 0.1$. Spodné panely ukazujú rozdelenie energie v oblasti UVB filtroch, ktoré vysvetľuje pozorované rozdiely vlnových variácií (viď text).

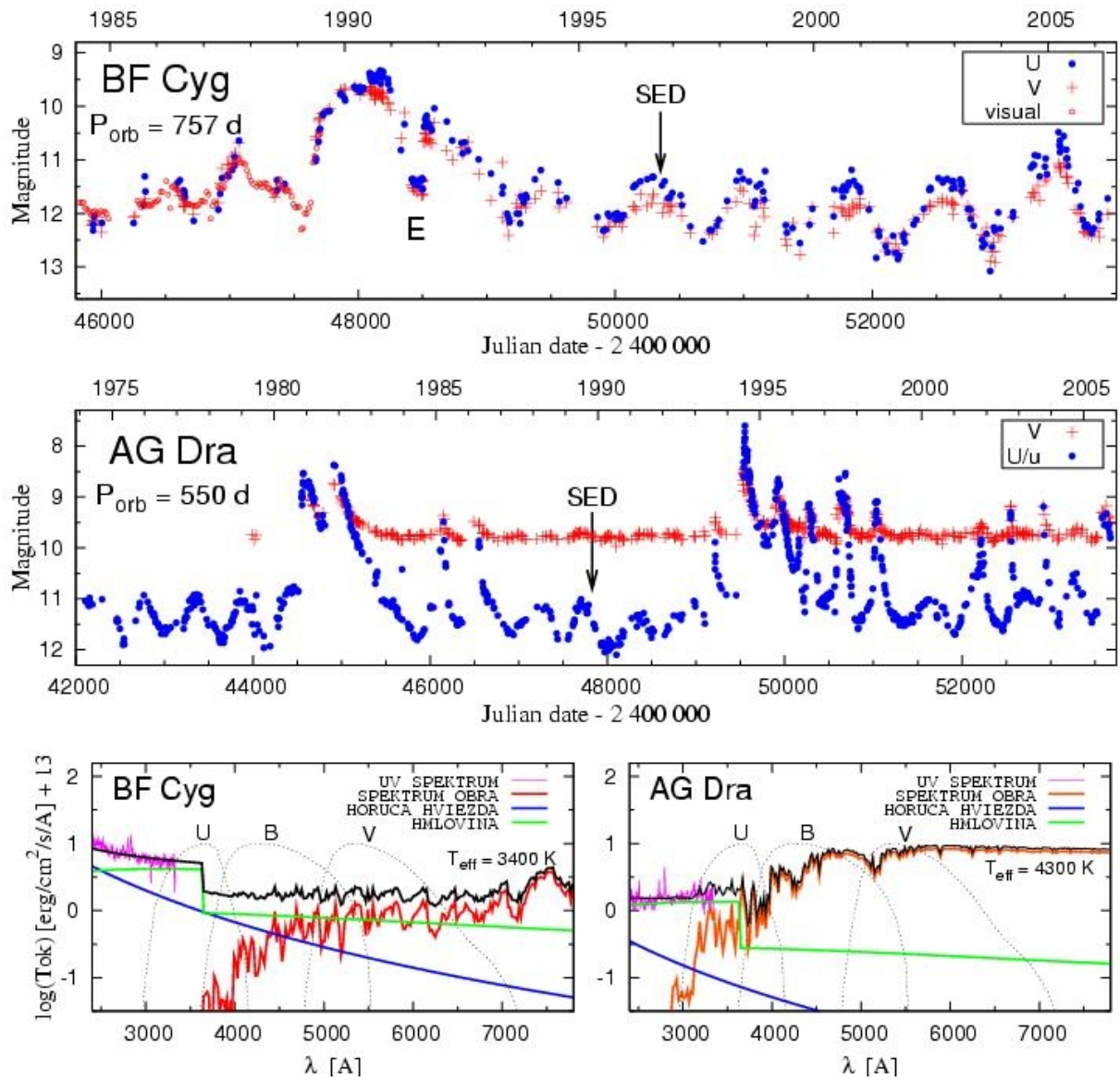
Obrázok 2. Ľavý panel: Schéma efektu odrazu (zanedbáva vplyv ionizácie hviezdneho vetra obra). Pravý panel: Hranice ionizácie (HII/HI) hviezdneho vetra chladného obra pre silný (hrubá plná čiara), priemerný (prerušovaná čiara) a slabý (bodkovaná čiara) zdroj ionizujúcich fotónov (t.j. horúca hviezda). Opticky hrubá časť pre prvý prípad je znázornená sivou časťou.

Obrázok 3. Vlnové, orbitálne viazané variácie v svetelných krivkách spôsobuje variácia žiarenia hmloviny. V dolnej ($\varphi \sim 0$) a hornej ($\varphi \sim 0.5$) konjunkcii obra sú zmeny príspevku hmloviny najvýraznejšie. Jasnosti odvodené z odpovedajúcich IUE spektier (\blacktriangle) perfektne súhlasia s fotometrickými magnitúdami (Δ).

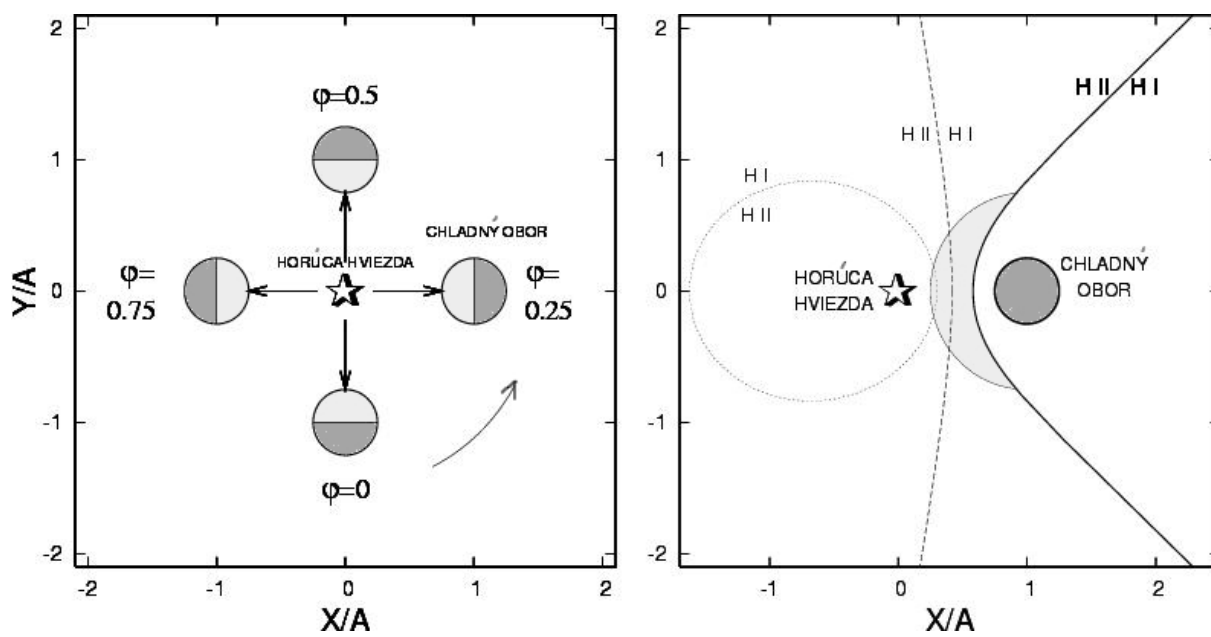
Obrázok 4. Svetelné krivky BF Cyg pokrývajúce obdobie posledného vzplanutia. Počas prechodu z maxima do pokojnej fázy O-C diagram indikuje zdanlivú periódu len 730 dní (epochy E = 49, 50, 51). Pred vzplanutím dochádza k náhlej zmene polohy minima v dôsledku vytvorenia sa falošnej fotosféry; perióda (t.j. časový rozdiel okamihov miním) sa predĺži. Neurčitosti polôh miním sú menšie ako ± 20 dní (E=47). Spodný panel znázorňuje schému ionizačnej hranice so zahrnutím efektu orbitálneho pohybu dvojhviezdy. Počas pokojnej fázy je opticky hrubá časť hmloviny (t.j. HII oblasť) nesymetrická s osou dvojhviezdy a má pozdĺžny tvar (sivá časť) – minimum svetla pozorujeme *pred* konjunkciou ($\varphi \approx 0.9$). Počas aktivity sa štruktúra hmloviny výrazne mení. Hlavným zdrojom optického svetla je falošná fotosféra – v svetelnej krivke pozorujeme zákryt *v polohe* konjunkcie ($\varphi = 0$).

Tabuľka 1. Prehľad hlavných variácií pozorovaných v svetelných krivkách symbiotických hviezd.

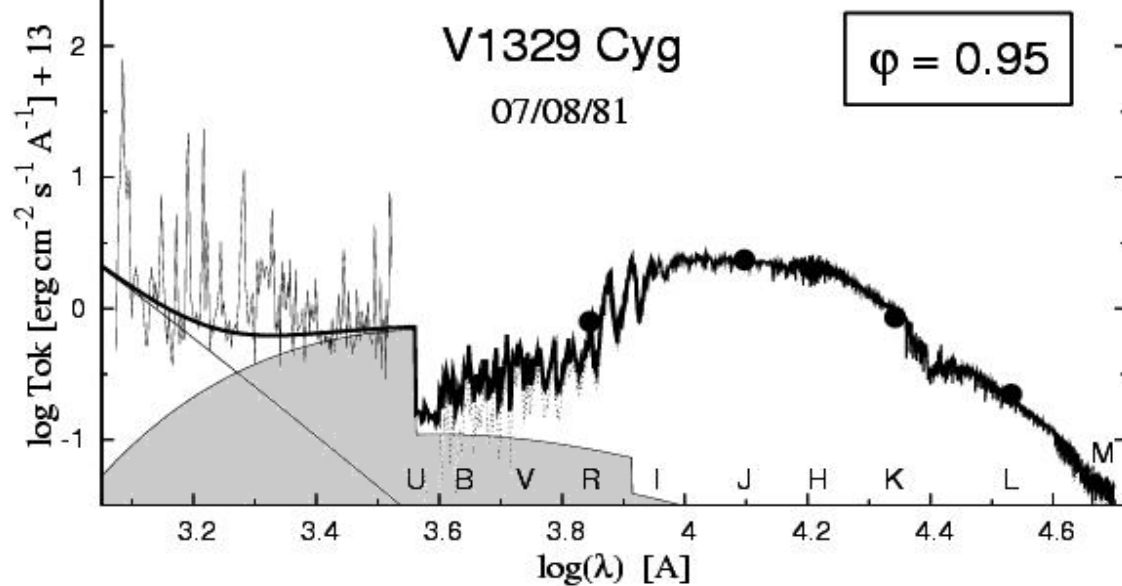
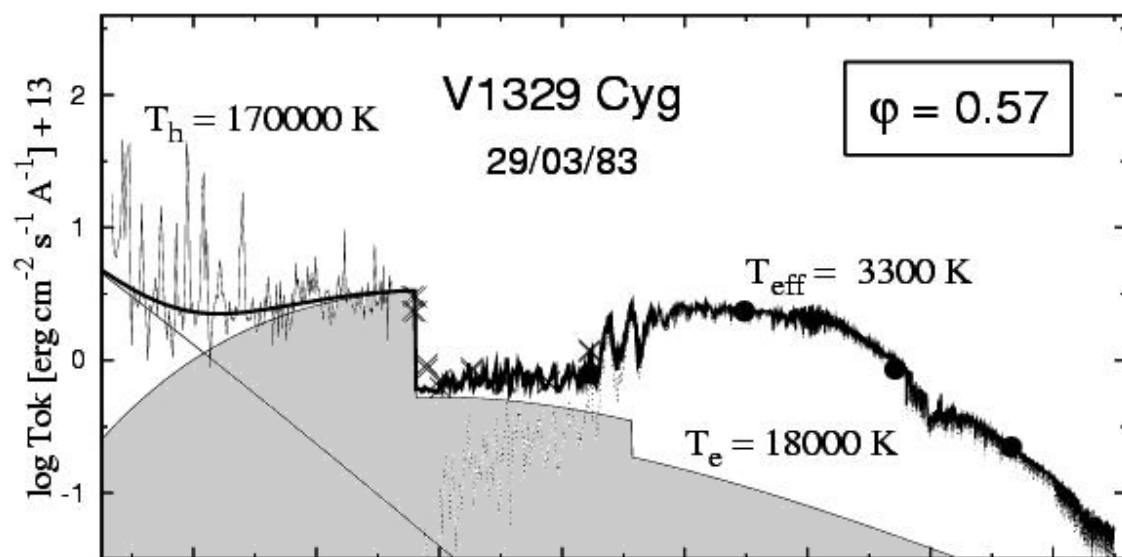
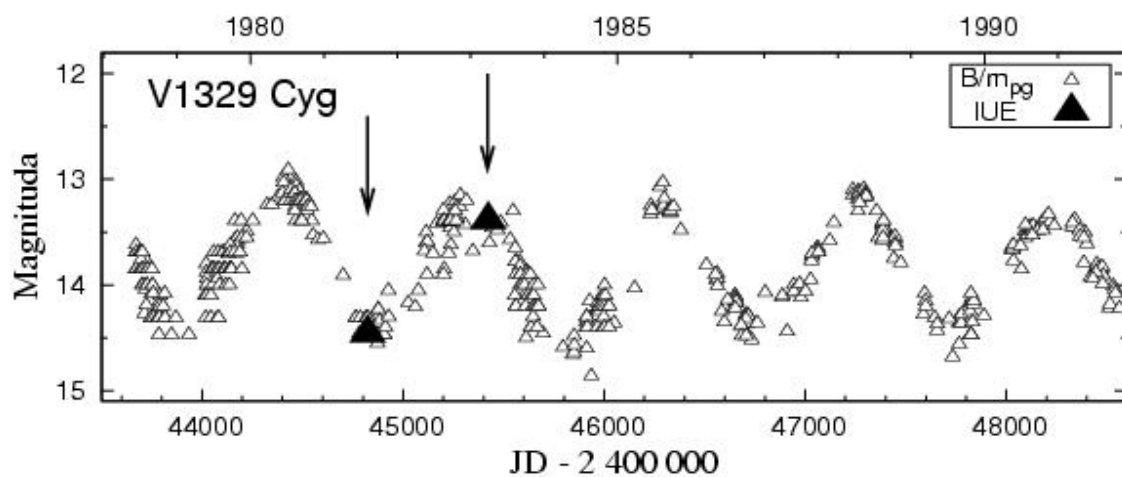
Obrázok 1.



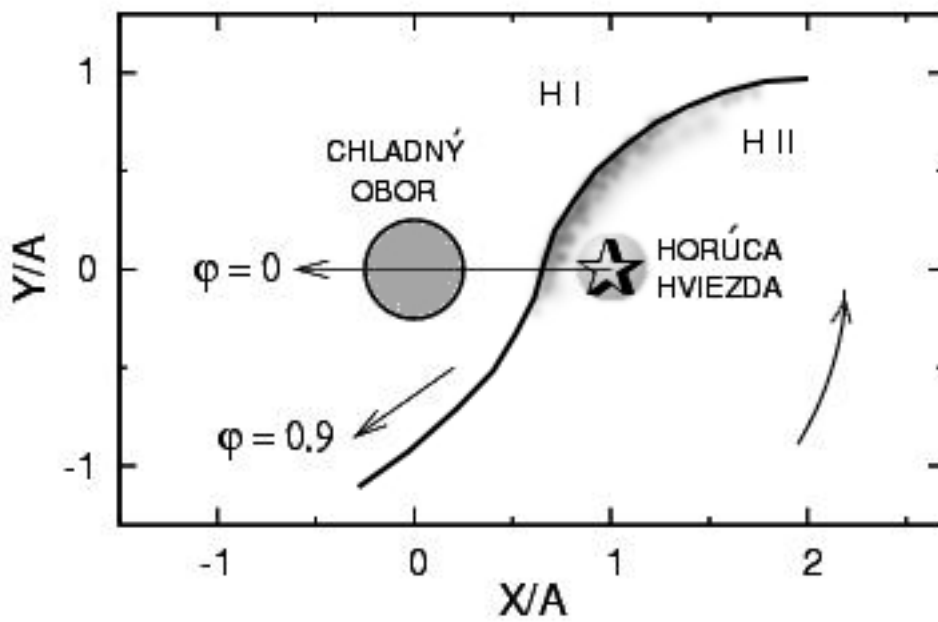
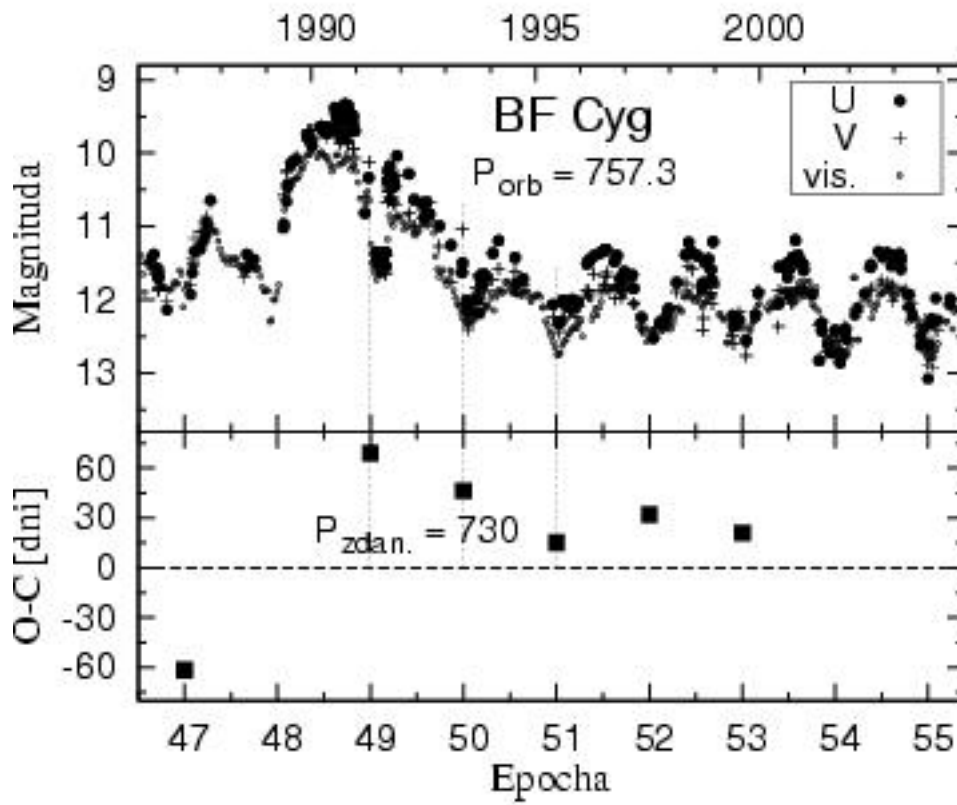
Obrázok 2.



Obrázok 3.



Obrázok 4.



Tabuľka 1.

Typ premennosti	Príklady	Interpretácia
A. Periodická		
Úzke minimá	AR Pav, AX Per, CI Cyg, BF Cyg, CH Cyg, YY Her	<ul style="list-style-type: none"> ● Zákryt horúceho objektu chladným obrom
Vlnová variácia	<i>P o k o j n á f á z a</i>	
(i) $P \approx P_{orb}$	Z And, AG Peg, BF Cyg, AG Dra, V443 Her, ...	<ul style="list-style-type: none"> ● Opticky hrubá H II zóna, ● „Efekt odrazu“
	<i>A k t í v n a f á z a</i>	
	AR Pav, AX Per, AS 296	<ul style="list-style-type: none"> ● Zrážková oblasť v blízkosti červeného obra, ● Precesia akrečného disku
(ii) $P \approx 0.5 \times P_{orb}$	T CrB, BD-21°3873, He2-467, EG And, YY Her, (CI Cyg)	<ul style="list-style-type: none"> ● Slapová deformácia obra, ● Opticky hrubá H II zóna, ● Okultácia horúcim objektom
(iii) $P \neq P_{orb}$	CH Cyg, AG Dra, Symbiotické miridy	<ul style="list-style-type: none"> ● Pulzácia obra
B. Nepravidelná		
<u>Krátkodobé:</u>		
- flickering	T CrB, CH Cyg	<ul style="list-style-type: none"> ● Horúca škvrna (?)
- niekoľkonásobné zjasnenia	AG Dra, Z And	<ul style="list-style-type: none"> ● Nestabilita AD, ionizácia (?)
<u>Dlhodobé:</u>		
vzplanutia	Symbiotické novy	<ul style="list-style-type: none"> ● Termonukleárne horenie