

Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity v Brně
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Spektroskopie dvojhvězdy 96 Herculis

diplomová práce

Blanka Kučerová

vedoucí práce: RNDr. Pavel Koubský, CSc.

Brno 2004

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně, pouze s použitím uvedené literatury.

Blanka Kučerová

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu své diplomové práce RNDr. Pavlu Koubskému, CSc. především za jeho trpělivost a pevné nervy, prof. RNDr. Michalu Lencovi, Ph.D. za poskytnutí notebooku na zpracovávání dat, Mgr. Janu Janíkovi, Ph.D. za pomoc při učení se s programem Spefo, Mgr. Daniele Korčákové Ph.D. za vyexportování grafů ze Spelu, protože jí jediné se to podařilo, dále všem z Astronomického ústavu v Ondřejově, kteří se podíleli na získání spekter a v neposlední řadě všem, kteří mi vždy ochotně odpovídali na mnohé z mých otázek, týkajících se převážně L^AT_EXu a počítačů vůbec.

Velice bych chtěla poděkovat svým rodičům za jejich podporu a za to, že mi umožnili studovat a vytvořili mi k tomu perfektní podmínky.

Tato práce vznikla s podporou grantu 102/02/1000 GA ČR.

Obsah

1	Úvod	9
2	Hvězdné spektrum	10
2.1	Vznik hvězdných spekter	10
2.2	Základy atomové fyziky	11
2.2.1	Stavba atomů	11
2.2.2	Excitace, deexcitace	11
2.2.3	Ionizace, rekombinace	12
2.3	Spektrum vodíku	13
2.4	Spektrum těžších prvků	14
3	Spektrální klasifikace	16
4	Horké hvězdy	18
4.1	Hlavní posloupnost	18
4.1.1	Protonově-protonový řetězec	18
4.1.2	CNO cyklus	19
4.2	Hertzsprungův-Russellův diagram	20
5	Spektroskopické dvojhvězdy	22
5.1	Dopplerův efekt	22
5.2	Dráhové elementy	23
5.3	Hmotnosti jednotlivých složek	27
5.4	Perioda a O–C diagram	29
5.4.1	Zdánlivé a falešné periody	30
5.4.2	Metody hledání period	31
5.4.3	O–C diagram	31
6	Získávání a zpracovávání spekter	33
6.1	Získání spekter a jejich redukce	33
6.2	Programy Spefo a Spel	34
7	96 Herculis	36
7.1	Dosavadní údaje o 96 Herculis	36
7.2	Vlastní zpracování spekter	36
8	Závěr	59

1 Úvod

Většina horkých hvězd je vázána v dvojhvězdách nebo vícenásobných hvězdných systémech a jejich pozorováním se ve stelárním oddělení v Ondřejově zabývají již několik let.

Cílem této práce je studium spektroskopie dvojhvězdného systému 96 Herculis, a stanovení jeho dráhových elementů.

Úvodní kapitoly této práce se věnují obecně vzniku hvězdných spekter, a spektrální klasifikaci. Protože dvojhvězda 96 Her patří mezi horké hvězdy hlavní posloupnosti, v následující kapitole jsou pro představu zmíněny charakteristické vlastnosti této skupiny hvězd. Kapitola o spektroskopických dvojhvězdách pak podává představu o jednotlivých veličinách, které se díky studiu spekter dají získat. Kapitola 6 je zaměřena na jednotlivé programy, kterými byla data zpracovávána a pomocí kterých byly získány nové dráhové elementy. Poslední část této práce se věnuje samotné dvojhvězdě 96 Her, kde jsou kromě představení dosavadních výsledků uvedeny i výsledky získané v této práci.

2 Hvězdné spektrum

Spektrum, pojem, pod nímž si dnes každý představí rozdělení intenzity elektromagnetického záření mezi jednotlivé vlnové délky, vzniká po průchodu světla, šířícího se z libovolného zdroje, hranolem nebo jiným rozptylujícím zařízením, jakým je např. difrakční mřížka. Světelný paprsek se rozloží na řadu dílčích paprsků tvořících spektrum, protože se každá vlnová délka od původního směru odchyluje jinak.

2.1 Vznik hvězdných spekter

Nitro hvězd vysílá směrem k povrchu spojitě záření a chová se jako *absolutně černé těleso*. Rozdělení energií ve spektru je dáno *Planckovým zákonem*

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

nebo

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (2)$$

kde h je Planckova konstanta ($h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$), k Boltzmannova konstanta ($k = 1.380658 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$), ν frekvence záření, c rychlost světla ($c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$), a λ vlnová délka záření, přičemž platí

$$B_\nu d\nu = B_\lambda d\lambda; \quad B_\nu = \frac{\lambda^2}{c} B_\lambda.$$

V hlubších vrstvách hvězdy je toto záření zcela pohlcováno atomy plynu a znovu vyzařováno v nejrůznějších spektrálních oborech. Pouze z velmi úzké povrchové oblasti hvězdy proniká spojitě záření do okolního prostoru. Fotony vystupující z této oblasti nám podávají informace o místě, odkud bylo záření vysláno.

Největší dohlednost je ve vlnových délkách, kde nejsou žádné spektrální čáry, v tzv. *kontinuu* (spojité spektrum tepelného původu). Záření kontinua k nám přichází z největších hloubek, z oblastí s vyšší teplotou. Ani v kontinuu není dohlednost ve všech vlnových délkách stejná. Výsledkem pak je, že rozložení energie ve spektru hvězdy se liší od rozložení energie absolutně černého tělesa.

Ve vlnových délkách, jenž odpovídají vlnovým délkám fotonů vznikajících při vázaně-vázaných přechodech je dohlednost obecně menší, dochází k poklesu

jasu, oblasti ve spektru jeví tmavší čáry a pozorují se tzv. *absorpční čáry*. Ve hvězdách se pozorují občas i tzv. *emisní čáry*. Ty se objevují tehdy, jsou-li vrstvy, v nichž vznikají, teplejší, než vrstvy, odkud k nám záření přichází. (Emisní čáry, které se nacházejí ve spektrech některých hvězd a nenacházejí se ve spektrech pozorovaných v laboratorních podmínkách na Zemi, se nazývají *zakázané čáry*. Zdrojem těchto čar jsou atomy s tzv. *metastabilními hladinami*. Metastabilní stav atomů na Zemi trvá velmi krátkou dobu, zatímco např. ve velmi řídkých mlhovinách existují dostatečně dlouho na to, aby mohly zakázané čáry vyzařovat.)

2.2 Základy atomové fyziky

K pochopení vzniku čar a k porozumění vlivů, které je nějakým způsobem ovlivňují (např. čím a proč dochází k rozšiřování čar), je nutné se seznámit se základy atomové fyziky.

2.2.1 Stavba atomů

Atom se skládá ze dvou částí – rozměrově malého kladně nabitého jádra, jež je tvořeno kladně nabitými protony a neutrálními neutrony, a z elektronového obalu, který je složen ze záporně nabitých elektronů. Pokud je počet protonů a elektronů v atomu shodný, je jeho celkový elektrický náboj nulový a hovoří se o neutrálním atomu. Elektrony k jádru váže tzv. *elektrostatická (Coulombova) síla*, a tvoří-li elektron s protonem vázanou soustavu, pak trajektorii elektronu kolem jádra je elipsa, a proton se nachází v jednom z ohnisek této elipsy. Z kvantové fyziky je známo, že dovolené dráhy elektronů kolem jádra jsou pouze takové, při kterých je moment hybnosti $n\frac{h}{2\pi} = n\hbar$, kde n je celé číslo a h Planckova konstanta. Platí, že $n\hbar = mvr$, kde m je hmotnost elektronu, v jeho okamžitá rychlost a r vzdálenost od jádra. Každé dráze odpovídá jistá energie

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{Ze^2}{r}, \quad (3)$$

kde Z je protonové číslo (počet protonů v atomu).

2.2.2 Excitace, deexcitace

Obíhá-li elektron na dráze nejbližší k jádru, je v tzv. *základním kvantovém stavu*. Při přechodu mezi dvěma hladinami E_n a E_{n+1} je pohlceno nebo vyzáře-

no kvantum energie

$$h\nu = |E_n - E_{n+1}|. \quad (4)$$

Dodáním energie atomu se elektron dostává na energeticky vyšší hladinu (vázaně-vázaný přechod) a mluví se pak o *excitaci* atomu. K ní může dojít z důvodu pohlcení fotonu, jehož energie právě odpovídá rozdílu mezi energetickými hladinami atomu ΔE (frekvence fotonu ν musí vyhovovat vztahu $h\nu = \Delta E$) nebo díky nepružné srážce s jiným atomem, přičemž energie potřebná na excitaci se získá z kinetických energií obou částic, jež se srazily. V tomto stavu atom setrvává velmi krátce (cca 10^{-9} s) a opět se elektron vrací do nižší energetické hladiny. Dochází k tzv. *deexcitaci*. K ní dochází buď samovolným přechodem elektronu (tzv. spontánní přechod¹), přičemž rozdíl v energiích daných hladin sebou odnese vyzářený foton, nebo může dojít k přechodu elektronu díky pružným srážkám dvou atomů či iontů a rozdíl energií si odnášejí obě částice, což se projeví zvýšením jejich kinetické energie. K tomuto druhému případu dochází v oblastech, kde je frekvence srážek jednotlivých atomů nebo iontů velmi vysoká.

2.2.3 Ionizace, rekombinace

Při dostatečně velké energii, která může být atomu dodána, dochází k tak velkému vzdálení elektronu od jádra, že síla, která je k sobě váže, je překonána a elektron se od jádra odpoutá. Atom je tedy ochuzen o jeden popř. více elektronů a jde o tzv. *ionizaci* (vázaně-volný přechod). Mluví-li se o ionizačním napětí (potenciálu), míní se tím nejmenší energií, která je k tomuto procesu odpoutání zapotřebí. Každá vyšší energie než je ionizační potenciál atom nejprve ionizuje, ale její přebytek se spotřebuje ve formě kinetické energie odlétnutého elektronu. Tuto jednoduchou formulaci můžeme zapsat rovnicí

$$E_i = \chi_i + \frac{1}{2}mv^2, \quad (5)$$

kde E_i je energie dodaná, χ_i je ionizační potenciál, m hmotnost a v rychlost uvolněného elektronu. (V tomto případě se jedná o kladný ion. Pokud atomu naopak jeden nebo více elektronů chybí, jedná se o záporný ion.) χ_i je pro každou dráhu v daném atomu konstantou. Atomy, které ztratily své elektrony

¹Elektron se na základní hladinu může dostat přímo, nebo postupně, kaskádovitým procesem, tzv. *fluorescencí*.

a staly se z nich kladné ionty, mají tendenci s elektrony opět *rekombinovat* (volně-vázaný přechod), tj. vytvořit znovu neutrální celek.

Spektrální čáry neutrálních prvků se označují symbolem I (př. CaI je neutrální vápník). Je-li prvek jednou ionizovaný, označuje se římskou číslicí II, prvek n -krát ionizovaný pak jako prvek $(n+1)$ (př. FeXIV je třináctkrát ionizovaný atom železa).

2.3 Spektrum vodíku

Nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru je vodík. Jeho atom je nejjednodušším neutrálním atomem, neboť je tvořen pouze kladným a hmotným protonem a záporným lehkým elektronem.

Přechody, v jejichž důsledku vzniká čárové spektrum, jsou povolené přechody mezi vázanými stavy s různými energiemi (jde o tzv. *vázaně-vázané přechody* spojené s vyzářením nebo pohlcením fotonu o odpovídající energii).

Nejdůležitějšími přechody jsou ty, kdy alespoň jedna z hladin odpovídá hlavnímu kvantovému číslu $n = 1, 2, 3, 4$ (vytváří se mezi jednotlivými hladinami jisté série).

Lymanova série se vztahuje k přechodu $n_a = 1$ (není pozorovatelná ze Země, neboť je záření absorbováno atmosférou), *Balmerova série*, $n_a = 2$, která je ve viditelné oblasti spektra a je velmi důležitá při klasifikaci hvězdných spekter, *Paschenova série*, $n_a = 3$, *Brackettova série*, $n_a = 4$ a *Pfundova série* $n_a = 5$. Všechny tři posledně zmiňované se nacházejí v oblasti infračerveného oboru.

Vlnové délky čar jednotlivých sérií lze vypočítat z relace

$$h\nu = \Delta E = \frac{E_1}{n_a^2} - \frac{E_1}{n_b^2} \longrightarrow \frac{1}{\lambda} = -\frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right) = R \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right), \quad (6)$$

kde R je tzv. *Rydbergova konstanta*, která vlastně vyjadřuje energii ionizace atomu vodíku v základním elektronovém stavu a jejíž velikost je $R = 1.097373177 * 10^7 m^{-1}$, resp. $R = 13.6 eV$.

Vlnové délky některých jednotlivých čar v sériích jsou v následujícím přehledu.

Lymanova série			Balmerova série		
n_b	$\lambda(nm)$	označení	n_b	$\lambda(nm)$	označení
2	121.57	L_α	3	656.28	H_α
3	102.58	L_β	4	486.13	H_β
4	97.25	L_γ	5	434.05	H_γ
∞	91.2	hrana série	∞	364.45	hrana série

Paschenova série		
n_b	$\lambda(nm)$	označení
4	1875.1	P_α
5	1281.8	P_β
6	1093.8	P_γ
∞	820.4	hrana série

Pro vodík jsou velmi významné i přechody vázaně-volné (vodík září a pohlcuje v kontinuu²), při nichž dochází k odpoutání elektronu z atomu ionizací nebo naopak dojde k zachycení elektronu negativním vodíkovým iontem H^- , kdy dochází k vyslání fotonu elektronem při jeho prolétnutí kolem iontu, a tím ke ztrátě kinetické energie elektronu. Ten má ale i nadále dostatek energie k tomu, aby se z dosahu iontu vzdálil. Nejvíce vodík interaguje těsně za hranami spektrálních sérií, nejzřetelněji však za hranou Lymanovy série, v tzv. Lymanově kontinuu.

U deuteria, těžkého vodíku, je spektrum shodné se spektrem normálního vodíku, avšak neutron, který je v jádru navíc, zvyšuje jeho hmotnost a frekvence přechodů jsou vyšší. Ve viditelné oblasti spektra jsou vlnové délky spektrálních čar posunuty přibližně o 0,15nm ke kratším vlnovým délkám.

2.4 Spektrum těžších prvků

Podobné spektrum jako má vodík mají všechny jednoelektronové ionty, jakým je např. ionizované helium HeII. I zde lze najít období spektrálních sérií, ale s tím rozdílem, že jsou posunuty ke kratším vlnovým délkám (jako u deuteria, o němž byla zmínka v předchozí kapitole).

Ionizační potenciál atomu s jedním elektronem a o protonovém čísle Z je pak Z^2 -krát větší než u vodíku a platí

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right). \quad (7)$$

U helia je nejdůležitější série pro hladinu $n_a = 4$, tzv. *Pickeringova*, neboť spadá do oblasti viditelného spektra. Vlnové délky přechodů ze sudých hladin $n_b = 6, 8, 10, \dots$ odpovídají přibližně vlnovým délkám Balmerovy série vodíku, čáry vznikající přechodem z lichých hladin jsou mezi nimi.

²K záření nebo pohlcování světla v kontinuu nemusí docházet jen díky vázaně-volným a volně-volným přechodům. Třetí možnou příčinou absorpce v kontinuu je *rozptyl na volných elektronech* – světlo dopadající na částici z jednoho směru je rozptýleno do všech ostatních směrů, takže ve směru původním nastává úbytek světla.

Neutrální helium má spektrum velmi složité, jsou zde série čar s triplety a singlety.

U víceelektronových atomů se kromě interakce elektronu s jádrem uplatňuje i interakce elektronu s ostatními elektrony v obalu, a celá situace je mnohem složitější. Nicméně i tady existují jistá pravidla a to v podobě čtyř kvantových čísel (n, m, l, s). Jednotlivé stavy atomu lze touto čtveřicí popsat, a platí, že každé čtveřici odpovídá jiná energie. Ukazuje se, že pravděpodobnost některých přechodů mezi hladinami je vyšší. Velká je u tzv. povolených přechodů, malá u přechodů zakázaných.

3 Spektrální klasifikace

Nejdůležitějším parametrem hvězd, který určuje podobu jejich spektra, je teplota. Spektrální (harvardská) klasifikace je rozdělení hvězd do tříd podle charakteristických rysů nacházejících se ve spektrech. Hvězdy jsou zde rozděleny do spektrálních tříd W, O, B, A, F, G, K, M, L, T, S, R, N, viz.1, přičemž celá spektrální klasifikace zahrnuje ještě spektrální třídy Q a P, kde Q je spektrum charakteristické pro novy a P je pro planetární mlhoviny.

Tabulka 1: Spektrální klasifikace hvězd

Typ	Povrchová teplota [K]	Hlavní charakteristiky
W	50 000 – 25 000	WN - převážně čáry N, WC - převážně čáry C a O; u obou výrazné He, slabší H; emisní i absorpční čáry
O	40 000 – 25 000	He II, He I, H I, O III, N III, C III, Si IV
B	28 000 – 11 000	He I, H I, C II, O II, N II, Fe III, Mg III
A	11 000 – 7 500	H I, Ca II, čáry ostatních ionizovaných kovů
F	7 500 – 6 000	H I, Ca II, Ti II, Fe II
G	6 000 – 5 000	Ca II, H I, Fe I, čáry neutrálních kovů obecně
K	5 000 – 3 500	Ca I, čáry kovů, molekulární pásy CH a CN
M	3 500 – 3 000	pásy molekul TiO, čáry kovů
L	1 300 – 2 000	Li, pásy FeH, CrH, H ₂ O, CO ₂
T		CH ₄
S	3 500 – 2 500	molekulární pásy TiO, ZrO, emisní čáry H
R,N	3 500 – 2 500	pásy molekul CN, CH, C ₂

Rozdělení lze provést i podrobněji, proto se u jednotlivých tříd objevují ještě různé předpony charakterizující hvězdu (**g** (giant = obr), **c** (veleobr), **d** (dwarf = trpaslík), **sg** (subgiant = podobr), **wd** (white dwarf = bílý trpaslík)) a přípony, které určují vzhledové zvláštnosti spektra **s** (sharp = ostré čáry), **e** (emission = emisní čáry), **n** (nonsarp = neostré čáry), **k** (čáry mezihvězdného prostředí), **v** (variable = proměnné čáry), **p** (peculiar = zvláštní spektrum) a další.

Dalším parametrem ovlivňujícím spektra hvězd je gravitační zrychlení g , jež se projevuje na vzhledu spektrálních čar. Pokud je gravitační zrychlení velké, atmosféra hvězdy bývá hustá a tenká. Díky tomu, že zde dochází k častým srážkám, spektrální čáry jsou rozšířené. Jsou-li naopak čáry ostré a hluboké,

jedná se o spektra hvězd s malým povrchovým zrychlením. K tomuto rozdělení se užívá tzv. *Morganovy-Keenanovy klasifikace*, v níž se ke spektrálním typům harvardské klasifikace doplňuje tzv. *luminozitní třída*, která také přibližně určuje polohu hvězdy v Hertzsprungově-Russellově diagramu.

Tabulka 2: Luminozitní třídy

Označení	Typ hvězdy
Ia	jasní veleobří
Ib	veleobří
II	nadobří
III	obří
IV	podobří
V	hvězdy hlavní posloupnosti
VI	podtrpaslíci
VII	bílí trpaslíci

4 Horké hvězdy

Dříve se hvězdy rozdělovaly na tzv. *rané* (early) a *pozdní* (late), což bylo dáno tehdejší představou o hvězdném vývoji. Dnešní dělení na *horké* a *chladné hvězdy* vychází jak z kvantitativních tak kvalitativních charakteristik. Nejdůležitější vlastností hvězdy je především hmotnost M , dále pak zářivý výkon L , poloměr R , gravitační zrychlení g a efektivní teplota T_{ef} .

Rozdělit hvězdy na horké a chladné lze několika způsoby, podle toho, na které vlastnosti se zaměříme. To, jak se nám hvězdy jeví, zda mají stabilní či rozpadající se magnetická pole, zda se nějak aktivně projevují (tím jsou myšleny fotosférické skvrny, erupce, protuberance) poukazuje na souvislosti s teplotou. Rozhraní mezi oběma skupinami probíhá přibližně u spektrálního typu F2, což odpovídá efektivní teplotě kolem 7 000 K.

Horké hvězdy se od chladných liší tím, že se projevují klidnými atmosférami, stabilními globálními magnetickými poli a také tím, že se tok energie proudící z nitra hvězdy k podpovrchovým vrstvám přenáší zejména zářením než konvekcí.

Mezi horkými hvězdami jsou hvězdy s různými hmotnostmi i stářím a do oblasti horkých hvězd se mohou dostat v různých stádiích svého vývoje, přičemž jedná-li se o dvojhvězdné systémy, vše závisí nejen na hmotnostech složek, ale také na orbitálních vlastnostech celé soustavy.

Do horkých hvězd se řadí několik typů hvězd jako jsou např. proměnné typu δ Scuti, Wolfovy-Rayetovy hvězdy, (Herbigovy) Ae/Be hvězdy, proměnné typu RR Lyrae, proměnné typu β Cephei a další.

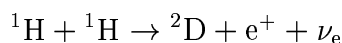
4.1 Hlavní posloupnost

Na hlavní posloupnost se hvězda ve svém vývoji dostává ve chvíli, kdy se smršťováním zahřeje natolik, že se v jejím centru zapálí termonukleární reakce. Jejich výkon je pak natolik velký, že je schopen uhradit energetické ztráty dané tokem energie z nitra na povrch. V této fázi stráví hvězda (80–90)% svého aktivního života. Zda tato doba bude řádově miliony nebo miliardy let záleží samozřejmě na počáteční hmotnosti hvězdy, přičemž čím je hvězda hmotnější, tím je ve fázi hlavní posloupnosti kratší dobu.

4.1.1 Protonově-protonový řetězec

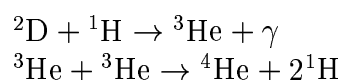
Přeměna vodíku na helium může probíhat různými způsoby, neboť energetická účinnost jednotlivých jaderných reakcí velmi závisí na teplotě. Je-li v cen-

trální části hvězdy teplota od 7 do 17 milionů kelvinů, nejvíce energie se uvolní prostřednictvím tzv. *protonově-protonového (p-p) řetězce*.

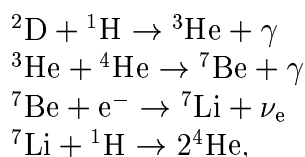


V této první reakci vzniká po srážce dvou protonů (jader vodíku) deuterium, pozitron a neutrino. Neutrino díky svému velmi malému účinnému průřezu lehce prochází hvězdou až do okolního kosmického prostoru.

Existuje několik způsobů jak může tento p-p řetězec pokračovat. Buď se může realizovat reakcemi



nebo



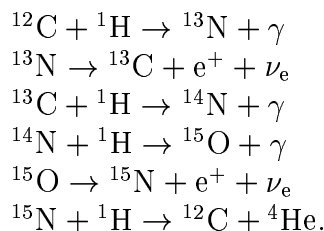
kde γ je kvantum záření γ .

Přibližně v 70% případech se uplatňuje první způsob, ve zbylých 30% případech pak druhý způsob.

Protonově-protonový řetězec hraje důležitou roli především u hvězd, jejichž hmotnosti jsou menší než $1,8 M_{\odot}$. Jaderné reakce zde hoří v blízkosti centra, přenos energie probíhá prostřednictvím zářivé difúze a vyhořelý materiál se tudíž nepromíchává.

4.1.2 CNO cyklus

U hvězd, jejichž centrální teplota je vyšší než 17 milionů kelvinů, je energeticky významnější tzv. *uhlíkovo-dusíkovo-kyslíkový (CNO) cyklus*, v němž jádra uhlíku, dusíku a kyslíku slouží jako katalyzátory. I zde existuje několik variant, jak tento proces může probíhat. Jednou z možností je



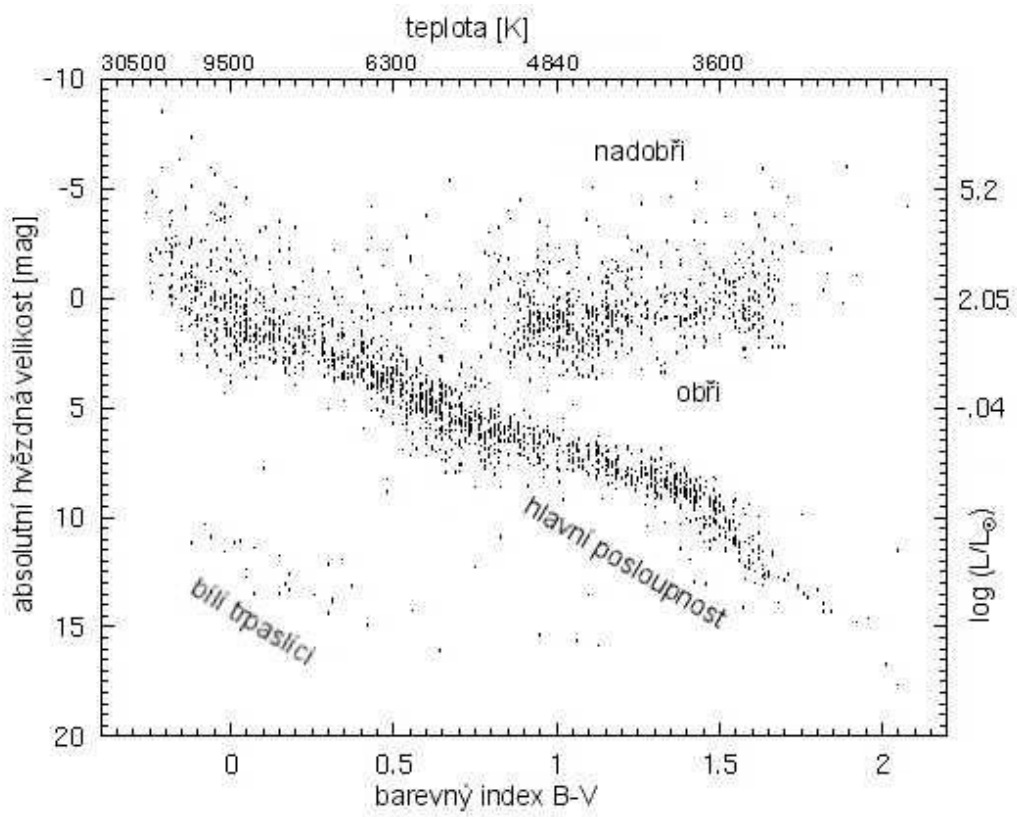
Celková energetická bilance CNO cyklu je na jeden atom helia nepatrně menší než u protonově-protonového řetězce, neboť je více energie ztraceno vyzářením neutrin.

Díky tomu, že ke spalování vodíku dochází v tomto případě velmi rychle a děje se tak především v malé části samotného centra hvězdy, nestíhá zářivá difúze veškerou energii odvádět pryč. Proto se zde uplatňuje i proces konvekce, díky němuž se jednotlivé vrstvy promíchávají a do centra se dostává nový materiál.

Během vývoje hvězdy na hlavní posloupnosti dochází k velkým změnám její vnitřní stavby. V centrálních oblastech se hromadí helium. I když je ve hvězdě dostatek vodíku, do centrální oblasti se nedostane, neboť je tato část hvězdy od okolních vrstev oddělena jistou statickou zónou, kde se energie přenáší především zářivou difúzí. I přesto, že se v jádře vodík postupně vyčerpává, výkon hvězdy přesto neklesá a to díky tomu, že se centrální části hvězdy pozvolna hroutí. To je důsledek toho, že se ve hvězdě neustále udržuje mechanická rovnováha. Vnitřek hvězdy se pomalu zahřívá a tempo jaderných reakcí roste. Výkon jádra se zvyšuje a tok uvolňované energie způsobí nárůst potenciální energie obalu a hvězda se začne rozpínat. Jádro se pomalu osamostatňuje a efektivní teplota hvězdy začne s časem klesat. (To ale neplatí u hvězd s hmotností sluneční a menší, kde efektivní teplota stále mírně roste.) V okamžiku, kdy se v jádře vyčerpá téměř všechen vodík, hvězda svůj vývoj na hlavní posloupnosti končí a stává se obrem.

4.2 Hertzsprungův-Russellův diagram

Hertzsprungův-Russellův diagram (HR diagram) je závislost svítivosti hvězdy na jejím spektrálním typu. Na vodorovnou osu se kromě spektrálního typu často vynáší i efektivní teplota nebo někdy též barevný index ($B-V$), neboť barva hvězd je funkcí spektrální třídy. Na svislou osu se vynáší absolutní hvězdná velikost vyjádřená v magnitudách. Každá hvězda se během svého života vyvíjí a postupně se v diagramu přemísťuje. Jak je zřejmé z obr. 1, nejsou hvězdy v diagramu rozmístěny rovnoměrně, ale shlukují se do určitých celků. Úhlopříčně diagramem prochází oblast hlavní posloupnosti, která ještě vlevo nahoře zahrnuje horké hvězdy s vysokou svítivostí, tzv. modré obry, vpravo dole pak málo žhavé červené trpaslíky. V diagramu vpravo nahoře se nacházejí veleobři a červení obři, což jsou stadia, do nichž se hvězda dostává po opuštění hlavní posloupnosti. Vlevo dole je pak oblast bílých trpaslíků, což jsou hvězdy v závěrečné fázi svého vývoje.



Obrázek 1: Hertzsprungův-Russellův diagram

5 Spektroskopické dvojhvězdy

Významná většina hvězd se nachází ve dvojhvězdách a vícenásobných hvězdných systémech. Podle způsobu objevení se dělí na dvojhvězdy *vizuální*, *astrometrické*, *spektroskopické* a *zákrytové*.

Vizuální dvojhvězdy byly objeveny díky optickým přístrojům, přičemž se může jednat o dvojhvězdy fyzické nebo jen optické. Astrometrické dvojhvězdy byly odhaleny na základě nerovnoměrnosti ve vlastním pohybu jasnější složky, spektroskopické podle periodických změn spektrálních čar k nimž dochází díky Dopplerově efektu a zákrytové, které byly objeveny podle světelných změn soustavy.

U spektroskopických dvojhvězd bývá v mnoha případech jedna ze složek natolik zářivě dominantní, že se ve spektru pozorují čáry pouze této složky. Těmto spektroskopickým dvojhvězdám se říká *jednočárové*. Ve zbylých případech se jedná o dvojhvězdy *dvoučárové*, kdy spektrum je složeno z obou složek a nacházejí se v něm dva systémy spektrálních čar. Je jasné, že toto rozdělení souvisí s dostupnou pozorovací technikou. Čím lepší přístroje se používají, tím je lepší rozlišení čar a tedy větší pravděpodobnost nalezení spekter od obou složek dvojhvězdy.

5.1 Dopplerův efekt

Pozorování spektroskopických dvojhvězd je založeno na měření dopplerovského posuvu spektrálních čar, ke kterému dochází v důsledku orbitálního pohybu složek. Jestliže se jedna ze složek pohybuje směrem k pozorovateli, je vlnová délka jejího světla posunuta ke kratším vlnovým délkám a naopak, pokud se pohybuje od pozorovatele, posuv se děje k delším vlnovým délkám. Platí, že

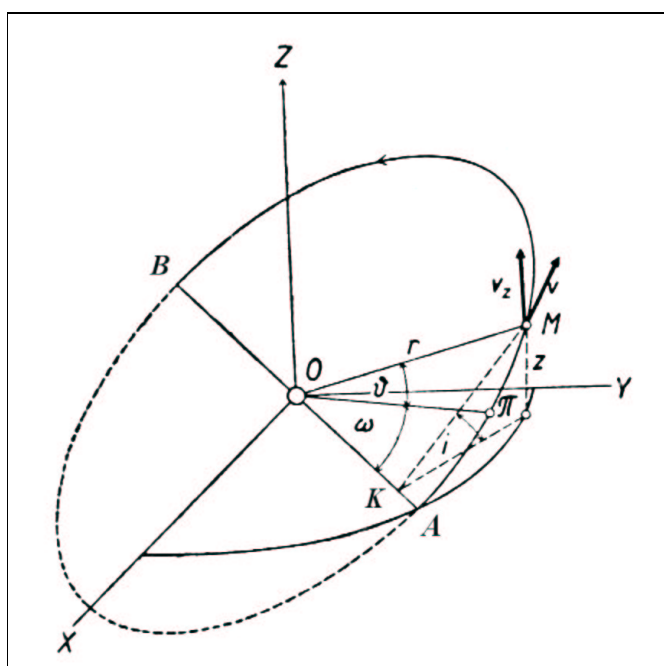
$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_r}{c}, \quad (8)$$

kde λ_0 je laboratorní vlnová délka příslušné čáry, λ je vlnová délka měřená, která je již opravena o Dopplerův efekt okamžité rychlosti Země a v_r je radiální rychlost, tj. rychlost pohybu jedné ze složek dvojhvězdy ve směru zorného paprsku. Radiální rychlost může mít kladnou nebo zápornou hodnotu a to podle toho, zda se hvězda pohybuje směrem od pozorovatele nebo k němu. Jestliže se zjistí periodické kolísání v_r s časem kolem nějaké průměrné hodnoty $v_{0,r}$, lze odečtením $v_r - v_{0,r}$ určit okamžitou složku radiální rychlosti způsobenou oběhem příslušné komponenty kolem společného těžiště. Pozorováním dvojhvězdy v jednotlivých fázích oběhu lze poté měřit periodickou změnu $\Delta\lambda$ něko-

lika čar kolem střední polohy. Jestliže jsou obě složky dostatečně jasné, dochází k periodickému rozestupu jedné a téže čáry na dvě složky. Rozdíl vlnových délek rozestupu čar pak odpovídá rozdílu okamžitých radiálních rychlostí obou komponent dvojného systému. Stojí za zmínku, že zde může být přítomna i třetí složka čáry, která se tohoto periodického děje neúčastní, a která vzniká absorpcí v mezihvězdném plynu.

5.2 Dráhové elementy

Obě tělesa v daném dvojném systému vykonávají pohyb po kuželosečkách (ve většině případů se jedná o elipsy, v některých případech lze dráhy jednotlivých komponent popsat kružnicemi), přičemž hvězdy obíhají kolem společného těžiště celého systému. Geometrická situace je znázorněna na obr. 2. XY je rovina tečná k nebeské sféře, která je kolmá na směr zorného paprsku, který je určen rovinou Z . Bodem A je znázorněn *vzestupný uzel*, bodem B pak *sestupný uzel*. Dráha je vzhledem k nebeské sféře skloněna o úhel i .



Obrázek 2: Geometrie dráhy dvojhvězdy

Vzdálenost hvězdy od roviny nebeské sféry je dána vztahem

$$z_j = MK \sin i = r_j \sin(\vartheta(t) + \omega_j) \sin i, \quad (9)$$

kde r_j je průvodič hvězdy, $\vartheta(t)$ je *pravá anomálie* (úhel mezi průvodičem jedné komponenty a směrem k periastru), ω_j délka periastra (což je úhlová vzdálenost mezi periastrum a uzlovou přímkou) a i sklon dráhy (úhel mezi rovinou, v níž kolem sebe složky dvojhvězdy obíhají a rovinou kolmou na směr zorného paprsku). Index $j = 1, 2$. Z toho pro radiální rychlost plyne, že

$$\frac{dz_j}{dt} = r_j \sin i \cos(\vartheta(t) + \omega_j) \frac{d\vartheta(t)}{dt} + \sin i \sin(\vartheta(t) + \omega_j) \frac{dr_j}{dt}. \quad (10)$$

Z geometrie elipsy plyne pro průvodič hvězdy

$$r_j = \frac{a_j(1 - e^2)}{1 + e \cos \vartheta(t)}. \quad (11)$$

(Je-li hlavní poloosa elipsy (pro jednoduchost a větší přehlednost jsou zde vynechány indexy) $a = \frac{1}{2}(r+r')$, vedlejší poloosa $b = \sqrt{a^2(1 - e^2)}$ a excentricita $e = \frac{c}{a}$, kde c je vzdálenost ohniska od středu elipsy, lze s využitím kosinové věty pro trojúhelník psát

$$r' = \sqrt{(r^2 + 4aer \cos \vartheta + 4a^2e^2)} \quad (12)$$

a s využitím vztahu $r + r' = 2a$ se už získá námi požadovaný vztah (11).)

Pomocí tohoto vztahu lze určit $\frac{dr_j}{dt}$ v závislosti na pravé anomálii $\vartheta(t)$ a současně s využitím zákona ploch, kde platí

$$r_j^2 \left(\frac{d\vartheta(t)}{dt} \right) = \frac{2\pi a_j b_j}{P} = konst. \quad (13)$$

lze dostat

$$\frac{dz_j}{dt} = \frac{2\pi}{P} \frac{a_j \sin i}{\sqrt{(1 - e^2)}} [\cos(\vartheta(t) + \omega_j)(1 + e \cos \vartheta(t)) + e \sin \vartheta(t) \sin(\vartheta(t) + \omega_j)]. \quad (14)$$

Úpravou se pak získá vztah

$$\frac{dz_j}{dt} = (3 - 2j)K_j [e \cos \omega_j + \cos(\vartheta(t) + \omega_j)], \quad (15)$$

kde

$$K_j = \frac{2\pi a_j \sin i}{P\sqrt{(1-e^2)}}. \quad (16)$$

Protože veličina $2K_j$ je amplitudou radiální rychlosti, K_j představuje její polo-
viční hodnotu.

S přihlédnutím k tomu, že těžiště soustavy má určitou složku pohybu ve směru zorné přímky vzhledem ke Slunci, radiální rychlost hvězdy bude nabývat konečného tvaru

$$\frac{d\zeta_j}{dt} = \gamma + (3 - 2j)K_j[e \cos \omega_j + \cos(\vartheta(t) + \omega_j)]. \quad (17)$$

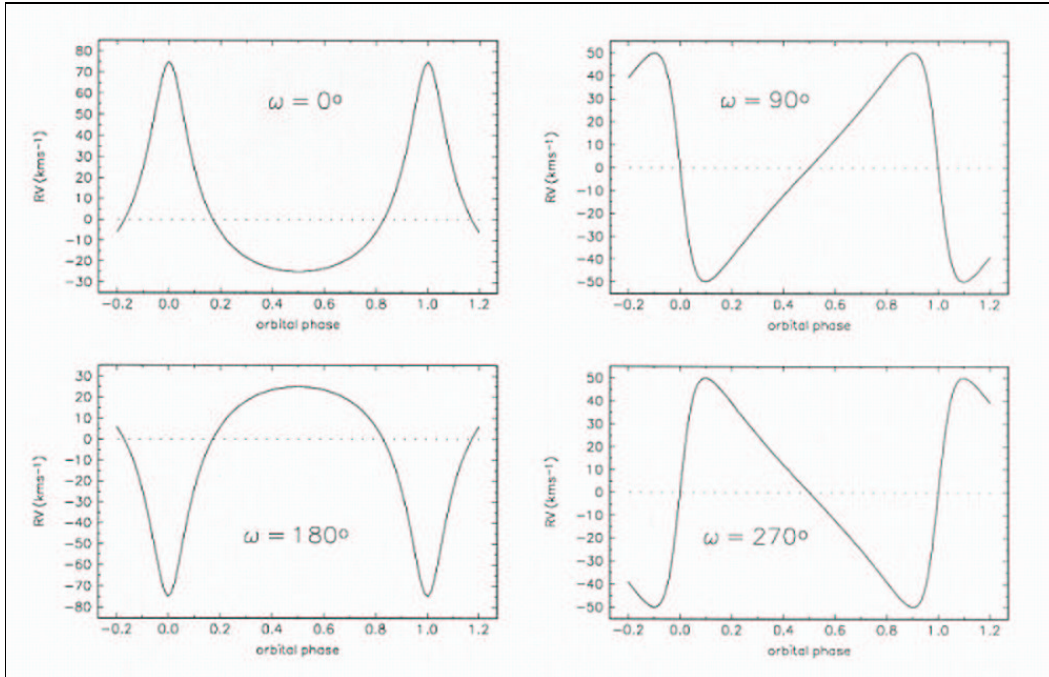
Problém, který se poté řeší, je nalézt parametry popisující pohyb po dané elipse, přičemž tyto parametry musí splňovat rovnici (17). K jejich nalezení vede pozorování a následné studium změn v radiálních rychlostech jednotlivých složek dvojhvězdy. Změny radiálních rychlostí³ se vynášejí v závislosti na čase do grafů a vytváří se tak tzv. *křivka radiálních rychlostí*. Vzhled křivky se výrazně mění podle toho, zda se složky pohybují po kruhových či eliptických drahách. Na obr. 3 jsou vidět křivky radiálních rychlostí s výstřednou dráhou složky odpovídající konkrétním hodnotám délky periastra ω . Pro $\omega = 0^\circ$ a 180° jsou kolem fáze maxima resp. minima radiálních rychlostí úzké extrémy. U křivek pro $\omega = 90^\circ$ a 270° je vidět, že při přechodu od maxima do minima a zpět je jedna část křivky velice strmá a druhá pozvolná, přičemž části křivky pod a nad hodnotou rychlosti γ jsou zrcadlově symetrické. U dvoučárových spektroskopických systémů si jsou křivky radiálních rychlostí jednotlivých složek podobné, ale probíhají v protifázi. U jednočárových dvojhvězd lze vykreslit jen jednu křivku radiálních rychlostí.

Z rovnice (17) plyne, že největší hodnota radiální rychlosti bude měřena tehdy, když $\cos(\vartheta(t) + \omega_j) = 1$, tj. ve vzestupném uzlu. Tato maximální hodnota bude

$$\frac{d\zeta_j}{dt} = \gamma + (3 - 2j)K_j + K[e \cos \omega_j]. \quad (18)$$

Nejmenší hodnotu má radiální rychlost při $\cos(\vartheta(t) + \omega_j) = -1$, tj. v sestupném

³Změny radiálních rychlostí se zpravidla vztahují k okamžiku pozorování vyjádřeného v juliánských dnech a jejich zlomecích. Juliánské datum je volně plynoucí časový údaj odpovídající počtu dnů, které uplynuly od poledne 1. ledna roku 4713 př. n. l., neboť tento den je definován jako nulový bod na této časové stupnici.



Obrázek 3: Křivky radiálních rychlostí dvojhvězdy pro parametry $\gamma = 0$, $e = 0.5$ odpovídající čtyřem různým hodnotám délky periastra ω

uzlu. Vyjádřit ji lze jako

$$\frac{d\zeta_j}{dt} = \gamma - (3 - 2j)K_j + K_j[e \cos \omega_j]. \quad (19)$$

Rozdíl těchto dvou extrémních hodnot dává již dříve zmiňovanou amplitudu radiální rychlosti $2K_j$.

Shrne-li se vše dohromady, vyplývá z toho, že dráha spektroskopických dvojhvězd je tedy dána šesti parametry, tzv. *dráhovými elementy*, mezi které patří

P – oběžná doba, kterou lze určit přímo z periodicity radiálních rychlostí

T – okamžik průchodu periastrum

e – excentricita dráhy, jež se určuje z tvaru křivky radiálních rychlostí (pokud je nulová, křivka má tvar sinusoidy a složky se pohybují po kruhových trajektoriích)

ω_j – délka periastra, což je úhlová vzdálenost mezi periastrum (bodem největšího přiblížení složek dvojhvězdy na jejich oběžných drahách) a uzlovou

přímku (přirozeně platí, že $\omega_2 = \omega_1 + 180^\circ$)

γ – radiální rychlost těžiště systému vzhledem ke Slunci

K_j – polovina amplitudy. Všechny tyto parametry se z pozorovaných měření

radiálních rychlostí určují metodou nejmenších čtverců. Ze získaných elementů lze poté vypočítat dolní odhad velikosti poloos a_j jednotlivých elips

$$a_j \sin i = \frac{P}{2\pi} K_j \sqrt{1 - e^2}. \quad (20)$$

Sečtením těchto dvou rovnic ($j = 1, 2$) se dostane

$$a \sin i = (a_1 + a_2) \sin i = \frac{P}{2\pi} (K_1 + K_2) \sqrt{1 - e^2}. \quad (21)$$

5.3 Hmotnosti jednotlivých složek

Poloha tělesa ve dráze v daném okamžiku t je jednoznačně popsána tvarem dráhy a pravou anomálií $\vartheta(t)$. Redukuje-li si daný problém na pohyb po kruhové dráze, pak lze pravou anomálii nahradit *střední anomálií*, která je dána vztahem $M(t) = \frac{2\pi}{P}(t - T)$, kde perioda P je vyjádřena ve dnech a okamžik průchodu periastronem T obvykle ve dnech juliánských. Vztah mezi pravou anomálií a střední anomálií je dán přes *anomálii excentrickou*, $E(t)$, a to

$$M(t) = E(t) - e \sin E(t), \quad (22)$$

což je tzv. *Keplerova rovnice*. Její řešení je možné pomocí iterací, kdy se v prvním přiblížení položí $E(t) \sim M(t)$. K rychlejším výpočtům byly v minulosti vytvořeny různé tabulky, např. [12]. Nyní se vše zjednodušuje díky počítačům a vyspělé technologii, a tak je možné nalézt $E(t)$ rychle a hlavně s velkou přesností. Vztah dávající do souvislosti excentrickou a pravou anomálii je

$$\tan \frac{\vartheta(t)}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \tan \frac{E(t)}{2}. \quad (23)$$

Potíž zde nastává v tom, že velké poloosy drah a_1 , a_2 a sklon dráhy i k tečné sféře nelze určit jednotlivě, nýbrž jen jako součin $a \sin i$ ⁴.

A. Dvoučárové dvojhvězdy

Budou-li a_1 , a_2 velké poloosy drah jednotlivých složek dvojhvězdy, M_1 , M_2 hmotnosti, P oběžná doba a G gravitační konstanta, pak s použitím 3. Keple-

⁴Tato neurčitost souvisí se skutečností, že se měří pouze radiální složka dráhové rychlosti.

rova zákona, jehož tvar je

$$P^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(M_1 + M_2)} \quad (24)$$

lze psát

$$M_j = \frac{a_{3-j}}{a} (M_1 + M_2) = \frac{PK_{3-j}\sqrt{1-e^2}}{2\pi a \sin i} \frac{4\pi^2 a^3}{GP^2} \quad (25)$$

Úpravou pak

$$M_j = \frac{2\pi P^2(1-e^2)(K_1 + K_2)^2 K_{3-j}\sqrt{1-e^2}}{4\pi^2 \sin^2 i} \frac{K_{3-j}\sqrt{1-e^2}}{GP \sin i}. \quad (26)$$

Jsou-li tedy známy spektra obou hvězd, z poměru amplitud radiálních rychlostí lze dostat poměr obou hmotností⁵ a následně vypočítat $M_1 \sin^3 i$ a $M_2 \sin^3 i$, kde

$$M_j \sin^3 i = \frac{1}{2\pi G} K_{3-j} (K_1 + K_2)^2 P (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (27)$$

Pokud se hmotnost vyjádří v hmotnostech slunečních, perioda ve dnech a polo-
viční amplitudy křivek radiálních rychlostí v km s^{-1} , lze psát

$$M_j \sin^3 i = 1.036149 * 10^{-7} K_{3-j} (K_1 + K_2)^2 P (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (28)$$

Protože sklon dráhy i není znám, dostane se tak pouze dolní mez pro obě hmotnosti, položí-li se $\sin i = 1$. Pokud je daná spektroskopická dvojhvězda zároveň dvojhvězdou zákrytovou proměnnou s dobře známou světelnou křivkou, sklon dráhy i znám je a určit hmotnosti jednotlivých složek je tedy možné.

V ostatních případech se za $\sin i$ dosazuje nějaká pravděpodobná hodnota, přičemž k jejímu získání se vychází z předpokladu, že polohy dráhových rovin v prostoru jsou zcela náhodné. Označí-li se dS element sféry jednotkového poloměru, jehož normála svírá se zorným paprskem úhel i , pak je 2π plocha polokoule a střední hodnota funkce $\sin^3 i$ dána výrazem

$$\overline{\sin^3 i} = \frac{1}{2\pi} \int_{\Sigma} \sin^3 i dS,$$

⁵Tato úměra může být vyjádřena také ve vztahu k poloosám jednotlivých elips složek dvojhvězdy a to vztahem $\frac{K_2}{K_1} = \frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1}$.

a protože

$$dS = 2\pi \sin i di,$$

platí

$$\overline{\sin^3 i} = 2\pi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^4 i di = \frac{3\pi}{16} \doteq 0.59.$$

V praxi se toto číslo nahrazuje většinou číslem o něco větším a to proto, že se bere v úvahu ta skutečnost, že spektroskopické dvojhvězdy s velkým sklonem jsou pravděpodobnější než se sklonem malým. Často se bere hodnota $\sin^3 i = \frac{2}{3}$.

B. Jednočárové dvojhvězdy

Pokud se pozoruje křivka radiálních rychlostí pouze jasnější složky dvojného systému, lze z parametrů, jež popisují tuto křivku, získat jen $a_1 \sin i$ a tzv. *funkci hmotnosti* $f(M)$, což je veličina definovaná vztahem

$$f_j(M) = \frac{4\pi^2 a_j^3 \sin^3 i}{G P^2} = \frac{M_{3-j}^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2}. \quad (29)$$

Funkci hmotnosti lze vypočítat pomocí parametrů, které se získají přímo z křivky radiálních rychlostí a tedy

$$f_j(M) = \frac{1}{2\pi G} K_j^3 P (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (30)$$

Po vyjádření numericky vychází

$$f_j(M) = 1.036149 * 10^{-7} K_j^3 P (1 - e^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (31)$$

5.4 Perioda a O–C diagram

Většinou prvním úkolem při studiu konkrétní dvojhvězdy je určit z pozorovaných změn radiálních rychlostí dostatečně přesně její periodu P . Vzhledem k tomu, že se u dvoučárových dvojhvězd na začátku neví, která čára patří které složce, není určování periody zcela jednoduché.

Od zcela odhadnutých hodnot se lze ke konečné periodě dostat pomocí dalších zpřesňujících pozorování, případně se dají využít pozorování již dříve zpracovaná a publikovaná. Čím více pozorování člověk k dispozici má a čím jsou častější, tím lépe je křivka radiálních rychlostí pokryta a hodnota periody je spolehlivější.

5.4.1 Zdánlivé a falešné periody

Podarí-li se stanovit periodu konkrétního systému, není jisté, že její hodnota vůbec odpovídá realitě. Často se stává, že se perioda určí špatně. Chyby mohou být způsobeny např. tím, že se dvojhvězda pozoruje pouze z jedné zeměpisné délky a to vždy když prochází meridiánem, tedy ve stejný časový okamžik hvězdného dne. Je také možné, že skutečná perioda je se špatně určenou periodou v poměru malých přirozených čísel. V obou těchto případech se hovoří o tzv. *zdánlivých (fiktivních) periodách*.

Radiální rychlost může být reprezentována periodickou funkcí času t a periody P . Oba parametry vstupují do funkce pomocí fáze φ ,

$$\varphi = \frac{t - T_0}{P},$$

kde T_0 je libovolná doba pozorování, např. čas prvního pozorování. Pro rychlost pak platí

$$V = V(\varphi) = V(\varphi \pm n), \quad (32)$$

kde n je celé číslo. Pak lze také psát

$$V(t, P_r) = V(t, P_x),$$

kde P_r je perioda reálná a P_x perioda fiktivní. Pro jednotlivé fáze platí

$$\frac{t - T_0}{P_r} = \frac{t - T_0}{P_x} \pm n. \quad (33)$$

Když nyní τ , vyjádřené ve stejných jednotkách jako P , bude představovat nejmenší interval pozorování (obvykle jeden siderický den: 23 h 56 min 4,001 s), pak

$$t - T_0 = k\tau,$$

kde k je celé číslo a

$$\frac{k\tau}{P_r} = \frac{k\tau}{P_x} \pm n$$

nebo také

$$\frac{1}{P_x} = \frac{1}{P_r} \pm \frac{n}{k\tau}. \quad (34)$$

Ve většině případů jsou n a k rovny jedné, lze proto psát (vyjádřeno v jednotkách slunečních dní)

$$\frac{1}{P_x} = \frac{1}{P_r} \pm 1.002738. \quad (35)$$

Za zmínku stojí, že když $n = 2, 3, \dots$ budou periody v blízkosti $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}$ dne. Je zřejmé, že pozorované změny s různými periodami dávají stejné křivky radiálních rychlostí. Pokud $k = 2, 3, \dots$ naznačuje to, že pozorování byla uskutečněna každý druhý, třetí den.

5.4.2 Metody hledání period

Při hledání možné periody systému se využívá celá řada matematických metod. Jednou z nich jsou metody založené na setřídění dat pro každou zkoušenou periodu do fázového diagramu. Pro libovolně zvolený časový okamžik se počítají fáze a díky měnění periody po určitých krocích v jistém intervalu, se vypočítávají vždy nové fáze pro jednotlivé okamžiky měření. Ve fázovém diagramu se poté zkoumá míra rozptylu bodů v jednotlivých malých fázových intervalech. Za nejlepší periodu se považuje ta, pro níž je rozptyl ve všech fázích intervalu minimální. Těto metodě se říká *metoda minimalizace fázového rozptylu*. Bližší popis této metody lze nalézt např. v [8]. Další metody jsou založeny na tom, že se již předem předpokládá tvar křivky radiálních rychlostí, vytvoří se její model, a pak se hledá taková perioda, pro níž by se model nejlépe shodoval s naměřenými daty. To se provádí nejčastěji různými regresními metodami, které jsou založeny na metodě nejmenších čtverců.

5.4.3 O–C diagram

Běžně používanou metodou, jak zpřesňovat hodnotu periody a jak zjistit, že je daná perioda dlouhodobě stálá nebo zda se nějakým způsobem mění, je konstruovat tzv. *O–C diagram*, což je časová závislost rozdílu okamžiku pozorovaného (O – Observed) extrému (maxima) v křivce radiálních rychlostí a vypočítaného okamžiku (C – Calculated). Pokud je hodnota periody dostatečně přesná, budou body v tomto diagramu ležet v okolí přímky rovnoběžné s osou x , na níž se ale častěji než čas vynáší epocha, což je reálné číslo charakterizující cykl a fázi. Budou-li se body hromadit kolem přímky s kladnou směrnicí, perioda je sice stálá, ale její hodnota je poněkud delší, než byla zprvu udávána. Podobné je to i v případě přímky se zápornou směrnicí, kde je ale perioda naopak kratší. Občas se stane, že se získá periodický průběh odchylek. V tomto případě se perioda buď lineárně zvětšuje nebo zmenšuje, což může být

jako důsledek přenosu hmoty mezi těsnými složkami dvojhvězdy. Časté jsou i případy, kdy změny periody jsou komplikovanější a dají se popsat polynomem vyššího stupně. Vykazuje-li O–C diagram periodické změny, lze se domnívat, že v systému je přítomno třetí těleso nebo se oběžná dráha systému v prostoru stáčí. Pokud je průběh odchylek nespojitý a je s výrazným sklonem, může se jednat o situaci, kdy se období stability skokově mění například díky nějakým eruptivním procesům. Dříve než učiníme nějaký závěr, je dobré se ale nejprve přesvědčit, zda nedošlo k chybě v počítání s jednotlivými daty.

Jakmile je nalezena perioda systému, dalším krokem bývá stanovení předběžných elementů T , e , ω_j , γ a K_j . V dnešní době se k jejich výpočtu používá několika programů, jež jsou založeny na základě několika metod (např. metodě nejmenších čtverců, Fourierově transformaci). Díky výpočetní technice se dnes jednotlivé parametry získávají celkem snadno a s velkou přesností.

6 Získávání a zpracovávání spekter

6.1 Získání spekter a jejich redukce

Všechna spektra byla pořízena na dvoumetrovém dalekohledu v Ondřejově (východní délka: $14^{\circ}47'01,1'' = 0\text{ h }59\text{ m }8,1\text{ s}$; severní šířka: $49^{\circ}54'38''$; nadmořská výška 528 m). Pokud byl dalekohled nastaven v konfiguraci Coudé ohniska, spektra se získávala mřížkovým Coudé spektrografem, jenž měl za detektor buď Reticon nebo CCD 700. Reticon je stejně jako klasická CCD kamera lineární elektronický detektor měnící dopadající světelná kvatna v elektrický náboj. Reticon se ale liší tím, že je tvořen pouze jednou řadou pixelů (fotodiod). Byl-li dalekohled v konfiguraci Cassegrainova ohniska, použitým spektrografem byl HEROS (Heidelberg Extended Range Optical Spectrograph), což je dvoukanálový spektrograf s echelletovou mřížkou. Jeho výhodou je to, že umožňuje zobrazit na jedno záznamové médium rozsáhlou oblast vlnových délek při velmi velké disperzi. Spektrum získané z HEROSu se od klasických ale dost liší, není to jeden souvislý barevný pás, ale velké množství spektrálních řádů, jež leží přes sebe. Každý řád zobrazuje několik desítek angströmů vlnové délky a teprve poskládáním řádů se dostane klasické spektrum. Jako záznamového média se používá pro každý kanál vlastní CCD čip.

Redukce, nebo-li zpracovávání exponovaných spekter, spočívá v kalibraci na odlišnou účinnost jednotlivých pixelů detektoru, převodu relativního měřítka do absolutního měřítka vlnových délek a v opravě o heliocentrickou korekci.

K odstranění rozdílných účinností pixelů slouží tzv. *flat-field*, neboli plošné osvětlení detektoru, ke kterému se používá bílé světlo žárovky. Protože optická dráha tohoto světla je stejná jako od hvězdy, vlastnosti pixelů jsou v obou případech ovlivněny stejným způsobem.

Offset sloužící k odstranění přirozeného šumu (např. k určení temného proudu), je snímek exponovaný při zavřeném spektrografu, tj. bez přítomnosti světla. Protože je jeho hodnota ve hvězdném spektru navíc, od každého záznamu se odečítá.

Pro kalibraci spektra a převedení relativních poloh čar do absolutního měřítka vlnových délek se jako srovnávací spektrum pořizuje snímek thorium-argonové výbojky, jehož čáry mají přesně dané polohy o známých vlnových délkách.

Jednou ze závěrečných fází redukce bývá normování průběhu kontinua a také oprava spektra o heliocentrickou korekci, což je odstranění vlivu pohybu pozorovatele vůči pozorované hvězdě.

6.2 Programy Spefo a Spel

SPEFO

Program Spefo, jehož první verze pochází již z roku 1989, byl vytvořen dnes již zemřelým pracovníkem stelárního oddělení v Ondřejově Jiřím Hornem. Původně byl zaměřen na redukci fotografických desek, tedy na určení závislosti intenzity na vlnové délce. Sloužil mimo jiné i k ovládní mikrofotometru. Později byly funkce Spefa rozšířeny, aby se dalo používat na spektra z Reticonu a následně i CCD kamer. Protože program pracuje pouze s jednorozměrnými spektry, je nutné spektra ze CCD kamer před použitím upravit.

Z velké části je tedy program zaměřen na redukci získaných dat, neboť dokáže odečítat offset a vyhlazovat spektrum o flat-field. Kromě toho také převádí pixely na vlnové délky, spektrum tedy kalibruje.

Další část programu je zaměřena na analýzu dat. Spefo provádí rektifikaci spekter, která spočívá v proložení silně zakřiveného kontinua Hermitovými polynomy a kontinuu se následně přiřazuje hodnota jedné. Program dále měří ekvivalentní šířky čar a z posuvů čar také radiální rychlosti hvězd.

Spefo umožňuje i grafický výstup v jazyce HPGL pro plotery nebo laserové tiskárny, je schopen porovnávat rozdíly mezi dvěma spektry jejich vzájemným překrytím a v neposlední řadě převádí soubory ze Spefa do ascii a opačně nebo ze Spefa do formátu fits a zpět, přičemž některými převody se část informací ztrácí, a proto nejsou tolik využívány.

Bližší informace o tomto programu s přesnějším popisem různých funkcí je možné najít v [14]

SPEL

Program Spel, zaměřený na určování dráhových elementů spektroskopických dvojhvězd, vypracoval v roce 1977 v rámci své disertační práce opět Jiří Horn.

Je založen na hledání minima sumy čtverců odchylek, tedy

$$\sum (v_{r,obs} - v_{r,cal})^2 = \min, \quad (36)$$

přičemž využívá rovnic (9), (22) a (23) a je zde užito přímé minimalizační metody, jejíž popis je v [1].

Je to program, jenž určuje pro eliptickou dráhu dvojhvězdy parametry P , T , e , ω , K_i a V_0 a pro kruhovou dráhu pouze P , T , K_i a V_0 , přičemž je možné je počítat pro obě komponenty zvlášť, ale i dohromady. Je také možné zvolit si některý z daných elementů jako pevně daný a počítat hodnoty ostatních. Z těchto elementů program ještě počítá funkci hmotnosti příp. hmotnosti obou složek, a také velikosti obou hlavních poloos. Výsledkem celého

programu je seznam všech hodnot jednotlivých elementů i s jejich chybami a kromě toho také graf, v němž jsou nejen jednotlivá měření (velikost radiální rychlosti v závislosti na fázi), ale přímo i křivka radiálních rychlostí.

Bližší a podrobnější popis lze nalézt v [5].

7 96 Herculis

7.1 Dosavadní údaje o 96 Herculis

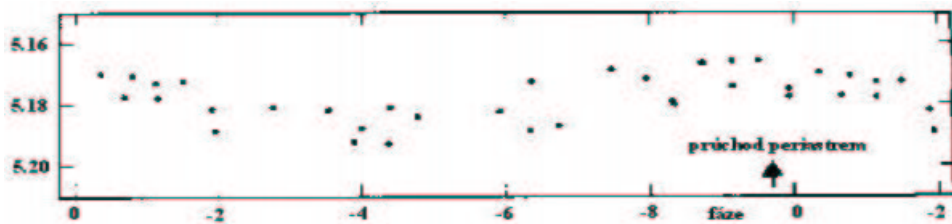
Spektroskopická dvojhvězda 96 Herculis (SAO 85 672, HD 164 852, HR 6 738, BD +20 3 649, V 0 820 Her), jejíž souřadnice jsou $\alpha = 18\text{ h } 2\text{ m } 23,092\text{ s}$ a $\delta = 20^\circ 50' 0,85''$ (údaje vztahující se k roku 1950 a naměřené SAO – Smithsonian Astrophysical Observatory) je dvojhvězdou spektrálního typu B3V a její vizuální hvězdná velikost je 5,28 mag. V některých zdrojích je možné nalézt i to, že 96 Her není hvězdou hlavní posloupnosti, ale že se jedná o podobra, tedy B3IV.

V roce 1911 W. W. Mitchell upozornil na to, že by se v případě 96 Her mohlo jednat o čtyřhvězdný systém, jehož periodu stanovil na 50,2 dní. Při proměřování dvou desek získaných na Lickově observatoři zjistila A. M. Hobe výskyt slabého spektra, jenž naznačovalo, že by se mohlo jednat o dvojný systém. V roce 1930 podvojnost systému vyvrátili J. S. Plaskett a J. A. Pearce s tvrzením, že se jedná o chyby v měření. K. Kodaira v roce 1971 navázal na práci Mitchella a určil periodu systému na 40,04 dní, přičemž sám říkal, že má-li být tato hodnota považována za správnou, bylo by dobré dvojhvězdu nasnímat spektrografem s větší disperzí. Mezi další, kteří se dvojhvězdou zabývali byli P. Koubský a kol., kteří určovali dráhové elementy 96 Her z dat, jež získali z několika spektrogramů na několika observatořích pořízených v letech 1983 až 1985. Z DDO (David Dunlap Observatory) v Kanadě měli k dispozici 14 spektrogramů z modrofialové části spektra (3 650–4 900)Å. Zde byl spektrograf s disperzí 8 Åmm^{-1} . Další spektrogramy měli z NAOR (National Astronomical Observatory at Rozen). Z oblasti červeného spektra (4 800–6 800)Å získali 2 spektrogramy (disperze 18 Åmm^{-1}), zatímco z oblasti modré (3 500–4 900)Å 13 spektrogramů s disperzí 9 Åmm^{-1} . Zbylé 3 spektrogramy byly získány z IUE (International Ultraviolet Explorer), družice, jež byla zaměřena na snímání ultrafialových spekter.

Jejich dráhové elementy jsou v tabulce 3 a jimi určená vizuální hvězdná velikost je nižší než uvádí SAO, a to kolem 5,18 mag. Názorně to ilustruje obr.4. Obě dvě hodnoty jsou však správné, neboť každá odpovídá hodnotě hvězdné velikosti v jiném filtru.

7.2 Vlastní zpracování spekter

Radiální rychlosti složek dvojhvězdy byly měřeny na několika absorpčních čárách pomocí programu Spefo.



Obrázek 4: Světelná křivka dvojhvězdy 96 Her

Tabulka 3: Dráhové elementy získané Koubským a kol. v roce 1985

P	$12,4573 \text{ d} \pm 0,008 \text{ d}$
T	$\text{JD } 45895,41 \pm 0,02$
e	$0,536 \pm 0,008$
ω	$321,33^\circ \pm 1,3^\circ$
K_1	$57,6 \text{ km s}^{-1} \pm 0,9 \text{ km s}^{-1}$
K_2	$57,5 \text{ km s}^{-1} \pm 0,9 \text{ km s}^{-1}$
γ	$-15,5 \text{ km s}^{-1} \pm 0,4 \text{ km s}^{-1}$
$m_1 \sin^3 i$	$0,591 M_\odot$
$m_2 \sin^3 i$	$0,592 M_\odot$
$a_1 \sin i$	$12,0 R_\odot$
$a_2 \sin i$	$12,0 R_\odot$

Celkem mi bylo poskytnuto 121 spekter, přičemž 27 jich bylo získáno coudé spektrografem s detektorem CCD 700 a 28 s detektorem Reticon, a 66 spekter bylo pořízeno spektrografem HEROS (33 z červené oblasti, 33 z modré oblasti).

Tato spektra se nejprve musela před samotným měřením radiálních rychlostí rektifikovat, což bylo prováděno rovněž programem Spefo.

Radiální rychlosti obou komponent byly určovány způsobem, jenž je založen na principu zrcadlového převrácení profilu konkrétní čáry a jeho následné posouvání tak, aby shoda sobě si odpovídajících čar, byla co nejlepší.

V tabulkách 5 až 9 jsou vlnové délky příslušných čar, které sloužily jako tabulkové hodnoty pro daná spektra. Pro kontrolu byly měřeny i atmosférické (telurické) čáry, které jsou v tabulce 10. Výsledky těchto měření jsou v tabulkách 11 až 14, kde jsou uvedena označení jednotlivých spekter, heliocentrická

korekce, radiální rychlosti obou složek i s příslušnými chybami a také radiální rychlost telurických čar, jejíž hodnota by měla být stejná jako velikost heliocentrické korekce. Protože tomu však ve většině případů tak nebylo, musela se radiální rychlost obou složek o rozdíl těchto dvou hodnot poopravit, a pak teprve dále zpracovávat pomocí programu Spel. Tím byl odstarněn instrumentální posuv spektrografu. Pokud nějaký údaj v tabulce chybí, je to dáno tím, že byla pozorována jen jedna složka, nebo se v té dané oblasti již neobjevují žádné telurické čáry atd. Výsledné hodnoty, jež byly zadávány do programu Spel jsou v tabulce 15, přičemž v_{r1} a v_{r2} jsou radiální rychlosti složek. Je zde uveden i okamžik pozorování vyjádřený v juliánském datování, váha měření w , a také odchylky naměřených radiálních rychlostí od výsledné křivky radiálních rychlostí O–C, vztažené k řešení pro tři hodnoty γ .

Váhování bylo provedeno na základě velikosti chyby jednotlivých měření a na počtu čar, z kterých byla radiální rychlost určena. V tabulce 4 je Δx chyba měření a p počet čar, w je váha.

Tabulka 4: Rozdělení vah

$\Delta x/p$	w
do 0,03	1,0
(0,03–0,06>	0,8
(0,06–0,09>	0,6
(0,09–0,12>	0,4
více než 0,12	0,2

Veškeré výsledky získané pomocí programu Spel jsou v tabulkách 16 až 18. Hodnota rms je průměrná odchylka jednoho měření od křivky radiálních rychlostí. Její velikost nám určuje, jak dobrá je shoda naměřených dat s křivkou vypočítanou. Čím je menší, tím je to lepší. Protože je možné díky tomuto programu získat i grafický výstup, všechna naměřená data i s vypočítanou křivkou radiálních rychlostí jsou v grafech 5 až 7. V těchto grafech jsou jednotlivá měření barevně odlišena, přičemž červená barva odpovídá datům ze CCD 700, zelená Reticonu a modrá Herosu. Na osu x je vynesena fáze, na osu y radiální rychlost v km s^{-1} . Na obr. 5 jsou v grafu zahrnuty všechny naměřené hodnoty, tedy bez jakéhokoliv vyloučení. Obrázek 6 je graf obsahující data opravená a ováhovaná, přičemž oprava spočívala ve vyloučení radiálních rychlostí určených s velmi velkými chybami (což bylo dáno např. tím, že spektrum bylo slabé a čáry v něm těžko rozlišitelné). Obrázek 7 představuje graf

pro případ, kdy data jsou opět s danými váhami, ale zde se již uvažují tři různé hodnoty γ , pro tři různá období. Shodou okolností odpovídají tato rozdělení i třem různým detektorům (Reticon, CCD 700, Heros). Na obr. 8 a 9 jsou znázorněny závislosti odchylek O–C na čase. Na ose x je juliánské datování. Plné čtverečky odpovídají Reticonu, plná kolečka CCD 700 a kolečka prázdná Herosu.

Tabulka 5: Čáry a jejich vlnové délky použité na určování radiálních rychlostí ze spekter z Reticonu, a ze CCD 700 kolem oblasti H_α

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
6 334,428	Ne I 1	6 506,528	Ne I 8	6 598,953	Ne I 8
6 347,091	Si II 2	6 545,800	Mg II	6 610,580	N II 31
6 371,359	Si II 2	6 562,817	H 3	6 671,880	Si II
6 402,246	Ne I 1	6 578,030	C II 2	6 678,151	He I 6 678
6 482,070	N II 8	6 582,850	C II 2		

Tabulka 6: Čáry a jejich vlnové délky použité na určování rad. rychl. ze spekter ze CCD 700 kolem oblasti H_β

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
4 802,687	C II	4 861,332	H 4	4 925,323	S II
4 803,287	N II 2	4 879,862	Ar II	4 943,003	O II
4 813,333	Si III	4 917,176	S II	4 991,919	S II
4 815,510	S II	4 921,931	He I	4 994,370	N II
4 828,951	Si III	4 924,054	S II	5 001,134	N II

Tabulka 7: Čáry a jejich vlnové délky použité na určování rad. rychl. ze spekter ze CCD 700 kolem oblasti H_γ a oblasti Mg II

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
3 703,855	H 16	4 009,268	He I 4 009	4 471,508	He I 4 471
3 711,973	H 15	4 026,209	He I 4 026	4 481,228	Mg II
3 721,940	H 14	4 101,737	H 6	4 483,424	S II 43
3 734,370	H 13	4 120,859	He I 4 120	4 508,283	Fe II 38
3 750,154	H 12	4 128,053	Si II 3	4 512,535	Al III
3 770,632	H 11	4 130,884	Si II 3	4 522,634	Fe II 38
3 797,900	H 10	4 143,761	He I 4 143	4 529,176	Al III
3 819,637	He I 3 819	4 168,967	He I 4 169	4 549,467	Fe II 38
3 835,386	H 9	4 267,140	C II 6	4 552,536	N II 58
3 853,657	Si II 1	4 340,468	H 5	4 567,872	Si III 2
3 856,021	Si II 1	4 387,929	He I 4 387	4 574,777	Si III 2
3 862,592	Si II 1	4 414,909	O II 5	4 583,829	Fe II 38
3 867,527	He I 3 867	4 416,975	O II 5	4 590,971	O II 15
3 889,051	H 8	4 419,590	Fe III	4 596,174	O II 15
3 918,977	C II 4	4 426,010	Ar II 7	4 601,478	N II 5
3 920,677	C II 4	4 427,990	bl. N II + Mg II	4 713,203	He I 4 713
3 926,534	He I 3 926	4 432,739	N II 55	4 861,332	H 4
3 933,664	Ca II K	4 433,991	Mg II 9	4 921,931	He I 4 922
3 964,729	He I 3 964	4 437,551	He I 4 437	5 015,678	He I 5 015
3 968,470	Ca II H	4 447,032	N II 15	5 047,738	He I 5 047
3 970,074	H 7	4 463,582	S II 43	5 056,059	Si II 5

Tabulka 8: Čáry a jejich vlnové délky na určování rad. rychl. ze spekter z modré oblasti Herosu

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
3703,855	H 16	3964,729	He I 3964	4552,622	Si III
3711,973	H 15	3968,470	Ca II H	4567,840	Si III
3721,940	H 14	3970,074	H 7	4574,757	Si III
3734,370	H 13	4009,268	He I 4009	4713,203	He I 4713
3750,154	H 12	4026,209	He I 4026	4815,510	S II
3770,632	H 11	4101,737	H 6	4861,332	H 4
3797,900	H 10	4120,859	He I 4120	4921,931	He I 4922
3819,637	He I 3819	4128,053	Si II 3	5015,678	He I 5015
3835,386	H 9	4130,884	Si II 3	5047,738	He I 5047
3853,657	Si II 1	4143,761	He I 4143	5056,059	Si II 5
3856,021	Si II 1	4153,095	S II	5212,579	S II
3862,592	Si II 1	4168,967	He I 4169	5320,695	S II
3867,527	He I 3867	4267,140	C II 6	5345,655	S II
3889,051	H 8	4340,468	H 5	5428,637	S II
3918,977	C II 4	4387,929	He I 4387	5432,744	S II
3920,677	C II 4	4437,551	He I 4437	5453,790	S II
3926,534	He I 3926	4471,508	He I 4471		
3933,664	Ca II K	4481,228	Mg II		

Tabulka 9: Čáry a jejich vlnové délky na určování rad. rychl. ze spekter z červené oblasti Herosu

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
5875,966	He I 4	6371,371	Si II	6582,882	C II
6096,163	Ne I	6382,991	Ne I	6678,154	He I
6143,063	Ne I	6402,246	Ne I	7032,413	Ne I
6158,187	O I	6506,528	Ne I	7771,944	O I
6334,428	Ne I	6562,817	H 3	7775,388	O I
6347,109	Si II	6578,052	C II		

Tabulka 10: Atmosférické (telurické) čáry a jejich vlnové délky použité na spektra z Reticonu, CCD 700 a červenou oblast Herosu

λ [Å]	čára	λ [Å]	čára	λ [Å]	čára
6 280,3950	atm	6 532,354	atm H ₂ O	6 599,324	atm H ₂ O
6 281,179	atm	6 532,402	atm H ₂ O	6 602,134	atm H ₂ O
6 305,810	atm O ₂	6 534,000	atm H ₂ O	6 875,590	atm O ₂
6 306,567	atm O ₂	6 536,720	atm H ₂ O	6 876,715	atm O ₂
6 310,637	atm O ₂	6 542,313	atm H ₂ O	6 877,637	atm O ₂
6 490,791	atm H ₂ O	6 543,907	atm H ₂ O	6 883,833	atm O ₂
6 495,866	atm H ₂ O	6 545,781	atm H ₂ O	6 904,117	atm O ₂
6 497,594	atm H ₂ O	6 547,757	atm H ₂ O	6 905,023	atm O ₂
6 504,186	atm H ₂ O	6 548,622	atm H ₂ O	6 919,002	atm O ₂
6 505,488	atm CN ⁻	6 552,629	atm H ₂ O	7 184,526	atm O ₂
6 508,593	atm H ₂ O	6 553,785	atm H ₂ O	7 272,973	atm H ₂ O
6 512,242	atm H ₂ O	6 557,171	atm H ₂ O	7 623,288	atm O ₂
6 514,727	atm H ₂ O	6 564,206	atm H ₂ O	7 624,500	atm O ₂
6 515,848	atm H ₂ O	6 568,806	atm H ₂ O	7 644,200	atm O ₂
6 516,610	bl. 3x H ₂ O	6 572,086	atm H ₂ O	7 645,312	atm O ₂
6 518,011	atm H ₂ O	6 574,852	atm H ₂ O	7 670,600	atm O ₂
6 519,452	atm H ₂ O	6 580,785	atm H ₂ O	7 671,669	atm O ₂
6 522,192	atm H ₂ O	6 583,259	atm H ₂ O	8 189,272	atm H ₂ O
6 523,843	atm H ₂ O	6 586,602	atm H ₂ O	8 218,114	atm H ₂ O
6 530,598	atm H ₂ O	6 594,361	atm H ₂ O		

Tabulka 11: Seznam všech spekter z Reticonu a naměřené rad. rychl.

	Primární složka			Sekundární složka		Telurické čáry	
	hel. kor.	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba
96h01880	5,89	-45,00	0,61	17,12	1,36	5,19	0,37
96h01923	0,98	-13,93	0,92			-0,25	0,61
96h01968	-2,97	-47,10	0,96	14,56	1,33	-5,39	0,80
96h01972	-3,15	-56,19	0,69	10,16	1,30	-13,49	0,65
96h02111	-10,59	-43,10	0,73	5,45	1,21	-15,48	0,35
96h02121	-11,29	-49,86	0,82	19,20	1,22	-15,71	0,39
96h02128	-11,55	-52,60	0,71	11,44	0,81	-16,56	0,37
96h02141	-12,23	60,09	0,36	-100,20	0,78	-17,11	0,39
96h02148	-12,46	29,54	0,62	-68,05	0,79	-18,38	0,41
96h02298	-15,46	-76,80	1,99	41,81	1,23	-17,27	0,92
96h02300	-15,54	49,92	0,37	-80,55	0,91	-20,43	0,40
96h02396	-17,64	-48,47	0,59	10,23	1,04	-22,67	0,29
96h02704	-21,40	-18,68	0,61			-24,74	0,49
96h02907	-21,32	47,41	0,69	-85,94	1,36	5,19	0,37
96h05650	-14,76	57,21	0,76	-98,49	0,67	-17,95	0,38
96h08299	2,37	7,17	0,39	-46,52	0,66	-3,92	0,51
96h08367	-2,82	-22,09	0,52			-10,95	0,40
96h08386	-3,27	-38,00	0,69	0,12	0,78	-9,10	0,52
96h08393	-3,46	-42,04	0,78	-1,13	1,22	-8,30	0,33
96h08407	-4,90	-50,91	0,45	8,16	0,93	-11,92	0,37
96h08431	-5,24	-20,91	0,46			-12,33	0,42
96h08455	-5,60	49,40	0,62	-102,78	0,61	-13,38	0,43
96h08471	-5,96	32,73	0,54	-83,84	1,28	-12,12	0,40
96h08603	-9,94	47,94	0,45	-102,71	1,03	-15,73	0,48
96h08721	-12,79	-51,09	0,63	9,75	1,06	-18,20	0,46
96h08843	-14,17	8,07	0,88	-44,22	0,63	-17,90	0,40
96h08874	-14,55	-21,19	0,47			-20,93	0,35
96h09204	-21,34	-49,78	0,63	11,63	0,97	-26,57	0,34

Tabulka 12: Seznam všech spekter ze CCD 700 a naměřené rad. rychl.

	Primární složka		Sekundární složka		Telurické čáry	
	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba
oblast kolem H_α						
md110020	-32,98	0,37	8,54	0,37	19,11	0,56
md120014	-38,54	0,57	16,58	0,73	19,31	0,47
md120015	-40,27	0,72	12,72	0,65	18,62	0,49
md140040	-45,45	0,46	21,98	0,59	19,72	0,45
md210045	-14,77	0,40			17,63	0,68
md220035	-13,64	0,49			18,04	0,64
md220036	-14,20	0,43			17,20	0,62
md240044	-34,26	0,68	9,23	0,41	16,92	0,53
mh080011	58,37	0,58	-87,90	0,93	-15,41	0,41
mh080012	59,62	0,41	-88,27	0,33	-14,81	0,38
mh080013	60,33	0,35	-89,11	0,40	-14,55	0,45
mh080014	60,23	0,86	-89,97	0,54	-16,56	0,35
mh100020	17,13	0,58	-38,90	0,62	-15,18	0,37
mi060016	-15,63	0,20			-22,03	0,29
mi200023	-19,64	1,04			-21,90	0,24
mi200024	-20,83	0,83			-22,19	0,27
mi210022	-38,09	0,30	10,28	0,69	-20,99	0,38
oblast kolem H_β						
md160026	-35,92	0,99	13,72	0,80		
md160027	-36,21	0,67	14,25	1,19		
md240047	-30,52	0,64	11,47	0,54		
mh080018	62,30	0,95	-89,82	0,86		
mh100023	16,18	1,15	-37,69	1,84		
oblast kolem H_γ						
mh280020	-35,78	1,27	13,79	0,68		
oblast kolem Mg II						
mh080023	63,15	0,50	-95,91	0,83		
mh100026	14,94	0,55	-40,35	1,02		
mh210029	-40,61	1,14	9,89	1,36		
mh210030	-39,54	0,64	12,86	0,66		

Tabulka 13: Seznam všech spekter z modré oblasti Herosu a naměřené radiální rychlosti

	Primární složka		Sekundární složka	
	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba
bxn1577	-31,41	0,51	1,63	0,54
bxn1839	15,84	0,45	-53,41	0,64
bxn1912	-43,46	0,42	14,95	0,57
bxn1926	-16,00	0,50		
bxn1945s	46,32	0,58	-82,54	0,96
bxn1955s	13,73	0,69	-50,62	0,68
bxn1972	-18,42	0,49		
bxn2290	-32,04	0,89	-0,04	0,81
bxn2302	-47,04	0,60	19,81	0,96
bxn2315s	-46,94	0,65	11,97	0,96
bxn2375	54,22	0,64	-94,51	0,82
bxn2399	-48,40	0,48	14,34	0,67
bxn2416	-50,75	0,63	17,17	0,60
bxn2514	49,17	0,50	-90,63	0,83
bxn2913	36,41	0,59	-71,31	0,68
bxn3738	-50,78	0,74	18,14	0,75
bxn3943s	56,46	1,33	-82,71	1,67
bxn3960	-18,55	0,58		
bxn4165	-12,76	0,92		
bxn4404	-47,93	0,49	19,81	0,50
bxn4420	-44,49	0,43	20,88	0,43
bxn4789s	66,73	0,57	-99,87	0,71
bxn4806s	32,43	0,45	-65,12	0,61
bxn4822s	8,13	0,42	-32,51	0,57
bxn4845s	-12,59	0,50		
bxn4890s	-33,69	0,86	13,47	0,81
bxn4918s	-41,40	0,58	15,09	0,64
bxn4936s	-37,24	3,60	16,12	3,45
bxn4951	-49,18	0,51	23,23	0,48
bxn5615	-46,06	0,50	23,90	0,39
bxn5826s	0,99	0,69	-27,58	0,73
bxn5845s	62,37	0,58	-99,28	0,67
bxn5874s	38,36	0,44	-69,87	0,82

Tabulka 14: Seznam všech spekter z červené oblasti Herosu a naměřené radiální rychlosti

	Primární složka		Sekundární složka		Telurické čáry	
	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba	rad. rych.	chyba
rxn1577	-33,86	0,21	0,65	0,30	18,67	0,21
rxn1839	16,16	0,25	-54,79	0,27	21,44	0,18
rxn1912	-45,51	0,44	14,44	0,46	17,93	0,18
rxn1926	-17,10	0,47			18,10	0,14
rxn1955	12,09	0,30	-51,84	0,63	17,47	0,26
rxn1972	-19,69	0,16			17,12	0,15
rxn2290	-34,35	0,36	-0,08	0,35	1,29	0,23
rxn2302	-48,84	0,29	18,72	0,84	-1,11	0,18
rxn2315	-48,65	0,24	16,44	0,82	-0,85	0,15
rxn2375	52,68	0,34	-96,17	0,35	-1,67	0,13
rxn2399	-49,32	0,20	14,20	0,78	-4,20	0,11
rxn2416	-52,06	0,33	17,65	0,66	-4,83	0,14
rxn2492	30,36	0,31	-70,95	0,81	-10,30	0,14
rxn2514	49,02	0,34	-92,70	0,44	-10,12	0,16
rxn2913	36,96	0,40	-75,01	0,70	-19,31	0,14
rxn3738s	-51,75	0,24	17,94	0,69	17,03	0,15
rxn3943s	54,86	0,45	-88,59	0,90	11,54	0,18
rxn3960s	-24,87	0,93			10,44	0,14
rxn4165s	-1,38	0,51	-32,30	0,90	-0,14	0,16
rxn4404	-48,35	0,37	20,65	0,55	-11,92	0,16
rxn4420	-45,75	0,25	20,72	0,36	-12,28	0,15
rxn4789s	64,59	0,22	-102,34	0,45	-20,85	0,20
rxn4806s	30,08	0,40	-66,48	0,70	-20,37	0,18
rxn4822s	7,48	0,48	-34,06	0,52	-20,48	0,16
rxn4845s	-13,70	0,33			-20,66	0,16
rxn4890s	-38,00	0,51	10,63	0,76	-21,84	0,24
rxn4918s	-43,31	0,45	16,63	0,94	-21,36	0,22
rxn4936s	-49,86	0,97	24,48	1,59	-21,93	0,21
rxn4951	-49,70	0,51	22,43	0,58	-21,21	0,32
rxn5615s	-46,72	0,57	24,34	0,78	19,63	0,38
rxn5826s	-10,68	0,50			21,40	0,29
rxn5845s	60,87	0,65	-100,94	0,85	21,10	0,44
rxn5874s	37,20	0,55	-72,13	0,65	21,83	0,32

Tabulka 15: Data zadávaná do programu Spel a výsledky O–C pro případ váhovaných dat se třemi hodnotami γ

JD 2 400 000+		v_{r1} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]	v_{r2} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]
49144,4322	96h04880	-45,70	0,6	9,329	16,42	0,2	2,981
49458,3990	96h01923	-15,16					
49169,3996	96h01968	-49,52	0,4	5,431	12,14	0,2	-1,215
49169,4885	96h04972	-66,85			-0,18		
49191,4861	96h02111	-47,99	0,2	-1,181	0,56	0,2	-4,030
49193,5423	96h02121	-54,28	0,4	0,531	14,78	0,2	1,575
49194,5065	96h02128	-57,61	0,6	-3,121	6,43		
49197,3851	96h02141	55,21	0,8	-1,881	-105,08	0,4	2,184
49198,3565	96h02148	23,62	0,4	-3,764	-73,97	0,6	1,313
49209,3238	96h02298	40,00	0,2	4,287	-78,61	0,2	5,639
49209,4017	96h02300	45,03	0,6	3,083	-85,44	0,2	5,521
49218,4227	96h02396	-53,50	0,6	1,239	5,20		
49250,3361	96h02704	-22,02	0,8	-4,566			
49259,2755	96h02907	43,32	0,6	-0,992	-90,03	0,6	3,477
49571,4315	96h05650	54,02	0,4	1,308	-101,68	0,4	0,870
49884,5101	96h08299	0,88	0,8	-3,714	-52,81	0,6	-2,062
49899,4147	96h08367	-30,22	0,8	-0,104			
49900,4616	96h08386	-43,83			-5,71	0,4	-1,654
49901,3810	96h08393	-46,88	0,4	-2,023	-5,97		
49905,3970	96h08407	-57,93			4,14		
49906,3944	96h08431	-28,00					
49907,4017	96h08455	41,62			-110,56		
49908,4049	96h08471	26,57			-90,00		
49920,3961	96h08603	42,15			-108,50		
49929,4502	96h08721	-56,50	0,6	-1,504	4,34		
49934,4348	96h08843	4,34	0,4	1,556	-47,95	0,4	0,850
49936,3571	96h08874	-27,57	0,8	-1,814			
49978,3534	96h09204	-55,01	0,6	-0,572	6,40	0,2	-6,403
52742,5358	md120014	-39,28	0,8	-2,492	15,84	0,6	2,709
52742,5514	md120015	-41,67	0,6	-4,794	11,32	0,4	-1,906
52743,5097	md140040	-45,53	0,8	-3,866	21,90	0,6	3,519

Tabulka 15: Pokračování

JD 2 400 000+		v_{r1} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]	v_{r2} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]
52752,5359	md220035	-13,98	0,8	4,094			
52752,5494	md220036	-15,35	0,8	2,860			
52754,4655	md240044	-35,42	0,6	-1,833	8,07	0,6	-1,615
52860,3471	mh080011	58,02	0,6	0,931	-88,25	0,2	-0,318
52860,3520	mh080012	59,87	0,6	2,488	-88,02	0,8	0,228
52860,3617	mh080013	60,86	0,8	2,910	-88,58	0,4	0,280
52860,3776	mh080014	58,78	0,2	-0,063	-91,42	0,4	-1,599
52862,4106	mh100020	17,61	0,8	1,350	-38,42	0,6	5,558
52889,4428	mi060016	-17,08	1,0	-0,617			
52903,3885	mi200023	-20,06					
52903,4047	mi200024	-21,53					
52904,3041	mi210022	-37,68	0,8	-2,144	10,69	0,4	-1,093
52746,5361	md160026	-35,92	0,2	2,088	13,72	0,2	-0,725
52746,5618	md160027	-36,21	0,6	1,376	14,25	0,2	0,260
52753,5010	md240047	-30,52	0,4	-3,813	-30,52		
52860,4066	mh080018	62,30	0,2	1,955	-89,82	0,2	1,618
52862,4477	mh100023	16,18	0,2	0,772	-37,69	0,2	5,371
52880,4384	mh280020	-35,78	0,2	5,292	13,79	0,6	-3,953
52860,4533	mh080023	63,15	1,0	0,737	-95,91	0,8	-2,245
52862,4944	mh100026	14,94	1,0	0,584	-40,35	0,8	1,579
52904,3277	mh210029	-40,61	0,4	-4,934	9,89	0,4	-2,044
52904,3513	mh210030	-39,54	0,8	-3,724	12,86	0,8	0,775
51956,6747	rxn1577	-33,31	1,0	1,000	1,20	1,0	-3,165
52002,5424	rxn1839	16,50	1,0	0,571	-54,45	1,0	-4,730
52023,5737	rxn1912	-45,60	0,8	-1,181	14,35	0,8	-0,898
52024,4961	rxn1926	-16,94	0,8	5,386			
52027,5309	rxn1955	12,32	0,8	-1,976	-51,61	0,6	-3,648
52029,5788	rxn1972	-19,26	1,0	-0,989			
52081,3984	rxn2290	-33,69	1,0	1,442	0,58	1,0	-4,671
52084,5206	rxn2302	-49,24	1,0	-0,525	18,32	0,8	-1,553
52085,4130	rxn2315	-48,65	1,0	-0,994	16,44	0,6	-2,293

Tabulka 15: Pokračování

JD 2 400 000+		v_{r1} [km s ⁻¹]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [km s ⁻¹]	v_{r2} [km s ⁻¹]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [km s ⁻¹]
52088,5176	rxn2375	53,15	1,0	-2,487	-95,70	0,8	-3,233
52096,4365	rxn2399	-48,72	1,0	-1,058	14,80	0,8	-3,940
52097,3991	rxn2416	-51,82	1,0	-3,026	17,89	0,8	-2,068
52112,4705	rxn2492	30,31	1,0	-3,221	-71,00	0,6	-2,331
52113,4631	rxn2514	49,45	0,8	-5,350	-92,27	0,6	-0,704
52151,3708	rxn2913	37,19	1,0	1,101	-74,78	0,8	-3,357
52395,4486	rxn3738s	-51,46	1,0	-3,892	18,23	0,8	-0,409
52412,5555	rxn3943s	54,45	0,8	1,232	-89,00	0,4	0,863
52416,5528	rxn3960s	-25,15	0,6	0,094			
52448,5114	rxn4165s	-1,28	0,8	-0,887	-32,20	0,2	-0,052
52483,4804	rxn4404	-48,25	1,0	0,606	20,75	0,8	0,724
52484,4631	rxn4420	-45,74	1,0	-0,030	20,73	0,8	4,092
52524,3882	rxn4789s	64,32	1,0	2,206	-102,61	0,8	-3,170
52525,3307	rxn4806s	30,31	0,8	-0,802	-66,25	0,8	-0,185
52526,3303	rxn4822s	7,70	0,8	1,802	-33,84	0,8	5,080
52527,3476	rxn4845s	-13,54	1,0	-2,984			
52530,3659	rxn4890s	-38,76	0,8	-1,075	9,87	0,8	1,871
52531,3886	rxn4918s	-43,50	0,8	-0,243	16,44	0,6	2,442
52533,3801	rxn4936s	-50,51	0,4	-1,655	23,83	0,2	3,805
52546,3329	rxn4951	-49,51	0,8	-1,437	22,62	0,8	3,438
52695,6593	rxn5615s	-46,74	0,8	1,834	24,32	0,8	4,599
52723,5514	rxn5845s	60,37	0,6	-2,949	-101,44	0,6	-0,702
52724,5812	rxn5874s	37,49	0,8	2,674	-71,84	0,8	-1,788
51956,6755	bxn1577	-31,41	1,0	2,905	1,63	0,8	-2,741
52002,5431	bxn1839	15,84	1,0	-0,072	-53,41	1,0	-3,709
52023,5746	bxn1912	-43,46	1,0	0,950	14,95	1,0	-0,288
52024,4971	bxn1926	-16,00	1,0	6,281			
52026,4370	bxn1945s	46,32	1,0	-1,518	-82,54	0,8	1,531
52027,5323	bxn1955s	13,73	1,0	-0,533	-50,62	0,8	-2,694
52029,5816	bxn1972	-18,42	1,0	-0,118			
52081,4002	bxn2290	-32,04	0,8	3,104	-0,04	0,8	-5,303

Tabulka 15: Pokračování

JD		v_{r1} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]	v_{r2} [$km\ s^{-1}$]	w	$(O - C)_{3\gamma}$ [$km\ s^{-1}$]
2 400 000+							
52084,5212	bxn2302	-47,04	1,0	1,676	19,81	0,8	-0,064
52085,4136	bxn2315s	-46,94	1,0	0,714	11,97	0,8	-6,761
52088,5188	bxn2375	54,22	1,0	-1,377	-94,51	0,8	-2,086
52096,4392	bxn2399	-48,40	1,0	-0,731	14,34	1,0	-4,408
52097,3997	bxn2416	-50,75	1,0	-1,957	17,17	1,0	-2,787
52113,4660	bxn2514	49,17	1,0	-5,531	-90,63	0,8	0,830
52151,3718	bxn2913	36,41	1,0	0,355	-71,31	0,8	0,077
52395,4493	bxn3738	-50,78	0,8	-3,210	18,14	0,8	-0,501
52412,5563	bxn3943s	56,46	0,2	3,270	-82,71	0,2	7,123
52416,5538	bxn3960	-18,55	1,0	6,703			
52445,5119	bxn4165	-12,76					
52483,4808	bxn4404	-47,93	1,0	0,926	19,81	1,0	-0,216
52484,4636	bxn4420	-44,49	1,0	1,216	20,88	1,0	4,246
52524,3886	bxn4789s	66,73	1,0	4,624	-99,87	0,8	-0,438
52525,3311	bxn4806s	32,43	1,0	1,330	-65,12	1,0	0,932
52526,3307	bxn4822s	8,13	1,0	2,240	-32,51	1,0	6,402
52527,3481	bxn4845s	-12,59	1,0	-2,027			
52530,3664	bxn4890s	-33,69	0,8	3,998	13,47	0,6	5,467
52531,3892	bxn4918s	-41,40	1,0	1,860	15,09	1,0	1,089
52533,3810	bxn4936s	-37,24			16,12	0,2	-3,904
52546,3334	bxn4951	-49,18	1,0	-1,109	23,23	1,0	4,049
52695,6597	bxn5615	-46,06	1,0	2,513	23,90	1,0	4,179
52722,6497	bxn5826s	0,99	1,0	0,444	-27,58	0,8	5,579
52723,5521	bxn5845s	62,37	1,0	-0,955	-99,28	1,0	1,464
52724,5817	bxn5874s	38,36	1,0	3,561	-69,87	1,0	0,164

Tabulka 16: Dráhové elementy získané ze všech naměřených radiálních rychlostí

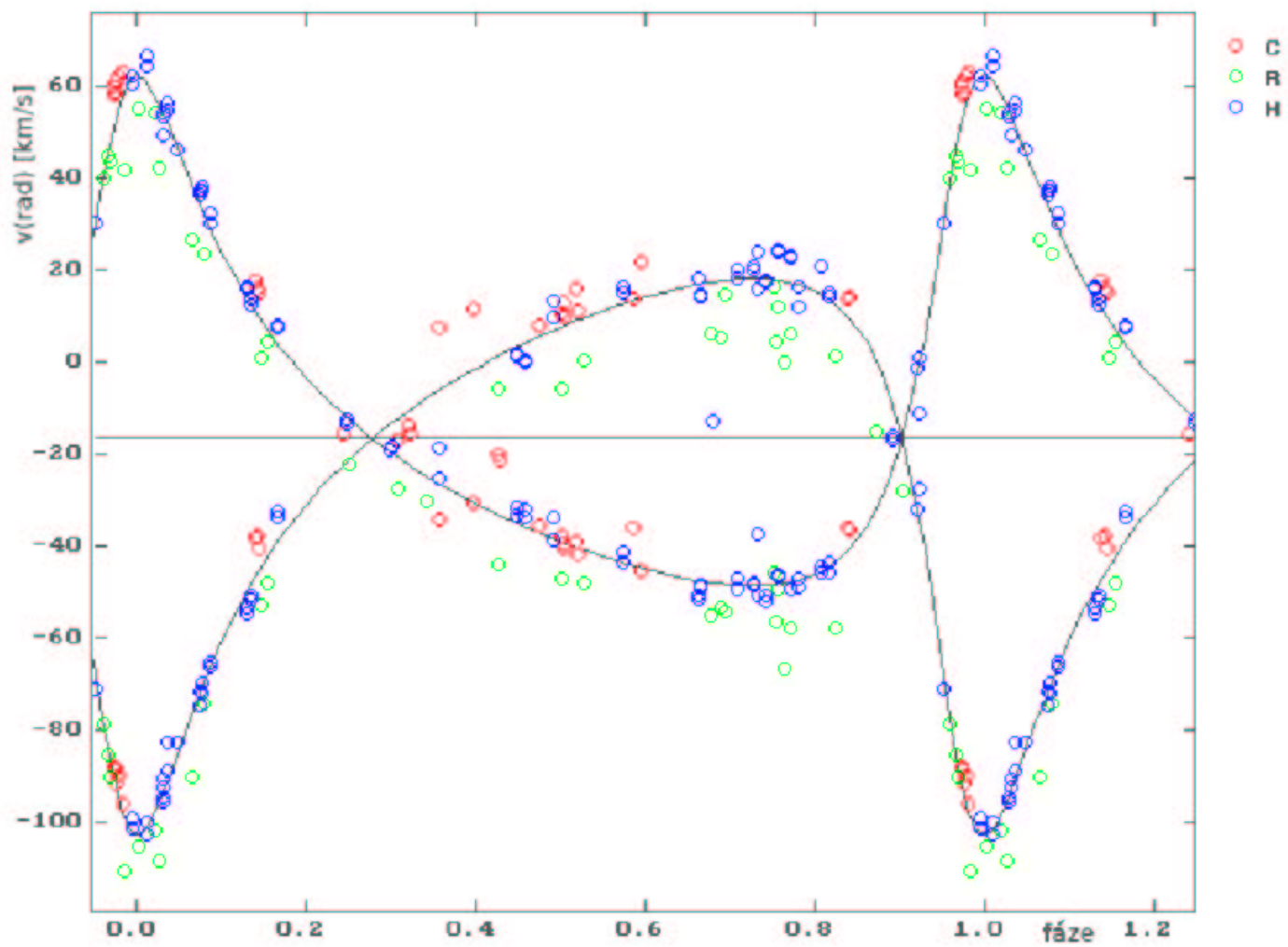
P	$12,46027 \text{ d} \pm 0,00012 \text{ d}$
T	$\text{JD } 45\,932,766 \pm 0,067$
e	$0,5385 \pm 0,0093$
ω	$322,01^\circ \pm 1,45^\circ$
K_1	$55,48 \text{ km s}^{-1} \pm 0,60 \text{ km s}^{-1}$
K_2	$60,51 \text{ km s}^{-1} \pm 0,90 \text{ km s}^{-1}$
γ	$-16,61 \text{ km s}^{-1} \pm 0,44 \text{ km s}^{-1}$
$m_1 \sin^3 i$	$0,63 M_\odot$
$m_2 \sin^3 i$	$0,58 M_\odot$
$a_1 \sin i$	$11,51 R_\odot$
$a_2 \sin i$	$12,55 R_\odot$
rms	$6,386 \text{ km s}^{-1}$

Tabulka 17: Dráhové elementy pro data neváhovaná

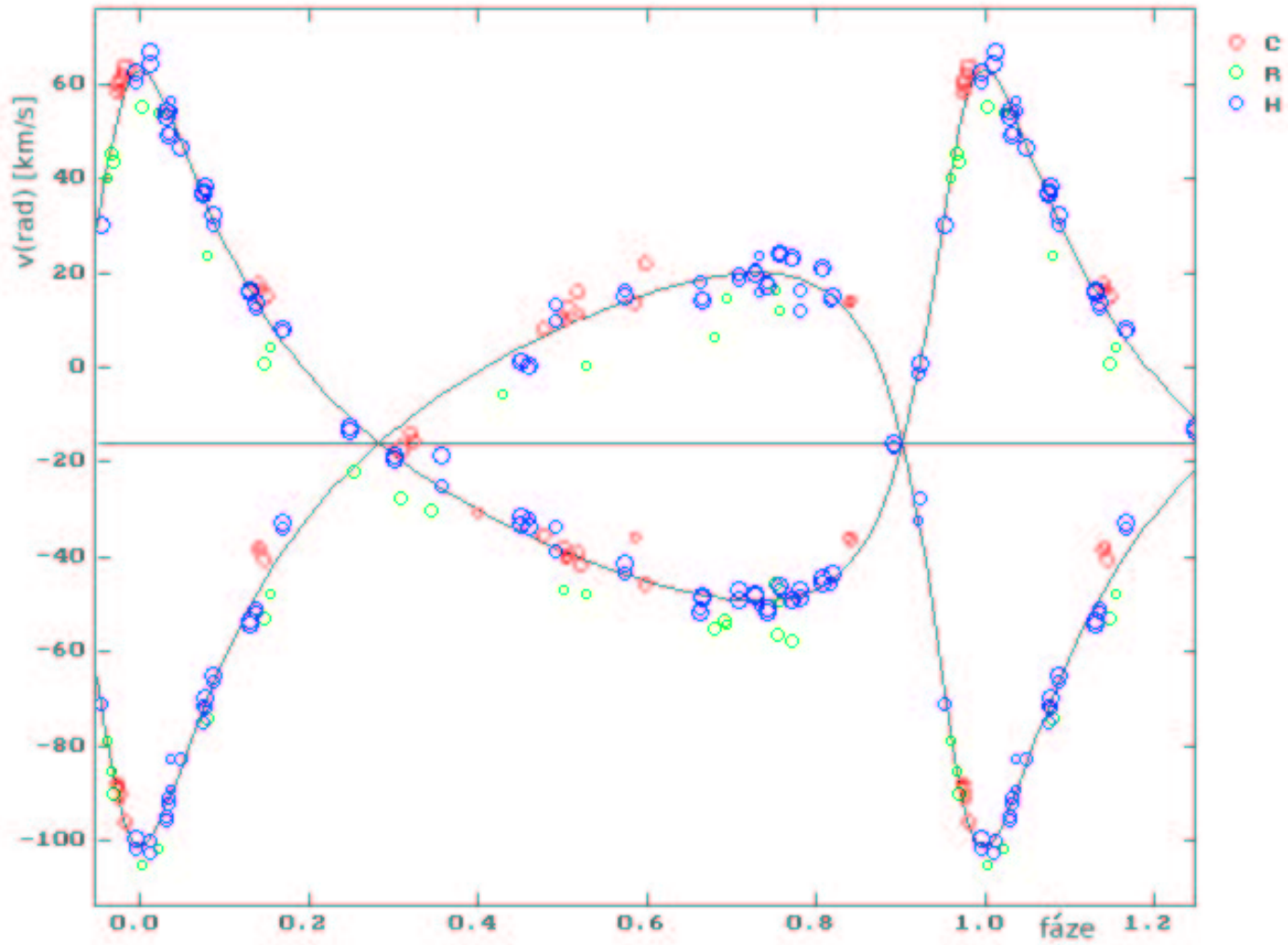
	pro jednu hodnotu γ	pro tři hodnoty γ
P	$12,460241 \text{ d} \pm 0,000088 \text{ d}$	$12,460221 \text{ d} \pm 0,000060 \text{ d}$
T	$\text{JD } 45\,932,771 \pm 0,048$	$\text{JD } 45\,932,781 \pm 0,033$
e	$0,5311 \pm 0,0065$	$0,5321 \pm 0,0045$
ω	$320,25^\circ \pm 1,02^\circ$	$320,52^\circ \pm 0,71^\circ$
K_1	$56,38 \text{ km s}^{-1} \pm 0,41 \text{ km s}^{-1}$	$56,47 \text{ km s}^{-1} \pm 0,28 \text{ km s}^{-1}$
K_2	$60,26 \text{ km s}^{-1} \pm 0,61 \text{ km s}^{-1}$	$60,07 \text{ km s}^{-1} \pm 0,43 \text{ km s}^{-1}$
γ	$-16,10 \text{ km s}^{-1} \pm 0,30 \text{ km s}^{-1}$	$\gamma_C \quad -12,69 \text{ km s}^{-1} \pm 0,45 \text{ km s}^{-1}$ $\gamma_R \quad -22,23 \text{ km s}^{-1} \pm 0,52 \text{ km s}^{-1}$ $\gamma_H \quad -15,70 \text{ km s}^{-1} \pm 0,27 \text{ km s}^{-1}$
$m_1 \sin^3 i$	$0,64 M_\odot$	$0,64 M_\odot$
$m_2 \sin^3 i$	$0,60 M_\odot$	$0,60 M_\odot$
$a_1 \sin i$	$11,76 R_\odot$	$11,77 R_\odot$
$a_2 \sin i$	$12,57 R_\odot$	$12,52 R_\odot$
rms	$4,121 \text{ km s}^{-1}$	$2,855 \text{ km s}^{-1}$

Tabulka 18: Dráhové elementy pro data váhovaná

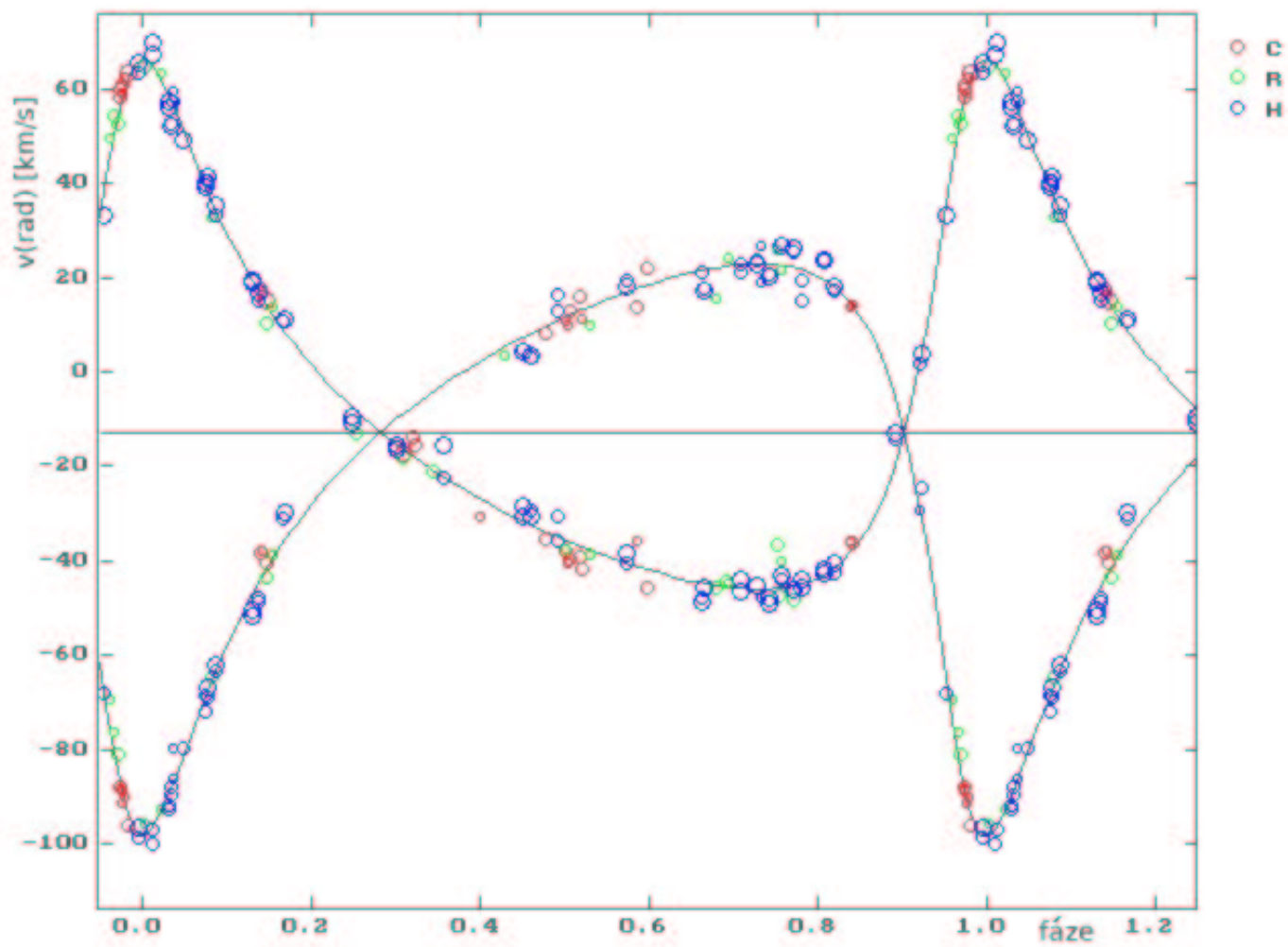
	pro jednu hodnotu γ	pro tři hodnoty γ
P	12,46026 d \pm 0,00012 d	12,460268 d \pm 0,000091 d
T	JD 45 932,765 \pm 0,066	JD 45 932,759 \pm 0,049
e	0,5295 \pm 0,0071	0,5316 \pm 0,0053
ω	320,08° \pm 1,08°	320,29° \pm 0,81°
K ₁	56,16 km s ⁻¹ \pm 0,44 km s ⁻¹	56,30 km s ⁻¹ \pm 0,33 km s ⁻¹
K ₂	60,65 km s ⁻¹ \pm 0,71 km s ⁻¹	60,46 km s ⁻¹ \pm 0,53 km s ⁻¹
γ	-15,91 km s ⁻¹ \pm 0,32 km s ⁻¹	γ_C -12,77 km s ⁻¹ \pm 0,59 km s ⁻¹ γ_R -22,49 km s ⁻¹ \pm 0,74 km s ⁻¹ γ_H -15,70 km s ⁻¹ \pm 0,28 km s ⁻¹
$m_1 \sin^3 i$	0,65 M _⊙	0,65 M _⊙
$m_2 \sin^3 i$	0,60 M _⊙	0,60 M _⊙
$a_1 \sin i$	11,73 R _⊙	11,74 R _⊙
$a_2 \sin i$	12,67 R _⊙	12,61 R _⊙
rms	3,756 km s ⁻¹	2,796 km s ⁻¹



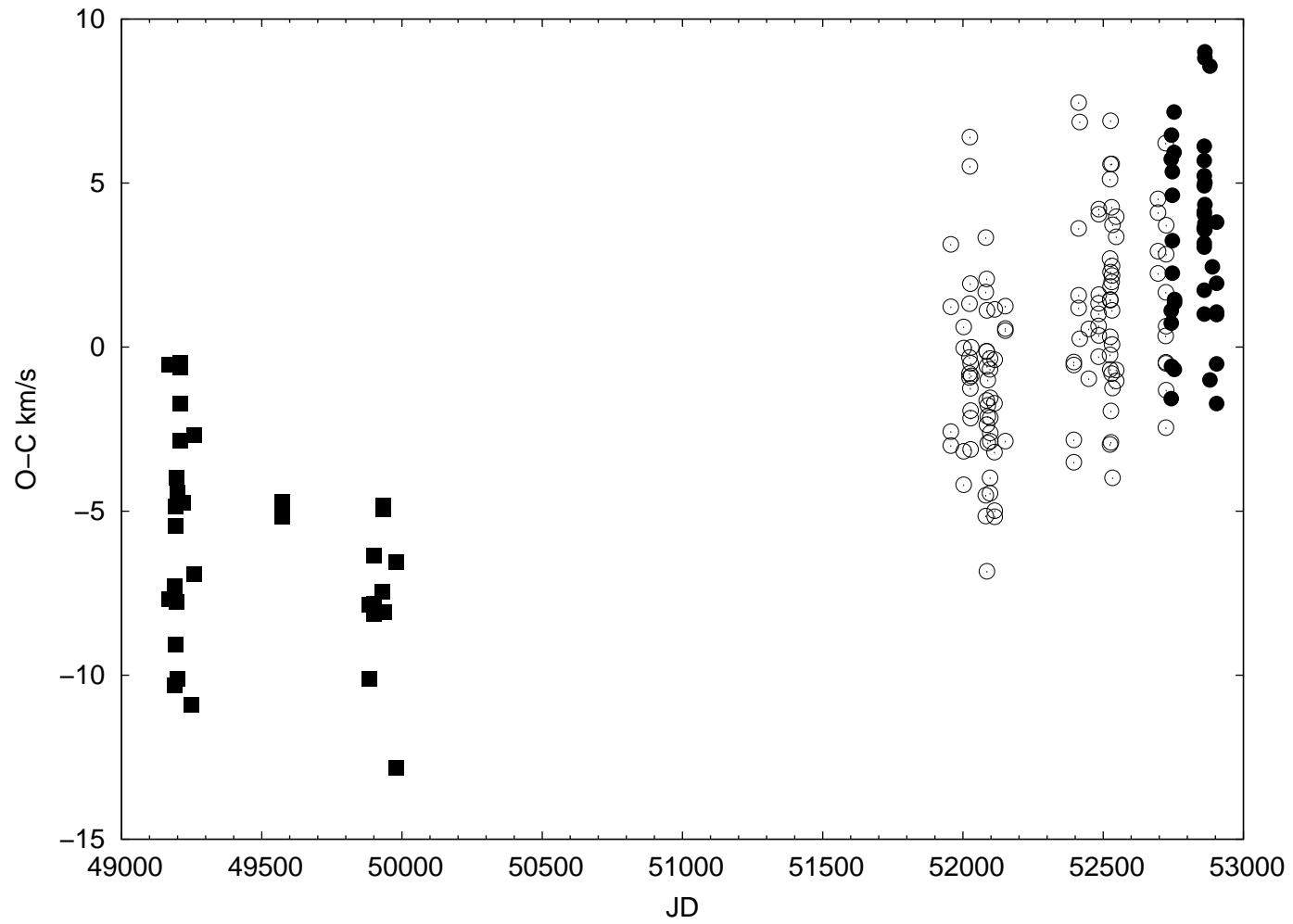
Obrázek 5: Křivka radiálních rychlostí se všemi naměřenými daty



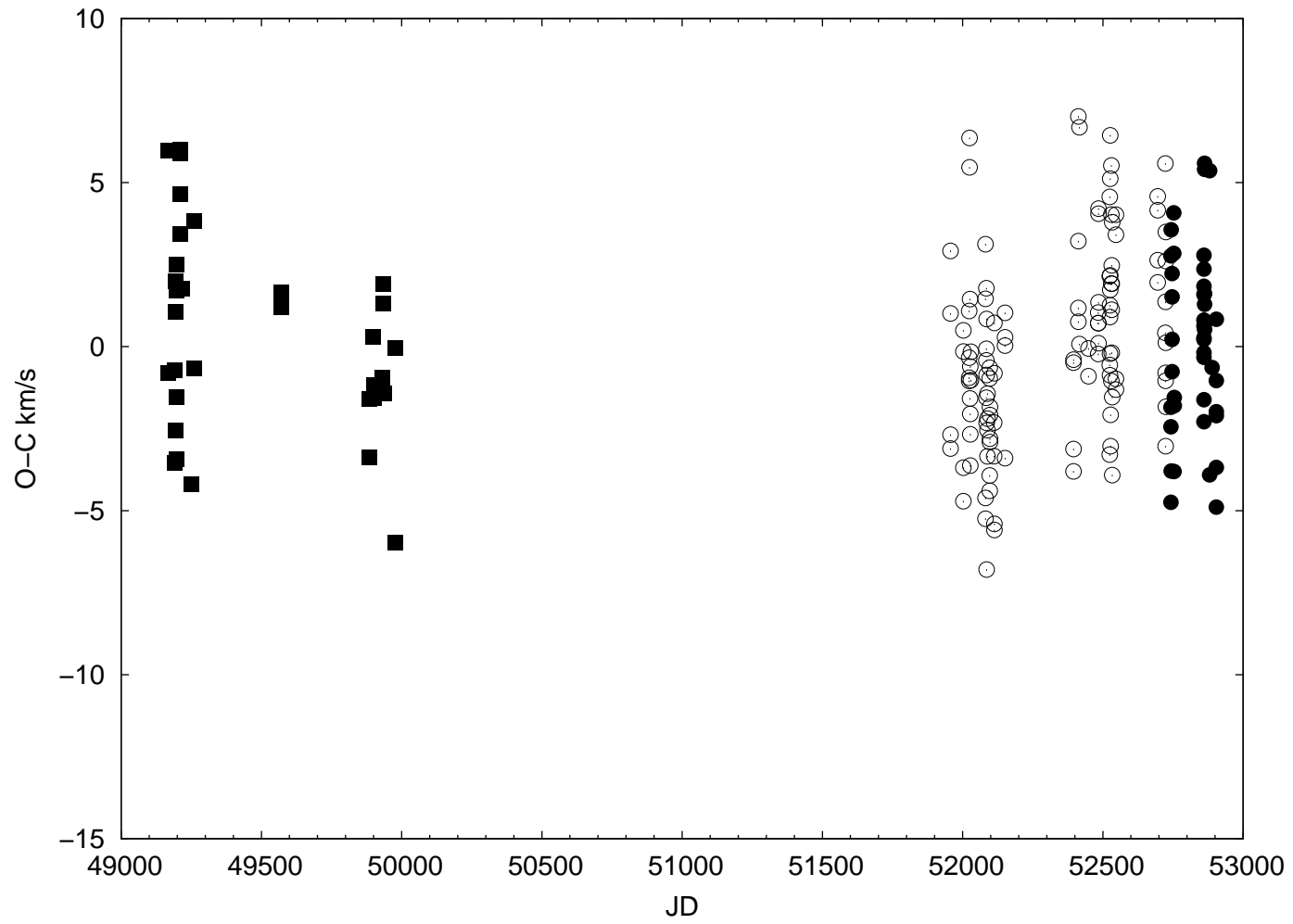
Obrázek 6: Křivka radiálních rychlostí s daty příslušné váhy, a pro jednu hodnotu γ



Obrázek 7: Křivka radiálních rychlostí s daty příslušné váhy, a pro případ třechodnot γ



Obrázek 8: Závislost odchylek O–C na čase pro jednu společnou hodnotu γ



Obrázek 9: Závislost odchylek O-C na čase pro tři hodnoty γ

8 Závěr

V této práci jsem se věnovala určování dráhových elementů dvojhvězdy 96 Her. Pohledem na tab. 16 a 17 je vidět, že se vyloučením nepřesných dat chyby jednotlivých elementů zlepšily. Patrné je to i v grafech na obr. 5 a 6. Zarážející snad může být, že řešení pro váhovaná měření mají větší chyby než pro neváhovaná. Zřejmě je to dáno tím, že data z Reticonu mají menší váhu než data z Herosu, a tak se stane, že váhováním se zvýhodní interval pozorování z Herosu, a elementy jsou pak určovány jakoby z kratšího časového intervalu. Proto je pak daná chyba větší. I přesto ale došlo ke zpřesnění dosavadních parametrů proti řešení Koubský a kol., 1985. Většina elementů je nyní určena s chybou o jeden řád lepší, perioda dokonce s chybou a dva řády.

Velmi důležitým závěrem je skutečnost, že byla pozorována změna rychlosti těžiště γ . Názorně je to vidět i na obr. 8. Velikosti jednotlivých rychlostí těžiště jsou $\gamma = (-22, 49 \pm 0, 74) \text{ km s}^{-1}$ pro Reticon (JD 2449144–2449978), pro Heros (JD 2451956–2452724) pak $\gamma = (-15, 70 \pm 0, 28) \text{ km s}^{-1}$ a pro CCD 700 (JD 2452742–2452904) $\gamma = (-12, 77 \pm 0, 59) \text{ km s}^{-1}$. Přibližně v průběhu deseti let se rychlost γ změnila o téměř 10 km s^{-1} . Z tohoto je tedy zřejmé, že dvojhvězda 96 Her není pouze dvousložkový systém, ale přinejmenším tříložkový. Vzhledem k tomu, že u dat z červené oblasti spektra byla proměřována i radiální rychlost telurických čar (většina spektrogramů byla právě z této oblasti spektra), o kterou byla data následně opravena, domnívám se, že dané výsledky jsou v pořádku a nic nenasvědčuje tomu, že nalezená změna gama rychlosti je způsobena přístrojovými vlivy nebo chybami při zpracovávání.

Původně dvojhvězda 96 Her se tedy stala objektem velmi zajímavým, kterému by se měla i nadále věnovat pozornost.

Reference

- [1] Fletcher, R., Powell, M. J. D., 1963, *Computer Journal*, 6, 163
- [2] Frost, E. B., Barrett S. B., Struve, O., 1926, *Astrophysical Journal*, 64, 1
- [3] Hacar, B., Úvod do obecné astronomie, SPN, Praha 1963
- [4] Hodge, P. W., *Concepts of contemporary astronomy*, McGraw-Hill Book Company, USA 1979
- [5] Horn, J., disertační práce, *Astronomický ústav ČSAV, Ondřejov* 1977
- [6] Kodaira, K., 1971, *Publication of the Astronomical Society of Japan*, 23, 159
- [7] Koubský P., Horn, J., Harmanec P. a kol., 1985, *Information Bulletin on Variable Stars*, 2778, 1
- [8] Mikulášek, Z., *Proměnné hvězdy, skriptum*, Brno 2002
- [9] Mikulášek, Z., *Úvod do fyziky hvězd, skriptum*, Brno 1999
- [10] Mikulášek, Z., Krtička, J., *Fyzika horkých hvězd, skriptum*, Brno 2003
- [11] Mitchell, S. A., 1911, *Science*, 34, 529
- [12] Schlesinger, F., Udick, S., 1912, *Publications of the Allegheny Observatory of the University of Pittsburgh*, II, 17
- [13] Široký, J., *Astronomie a astrofyzika, skriptum*, Olomouc 1979
- [14] Škoda, P., 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, A.S.,P. Conference Series, 101, ed. by George H. Jacoby and Jeannette Barnes, 187
- [15] Šlechta, M., 2001, *Povětroň*, 6, 10
- [16] Šolc, M. a kol., *Fyzika hvězd a vesmíru*, SPN, Praha 1983
- [17] Tanner, R. W., 1948, *Journal of the Royal Astronomical Society of Canada*, 42, 177
- [18] Underhill, A. B., *The early type stars*, D.Riedel Publishing Company, Dordrecht - Holland 1966

[19] Vanýsek, V., Základy astronomie a astrofyziky, Academia, Praha 1980

elektronické zdroje:

<http://astro.mff.cuni.cz/hec/ASTO19>

(P. Harmanec, P. Mayer: Binary Stars)

<http://asterope.asu.cas.cz/dal/pristroje.html>

(Přístrojové vybavení v Ondřejově)