

STUDIUM B[e] HVĚZD

Blanka Kučerová
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Brno

Vážení přítomní, ráda bych vám zde představila svou disertační práci s názvem Studium B[e] hvězd, která vznikla v rámci mého doktorského studia na zdejší škole pod vedením dr. Korčákové působící nyní na Astronomickém ústavu Univerzity Karlovy v Praze.

Proč B[e] hvězdy?

- aktuální téma s mnoha nevyřešenými otázkami
 - heterogenní skupina (různá vývojová stádia)
 - velmi rozsáhlé obálky => NELZE použít stávající syntetická spektra na analýzu
 - hydrodynamické modely nejsou schopny vysvětlit vlastnosti těchto objektů (rozsáhlý disk)
- možnost zaplnění mezery ve znalostech a pozorováních
 - pomocí spektroskopických dat z 2m dalekohledu v Ondřejově

Motivací pro výběr tohoto tématu byla pro mě především jeho aktuálnost a také řada nezodpovězených otázek a nevyřešených problémů. B[e] hvězdy tvoří totiž skupinu hvězd nacházejících se v různých vývojových stádiích (od hvězd před hlavní posloupností až po veleobry a kompaktní planetární mlhoviny). Díky přítomnosti rozsáhlých obálek se u těchto objektů velmi komplikuje studium samotného centrálního objektu, a samotné parametry těchto hvězd se nedají jednoduše modelovat podle klasických modelů hvězdných atmosfér.

Naprostá absence dlouhodobých studií těchto objektů, která byla způsobena především ze dvou důvodů - 1) povahou čáry $H\alpha$, která je 100x intenzivnější než je úroveň kontinua, a která neumožňovala při používání fotografických desek získat kvalitní data a 2) s rozvojem CCD se začaly preferovat krátkodobé projekty – byla možnost nasnímat si v průběhu studia (tedy několika let) vlastní data pomocí dvoumetrového dalekohledu v Ondřejově velkým lákadlem.

Proč MWC 342 (V1972 Cyg)?

- výběr nebyl náhodný
 - předchozí analýzy naznačovaly pozici hvězdy na HR diagramu poblíž klasických Be hvězd (rozšířit dlouhodobý výzkum v Ondřejově)
 - studium velice důležité pro testování vývojových modelů
 - pozorovatelnost ¾ roku; dostatečná kvalita S/N
 - během studia zařazena mezi tzv. FS CMA objekty (Miroshnichenko a kol., 2007), které jsou v současnosti v popředí zájmu

I přesto, že studium bylo původně zaměřeno na několik hvězd typu B[e] – např. OY Gem, FS CMA, V431 Sct, V 743 Mon, V 2028 Cyg, k detailnějšímu studiu byla použita pouze hvězda jediná, a to MWC 342 nebo též V 1972 Cyg. Její výběr však nebyl zcela náhodný. Předchozí analýzy naznačovaly, že by poloha této hvězdy na HR diagramu mohla být poblíž klasických Be hvězd, takže se zde naskýtal možnost navázat touto prací na dlouhodobý výzkum Be na Astronomickém ústavu v Ondřejově. Dalším důvodem pak byla samozřejmě i její poloha na obloze. Je to hvězda nacházející se v souhvězdí Labutě, a tak je z naší zeměpisné šířky dobře pozorovatelná téměř po většinu roku. To, že výběr to byl opravdu správný, se potvrdilo během studia, když byla tato hvězda zařazena mezi tzv. FS CMA objekty, které jsou v současnosti v popředí vědeckého zájmu.

Cíle disertační práce

- popis časových změn spektrálních vlastností
 - nelze použít standardní syntetická spektra
 - dlouhodobá pozorování mohou rozhodnout o povaze systému
 - potvrdit či vyvrátit dvojhvězdnou hypotézu (Miroshnichenko, 2007, Miroshnichenko a kol., 2007, FS CMa objekty = dvojhvězdy)
- omezení teoretických modelů
 - současné hydrodynamické modely nejsou schopny fenomenologický model vysvětlit

Cílem disertační práce bylo především popsat časové změny spektrálních vlastností hvězdy, které mohou rozhodnout o povaze celého pozorovaného systému, a které mohou například vyvrátit či naopak potvrdit jeho dvojhvězdnou hypotézu. Dlouhodobá studie je však velmi užitečná i pro získání dat potřebných k omezení teoretických modelů, neboť současné hydrodynamické modely nejsou schopny fenomenologický model vysvětlit.

Co jsou B[e] hvězdy?

- horké hvězdy spektrálního typu B
- silné emisní čáry Balmerovy série vodíku (často s P Cygni profilem)
- emisní čáry He I a čar kovů (většinou nízkých ionizačních stupňů) vznikajících jak povolenými, tak zakázanými přechody (Fe II, Si II, [O I])
- nadbytek infračerveného záření – přítomnost prachu v obálce

Co to vlastně vůbec jsou ty B[e] hvězdy? Jsou to horké hvězdy spektrálního typu B mající ve svých spektrech silné emisní čáry Balmerovy série vodíku, mající často P Cygni profil. Kromě toho se v jejich spektrech nacházejí i emisní čáry neutrálního helia a čar kovů vznikajících jak povolenými, tak zakázanými přechody. Mezi další vlastnosti těchto objektů patří pak také nadbytek infračerveného záření, který je způsoben přítomností prachu v okolohvězdné obálce.

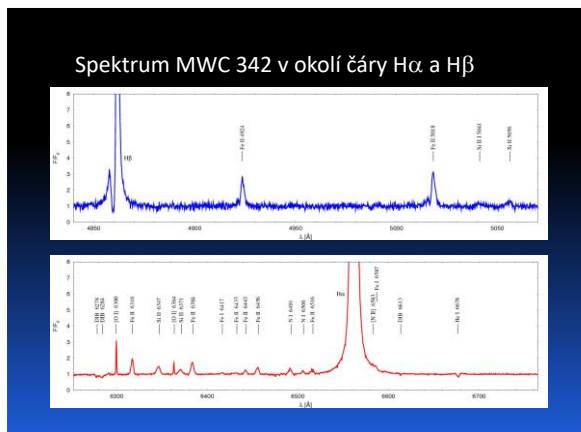
Co jsou B[e] hvězdy?

- skupina hvězd různých vývojových stádií (Lamers a kol., 1998)
 - B[e] veleobří
 - hvězdy typu B[e] před hlavní posloupností
 - kompaktní planetární mlhoviny typu B[e]
 - symbiotické hvězdy typu B[e]
 - neklasifikované hvězdy typu B[e]

(Miroshnichenko, 2007)

- hvězdy typu FS CMa

Jak již bylo řečeno, B[e] hvězdy jsou objekty různých vývojových stádií. Lamers a kol. v roce 1998 rozdělil hvězdy typu B[e] do pěti skupin: B[e] velebobry, hvězdy typu B[e] před hlavní posloupností, kompaktní planetární mlhoviny typu B[e], symbiotické hvězdy typu B[e] a nakonec hvězdy, které nezařadil ani do jedné této skupiny, označil jako neklasifikované hvězdy typu B[e]. Některé neklasifikované hvězdy byly následně Miroshnichenkem v roce 2007 zařazeny do nově vytvořené skupiny hvězd typu FS CMa.



6300 Å a 6364 Å. To jsou zakázané čáry kyslíku.

Pozorování a redukce spekter

- data nasnímana 2m dalekohledem na Astronomickém ústavu AV ČR v Ondřejově v letech 2004 - 2010
- nasnímané v oblastech:
 - (6 265 – 6 775) Å – 104 spekter
 - (4 760 – 5 005) Å – 4 spektra
 - (5 475 – 5 985) Å – 1 spektrum
 - (7 510 – 8 020) Å – 7 spekter
 - (8 200 – 8 710) Å – 5 spekter

Pro představu, jak vypadá spektrum hvězdy MWC 342 slouží tyto dva obrázky. První je z oblasti kolem čáry H β , druhý z oblasti kolem čáry H α . Všimněte si, že čára H β má rozvojený profil a že čára H α , která má rovněž dvojitý profil, zde není vykreslena celá. Je to z důvodu její velké intenzity – je až 100x intenzivnější než je úroveň kontinua – a kdyby byla vykreslena celá, tak by ostatní, mnohem slabší čáry, nebyly téměř vidět. Všechny čáry, až na hélium na vlnové délce 6678 Å, jsou emisní. Za zmínku určitě stojí i ty úzké spektrální čáry na pozicích

Spektra použitá v této disertační práci byla nasnímana dvoumetrovým dalekohledem na observatoři Astronomického ústavu Akademie věd České republiky a to v letech 2004 až 2010.

Hvězda MWC 342 byla nasnímana v několika oblastech, jejichž rozsahy jsou zde uvedeny. Je vidět, že nejvíce spekter bylo pořízeno v oblasti kolem čáry H α .

Pozorování a redukce spekter

- IRAF (Massey, 1997)
 - kosmiky – klasický postup k odstranění – zapnutí optimální extrakce (*clean*)
 - hvězdné emisní čáry [O I] blendované čarami noční oblohy (6 300 Å a 6 364 Å) – odstranění – proložení pozadí vhodnou funkcí (*skybox*)

=> nový redukční postup

- kosmiky – program *dcr* (Pych, 2004)
- čáry noční oblohy – IRAF, *task apall*, *skybox* = 1

Velmi důležitým krokem při analýze hvězdných spekter je jejich správná redukce. Té jsem věnovala značnou pozornost, což dokládá i skutečnost, že optimálnímu redukčnímu postupu jsem se věnovala první dva roky svého studia. Redukci jsem provedla pomocí softwaru IRAF, ale narazila jsem na jeden problém týkající se kosmiků a čar noční oblohy. K odstranění kosmiků a čar noční oblohy se využívají dva parametry – *clean* a *skybox*. Zjistila jsem, že při zvyšování parametru *skybox* sice dosahují lepších výsledků při odstraňování kosmiků, ale naopak

získávám horší výsledky v odstraňování čar noční oblohy, kterými jsou blendovány pro nás důležité čáry kyslíku. Abychom mohli čáry kyslíku použít k dalším analýzám, bylo nutné hledat jiný způsob odstranění kosmiků. Ty nakonec byly odstraněny pomocí programu *dcr* a tím byl problém vyřešen.

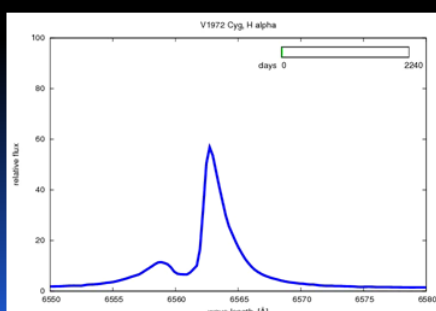
Analýza dat

- oblasti kolem $H\alpha$ a $H\beta$
 $H\alpha$, $H\beta$, He I (6 678 Å, 6 318 Å, 6 384 Å, 6 443 Å, 6 456 Å), [O I] (6 300 Å, 6 364 Å), Si II (6 347 Å, 6 371 Å)
- identifikace
- profily
- změny V/R
- ekvivalentní šířky
- radiální rychlosti

V práci jsem se zaměřila na identifikaci čar ve spektru hvězdy MWC 342, a poté jsem provedla bližší analýzu několika konkrétních čar, mezi něž patřily $H\alpha$, $H\beta$, neutrální helium na vlnové délce 6678 Å, čtyři čáry železa, dvě čáry zakázaných kyslíků a také dvě čáry křemíku. Analýzy spočívaly v pozorování změn profilů jednotlivých čar, ekvivalentních šířek a radiálních rychlostí.

Analýza dat

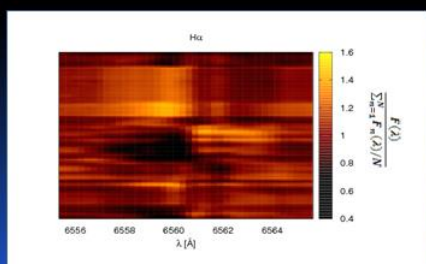
- monitorování průběhu čáry $H\alpha$



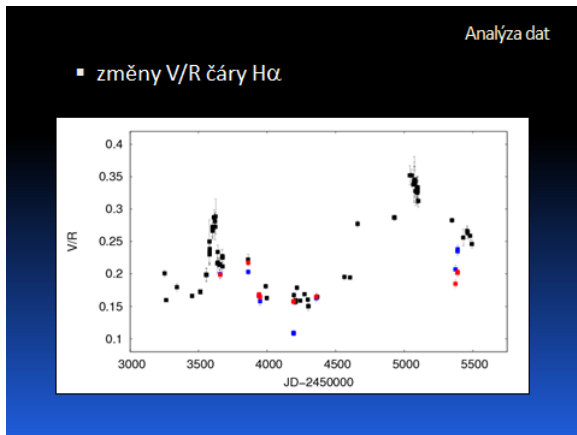
Na této animaci je možné sledovat změny profilu čáry $H\alpha$. Rozdvojený profil se v průběhu let výrazně mění a co určitě stojí za povšimnutí, je, že i profil samotného menšího píku, tedy toho, který je posunutý do modré oblasti spektra, se taktéž mění. V určité chvíli se jeví, jako kdyby byl taktéž rozdvojený, nebo byl pouze s jakýmsi hrbolkem, případně i hrbolky.

Analýza dat

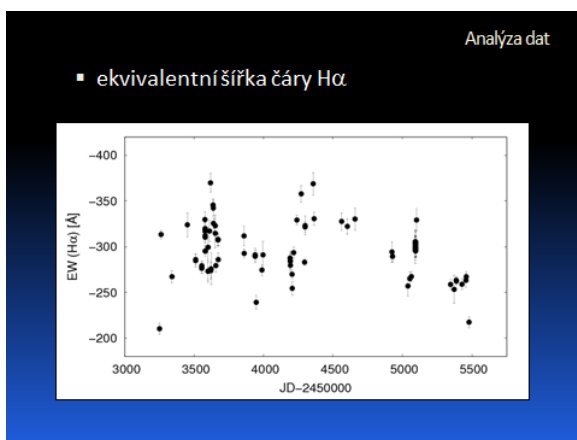
- barevná „šedá“ reprezentace čáry $H\alpha$



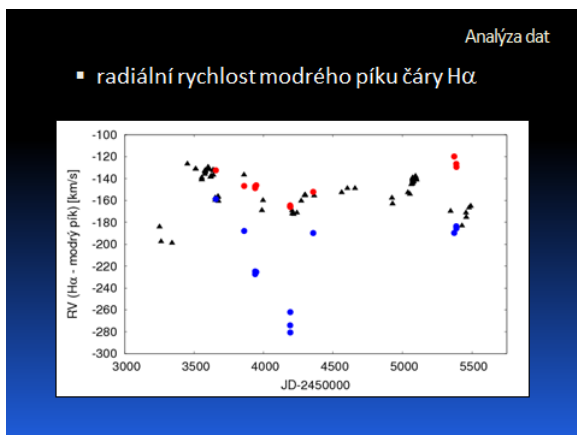
Stejná situace, jaká byla zobrazena na předchozí animaci, je nyní zachycena pomocí šedé (i když vlastně v tomto případě barevné) reprezentace. Na tento obrázek se dá nahlížet jako na 3D graf, kde na ose x je vlnová délka, na ose y jsou jednotlivá spektra chronologicky poskládaná za sebou tak, jak byla nasnímána a třetí osa, osa z, je barevné rozlišení profilu čáry $H\alpha$. Světlá místa určují místa s vyšší intenzitou, tmavší naopak s menší.



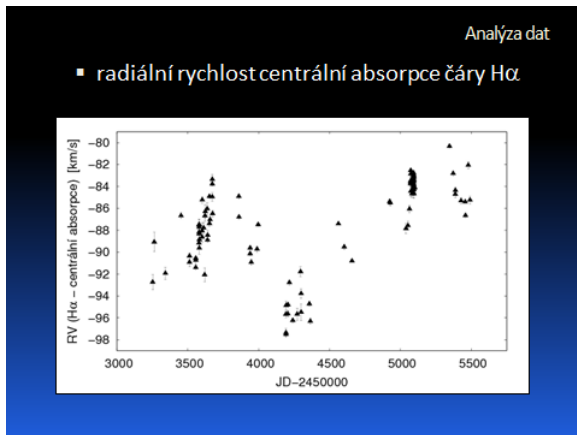
U hvězd s dvojitými emisními čarami je lepší než se zaměřit na jednotlivé píky zvláště, pozorovat čáru jako celek a zaměřit se na změny poměru intenzit jednotlivých píků, tedy tzv. V/R změny. V případě, že malý modrý pík nebyl rozdvojen, je poměr V/R zakreslen černými body. Pokud však rozdvojen byl, poměr modřejší části modrého píku k červenému píku a červenější části modrého píku k červenému píku je vykreslena modře, respektive červeně. Na první pohled jsou zde patrná dvě maxima a jedno minimum, z kterých lze usuzovat, že by se mohlo jednat o změny opakující se v čase.



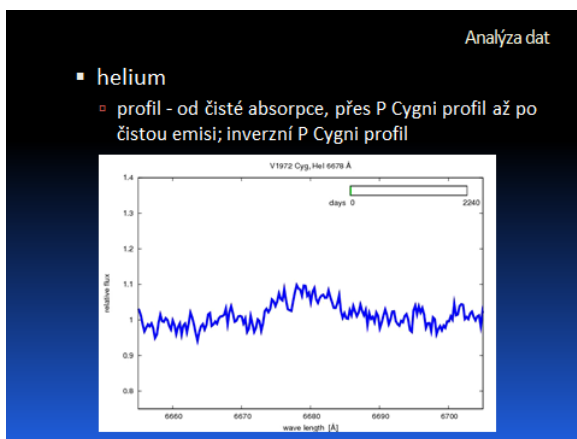
Na tomto snímku je ukázáno, jak se mění ekvivalentní šířka čáry H α v čase. Změny nejsou nijak výrazné, i když i zde je možné vysledovat jistá maxima a minimum.



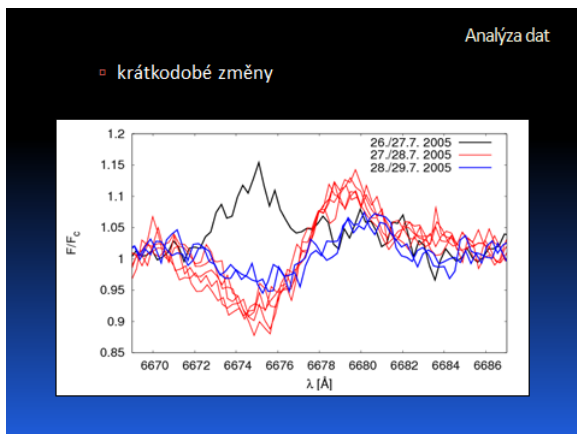
Mnohem zajímavější než ekvivalentní šířka čáry H α jsou však radiální rychlosti jednotlivých píků. V případě, že je modrý pík rozdvojen, je možné pozorovat radiální rychlosti jeho jednotlivých částí (to jsou ty červené a modré body) a je patrné, že se tyto rychlosti mění lineárně, tzn., že se těmi jednotlivými body dají proložit přímky. Bod, ve kterém se tyto dvě přímky protnou, pak odpovídají teoretickému časovému okamžiku rozdělení modrého píku.



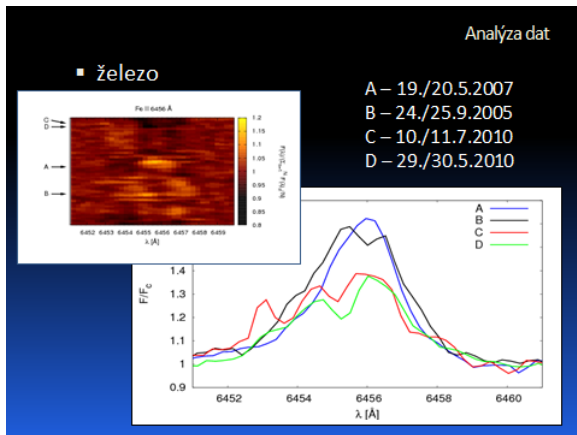
Tento graf nám ukazuje časovou závislost radiální rychlosti centrální absorpce. I zde je možné vysledovat tři extrémy, a to dvě maxima a jedno minimum.



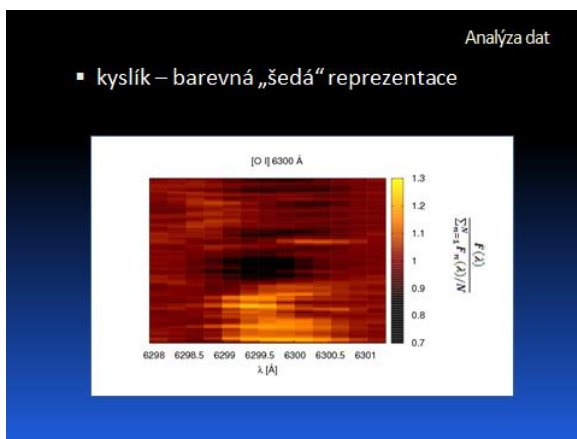
Velmi zajímavou čarou ve spektru hvězdy MWC 342 je neutrální helium na vlnové délce 6678 Å, jejíž profil se mění od čisté absorpce přes P Cygni profil až po čistou emisi. Vše je možné dobře vidět na této animaci. Zatímco P Cygni profil byl pozorován již dříve, v našich datech jsme objevili dokonce i tzv. inverzní P Cygni profil.



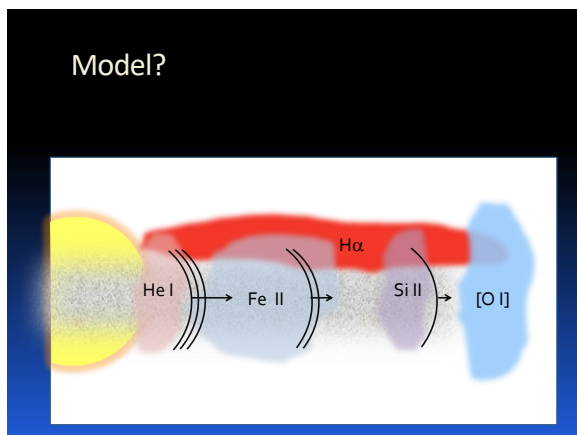
Na tomto obrázku je velmi dobře patrné, že změny byly pozorovány v rámci několika po sobě jdoucích nocí, avšak během jediné noci se výraznější změny neprojeví. Pravděpodobně je to však dané pouze nedostatečným rozlišením.



Tady už se dostáváme k železu. Čáry železa jsou ve spektru zastoupeny hned několikrát, ale jen čtyři z nich jsou natolik intenzivní, že se dají použít k analýzám. Jsou to čáry jedné ionizovaného železa a jsou si velice podobné. Nejzajímavější, alespoň co se profilu týče, je však čára na vlnové délce 6456 Å. Její profil se mění od čistě Gaussovského profilu až po čáru rozštěpenou na dva a dokonce až na tři píky o stejných či různých intenzitách – přesně jak je vidět na daném obrázku. Všechny čtyři profily jsou pak zvýrazněny i v obrázku barevné reprezentace.



Obě dvě čáry zakázaného kyslíku jsou si taktéž velmi podobné. I přesto, že byla v minulosti kyslíková čára na vlnové délce 6300 Å pozorována rozštěpená, po celou dobu našeho pozorovaného období nic takového zaznamenáno nebylo. Jednoduchý profil čáry je patrný i z barevné reprezentace na tomto obrázku, kde je vidět pouze ta skutečnost, že čára během sledovaného období měnila svou intenzitu.



A co vlastně ta všechna předchozí měření a analýzy naznačují? Z chování různých prvků lze usuzovat, že vznikají v různých vrstvách atmosféry hvězdy a jak bude ukázáno dále, chování hvězdy by snad bylo možné vysvětlit hvězdným větrem podporovaným pulsacemi objektu.

Model?

- Hvězdný vítr podporovaný pulzacemi
 - čára He I 6 678 Å se mění ze dne na den (absorpce, emise, P Cygni i inverzní P Cygni profil)
 - při výskytu inverzního P Cygni profilu mají všechny čáry menší intenzitu
 - pravděpodobně způsobeno změnami záření v kontinuu => změna poloměru
 - komplikovaný profil čáry železa Fe II 6 456 Å
 - profil vzniklý v důsledku různě rychle se pohybujících vrstev
 - čáry zakázaného kyslíku [O I]
 - úzké, Gaussovský profil – téměř žádné pozorované změny
 - radiální rychlost „hrbolku“ u modrého píku má lineární závislost – výtrysk (odtok) hmoty

Čára helia se mění ze dne na den a při výskytu inverzního P Cygni profilu mají všechny čáry menší intenzitu – to by mohlo být způsobeno změnami záření v kontinuu a to zase může být způsobeno například změnou poloměru hvězdy. Inverzní P Cygni profil a posun jeho absorpční části do červené oblasti vlnových délek naznačují možný dopad hmoty na hvězdu. Naopak, radiální rychlosti hrbolků modrého píku čáry H α poukazují na možný odtok látky z hvězdy. A právě tyto protichůdné tendence by mohl vysvětlit hvězdný vítr podporovaný pulzacemi hvězdy.

Komplikovaný profil čar železa by se mohl vysvětlit tak, že se jedná o profil vzniklý v důsledku různě rychle se pohybujících vrstev. To by dávalo představu, že rázová vlna šířící se prostředím, se postupně utlumuje a v okrajových vrstvách atmosféry, kde vznikají například zakázané čáry kyslíku, se už víceméně neprojevuje.

Model?

- Podvojnost – nelze vyloučit ani potvrdit
 - Miroshnichenko a Corporon, 1999 – doba oběhu - 40 let
 - „perioda“ z našich dat - 3,9 let
 - absence fotosferických čar – pozorované změny spojené s obálkou

Děkuji za pozornost

Závěrem bych ještě chtěla zmínit problematiku podvojnosti hvězdy. To, zda je či není hvězda MWC 342 dvojhvězdou, nelze z našich pozorování ani vyloučit ani potvrdit. V minulosti byla doba oběhu stanovena na 40 let, a i přesto, že moje doktorské studium trvalo dlouho, tak dlouhé, aby pokrylo tuto jednu periodu, zase nebylo. ☺ Nami pozorovaná perioda, teda pokud se dá o periodě jako takové vůbec mluvit, byla odhadnuta na 3,9 roku.

Děkuji Vám za pozornost.