

Rozprava o symbiotických hviezdach: IV. Hviezdne vetry

Čo je to hviezdny vietor?

Okrem elektromagnetického žiarenia, t.j. fotónov, hviezdy emitujú aj častice. Tok častíc do okolitého priestoru sa všeobecne nazýva *hviezdny vietor*. Najdôležitejšie parametre hviezdneho vetra, ktoré môžeme určiť z pozorovaní, je tempo straty hmoty, označované v literatúre ako \dot{M} (čítame ako "M-dot") a tzv. terminálová (t.j. konečná, a aj maximálna) rýchlosť vetra, ktorá sa označuje ako v^∞ . Parameter \dot{M} predstavuje množstvo hmoty, ktoré hviezda stratí za jednotku času. Zvyčajne ho vyjadrujeme v jednotkách hmotnosti Slnka za rok (1 M_\odot /rok = 6.3×10^{25} g/s). Napríklad, $\dot{M} = 10^{-6}$ M_\odot /rok, čo nie je až tak vysoká hodnota, znamená, že hviezda stratí hmotu odpovedajúcej hmotnosti našej Zeme behom troch rokov. Terminálová rýchlosť v^∞ sa pohybuje v rozmedzí približne od 10 km/s pre chladných superobrov až po 3 000 km/s pre horúce hviezdy s vysokou svietivosťou. Za predpokladu stacionárneho sféricky symetrického vetra je strata hmoty daná jeho hustotou $\rho(r)$ a rýchlosťou $v(r)$ v ľubovoľnom mieste „r“ od stredu hviezdy *rovnica kontinuity* ako

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho(r) v(r) \quad (= \text{konštanta}). \quad (1)$$

Táto rovnica vyjadruje skutočnosť, že hmotu sa vo hviezdnom vetre nemôže ani vytvárať ale ani strácať, jednoducho sa len prenáša od svojho zdroja. To znamená, že množstvo častíc vetra, ktoré sa za časovú jednotku prenesie cez ľubovoľnú sféru o polomere r okolo centrálnej hviezdy, je konštantné. Vzťah (1) možno aj jednoducho odvodiť, keď si predstavíme sférickú vrstvu s polomerom r a hrúbkou dr okolo hviezdy. Jej objem je $dV = 4\pi r^2 dr$, a teda hmotnosť $dM = dV \times \rho(r) = 4\pi r^2 dr \times \rho(r)$. Podelením časovým intervalom dt potom dostaneme vyššie uvedenú rovnicu kontinuity (vieme, že $dM/dt = \dot{M}$ a $dr/dt = v(r)$). Plyn, ktorý uniká z vonkajších vrstiev hviezdy, je urýchľovaný od malých rýchlostí pri povrchu hviezdy ($v \leq 1$ km/s) ku vysokým rýchlostiam vo veľkých vzdialenostiach od centra hviezdy, kde častice vetra asymptoticky dosahujú terminálovú rýchlosť, v^∞ (keď $r \rightarrow \infty$). Rozdelenie rýchlostí častíc vetra s radiálnou vzdialenosťou od hviezdy sa volá *zákon rýchlostí*, $v(r)$. Pozorovania a modelovanie hviezdnych vetrov ukazujú, že zákon rýchlosti môže byť často približne vyjadrený tzv. β -zákonom v tvare

$$v(r) = v^\infty (1 - R_*/r)^\beta. \quad (2)$$

Táto funkcia všeobecne popisuje, ako rýchlosť častíc hviezdneho vetra narastá so vzdialenosťou od svojho počiatku pri hviezdnej fotosfére, R_* ($v(R_*) = 0$) až po maximálne hodnoty vo veľkých vzdialenostiach, kde $v = v^\infty$. Parameter β potom popisuje, ako rýchlo hviezdny vietor dosiahne svoju terminálovú rýchlosť. Ináč povedané, vyjadruje strmlosť funkcie $v(r)$. Obrázok (1) ilustruje zákon rýchlosti pre horúce, veľmi svietivé hviezdy ($\beta \approx 0.8$) a pre chladných obrov ($\beta \approx 2.5$). V nasledujúcej kapitole si vysvetlíme, ako sa vlastne hviezdny vietor v spektrách hviezd prejavuje.

Ako hviezdny vietor indikujeme?

Z historického hľadiska je najznámejším a aj najvýraznejším prejavom hviezdneho vetra v spektrách hviezd, tzv. P-Cygni typ profilu spektrálnych čiar. Názov súvisí s objavom vzplanutia hviezdy v súhvezdí Cygnus v roku 1600, keď táto hviezda (neskoršie bola pomenovaná ako P Cygni) dosiahla jasnosti 3. magnitúdy. Koncom 19. storočia hranolové spektrá tejto hviezdy odhalili prítomnosť špeciálneho typu profilu spektrálnych čiar, ktorý pozostával z emisnej zložky posunutej smerom k dlhším vlnovým dĺžkam od centra čiary a v opačnom smere, ku kratším vlnovým dĺžkam, postupne prechádzal do absorpčnej zložky. Tento typ profilu spektrálnych čiar sa neskoršie ukázal spoločným predovšetkým pre horúce hviezdy s vysokou svietivosťou a bol pozorovaný aj pri vzplanutiach klasických nov. Po svojom predstaviteľovi bol pomenovaný ako P-Cygni typ profilu (alebo jednoducho, P-Cyg profil).

Podstatou vzniku takého profilu je prenos spojitého žiarenia, produkovaného fotosférou centrálnej hviezdy (kruh S na Obr. 2), cez expandujúce prostredie v jej okolí, napr. hviezdny vietor. Najprv si však pripomeňme najdôležitejšie procesy, ktoré sa uplatňujú pri formácii spektrálnych čiar vo hviezdnom vetre – *rozptyl v čiare* a čiarová emisia v dôsledku *rekombinácie* iónu s voľným elektrónom. V prvom prípade, pri absorpcii fotónu s atómom, dochádza k excitácii elektrónu do (energeticky) vyššej hladiny a k jeho takmer okamžitému návratu späť do pôvodnej hladiny (typicky za 10^{-10} až 10^{-9} sekundy), pričom sa vyžiari fotón tej istej energie ako pôvodne pohltý, avšak do hoc akého smeru. Keďže si fotón zachováva svoju identitu (t.j. energiu, čiže frekvenciu) a mení len smer svojho pohybu, nazývame tento proces rozptylom. V druhom prípade, pri zrážke ionizovaného atómu (iónu) s voľným elektrónom, dochádza k jeho opätovnému naviazaniu (z angličtiny, k „rekombinácii“) do určitej energetickej úrovne, z ktorej postupne prechádza do nižších hladín až do základného stavu. Pri každom prechode sa vyžiari fotón odpovedajúci určitej spektrálnej čiare. Prechody elektrónov medzi hladinami s veľmi vysokou pravdepodobnosťou potom produkujú intenzívne emisné čiary. Napríklad, proces rekombinácie je hlavným zdrojom extrémne silnej čiary H α v spektrách symbiotických hviezd.

Schéma, ako sa P-Cygni profil môže vo hviezdnom vetre vytvoriť, je ukázané na Obr. 2. Vo vonkajších hemisférach hviezdneho vetra (oblasti H na Obr. 2) dochádza k rozptylu fotónov hviezdnej fotosféry do všetkých smerov, časť aj do smeru k pozorovateľovi. Navyše, významnou mierou v intenzívnych čiarach prispieva aj emisia fotónov v dôsledku rekombinácie. Podľa Dopplerovho princípu, budú svetelné príspevky častí hviezdneho vetra s rovnakou rýchlosťou voči pozorovateľovi (t.j. rovnakou radiálnou rýchlosťou) prispievať v odpovedajúcej vlnovej dĺžke. Keďže radiálne rýchlosti častíc hviezdneho vetra nadobúdajú hodnoty medzi $-v^\infty$ a $+v^\infty$, bude výsledný emisný profil veľmi široký (pravý panel obrázku 2 hore). V oblasti „P“ pred hviezdou v smere k pozorovateľovi sa fotóny fotosféry budú na časticiach vetra rozptyľovať, lebo tu dosahujú najvyšších stĺpcových hustôt. Tento proces tak odstráni časť žiarenia hviezdy zo smeru pozorovania, čo sa v spektrálnej čiare prejaví vykrojením spojitého žiarenia (kontinua) produkovaného hviezdou fotosférou. Táto absorpčná zložka však nedosiahne nulové hodnoty toku žiarenia, lebo (malá) časť rozptýlených fotónov je smerovaná aj k pozorovateľovi. Keďže plyn vetra v oblasti „P“ sa pohybuje len ku pozorovateľovi a nadobúda hodnôt medzi 0 a v^∞ , bude

absorpčná zložka rozšírená od $-v^\infty$ do 0 km/s (pravý panel obrázku 2 v strede). Výsledný profil, ktorý je jednoduchým súčtom príspevkov z oblastí pred hviezdou (S + P) a oblastí hala (H), je P-Cygni profil. Ako bude výsledný P-Cyg profil presne vyzeráť, závisí predovšetkým na mohutnosti hviezdneho vetra, teda na \dot{M} . Vyššie hodnoty straty hmoty znamenajú väčší počet rozptyľovačov v smere pohľadu, ktoré tak spôsobí silnejšiu absorpčnú zložku profilu, a opačne, pre slabý hviezdny vietor môže byť absorpcia sotva merateľná. Je zrejmé, že aj vlastnosti daného prechodu budú výrazne ovplyvňovať pozorovaný výsledok. Najcitlivejšími indikátormi hviezdneho vetra sú tzv. rezonančné čiary, v ktorých sa elektrón z prvého excitovaného stavu vracia do základného stavu. Tieto prechody sú veľmi pravdepodobné, a preto aj pre menšie hodnoty odtoku hmoty môže byť v ich profile prítomná slabá absorpčná zložka. Príkladom sú rezonančné čiary v ultrafialovej časti spektra, napríklad, C IV 1550 Å alebo O VI 1032 Å. Podobne aj veľkosť a štruktúra zdroja spojitého žiarenia môže výrazne ovplyvňovať výsledný profil.

Čo hviezdny vietor poháňa?

Najvýznamnejším a aj najprirodzenejším mechanizmom akcelerácie hviezdneho vetra je tlak žiarenia, ktoré vychádza z hviezdnej fotosféry smerom von. Pri prechode cez rozpínajúce sa prostredie hviezdneho vetra dochádza k interakcii fotónov s časticami, ktoré im predávajú časť svojho momentu hybnosti, a tak ich urýchľujú v radiálnom smere. Keďže táto interakcia spôsobuje najmä diskkrétne (absorpčné) prechody v atómoch vetra, hovoríme o urýchľovaní hviezdneho vetra tlakom žiarenia v čiarach (v angličtine sa používa termín *line driven winds*).

Pokúsme sa tento proces trochu vysvetliť. V spodných vrstvách atmosfér horúcich hviezd sa vytvára veľké množstvo absorpčných čiar. To znamená, že žiarenie fotosféry bude v určitých čiarach absorbované (alebo rozptýlené) už v spodných vrstvách, a tak vonkajšie vrstvy nebudú ožarované priamo z fotosféry fotónmi odpovedajúcich prechodov. To by však viedlo k útlmu urýchľovania vonkajších vrstiev, lebo stále menej a menej fotosférických fotónov daného prechodu by bolo k dispozícii vo väčších vzdialenostiach. Ako potom tento mechanizmus funguje? Sila žiarenia na atómy (ióny) v dôsledku ich spektrálnych čiar by nebola účinná pri akcelerácii hviezdneho vetra keby neexistoval Dopplerov efekt. V každej atmosfére je totiž určitý gradient rýchlostí (t.j. rozdiely rýchlostí v radiálnom smere od fotosféry), napríklad už tým, že tlak plynu narastá s hustotou ($P=NkT$). V takom prípade vonkajšie vrstvy, ktoré sa pohybujú v radiálnom smere rýchlejšie než vrstvy spodnejšie (t.j. vzdávajú sa od fotosféry väčšou rýchlosťou), budú v dôsledku Dopplerovho efektu „vidieť“ fotosférické fotóny posunuté viac do červena než vrstvy spodnejšie, ktoré sa od fotosféry vzdávajú pomalšie. To znamená, že atómy z vonkajšej atmosféry budú môcť absorbovať v danej spektrálnej čiare fotóny priamo z fotosféry, ktoré nie sú utlmené vrstvami medzi fotosférou a vonkajšou atmosférou. Pre horúce hviezdy, ktoré produkujú veľké množstvo vysoko-energetických fotónov, je akceleračný mechanizmus v spektrálnych čiarach veľmi účinný. Je treba mať na pamäti, že hviezdny vietor je plazma. Takže aj keď proces urýchľovania je najúčinnnejší v rezonančných čiarach prvkov C, N, O a skupín prvkov Fe, ich ióny interagujú s voľnými elektrónmi a ostatnými iónmi, hlavne vodíka a hélia, predávajú im časť nadobudnutého momentu hybnosti, a tak vyhánajú von všetky častice atmosféry vo forme hviezdneho vetra. Súhrnom, hviezdny vietor horúcich (super) obrov spektrálnych typov O a B dosahuje vysokých terminálových rýchlostí okolo

3000 km/s v relatívne malých vzdialenostiach od povrchu, zatiaľ čo chladný obri spektrálneho typu M až K urýchľujú svoj vietor oveľa pomalšie, a to k maximálnym rýchlostiam len okolo 10 až 50 km/s (Obr. 1, 3).

Hviezdne vetry v symbiotických hviezdach

(a) *Hviezdny vietor chladných obrov.*

Jeho prítomnosť v symbiotických hviezdach je najzákladnejšou podmienkou vzniku symbiotického javu. V Rozprave I sme si vysvetlili jeho princíp fungovania – akrácie časti hviezdneho vetra kompaktným súputníkom, jeho zohriatie na extrémne teploty s následnou ionizáciou častíc neutrálneho vetra, čo dáva vznik intenzívnemu žiareniu hmloviny. Stručne povedané, keby chladní obri nefúkali svoj vietor, symbiotické hviezdy by neexistovali. Priama indikácia hviezdneho vetra obra v spektre je však obťažná, lebo jeho žiarenie pri nízkych efektívnych teplotách okolo 3 500 K takmer nie je schopné vietor ionizovať a navyše maximálne rozdiely rýchlostí jednotlivých častí vetra (t.j. protihľých častí) sa pohybujú tak do 50 až 100 km/s. To znamená, že emisné čiary budú úzke, a ich tvorba bude viazaná len na tu časť vetra obra, ktorá je ionizovaná žiarením horúcej hviezdy. Skutočnosť, že symbiotická hmlovina v pokojných fázach je vlastne len ionizovaná časť hviezdneho vetra obra, bola nezávisle potvrdená diagnostikou čiarového spektra hmloviny. Nussbaumer so spolupracovníkmi totiž zistili, že pomerné zastúpenie prvkov uhlíka, dusíka a kyslíka je veľmi blízke tomu, ktoré sa bežne pozoruje pre normálnych červených obrov. V červenej oblasti spektra, kde vplyv hmloviny je minimálny (približne VRI oblasť a ďalej), pozorujeme veľké množstvo absorpčných čiar. Väčšina z nich (hlavne kovov) však vzniká v najhustejších vrstvách atmosféry obra, ktoré nám o kinematike vetra veľa nepovedia, nakoľko odrážajú len orbitálny pohyb hviezdy. Určité možnosti nám poskytuje vodíková čiara $H\alpha$, ktorá patrí v optickom spektre symbiotických hviezd k najsilnejším. Často v jej emisnom jadre pozorujeme slabú absorpčnú zložku, ktorej pozícia zotrváva rovnaká v rôznych orbitálnych fázach a vždy je posunutá ku kratším vlnovým dĺžkam (Obr. 3). Tieto vlastnosti ukazujú na to, že sa táto absorpcia môže tvoriť v hviezdnom vetre, ktorý sa nachádza medzi pozorovateľom a hviezdny diskom – zdrojom vetra (t.j. oblasť P na Obr. 2). Efekt je najvýraznejší pre zákrytové sústavy v okolí spodnej konjunkcie obra (teda počas zákrytov), lebo v týchto pozíciách sa medzi pozorovateľom a fotosférou obra nachádza najväčšie množstvo neutrálneho vodíka. Posunutie absorpcie v spektre (t.j. radiálna rýchlosť po odčítaní rýchlosti orbitálneho pohybu a ťažiska sústavy) je blízka terminálovej rýchlosti hviezdneho vetra obra. Táto absorpcia je však relatívne slabá, takže nevytvára typický P-Cyg profil. Na Obr. 3 sú ukázané príklady pre zákrytové sústavy YY Her, CI Cyg, Z And a RW Hya počas ich pokojných fáz. Z obrázku je vidno, že terminálové rýchlosti dosahujú hodnôt menších než 50 km/s.

Aj hodnoty tempa straty hmoty hviezdny vetrom obra možno určiť na základe znalosti, že symbiotická hmlovina v pokojných fázach predstavuje jeho ionizovanú časť. Princíp je taký, že určíme teoretické hodnoty celkovej emisie hmloviny, ktoré porovnáme s pozorovanými (napr. z rozdelenia energie, ako sme diskutovali v Rozprave I). Predpokladá sa, že hviezdny vietor je sféricky symetrický a rozdelenie hustôt a rýchlostí jeho častíc v ľubovoľnej vzdialenosti od povrchu obra je dané hore uvedenými vzťahmi (1) a (2). Majúc k dispozícii pozorované množstvo hmlovinného žiarenia v spojitom spektre (tzv. mieru emisie, EM, vid' Rozprava I), a za predpokladu určitých vlastností takého vetra (napr.: $\beta=2.5$, $v^\infty=20$ km/s), možno určiť tempo

straty hmoty, \dot{M} , porovnaním teoretickej a pozorovanej emisie vetra. Týmto spôsobom bolo zistené, že chladní obri v symbiotických hviezdach strácajú časť svojej hmoty s tempom medzi 10^{-7} až 10^{-6} hmotností Slnka za rok. Tieto hodnoty boli potvrdené aj nezávislým spôsobom pomocou rádiových pozorovaní. Žiarenie hmloviny je totiž v rádiovkej oblasti vlnových dĺžok (približne od desiatín milimetra až po desiatky centimetrov) relatívne intenzívne a navyše tu predstavuje jediný zdroj žiarenia (fotosféra obra, a samozrejme ani horúca hviezda tu prakticky nesvietia). Preto je rádiová emisia symbiotických hviezd dobre merateľná, čo sa využíva k určovaniu vlastností hmloviny. Obrázok 4 ukazuje porovnanie hodnôt \dot{M} , určených nezávisle rôznymi autormi a metódami. Súhlas je uspokojivý. Navyše sa ukazuje, že veľkosť straty hmoty je funkciou svietivosti horúcej zložky – väčší odtok hmoty z chladnej zložky odpovedá vyššej svietivosti zložky horúcej. Tejto závislosti zatiaľ dobre nerozumieme. Ako pracovná hypotéza sa uvažuje možnosť, že ožarovaním privrátenej časti vonkajšej atmosféry obra horúcou hviezdou sa zvýši jej gradient rýchlostí – urýchľovací mechanizmus sa stane efektívnejší – následkom čoho sa zvýši aj tempo straty hmoty, a teda aj jej akrecie na horúcu hviezdu, ktorá potom o to viac začne svietiť. Kvantitatívne odhady zatiaľ neboli urobené.

Pred úvahami o hviezdnom vetre horúcej hviezdy zopakujeme, že v pokojných fázach je emisia ionizovaného vetra obrej zložky v symbiotickej dvojhviezde rozhodujúcou zložkou hmlovinného žiarenia. Príspevok emisie hviezdneho vetra horúcej hviezdy je minimálne rádovo nižší. Počas aktívnych fáz sa však táto situácia dramaticky mení.

(b) *Hviezdny vietor horúcich zložiek*

Počas aktívnych fáz symbiotických dvojhviezd sa výrazne zosilňuje. Tempo straty hmoty horúcou hviezdou môže prechodne nadobudnúť hodnoty, ktoré aj viac ako 10 násobne prevyšujú stratu hmoty červeným obrom. Vzhľadom na extrémne vysokú teplotu centrálnej hviezdy (10^5 K) bude jej vietor ionizovaný, čo nasledovne výrazne zmení vlastnosti symbiotickej hmloviny – ako geometrické tak fyzikálne. Emisné príspevky takého vetra sa stanú rozhodujúcimi pre nový symbiotickú hmlovinu v aktívnych fázach. Opačne, príspevok ionizovanej časti vetra obrej zložky sa v spektre (prakticky) neprejaví. Avšak jeho masívny pomalý vietor môže zohrávať dôležitú úlohu pri zrážke s rýchlym vetrom horúcej hviezdy.

Hlavnou indikáciou hviezdneho vetra horúcej zložky v spektrách symbiotických hviezd sú profily emisných čiar. Už začiatkom osemdesiatych rokov minulého storočia si astronómovia všimli, že v spektrách tzv. symbiotických nov sa nachádzajú skupiny emisných čiar, ktoré sa výrazne odlišujú najmä šírkou profilu. Wallerstein so spolupracovníkmi skúmali aktívne systémy V1016 Cyg a HM Sge, ktoré v roku 1964 a 1975 prešli silným vzplanutím, čím sa ich spektrum zmenilo na typické symbiotické spektrum s veľmi intenzívnymi emisnými čiarami. Zistili, že pozorované emisné čiary možno roztriediť do niekoľkých skupín s porovnateľnými vlastnosťami. Do prvej skupiny zaradili veľmi úzke profily čiar železa (šírka okolo len 20 km/s), naopak do skupiny druhej zaradili extrémne široké a intenzívne čiary vodíka. Ich šírka v polovine maxima dosahovala až 1 000 km/s alebo viac, a ich intenzita presahovala úroveň kontinua až 100 krát (najmä H α). V tretej skupine potom identifikovali zakázané čiary iónov vysoko ionizovaných prvkov od [NII] až po [FeVII], ktoré boli široké okolo 200 km/s a ich profil v hornej časti ukazoval dve jednoznačne oddelené zložky. Obrázok 5 ukazuje príklad takýchto profilov. Je však potrebné poznamenať, že zatiaľ nejde o všeobecne prijatú klasifikáciu, lebo pre jednotlivé systémy sa profily môžu viac či

menej odlišovať, ale najmä dosiaľ nebolo získané potrebné množstvo spektier pre viacero symbiotických hviezd počas ich fáz aktivity. Výrazné rozdiely ako v profiloch tak v stupni ionizácie týchto skupín čiar naznačujú na to, že sa vytvárajú v rôznych oblastiach symbiotického systému s rozdielnou geometriou a ionizačnou teplotou. Pokúsme sa tieto oblasti bližšie identifikovať.

(i) *Úzke profily*

Čiary nízko-ionizovaných kovov, z nich najčastejšie zastúpenie majú čiary raz ionizovaného železa, FeII, nemôžu byť formované v blízkosti horúcej hviezdy. Odpovedajúce prechody totiž vyžadujú relatívne nízke teploty a kinematika horúceho vetra (stovky až tisícky km/s) vysoko preyšuje ich pozorovanú šírku. Z tohto hľadiska sú preto najpravdepodobnejšou oblasťou vzniku týchto čiar vonkajšie časti atmosféry obra, respektíve vnútorné časti jeho vetra ionizovaného žiarením horúcej hviezdy. Túto interpretáciu podporujú aj merania ich radiálnych rýchlostí v rôznych fázach dvojhviezdy. Odpovedajúce krivky neodrážajú čistý orbitálny pohyb ani jednej zo zložiek, čo znamená, že sa v ich blízkosti nemôžu tvoriť. Pre mnohé sústavy pozorujeme vlnenie ich kriviek radiálnych rýchlostí ako funkcie orbitálneho pohybu, čo naznačuje na súvislosť oblasti tvorby týchto čiar s periodickým obežným pohybom. Avšak malá amplitúda kriviek a ich posunutie jak vo fáze tak v radiálnych rýchlostiach odpovedajú oblasti, ktorá sa nachádza niekde medzi horúcou hviezdou a chladným obrom. Čo sa týka zakázaných čiar iónov vysoko ionizovaných prvkov, ich tvorba je viazaná na oblasti zrážky hviezdnych vetrov od chladnej a horúcej hviezdy. Tento efekt podrobnejšie rozoberieme v niektorej z nasledujúcich Rozpráv.

(ii) *Široké profily – problém krídel čiar H α*

Podstata vzniku extrémne širokých krídel spektrálnych čiar vodíka Balmerovej série, predovšetkým jej najsilnejšej čiar H α , patrí k najviac diskutovaným problémom. Doteraz sa však nepodarilo dospieť k všeobecne prijateľnému riešeniu. V nasledujúcej časti si tento problém trochu viac priblížime.

Na prvý pohľad sa ako najprirodzenejší ukazuje interpretácia, že široké krídla čiar H α (6563 Å) vznikajú v hviezdnom vetre horúcej zložky. Atómy vodíka sú v ňom ionizované, takže sa emisné čiary vodíka tvoria pri odpovedajúcich rekombinačných prechodoch, a keďže sú častice horúceho vetra urýchľované do veľmi vysokých rýchlostí (až niekoľkých tisíc km/s), budeme imi vysielané fotóny podľa Dopplerovho princípu registrovať výrazne posunuté od centrálnej vlnovej dĺžky (t.j. vlnovej dĺžky odpovedajúcej danému prechodu v kludnom stave), podľa toho, akou rýchlosťou sa žiarič (atóm) ku nám pohybuje. Taktiež emisivita (t.j. schopnosť vyžiarovania) hviezdneho vetra je v kvalitatívnom súhlase s profilom krídla. Smerom od centra radiálne von klesá hustota častíc, a teda aj emisivita, zatiaľ čo rýchlosť narastá do maximálnej terminálovej hodnoty. Krídlo čiar preto postupne zaniká v šume spojitého žiarenia. Jej maximálne pozorované rozšírenie potom definuje spodnú hranicu terminálovej rýchlosti hviezdneho vetra. Z pozorovaní vieme, že sa krídla čiar H α rozopínajú až do vzdialenosti $\pm 50 - 60$ Å od centrálnej vlnovej dĺžky, čo odpovedá terminálovej rýchlosti hviezdneho vetra 2 300 – 2 700 km/s. Takéto hodnoty sú v súhlase s vysokou svietivosťou horúcej hviezdy.

Toto prirodzené vysvetlenie formácie širokých krídel čiar H α bolo však často spochybňované jak teoretickými úvahami tak aj niektorými pozorovaniami. Napríklad, rozopnutie krídel čiar H β dosahuje približne len polovičných hodnôt čiar H α . Tento

prípád by mohol byť vysvetlený výrazne slabšou intenzitou čiary H β , čo znemožňuje meranie veľmi slabých krídel vo väčších vzdialenostiach od centrálnej vlnovej dĺžky, lebo sú ľahšie kontaminované šumom kontinua. Existujú však pozorovania iných typov objektov (napr.: AGB hviezdy alebo centrálne hviezdy planetárnych hmlovín), pre ktoré krídla H α čiary expandujú až do 8 000 – 10 000 km/s, čo už je príliš veľa, aby mohli byť vysvetlené hviezdny vetrom vyháňaným tlakom žiarenia centrálnej hviezdy. Tento problém zatiaľ nebol úspešne riešený. Preto sa skúmali aj iné možnosti. V deväťdesiatych rokoch, keď bol široko diskutovaný problém prítomnosti alebo neprítomnosti akréčných diskov v symbiotických hviezdach (prevládala názor, že disky v symbiotikách nie sú „potrebné“), sme modelovali široké krídla čiary H α za predpokladu, že vznikajú v akréčnom disku okolo horúcej hviezdy. Prijateľné porovnanie modelu s pozorovaním bolo nájdené len pre CH Cyg, AG Dra a T CrB. Všeobecne však boli modelové krivky podstatne širšie než pozorované krídla.

Idea, ktorá najviac ovplyvnila názor na formáciu širokých krídel sa týkala možnosti Ramanovho rozptylu fotónov čiary Ly β (1026 Å) na atónoch neutrálneho vodíka. Princíp je ten istý, ako sme v Rozprave III popísali pre fotóny čiary OVI 1032 Å, ktoré sa Ramanovsky rozptyľovali do emisného pásu 6825 Å. V prípade Ly- β fotónov dochádza k ich Ramanovmu rozptylu do okolia čiary H α , teda do jej krídel. Na túto možnosť upozornil v r. 1989 Nussbaumer so spolupracovníkmi v práci o procesoch rozptylu v symbiotických hviezdach. Táto hypotéza bola aplikovaná až v r. 2000 kórejskými astronómami (H.-W. Lee a S. Hyung), ktorí vypracovali kvantitatívny model tohto typu rozptylu. Ukázali, že Ly- β fotóny sa rozptyľujú do okolia H α úmerne vzdialenosti, $\Delta\lambda$, od centra čiary ako $1/\Delta\lambda^2$. Porovnanie tejto funkčnej závislosti s pozorovanými profilmi ukázalo na veľmi dobrý súhlas, čo postupne presvedčilo zainteresovanú časť astronomickej komunity v reálnosť tejto myšlienky. Avšak, ako sa čoskoro ukázalo, dobrý súhlas teórie s pozorovaním ešte neznamenal jej všeobecnú platnosť. Nezávislé pozorovania podporovali pôvodnú interpretáciu.

(iii) H α – kinematika ionizovaného vetra alebo Ramanov rozptyl ?

Pri detailnej analýze vzplanutia prototypickej symbiotickej hviezdy Z And mi niektoré výsledky ukazovali na fyzikálnu neopodstatnenosť interpretácie širokých krídel Ramanovým rozptylom (o sústave Z And sa budeme rozprávať podrobne neskôr). Napríklad, počas vzplanutia došlo k poklesu ionizačnej teploty horúcej hviezdy, čo viedlo aj k poklesu Ramanovsky rozptýlených čiar. A skutočne, odpovedajúce emisie rozptýlených čiar OVI 6825 Å a 7088 Å v optickom spektre celkom vymizli. Súčasne pôvodné OVI čiary v ďalekej UV oblasti (1032 Å a 1038 Å) neboli tiež prakticky pozorovateľné. Na strane druhej, profil čiary H α sa výrazne rozšíril, čo by v rámci vyššie navrhnutého modelu vyžadovalo aj odpovedajúce zvýšenie a najmä rozšírenie čiary Ly- β . Spektra urobené družicou FUSE počas maxima vzplanutia Z And však registrovali presný opak – *pokles* emisie v Ly- β ! To ma podporilo v myšlienke vypracovať jednoduchý model hviezdneho vetra horúcej hviezdy, ktorý by vysvetľoval podstatu širokých krídel H α čiary kvantitatívne. Základom modelu je štruktúra horúceho objektu počas aktívnych fáz, ako sme si ju predstavili v Rozprave I. Teda rozšírený opticky hrubý disk okolo akrétora, z ktorého polárnych oblastí unikajú častice vysokými rýchlosťami (Obr. 6). Tento prístup simuluje bipolárnu štruktúru vetra, ktorá je dôležitá pre vysvetlenie pozorovanej symetrie krídel okolo centrálnej vlnovej dĺžky. Hlavným predpokladom, ktorý výrazne zjednodušuje modelovanie, je opticky tenký hviezdny vietor. V takom prípade je totiž každý fotón vyslaný z ľubovoľného miesta vetra registrovaný priamo až pozorovateľom – nedochádza už k

žiadnej jeho interakcii (absorpcii) s okolitým prostredím. Táto zdanlivo silná podmienka je však celkom dobre splnená cez väčšiu časť vetra, okrem jeho najhustejších centrálnych častí v blízkosti akrétora. Tieto oblasti sa však pohybujú najnižšími rýchlosťami (viď Obr. 1), a preto prispievajú len do jadra čiary (približne do ± 200 km/s od jeho centra), ktorého modelovanie nebolo naším cieľom. Vlastnosť opticky tenkého prostredia je daná predovšetkým veľmi vysokým gradientom rýchlostí. Vysvetlenie je analogické ako sme popísali v kapitole o urýchľovacom mechanizme. Zjednodušene, aby dajaká vonkajšia vrstva nemohla absorbovať čiarový fotón (t.j. fotón odpovedajúci danému prechodu) z vrstvy spodnej, musí sa relatívne ku nej pohybovať rýchlosťou väčšou minimálne než je dvojnásobok rýchlosti tepelného pohybu plazmy, v_t , ($v(\text{horná vrstva}) - v_t > v(\text{spodná vrstva}) + v_t$). Potom je fotón emitovaný spodnou vrstvou dopplerovsky posunutý minimálne o $2v_t$ pre atómy hornej vrstvy, a teda uniká von. A čím väčšie sú rozdiely rýchlostí v radiálnom smere, tým z väčších hĺbok (t.j. bližšie ku fotosfére) budú môcť fotóny v danej čiare unikáť von. V takom prípade, aby sme rekonštruovali celkový emisný profil, stačí zosumarizovať a prerozdeliť všetky viditeľné príspevky expandujúceho materiálu vetra podľa ich radiálnych rýchlostí (t.j. podľa vzdialenosti $\Delta\lambda$ od centrálnej vlnovej dĺžky) v okolí skúmanej čiary. Model výsledného profilu ukázal perfektný súhlas s pozorovaným profilom približne od ± 200 km/s od stredu čiary až po terminálové rýchlosti. Pravý panel Obr. 6 ukazuje príklad pozorovaného a syntetického profilu pre Z And počas jej aktívnej fázy. Keďže základom modelu je rovnica continuity a zákon rýchlosti (vyššie uvedené vzťahy 1 a 2) možno z modelu určiť akceleračný parameter β , terminálovú rýchlosť, a pokiaľ poznáme svietivosť v čiare (k tomu však potrebujeme vzdialenosť objektu), tak aj tempo straty hmoty hviezdny vetrom, \dot{M} . Modelovanie širokých krídel čiary H α počas aktívnych fáz vybraných symbiotických hviezd ukázalo, že hviezdny vietor ich horúcich zložiek je charakterizovaný parametrami $\beta = 1.7$, $v^\infty = 1\,600 - 2\,600$ km/s a tempom straty hmoty niekoľko krát ($10^{-7} - 10^{-6}$) hmotností Slnka za rok. Je zaujímavé poznamenať, že modelový profil, ktorý je daný kinematikou hviezdneho vetra, je určený rovnakým typom funkčnej závislosti ako pre prípad Ramanovho rozptylu. To v praxi (bohužiaľ) znamená, že len samotné modelovanie profilu čiary nie je postačujúce na rozlíšenie skutočnej podstaty širokých krídel. Na to treba mať ďalšie nezávislé pozorovania, napríklad z rádiovej oblasti. Konkrétne, zosilnený hviezdny vietor počas aktivity vedie k poklesu rádiovej emisie na vlnových dĺžkach okolo 20 cm, lebo tu sa stáva plazma vetra opticky hrubá – mení sa sklon rozdelenia energie v rádiovej oblasti. Takéto chovanie rádiovej emisie sa pozorovalo aj počas aktívnej fázy Z And. Navyše, zosilnenie hviezdneho vetra horúcej hviezdy ako výsledok jej aktivity vedie k zvýšeniu hustôt v jej okolí, čím sa hlavný zdroj nebulárneho žiarenia presune do jej okolia a stane sa predmetom zákrytu pre sústavy s vysokým sklonom dráhy, čo je v súhlase so všeobecným modelom štruktúry horúcich objektov počas aktívnych fáz (viď Rozprava I).

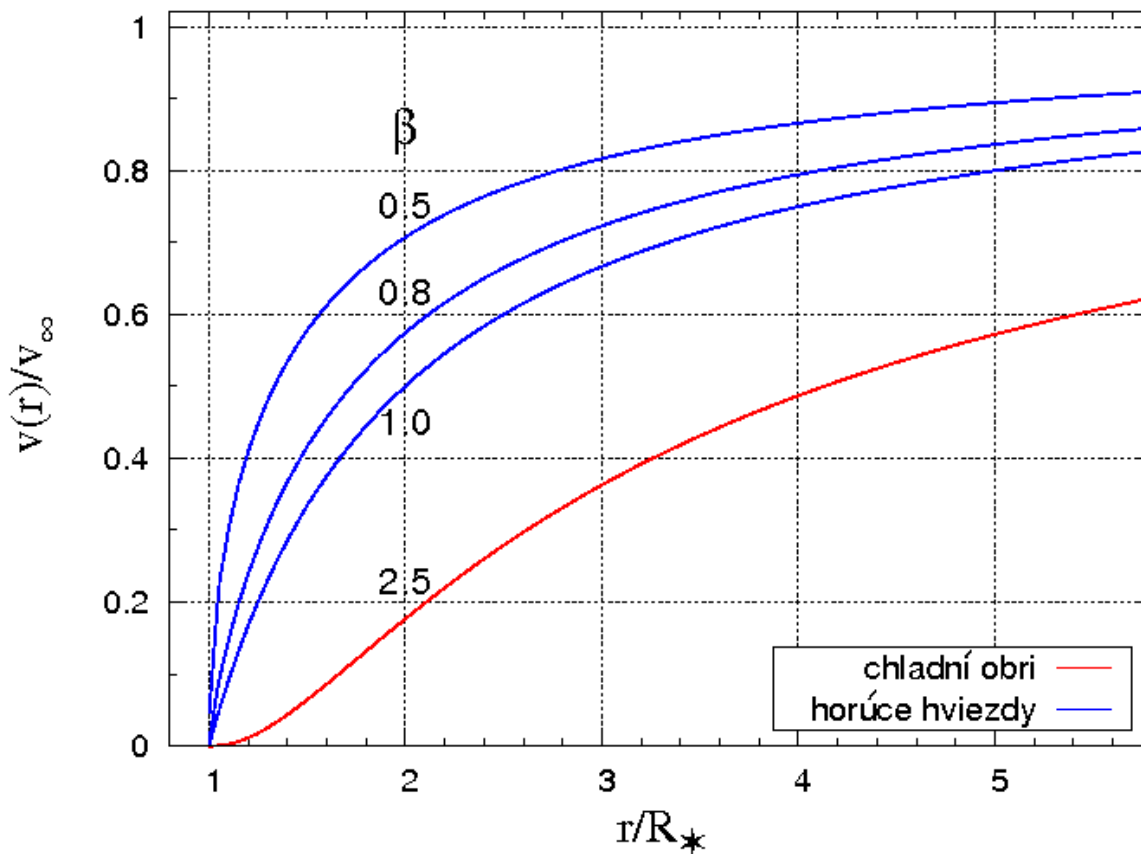
Podrobnejší popis modelu hviezdneho vetra horúcich zložiek symbiotických hviezd nájde čitateľ v práci autora publikovanej v *Astronomy & Astrophysics*, 457, 1003–1010 (2006), alebo na <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0607466>.

V nasledujúcej časti „Rozpravy o symbiotických hviezdach“ si bližšie predstavíme jej hmlovinu.

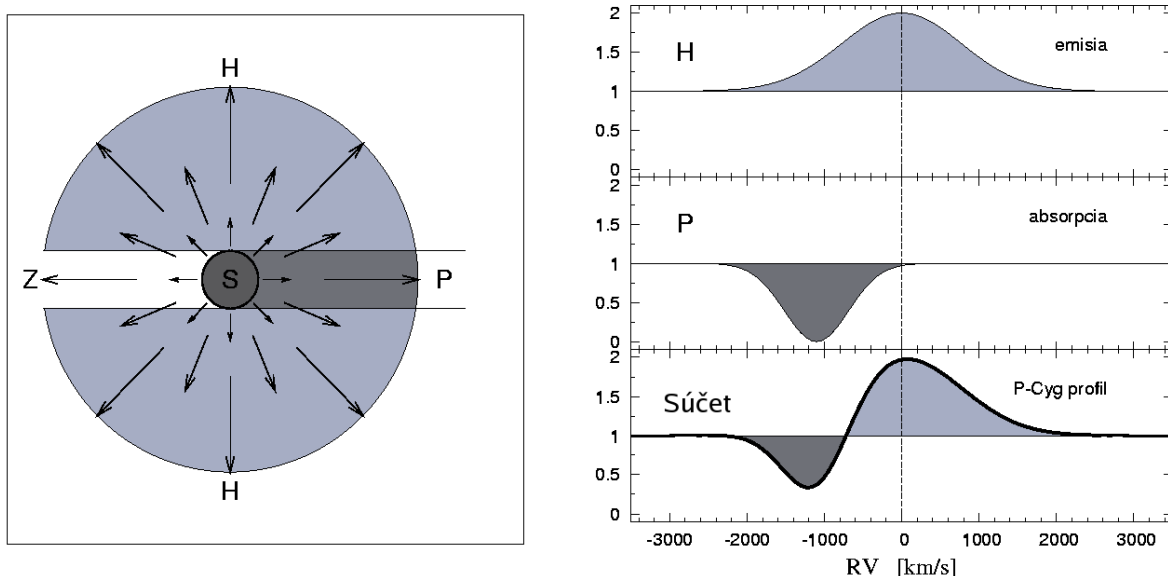
Augustin Skopal

Tatranská Lomnica, 7. marca 2007

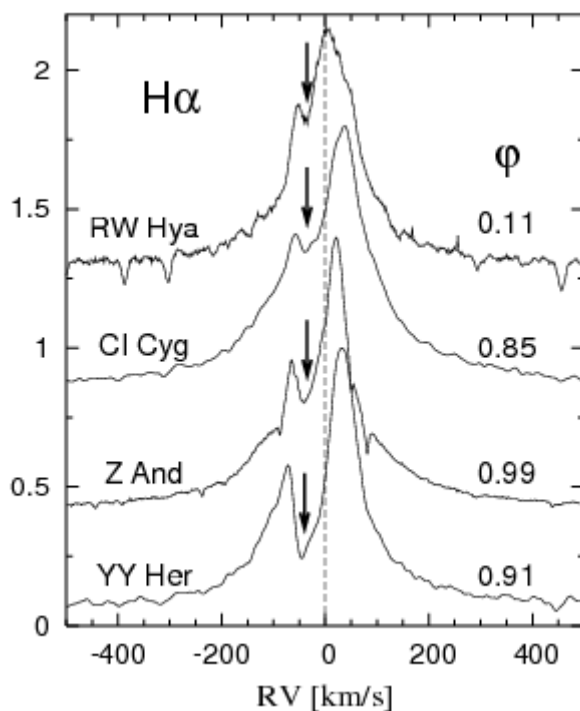
Obrázok 1. Urýchľovanie hviezdneho vetra od povrchu hviezdy smerom von podľa vzťahu (1). Pre chladných obrov (červená krivka) je akcelerácia častíc pomalšia, parameter $\beta = 2.5$, zatiaľ čo horúce hviezdy vyháňajú svoj vietor oveľa rýchlejšie (modré krivky), parameter $\beta = 0.5 - 1.0$.



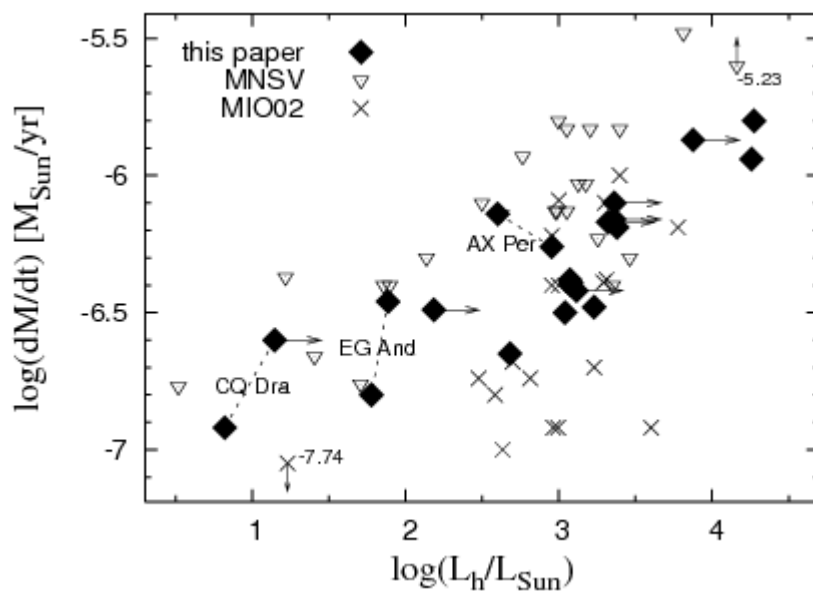
Obrázok 2. Schematické znázornenie vzniku tzv. P-Cyg profilu. Ľavý panel ukazuje geometriu hviezdneho vetra s narastajúcou rýchlosťou smerom von. Fotosféra hviezdy (počiatok vetra) je označená ako S, smer k pozorovateľovi ako P. V oblasti hala (H) sa tvorí emisný profil dopplerovsky rozšírený okolo referenčnej vlnovej dĺžky, zatiaľ čo v oblasti medzi S a P sa tvorí absorpčná zložka profilu, dopplerovsky posunutá ku kratším vlnovým dĺžkam. P-Cyg profil vzniká súčtom oboch zložiek (pravý panel).



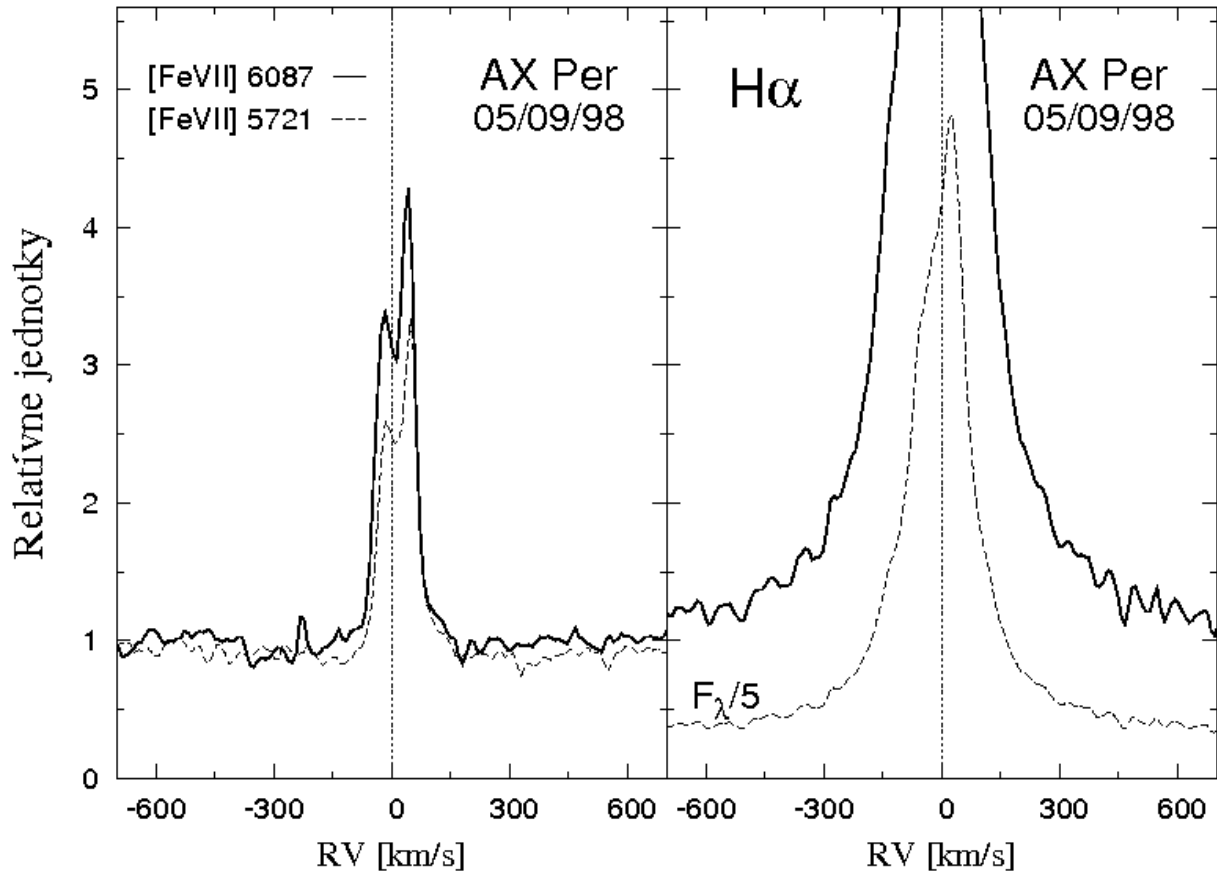
Obrázok 3. Príklady profilov čiary $H\alpha$ pre sústavy s vysokým sklonom obežnej dráhy pozorované v okolí dolnej konjunktie obra. Absorpčná zložka (označená šípkami) vzniká v hviezdnom vetre chladnej obrej hviezdy. Jej pozícia je vždy posunutá ku kratším vlnovým dĺžkam a je blízka terminálovej rýchlosti hviezdneho vetra obra (30-50 km/s).



Obrázok 4. Porovnanie tempa straty hmoty hviezdnyim vetrom chladných obrov v symbiotických hviezdach získaných rôznymi autormi a metódami. Súhlas je uspokojivý. Hodnoty sa najčastejšie pohybujú medzi 10^{-7} až 10^{-6} hmotností Slnka za rok. Možné vysvetlenie závislosti straty hmoty na svietivosti horúcej hviezdy je uvedené v texte. Obrázok je prevzatý z práce autora diskutovanej v Rozprave I.



Obrázok 5. Príklady úzkych a širokých profilov emisných čiar v spektrách aktívnych symbiotických hviezd. Zakázané čiary iónov vysoko ionizovaných prvkov (napr.: [FeVII]) sa tvoria v oblasti zrážky hviezdnych vetrov od chladnej a horúcej hviezdy, zatiaľ čo široké krídla čiar $H\alpha$ sa pravdepodobne formujú v hviezdnom vetre horúcej hviezdy.



Obrázok 6. Schematické znázornenie štruktúry horúceho objektu počas aktivity (ľavý panel). Šípky vychádzajúce z polárnych oblastí znázorňujú hviezdny vietor s terminálovou rýchlosťou okolo 2 000 km/s. Pravý panel ukazuje príklad odpovedajúceho modelového (M) a pozorovaného (O) profilu čiary H α . Súhlas je veľmi dobrý už od ± 200 km/s od stredu čiary až po terminálovú rýchlosť $\pm 2 000$ km/s.

