

**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **STUDENTSKÝ PROJEKT**

Alžběta Oplištilová

**Pokus o nalezení spektrálních čar sekundární  
složky hmotné zákrytové dvojhvězdy  $\delta$  Orionis**

Vedoucí projektu: prof. RNDr. Petr Harmanec, DrSc.

Praha 2018

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Delta Orionis</b>	<b>3</b>
<b>2 Určování radiálních rychlostí</b>	<b>4</b>
2.1 SPEFO . . . . .	5
2.2 Rektifikace . . . . .	6
2.3 Radiální rychlosti . . . . .	8
2.4 SPEL90 . . . . .	14
2.4.1 Individuální řešení jednotlivých čar . . . . .	19
<b>3 Rozmotávání spekter</b>	<b>25</b>
3.1 Program KOREL . . . . .	25
3.2 Vstupní soubory pro KOREL . . . . .	25
3.2.1 Soubor korel.dat . . . . .	25
3.2.2 Soubor korel.par . . . . .	30
3.3 Spuštění programu KOREL . . . . .	34
3.4 Hledání sekundární složky programem KOREL . . . . .	35
Závěr	40
Literatura	42

# Úvod

Studentský projekt je věnován jasné hmotné dvojhvězdě  $\delta$  Orionis ( $\delta$  Ori) neboli Mintaka ze souhvězdí Orion. Tato zákrytová dvojhvězda byla během posledního století studovaná mnohokrát. Spektrální čáry třetí složky však byly chybně interpretovány jako čáry sekundáru, což vedlo k určení nesprávných hmotností dvojhvězdy. První a třetí složka jsou srovnatelně horké, zatímco druhá složka je mnohem studenější a její spektrum je oproti první a druhé velmi slabé - špatně detekovatelné.

Cílem studentského projektu je zpracovat a proměřit kolekci spekter z modré oblasti a pokusit se najít sekundární složku  $\delta$  Orionis. Tato spektra byla získána spektrografem dvoumetrového dalekohledu v Ondřejově. K vypracování projektu se použije několik programů, jako je SPEFO, SPEL, SN2, SNVAHY, HEC35D a program na rozmotávání spekter KOREL.

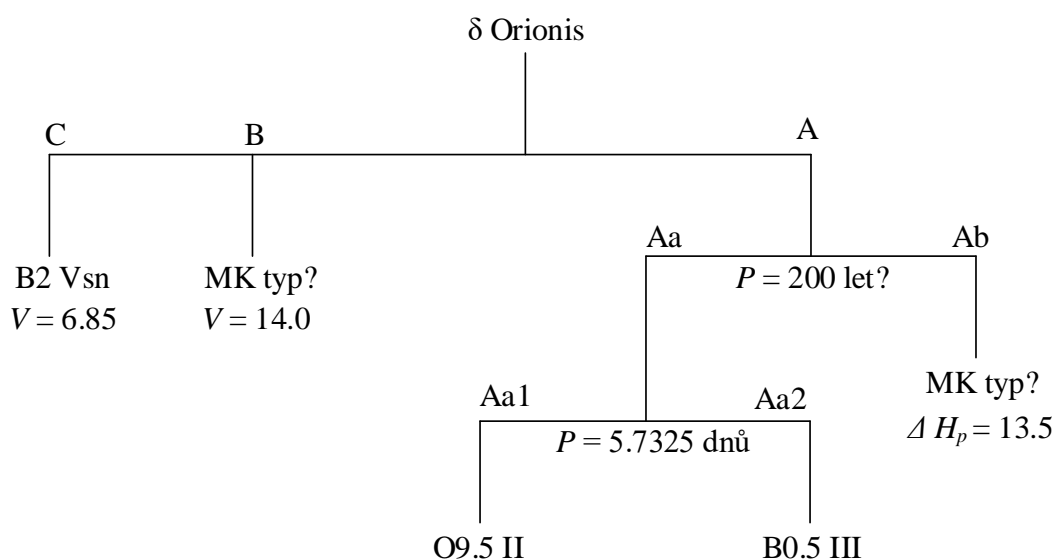
# 1. Delta Orionis

Jasná hmotná dvojhvězda  $\delta$  Orionis ( $\delta$  Ori) neboli Mintaka (spektrální klasifikace: O9.5 II) patří do trojhvězdného systému. Dvojhvězdy jsou dvojice hvězd, které jsou k sobě vázány gravitací a obíhají kolem společného těžiště po eliptické nebo kruhové dráze. Jasnější (někdy hmotnější) hvězdu označujeme jako primární složku (primár) - v případě  $\delta$  Orionis  $\delta$  Ori A (HD 36486, HR 1852) - jedna z nejjasnějších hvězd na nebi, a druhou hvězdu nazýváme sekundární složkou (sekundárem). To, že je  $\delta$  Orionis součástí trojhvězdného systému znamená, že navíc společně se vzdálenou třetí složkou obíhá kolem společného těžiště.

$\delta$  Orionis patří jako většina dvojhvězd mezi *spektroskopické dvojhvězdy*, což znamená, že se i v nejdokonalejších dalekohledech jeví jako jeden světelný bod. Povaha dvojhvězdy je zjištěna ze spektroskopických pozorování, jelikož v důsledku oběžného pohybu dochází k periodickým změnám radiální rychlosti čar.

Orbitální perioda delta Ori A je  $P = (5,7325 \pm 0,0002)$  d (Mayer et al. 2010) a má mírně excentrickou orbitu s apsidální periodou 234 let (Harmanec et al. 2013). Oběžná dráha  $\delta$  Orionis je v prostoru orientovaná tak, že v ní naše sluneční soustava zhruba leží, takže lze pozorovat vzájemné zákryty obou složek dvojhvězdy - mluvíme tedy o *zákrytové dvojhvězdě*. Zákryty se projevují hlavně při fotometrických pozorováních, a to pravidelně se opakujícími poklesy jasnosti. Maximální magnituda systému dosahuje až 2,20 mag, minimální magnituda je o 0,11 mag a 0.07 mag slabší. .

Podrobnější struktura Delta Orionis je zobrazená na obrázku 1.1 (Harvin et al. 2002). V roce 1980 Heintz objevil blízkou komponentu dvojhvězdy Ab, která se v poslední době jeví jako rozdělená na Aa a Ab s rozdílnou magnitudou 1,35 mag (průměr za celý oběh). Harvin a kol. v roce 2002 došel k závěru, že je dvojhvězda složena z komponent O9.5 II a B0.5 III. Z křivek radiálních rychlostí však byly určeny neočekávaně malé hmotnosti: 11,2 a 5,6  $M_{\odot}$ . Nicméně v roce 2010 Mayer a kol. poukázali na to, že sekundární systém spektrálních čar patří třetí složce Ab, která je podobně horká jako primární složka. Předpokládali, že hmotnostní poměr  $q = \frac{M_2}{M_1} \sim 0,4$  a došli k závěru, že systém by měl mít normální hmotnosti. Sekundární složka je velmi slabá a byla proto špatně identifikovaná.



Obrázek 1.1: Struktura Delta Orionis (Harvin et al. 2002)



## 2. Určování radiálních rychlostí

Radiální rychlost je rychlost tělesa ve směru k pozorovateli. Světlo tělesa s radiální rychlostí je ovlivněno Dopplerovým jevem - vlnová délka světla  $\lambda$  se zvětšuje, pokud dochází ke vzdalování objektu (červený posuv), nebo zmenšuje, jestliže se objekt přibližuje (modrý posuv). Dle konvence je většinou radiální rychlost pro vzdalující se objekty kladná a pro přibližující se objekty záporná. Vztah mezi radiální rychlostí  $RV$  a vlnovou délkou  $\lambda$  pro  $RV < c$  (radiální rychlosti jsou obvykle menší než rychlost světla ve vakuu) vyjadřuje klasický vzorec (viz např. Harmanec 2008)

$$\lambda = \lambda_0 \left(1 + \frac{RV}{c}\right). \quad (2.1)$$

Logaritmický tvar vzorce 1 je

$$\ln \lambda = \ln \lambda_0 + \ln \left(1 + \frac{RV}{c}\right). \quad (2.2)$$

Pro  $RV \ll c$  lze nahradit  $\ln \left(1 + \frac{RV}{c}\right)$  Taylorovým rozvojem a zanedbat jeho vyšší řády, tedy

$$\ln \lambda \doteq \ln \lambda_0 + \ln \left(\frac{RV}{c}\right). \quad (2.3)$$

S využitím Taylorova rozvoje tedy můžeme přepsat rovnici 2.2 na

$$c \cdot \Delta \ln \lambda \doteq \Delta RV, \quad (2.4)$$

ze kterého je patrné, že posun  $c \cdot \ln \lambda$  znamená rozdíl v radiálních rychlostech mezi dvěma spektry.

V důsledku zanedbání členů Taylorova rozvoje vyššího řádu vznikají chyby v radiálních rychlostech. Přibližnou vlnovou délku  $\lambda_{approx}$  vyjádříme z rovnice 2.2 s využitím aproximace Taylorovým rozvojem s mezikroky

$$\ln \lambda_{approx} - \ln \lambda_0 = \frac{RV}{c} = \ln \exp \left(\frac{RV}{c}\right) \quad (2.5)$$

a

$$\frac{\lambda_{approx}}{\lambda_0} = \exp \left(\frac{RV}{c}\right) \quad (2.6)$$

jako

$$\lambda_{approx} = \lambda_0 \exp \left(\frac{RV}{c}\right). \quad (2.7)$$

Rozdíl radiálních rychlostí proto bude (Harmanec 2008)

$$RV - RV_{approx} = RV - c \left(\frac{\lambda_{approx} - \lambda_0}{\lambda_0}\right) = RV - c \left(\exp \left(\frac{RV}{c}\right) - 1\right). \quad (2.8)$$

Chyba radiálních rychlostí při použití přibližného logaritmického vztahu tedy nezávisí na vlnové délce, ale pouze na velikosti radiální rychlosti.

## 2.1 SPEFO

K určení radiálních rychlostí jsem použila program SPEFO<sup>1</sup> (viz obr. 2.1), jenž byl vytvořen na stelárním oddělení Astronomického ústavu České republiky v Ondřejově. Program umožňuje kromě kompletních redukci spektrogramů a jejich digitalizace měřit radiální rychlosti  $RV$  pomocí srovnání přímého a převráceného spektra na rektifikovaných spektrech vykreslených již v relativních tocích i mnoho dalších věcí.

Program SPEFO prošel dlouhým vývojem. První verzi napsal ve FORTRANU v sedmdesátých letech astronom J. Krpata. Po roce 1990 napsal SPEFO jazykem Pascal pro osobní počítače Jiří Horn. Program umožňoval digitalizaci spekter na obrazovku počítače. Poslední verze programu od Jiřího Horna (SPEFO 3.26) pochází z 13. října 1994. Několik dalších úprav programu uskutečnil Dr. Petr Škoda, který zároveň publikoval detailní popis programu. Jeho nejnovější verze (SPEFO 3.30) byla vydána 29. dubna 1995. Kolem roku 1993 se k programu přidal mikrodensitometr a Dr. R. Komžík upravil program na verzi s názvem MF2SPEFO (18. května 2001). Od roku 2003 vylepšoval SPEFO původní autor Jiří Krpata. Uskutečňoval návrhy na zlepšení především od sebe a Petra Harmance, později od dalších pravidelných uživatelů SPEFA. V současné době program SPEFO nikdo nerozvíjí, poslední verze SPEFO JK 2.63 je od Jiřího Krpaty (Horn et al. (2010)).

Program jsem použila k měření radiálních rychlostí, které se s pomocí souboru `.st1` určují absolutně vůči laboratorní vlnové délce. Program SPEFO jsem spustila emulátorem (software, který dovoluje funkci počítačových programů v jiné platformě) DOSBox.



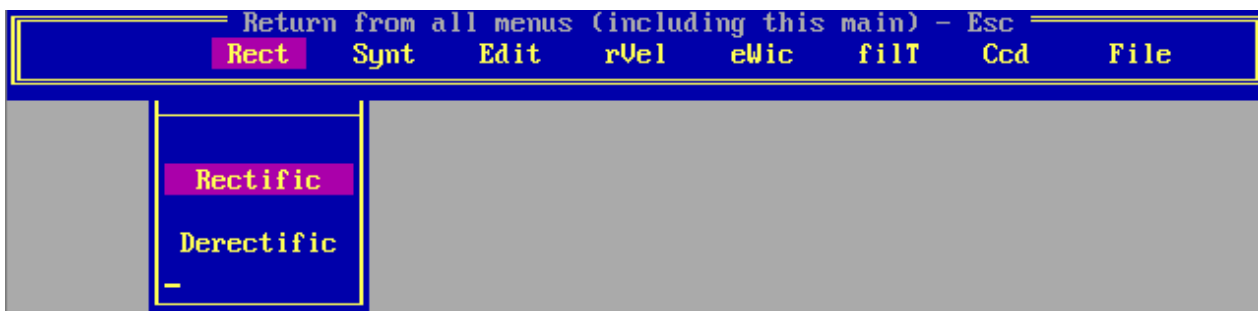
Obrázek 2.1: Program SPEFO

<sup>1</sup><http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/SPEFO/>

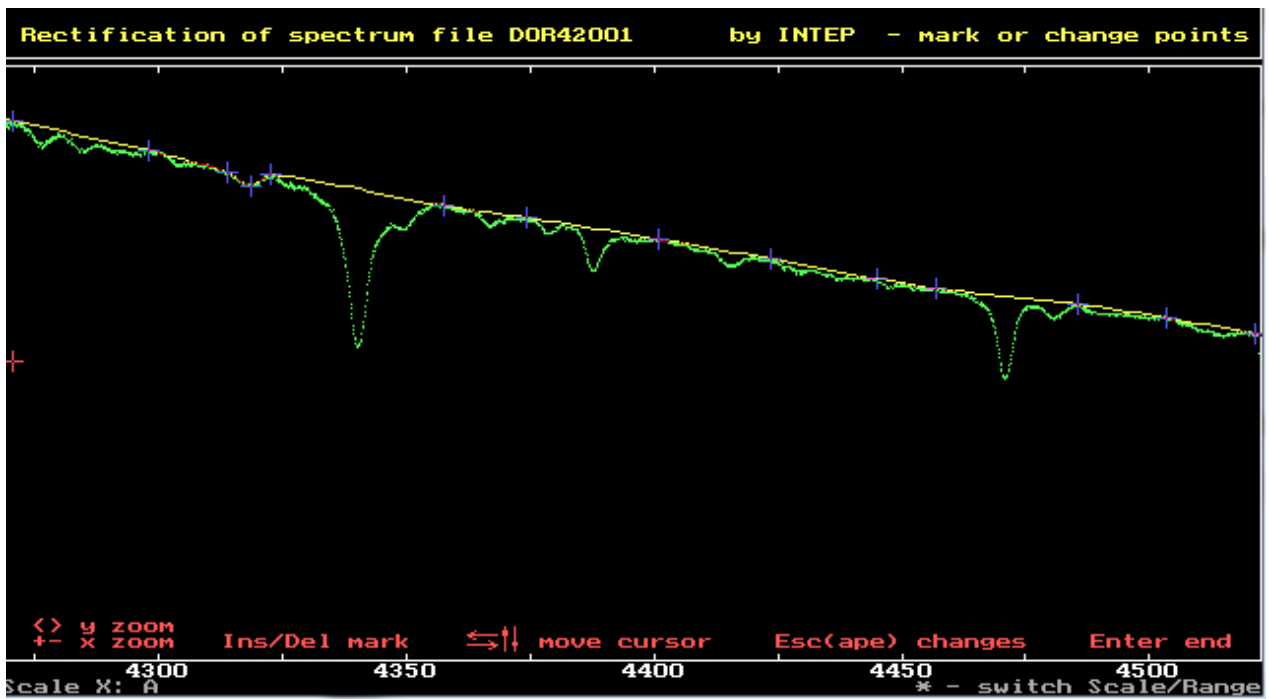
## 2.2 Rektifikace

Cílem rektifikace bylo provést korekturu spekter tak, aby se umožnilo porovnávat spektrální čáry v relativních jednotkách. Po otevření programu SPEFO jsem vybrala složku, ve které jsou .UII soubory (nerektifikovaná spektra). Po kliknutí na volbu **Rect** » **Rectific** (obr. 2.2) jsem zvolila požadovaný .UII soubor. Rektifikaci spektra jsem prováděla tak, že jsem modrým křížkem, který se vkládá pomocí klávesy **Insert**, označovala místa s nulovou relativní intenzitou - kontinuum (viz obr. 2.3). Uživatel může vložit až 100 bodů definujících kontinuum. Odstranění křížku se provádí klávesou **Delete**. Dokončenou rektifikaci jsem potvrdila klávesou **Enter** a zobrazilo se spektrum s relativní intenzitou na ose y (viz obr. 2.4). Program ukázal přímkou definující kontinuum, která spojuje všechny vytvořené body. Znovu jsem toto potvrdila klávesou **Enter** a tímto způsobem jsem provedla rektifikaci všech 61 spekter.

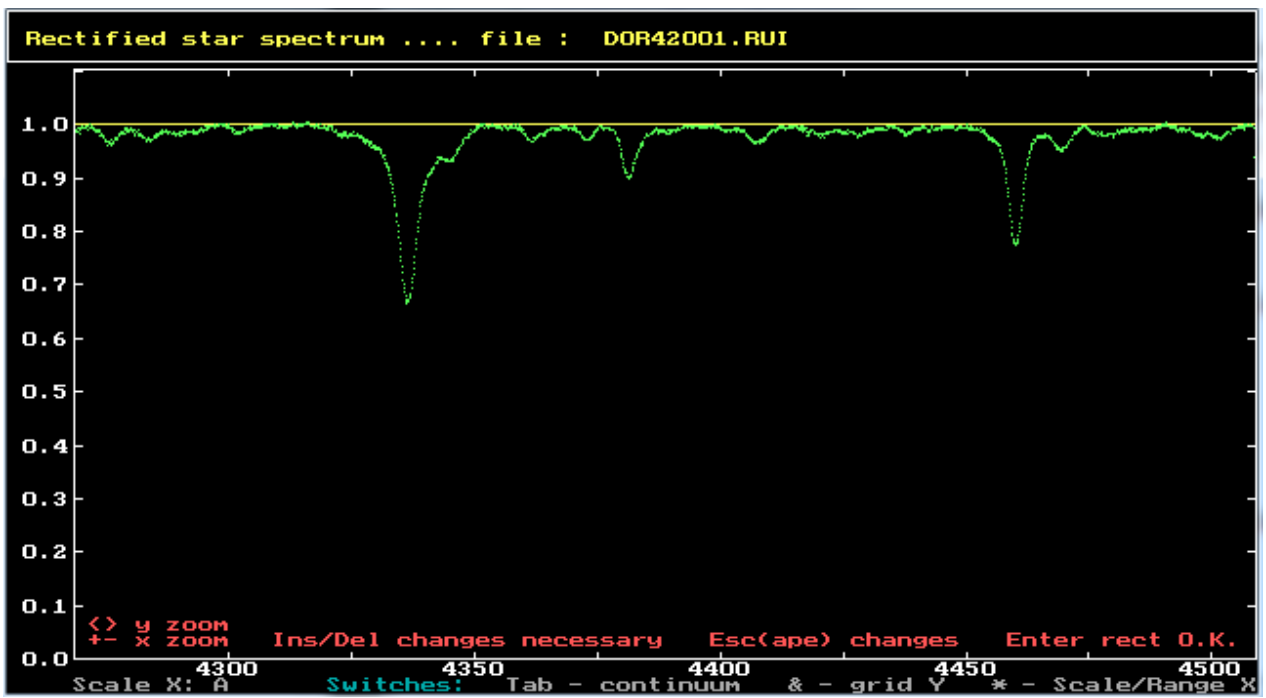
Při rektifikaci více spekter u jedné hvězdy program sám automaticky umísťuje křížky na vlnové délky jako u prvního spektra, dokud uživatel program neukončí. Tato funkce značně ulehčuje práci, jelikož uživatel jen mírně upraví pozice bodů. Rektifikovaná spektra jsou ukládána do souborů s příponou .RUI. Pomocné soubory s údaji o bodech definujících kontinuum mají příponu .CON. Uživatel může kdykoliv rektifikaci spekter upravovat.



Obrázek 2.2: Rektifikace v menu programu SPEFO



Obrázek 2.3: Rektifikace spektra

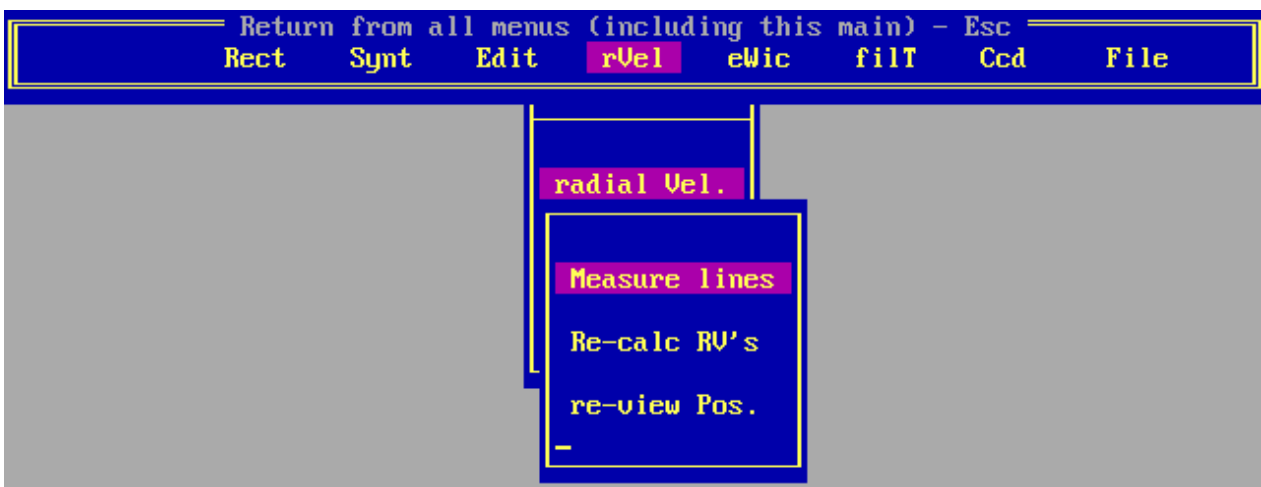


Obrázek 2.4: Hotová rektifikace spektra

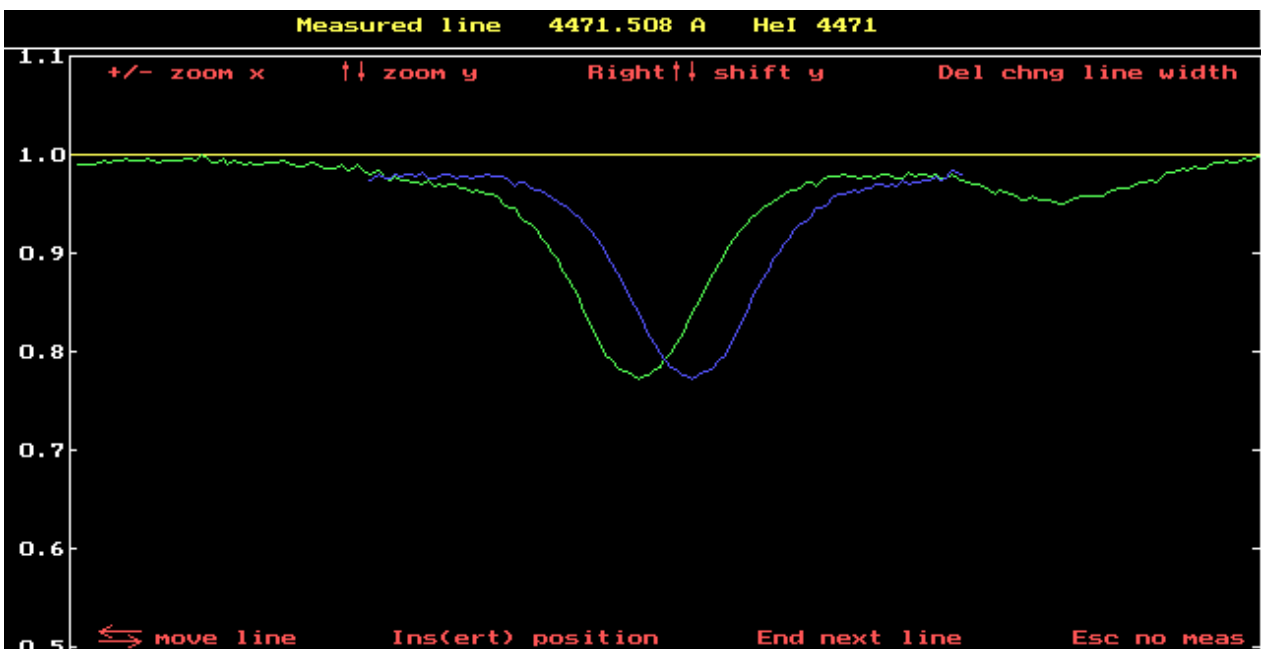
## 2.3 Radiální rychlosti

Při měření radiálních rychlostí (volba `rVel`  $\gg$  `radial Vel.`  $\gg$  `Measure lines` (obr. 2.5) se porovnávají se vzorovým spektrem čtyři spektrální čáry: He I 4471, He I 4388, Mg II 4481 a H gama (čísla znamenají vlnovou délku  $\lambda$  v angstrémech).

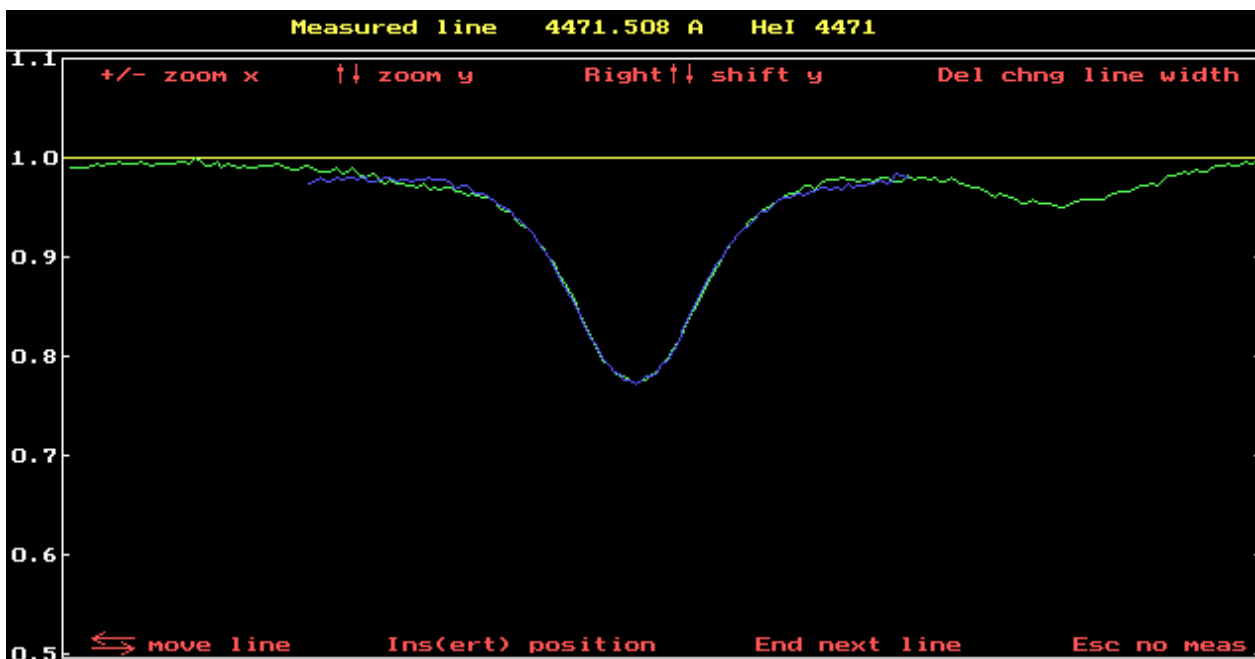
Spektry se pohybuje klávesami 4 a 6 (větší posun) nebo levou a pravou šipkou (citlivější posun). Přiblížení a oddálení osy  $y$  lze pomocí šipek nahoru a dolů. Přepnutí na celou obrazovku se udělá pomocí `Alt + Enter`. Seřízení spekter se potvrzuje klávesou `Enter`. Každé spektrum jsem měřila minimálně třikrát a změřené výsledky jsou průměrem těchto měření. Příklad posunu spektra v oblasti spektrální čáry He I 4471 je na obrázku 2.6 a 2.7, posun čáry He I 4387 znázorňují obrázky 2.8 a 2.9, Mg II obrázky 2.10 a 2.11, H gama obrázky 2.12 a 2.13. Výstupní soubory, ve kterých jsou zapsané radiální rychlosti jednotlivých spekter, se jmenují `DOR420...RV` (např. soubor 1). Detailnější záznamy jsou uvedeny v souborech `DOR420...RVR` (např. soubor 2).



Obrázek 2.5: Volba měření radiálních rychlostí



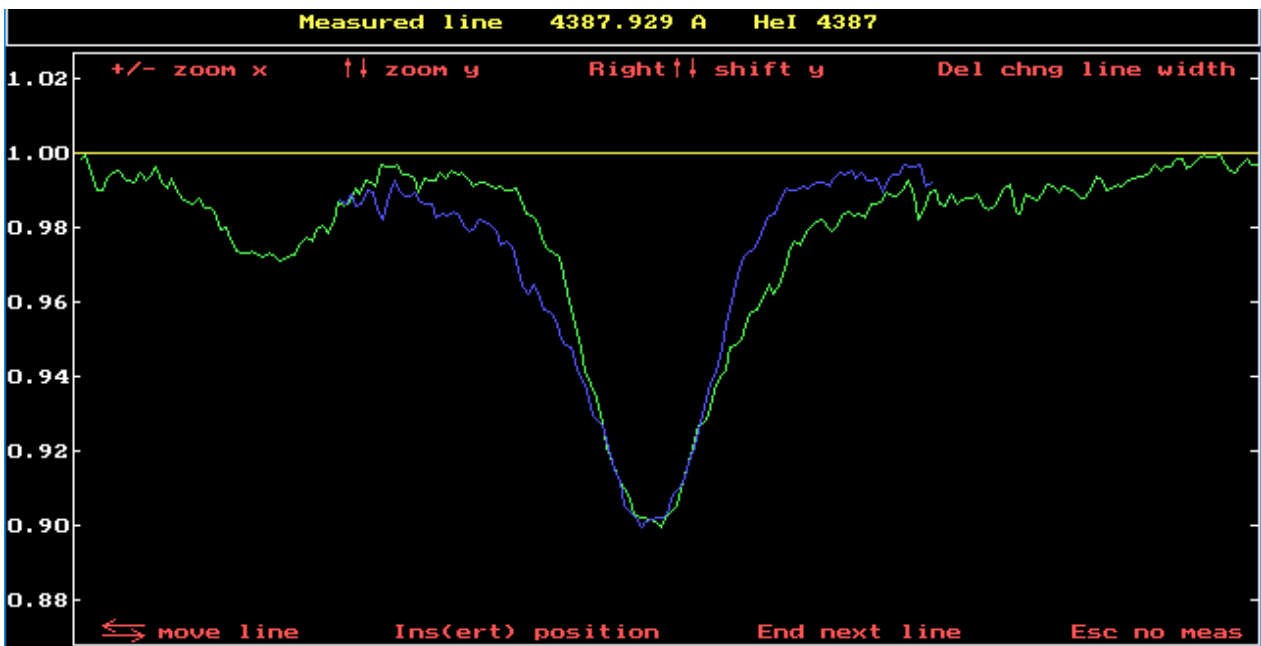
Obrázek 2.6: Spektrální čára He I 4471



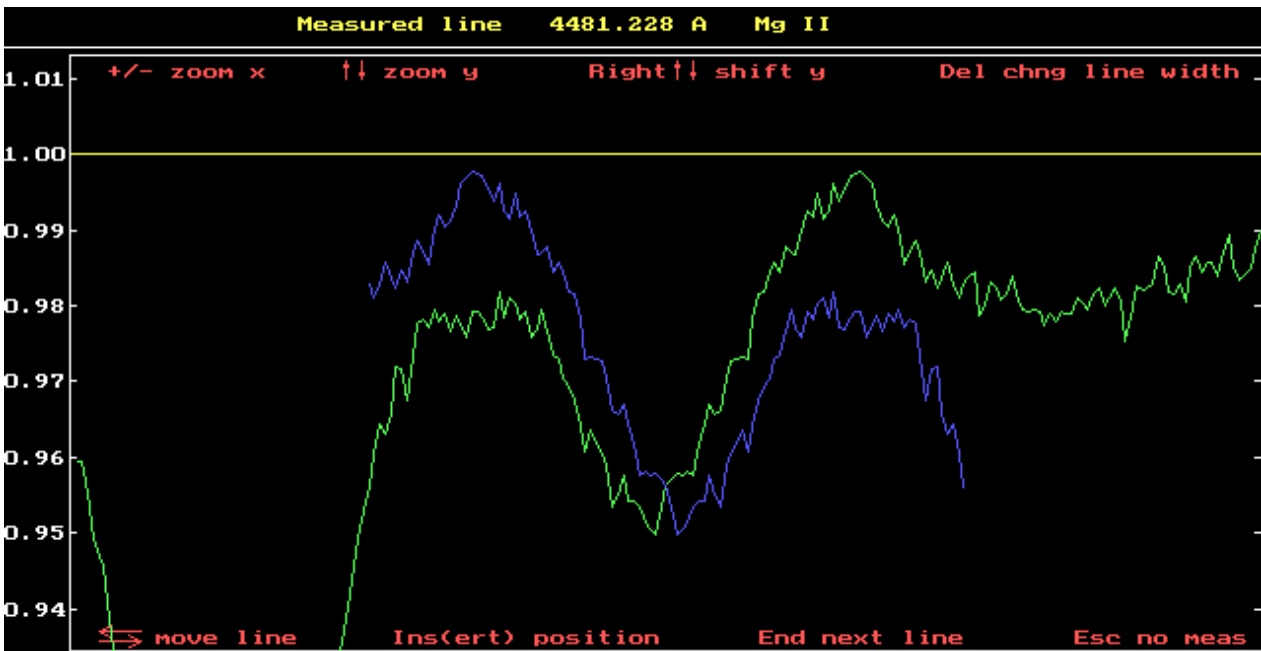
Obrázek 2.7: Spektrální čára He I 4471 - seřízení s kalibračním spektrem



Obrázek 2.8: Spektrální čára He I 4388



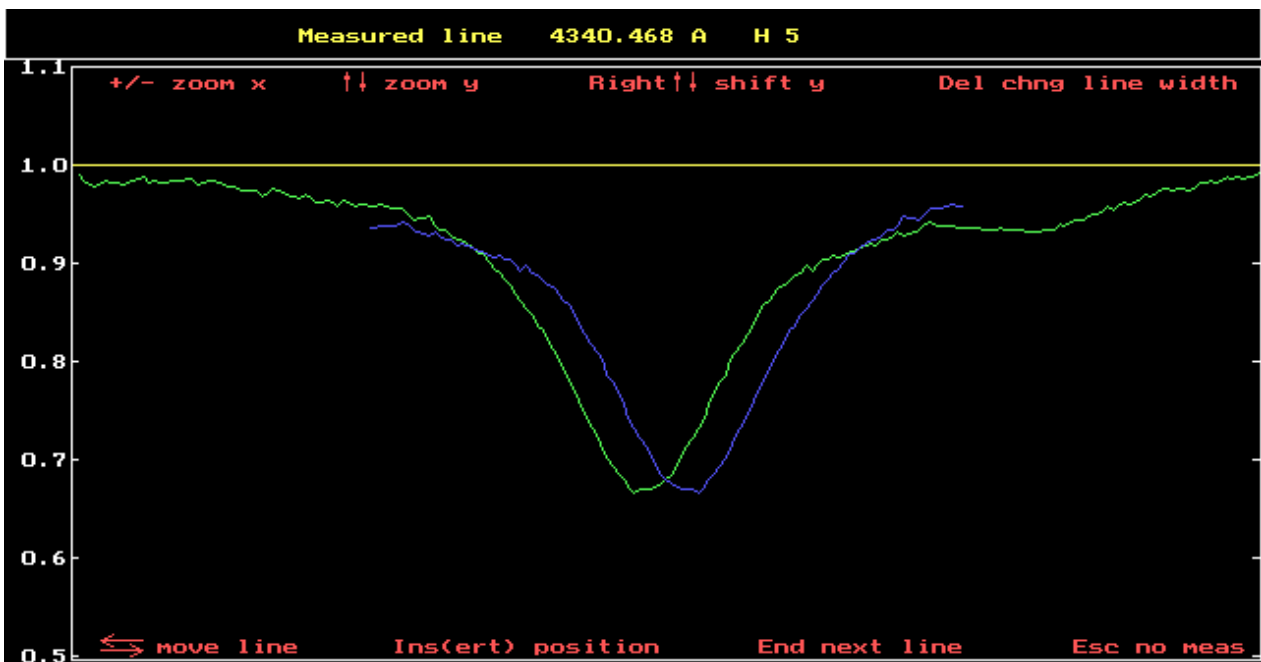
Obrázek 2.9: Spektrální čára He I 4388 - seřízení s kalibračním spektrem



Obrázek 2.10: Spektrální čára Mg II

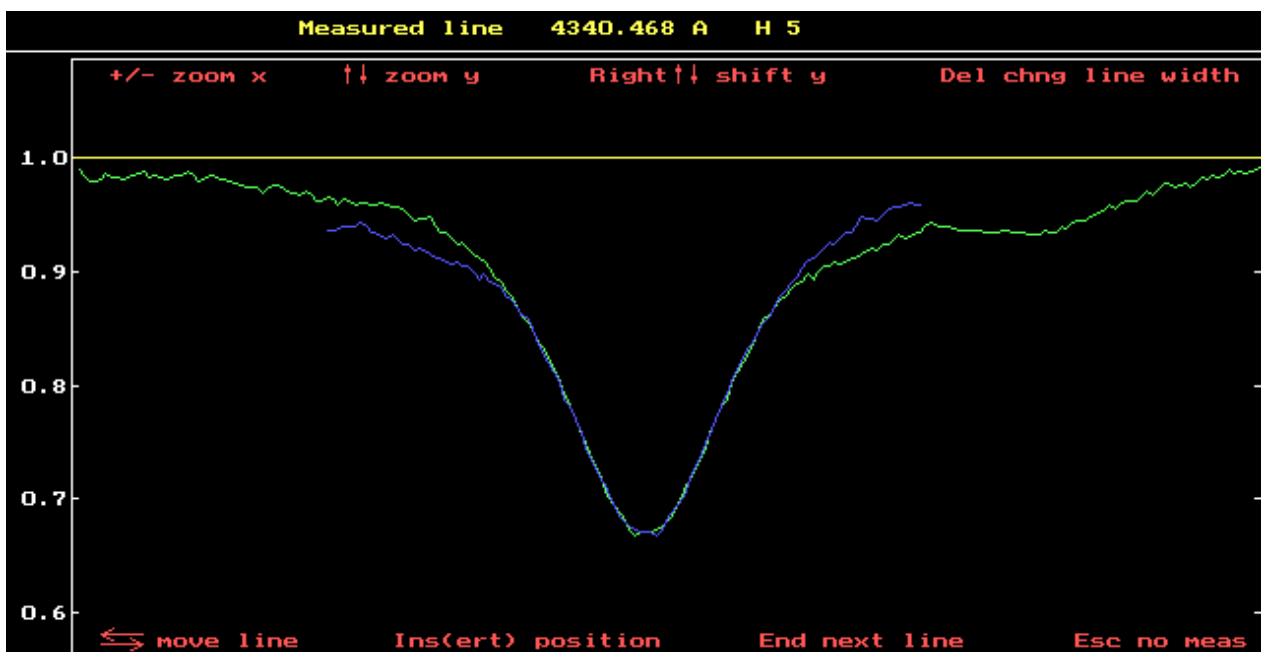


Obrázek 2.11: Spektrální čára Mg II - seřízení s kalibračním spektrem



Obrázek 2.12: Spektrální čára H gama





Obrázek 2.13: Spektrální čára H gama - seřízení s kalibračním spektrem

### Soubor 1: Příklad výstupního souboru .RV

```

4.26878174509E+0003
1.27109930122E-0001
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
0.00000000000E+0000
1.00005662417E+0000
 1585.25   6.99   0.0000   1 4471.5080   HeI 4471
   929.45   6.99   0.0000   2 4387.9290   HeI 4387
 1661.50   6.99   0.0000   3 4481.2280     Mg II
   555.55   6.99   0.0000   4 4340.4680     H 5
 1585.25   6.99   0.0000   1 4471.5080   HeI 4471
   929.45   6.99   0.0000   2 4387.9290   HeI 4387
 1661.50   6.99   0.0000   3 4481.2280     Mg II
   555.30   6.99   0.0000   4 4340.4680     H 5
 1585.45   6.99   0.0000   1 4471.5080   HeI 4471
   929.55   6.99   0.0000   2 4387.9290   HeI 4387
 1661.50   6.99   0.0000   3 4481.2280     Mg II
   555.40   6.99   0.0000   4 4340.4680     H 5

```

### Soubor 2: Příklad výstupního souboru .RVR

Summary of radial velocities measured on plate DOR42058

Heliocentric correction : 26.2886

Results for component N. 1

N.	ident.	lab.	width	position	measured	rms	hel. RV
1	HeI 4471	4471.5080	6.98	1738.70	4472.1877	0.000	71.8663
2	HeI 4471	4471.5080	6.98	1738.70	4472.1877	0.000	71.8663
3	HeI 4471	4471.5080	6.98	1738.70	4472.1877	0.000	71.8663
						mean RV =	71.8663
						rms =	0.0000

Results for component N. 2

N.	ident.	lab.	width	position	measured	rms	hel. RV
1	HeI 4387	4387.9290	6.98	1008.45	4388.6673	0.000	76.7371
2	HeI 4387	4387.9290	6.98	1008.45	4388.6673	0.000	76.7371
3	HeI 4387	4387.9290	6.98	1008.50	4388.6730	0.000	77.1278

mean RV = 76.8673  
rms = 0.1302

Results for component N. 3  
-----

N.	ident.	lab.	width	position	measured	rms	hel. RV
1	Mg II	4481.2280	6.98	1824.05	4481.9494	0.000	74.5561
2	Mg II	4481.2280	6.98	1823.55	4481.8922	0.000	70.7301
3	Mg II	4481.2280	6.98	1824.05	4481.9494	0.000	74.5561

mean RV = 73.2808  
rms = 1.2754

Results for component N. 4  
-----

N.	ident.	lab.	width	position	measured	rms	hel. RV
1	H 5	4340.4680	6.98	592.90	4341.1399	0.000	72.6996
2	H 5	4340.4680	6.98	592.70	4341.1170	0.000	71.1195
3	H 5	4340.4680	6.98	592.80	4341.1285	0.000	71.9096

mean RV = 71.9096  
rms = 0.4561

## 2.4 SPEL90

Program SPEL90<sup>2</sup> (SPektroskopické ELeMenty) vytvořený českým astronomem Dr. Jiří Hornem běží stejně jako SPEFO pod DOSBoxem. Program slouží k určení orbitálního řešení dvojhvězd, radiálních rychlostí a dráhových elementů spektroskopické dvojhvězdy. Umožňuje libovolné elementy buď počítat nebo fixovat. Poskytuje uživateli fázový graf, chyby jednotlivých elementů, aj. (Horn 2014).

Vytvoření vstupních souborů pro program SPEL umožňuje program SPEFO. Zvolila jsem `rVel >> Rv result` (obr. 2.14) a vybrala soubor `SPEFO.LST`. Při prvním dotazu programu jsem potvrdila klávesou `Enter`, že se výsledky mají psát do souboru se stejným názvem (typ souboru bude `.RVS`) a v druhém dotazu `SPEFA` jsem napsala tři znaky z názvu souboru - `dor` (obr. 2.15). Vše jsem potvrdila klávesou `Enter`, čímž se spustil program a vytvořil se výstupní soubor - `SPEFO.RVS` (viz soubor 3).

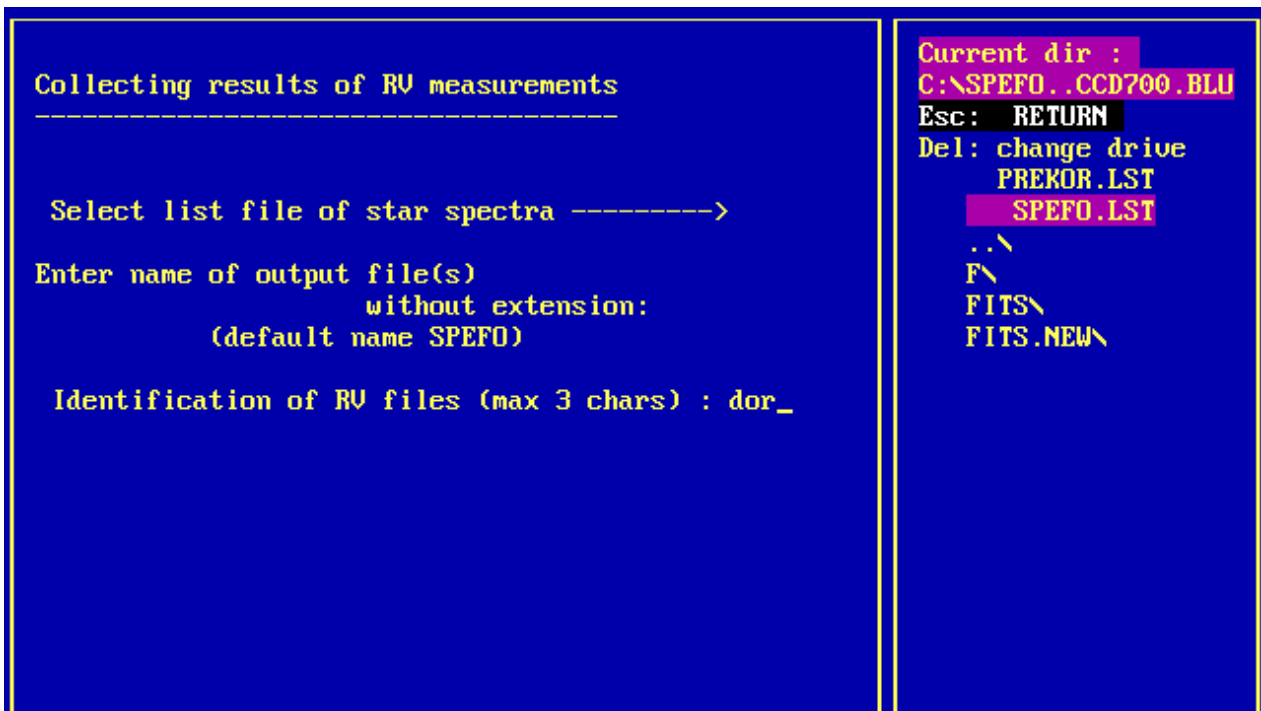
Z této tabulky jsem pro program SPEL vytvořila čtyři vstupní datové soubory `.SPD` pro každou měřenou čáru. K tomuto účelu lze použít program `VOLBA`<sup>3</sup>. Po otevření programu SPEL jsem vybrala vstupní soubor `.SPD` (např. soubor 4) dle obr. 2.16 a zvolila parametry jako na obrázku 2.17.

<sup>2</sup><http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/SPEL90/>

<sup>3</sup><http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/HEC13/>



Obrázek 2.14: Volba pro vytvoření .RVS souboru



Obrázek 2.15: Volba RV result

### Soubor 3: Soubor SPEFO.RVS

Results of RV measurements for files secured with the Ond  
 List of observations of star >>> delta Ori H5 <<<

N.	J.D. hel.	corr.	R.V. for individual components			
			1	2	3	4
42001	55836.5692	26.2335	28.3323	-0.5672	-2.0120	-7.6489
42002	55836.5827	26.2097	-14.4487	1.4356	-8.9812	-7.3800
42003	55836.5963	26.1849	-15.4678	2.2794	-10.2816	-7.5511
42004	55836.6137	26.1517	-16.6374	6.7336	-2.3773	-9.0477
42005	55836.6287	26.1222	-18.6556	-3.2841	-9.9191	-11.1625
42006	55836.6434	26.0929	-18.4008	-1.7211	-17.8860	-12.1796
42007	55837.5877	26.0588	-87.1038	-72.8793	-86.7247	-82.3534
42008	55837.6016	26.0328	-87.4539	-72.3263	-85.1915	-82.6140
42009	55837.6152	26.0064	-88.4346	-71.6289	-89.6119	-81.8204
42010	55837.6294	25.9784	-88.4981	-71.0779	-85.8128	-81.7752
42011	55871.5969	16.9755	-73.1297	-60.0827	-75.3657	-66.9062
42012	55893.4601	7.9171	28.5281	39.3960	20.5184	33.6448
42013	55893.4820	7.8667	33.4490	40.3588	19.0508	31.8384
42014	55953.4009	-19.2387	-9.5783	6.2374	-25.9028	-8.9109
42015	55953.4226	-19.2836	-8.2029	5.9030	-26.2311	-8.3705
42016	55953.4508	-19.3381	-3.5350	5.9933	2.9089	-5.0963
42017	55953.4692	-19.3704	-1.0462	11.1714	7.2700	-0.7025
42018	55953.4871	-19.3992	4.0380	13.0242	6.2491	1.1708
42019	55956.3498	-20.1601	45.7292	55.6710	8.1817	47.4292
42020	55959.2469	-20.9128	2.1243	23.2084	12.0120	6.5407
42021	55977.3276	-25.6205	75.1295	93.3929	82.9846	78.3837
42022	55990.3318	-27.3138	90.4808	100.4086	90.2347	86.8880
42023	55991.2779	-27.2883	-5.5685	13.5511	6.0123	-5.4426
42024	55992.2949	-27.3830	-89.9107	-70.7183	-84.1259	-81.5742
42025	56003.3328	-27.6165	-64.3854	-51.7833	-67.5856	-60.3751
42026	56011.3498	-27.1206	49.2859	58.2570	38.6287	48.1473
42027	56167.6213	26.1472	102.2050	113.8246	91.4320	99.6476
42028	56241.4709	15.4295	103.8706	117.9142	97.2888	100.7112
42029	56257.4224	8.5701	10.7213	21.1977	9.7339	13.1481
42030	56257.6273	8.1164	28.8380	42.1490	24.6733	30.6241
42031	56330.3789	-22.8962	-86.7736	-70.5232	-87.5022	-81.4389
42032	56354.3038	-27.1587	-55.0178	-43.9565	-53.6725	-53.3510
42033	56357.3761	-27.5049	84.3549	89.9267	81.9847	79.2770
42034	56596.5631	19.1204	85.9849	90.7990	64.2777	88.2694
42035	56608.6423	14.3991	111.0787	123.7768	88.5682	110.7252
42036	56609.4312	14.4441	83.2368	90.1818	70.0983	80.0474
42037	56621.6375	8.7784	24.4103	37.1036	9.3481	18.9388
42038	56629.6451	5.0123	-33.9060	-17.3250	-28.8692	-27.4040
42039	56642.5644	-1.1527	97.6275	105.7848	79.9188	99.2398
42040	56643.3817	-1.2259	115.6126	119.3047	105.6864	109.9240
42041	56643.6078	-1.7159	105.4845	112.0734	91.9697	104.3979
42042	56666.3166	-11.9535	128.8222	130.0592	117.5451	119.0625
42043	56666.4940	-12.3482	121.2414	132.1922	112.9036	115.6100
42044	56704.3508	-24.9170	-14.8727	3.3965	-11.5826	-12.4044

42045	56714.2672	-26.4964	-73.9432	-63.4455	-73.3595	-66.6649
42046	56719.3096	-27.1475	-2.7205	15.4786	-7.2306	0.0494
42047	56721.3496	-27.3779	-28.9481	-15.8711	-31.5404	-28.6148
42048	56737.3202	-27.4373	-85.5601	-60.0773	-77.1697	-77.7580
42049	56737.3202	-27.4373	-85.1768	-60.3377	-75.7670	-76.8365
42050	56738.3020	-27.3532	-56.9162	-37.2592	-55.9548	-46.1467
42051	56746.2894	-26.5682	107.6157	115.1424	99.5668	108.4888
42052	56928.5832	26.6856	51.1463	61.2860	37.4859	52.2761
42053	57105.2900	-27.2198	-43.7909	-26.7515	-44.1329	-36.7105
42054	57106.2877	-27.1303	50.0048	50.5387	23.4383	50.9441
42055	57106.3182	-27.1696	52.0741	64.9546	44.6941	55.1176
42056	57116.3066	-25.8607	-82.0610	-63.6319	-72.5505	-76.4798
42057	57128.2762	-23.3452	-34.1107	-22.7484	-31.5705	-29.6177
42058	57297.5482	26.2886	71.8663	76.8673	73.2808	71.9096
42059	57364.5793	2.9803	78.2914	97.5009	72.5467	75.1156
42060	57445.3477	-26.6982	103.9627	108.6089	98.3925	97.6824
42061	57464.3540	-27.6372	17.5245	35.7061	16.7380	18.1594

#### Soubor 4: Vstupní soubor .SPD programu SPEL (pro první čáru)

HJD-2400000	RV	weight	spg.	component	CARA 1
55836.5692	-13.1464	1.000	1	1	
55836.5827	-14.4487	1.000	1	1	
55836.5963	-15.4678	1.000	1	1	
55836.6137	-16.6374	1.000	1	1	
55836.6287	-18.6556	1.000	1	1	
55836.6434	-18.4008	1.000	1	1	
55837.5877	-87.1038	1.000	1	1	
55837.6016	-87.4539	1.000	1	1	
55837.6152	-88.4346	1.000	1	1	
55837.6294	-88.4981	1.000	1	1	
55871.5969	-73.1297	1.000	1	1	
55893.4601	28.5281	1.000	1	1	
55893.4820	33.4490	1.000	1	1	
55953.4009	-9.5783	1.000	1	1	
55953.4226	-8.2029	1.000	1	1	
55953.4508	-3.5350	1.000	1	1	
55953.4692	-1.0462	1.000	1	1	
55953.4871	4.0380	1.000	1	1	
55956.3498	45.7292	1.000	1	1	
55959.2469	2.1243	1.000	1	1	
55977.3276	75.1295	1.000	1	1	
55990.3318	90.4808	1.000	1	1	
55991.2779	-5.5685	1.000	1	1	
55992.2949	-89.9107	1.000	1	1	
56003.3328	-64.3854	1.000	1	1	
56011.3498	49.2859	1.000	1	1	
56167.6213	102.2050	1.000	1	1	
56241.4709	103.8706	1.000	1	1	

56257.4224	1940809.00	1.000	1	1
56257.6273	28.8380	1.000	1	1
56330.3789	-86.7736	1.000	1	1
56354.3038	-55.0178	1.000	1	1
56357.3761	84.3549	1.000	1	1
56596.5631	85.9849	1.000	1	1
56608.6423	111.0787	1.000	1	1
56609.4312	83.2368	1.000	1	1
56621.6375	24.4103	1.000	1	1
56629.6451	-33.9060	1.000	1	1
56642.5644	97.6275	1.000	1	1
56643.3817	115.6126	1.000	1	1
56643.6078	105.4845	1.000	1	1
56666.3166	128.8222	1.000	1	1
56666.4940	121.2414	1.000	1	1
56704.3508	-14.8727	1.000	1	1
56714.2672	-73.9432	1.000	1	1
56719.3096	-2.7205	1.000	1	1
56721.3496	-28.9481	1.000	1	1
56737.3202	-85.5601	1.000	1	1
56737.3202	-85.1768	1.000	1	1
56738.3020	-56.9162	1.000	1	1
56746.2894	107.6157	1.000	1	1
56928.5832	51.1463	1.000	1	1
57105.2900	-43.7909	1.000	1	1
57106.2877	50.0048	1.000	1	1
57106.3182	52.0741	1.000	1	1
57116.3066	-82.0610	1.000	1	1
57128.2762	-34.1107	1.000	1	1
57297.5482	71.8663	1.000	1	1
57364.5793	78.2914	1.000	1	1
57445.3477	103.9627	1.000	1	1
57464.3540	17.5245	1.000	1	1

```

S P E L - program for determination of spectroscopic elements
release 1.0                      Ondrejov      April, 1990

Select file of measurements =====>
Current dir : C:\SPEFO\
Esc: end of program
Del: change drive
M : file in memory - last read
R : residuals after last solution
C_1.SPD      C_2.SPD      C_3.SPD
C_4.SPD      OC.SPD      RESULT.SPD

```

Obrázek 2.16: Program SPEL

```

S P E L - program for determination of spectroscopic elements
release 1.0                      Ondrejov      April, 1990

O-C O-C O-C ru CARA 10000
number of measurements :      60 for primary

Type of orbit to be solved :      Circular      Elliptical

Elements of      Primary      will be computed

Input elements          fixed elements
Period 5.7328          U0[ 1] 0.00      Period Comp Fix
T max 56500           T max Comp Fix
K1 100                K1 Comp Fix
U0                    U0 Comp Fix

```

Obrázek 2.17: Vyplněné dotazy programu

### 2.4.1 Individuální řešení jednotlivých čar

Individuální řešení pro jednotlivé čáry jsou uvedena na obrázcích 2.18 a 2.19. Grafické znázornění je vidět na obrázcích 2.20, 2.21, 2.22 a 2.23. Společné řešení jsem získala tak, že jsem spojila všechny 4 soubory c\_...SPD do jednoho (první řádek je hlavička souboru) a parametr *K1* jsem zvolila jako volný. Výsledek je uveden na obrázcích 2.24 a 2.25.

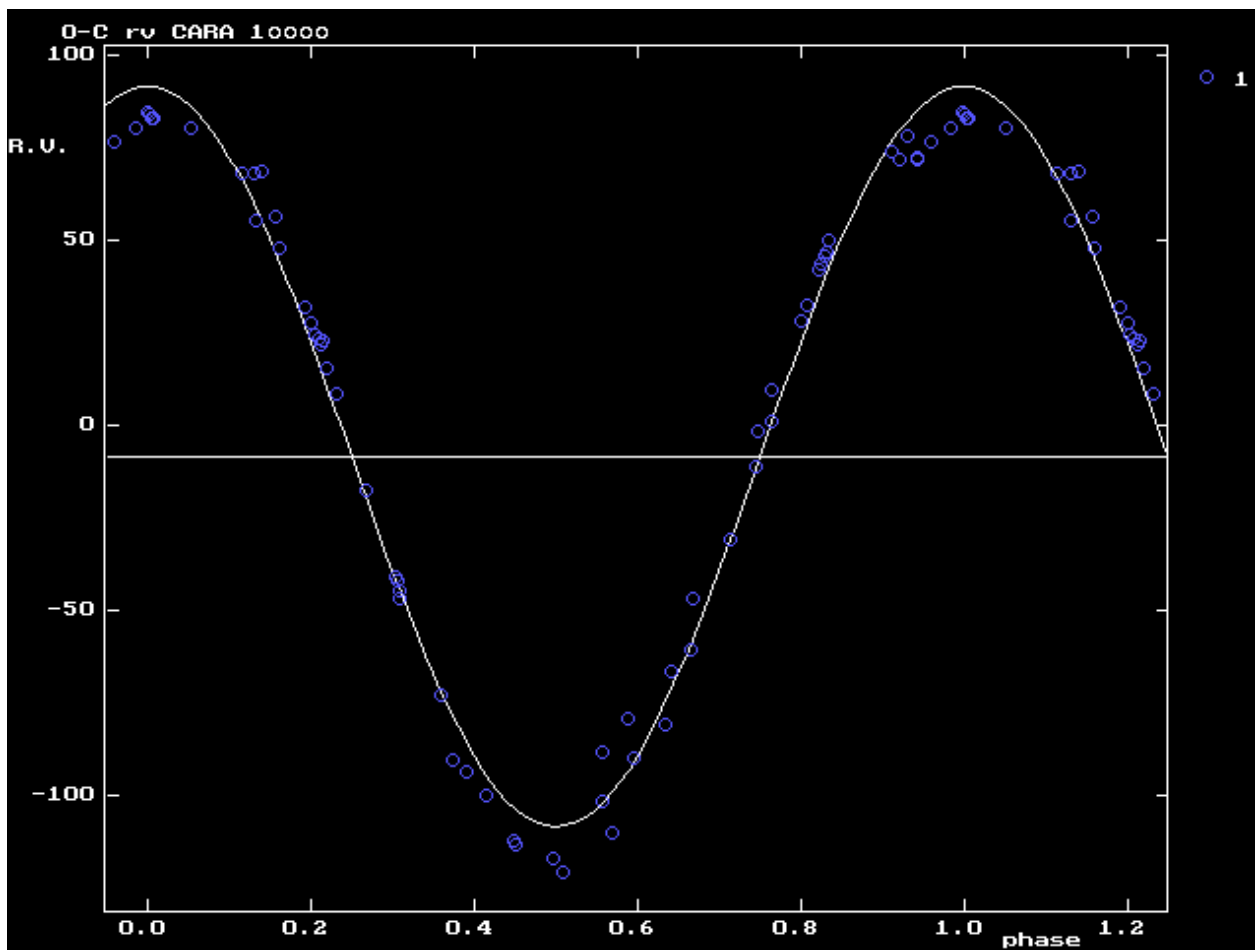
<pre> O-C ru CARA 10000 rms error of one measurement : 7.556 Period      5.73280000 assumed T max      56502.599  " 0.012 K1         100.000  assumed U0 [i] : 1 -8.38  " 0.99  f(m) = 0.5938 a = 11.33 </pre>	<pre> ru CARA 20000 rms error of one measurement : 8.630 Period      5.73280000 assumed T max      56499.780  " 0.014 K1         100.000  assumed U0 [i] : 1 33.08  " 1.13  f(m) = 0.5938 a = 11.33 </pre>
--	--

Obrázek 2.18: Individuální řešení - čára 1 (He I 4471) a čára 2 (He I 4388)

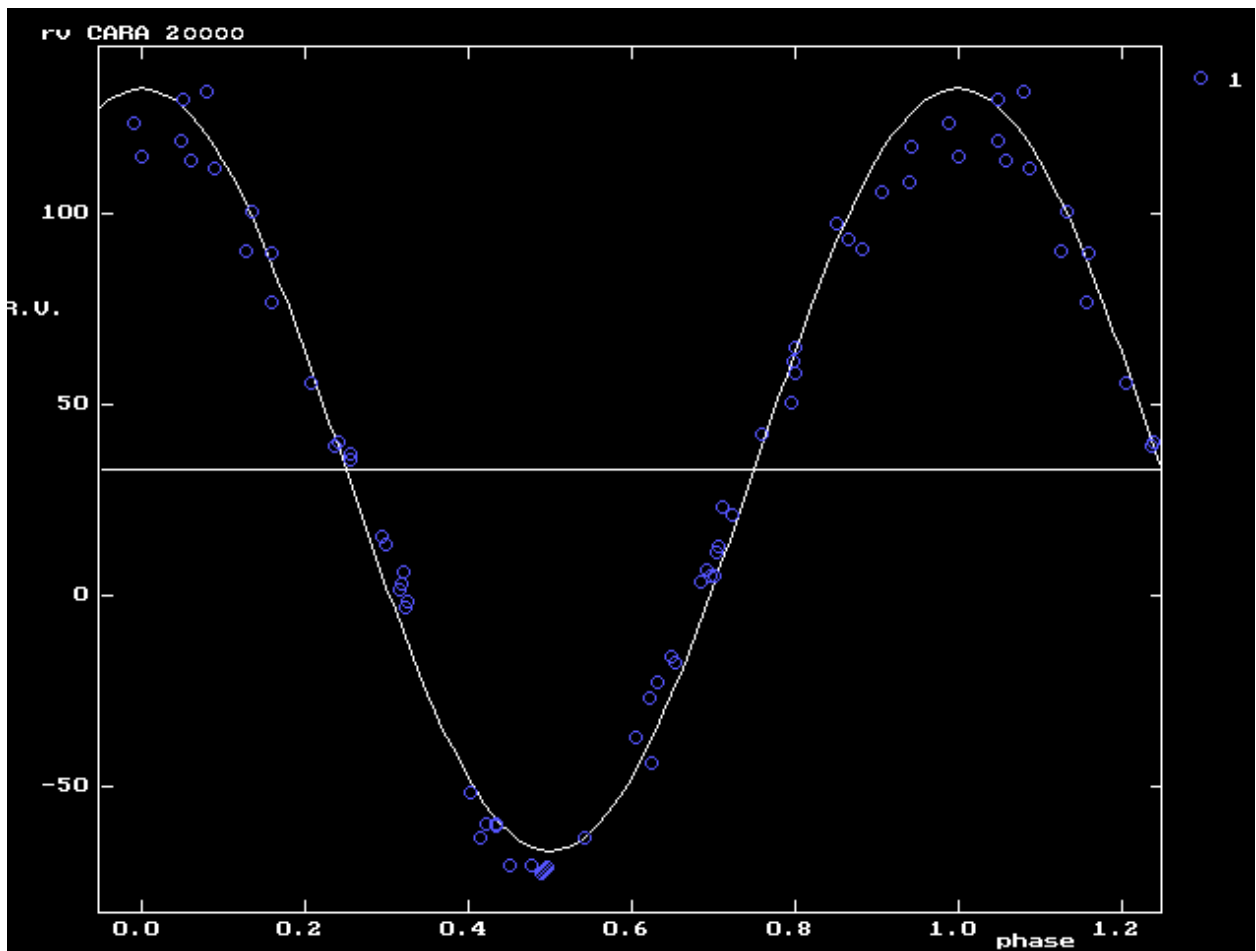


rv CARA 30000				rv CARA 40000			
rms error of one measurement :	12.866			rms error of one measurement :	7.681		
Period	5.73280000	assumed		Period	5.73280000	assumed	
T max	56499.782		0.021	T max	56499.778		0.012
K1	100.000	assumed		K1	100.000	assumed	
U0	[i] : 1	16.49	" 1.69	U0	[i] : 1	21.93	" 1.01
f(m) =	0.5938			f(m) =	0.5938		
a =	11.33			a =	11.33		

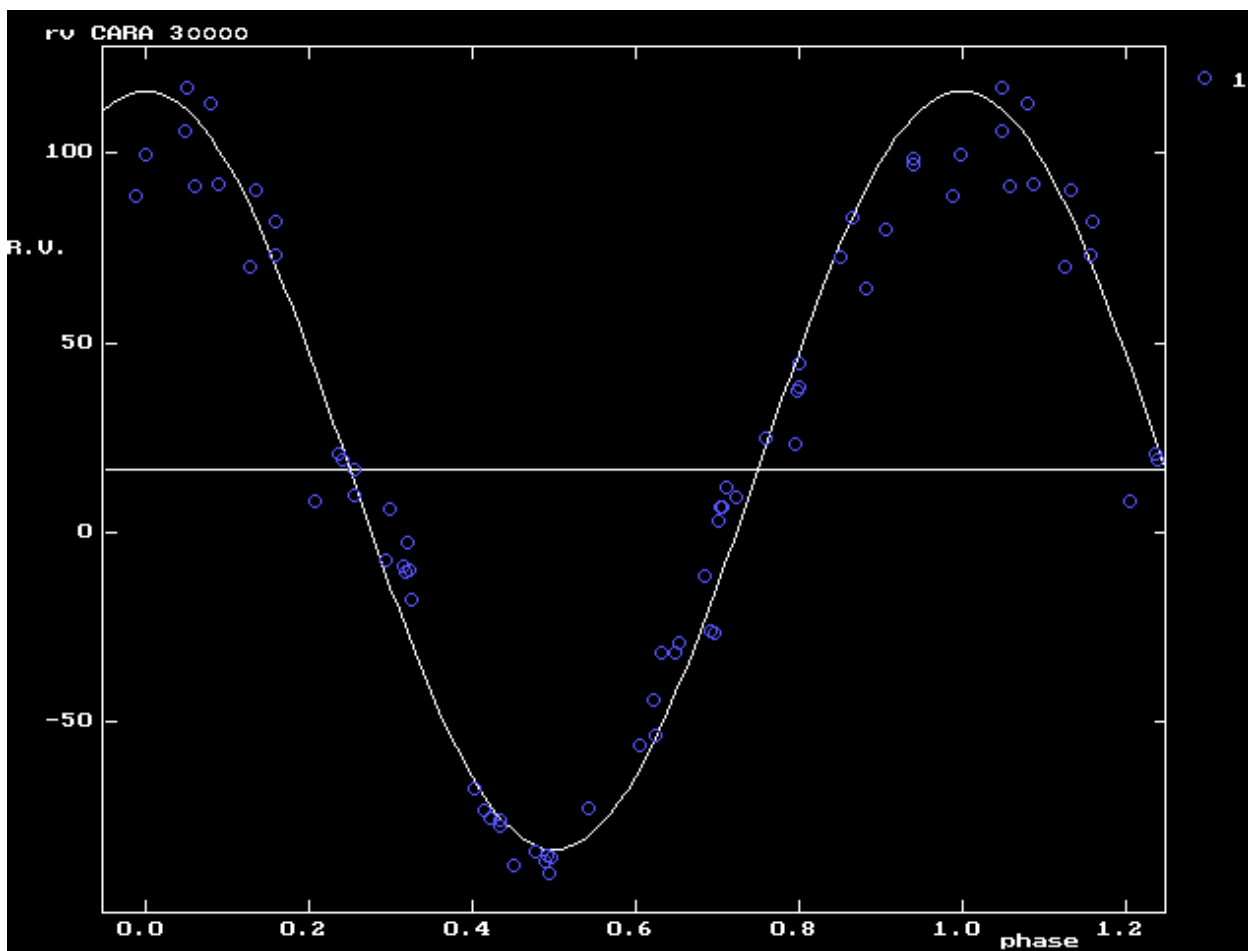
Obrázek 2.19: Individuální řešení - čára 3 (Mg II 4481) a čára 4 (H gama)



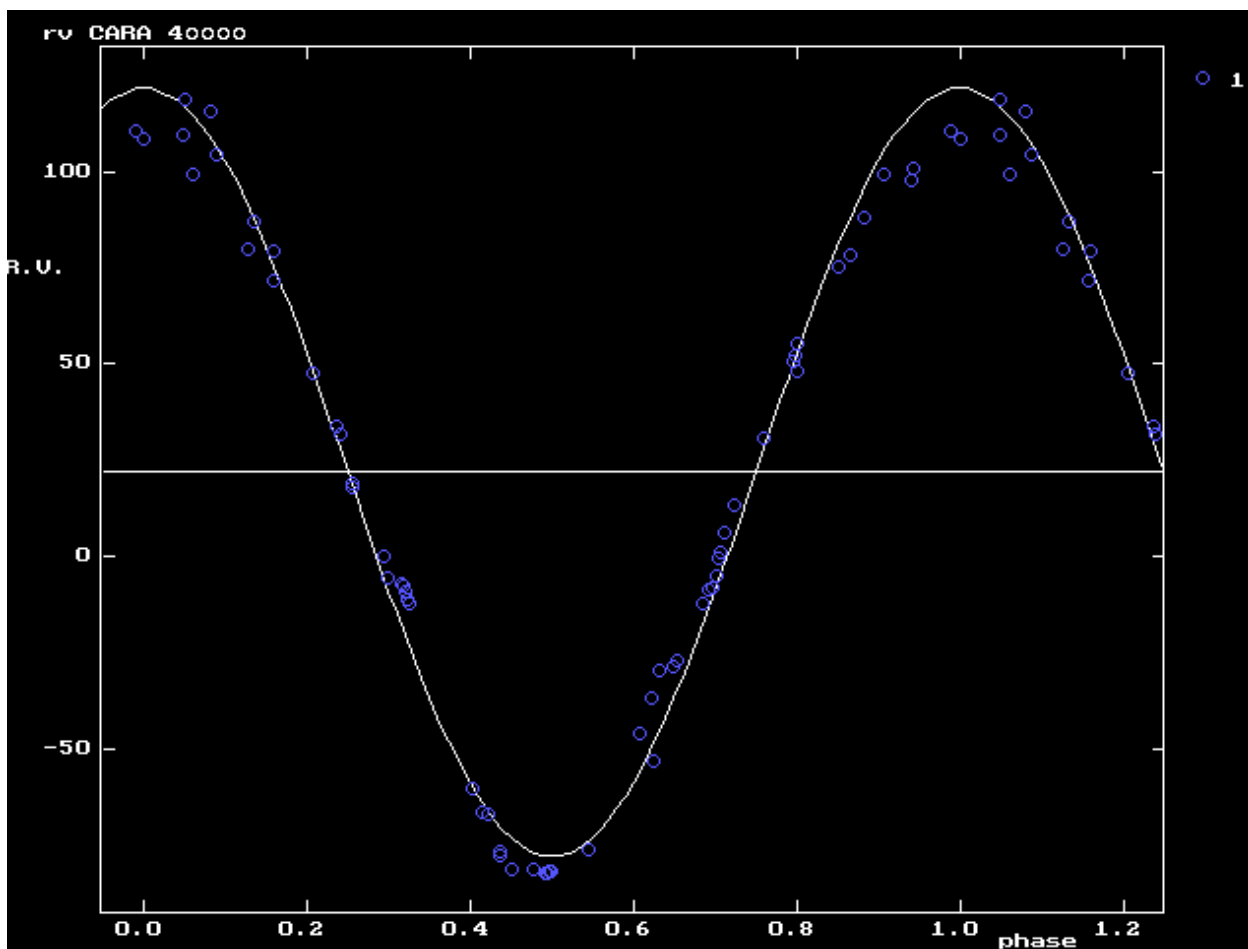
Obrázek 2.20: Individuální řešení - čára 1 (He I 4471) graf



Obrázek 2.21: Individuální řešení - čára 2 (He I 4388) graf



Obrázek 2.22: Individuální řešení - čára 3 (Mg II 4481) graf



Obrázek 2.23: Individuální řešení - čára 4 (H gama) graf

```

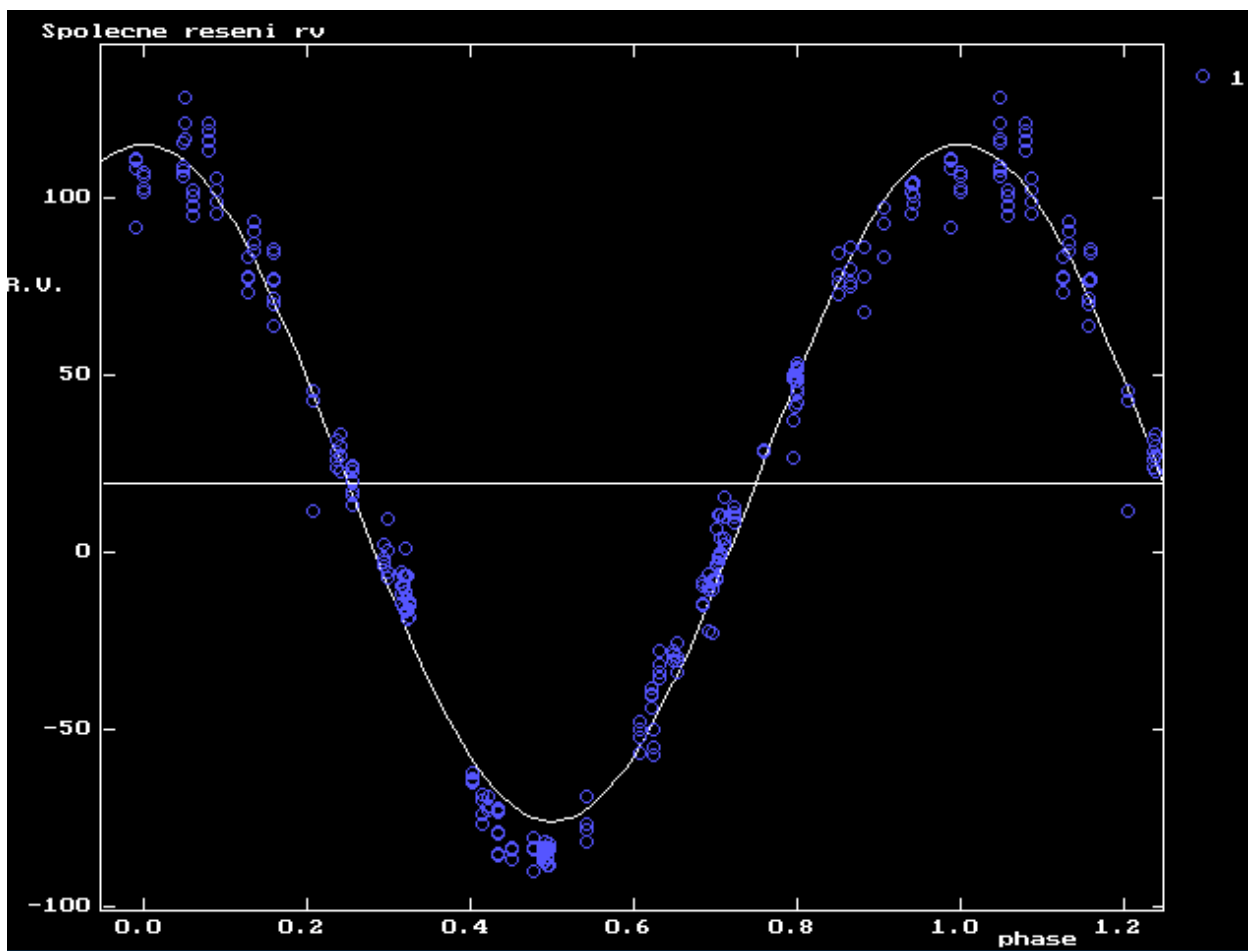
Spolecne reseni rv
rms error of one measurement : 8.971
Period      5.73280000  assumed
T max      56499.7797  "      0.0076
K1          95.62     "      0.87

U0   [i] : 1      19.62  "      1.17
        2      32.71  "      1.17
        3      16.11  "      1.17
        4      21.56  "      1.17

f(m) = 0.5191
a     = 10.83

```

Obrázek 2.24: Společné řešení



Obrázek 2.25: Společné řešení - graf

## 3. Rozmotávání spekter

Oddělení spekter individuálních složek (spectra disentangling) vede k získání dráhových elementů soustavy. Simon & Sturm (1994) poprvé navrhli matematické oddělení primáru a sekundáru. Hadrava (1995) navrhl metodu oddělení spekter až pětinasobné soustavy hvězd ve Fourierově prostoru, což umožnilo výrazné zrychlení výpočtu. Hadrava (1997) svůj postup ještě vylepšil možností uvažovat změnu relativní intenzity spekter jednotlivých složek i spekter - u zákrytových hvězd se toto děje při zákrytech. Metodu zrealizoval výpočetním programem KOREL. Uživatelé mohou tento program používat v nejnovější verzi po přihlášení do virtuální observatoře VO KOREL<sup>4</sup>.

### 3.1 Program KOREL

Program KOREL je napsaný ve FORTRANU 77. Dokáže modelovat hierarchickou soustavu až 5 hvězd - složky 1 a 2 obíhají kolem sebe, stejně jako složky 3 a 4, ještě se v soustavě může nacházet složka 5. Oběžná dráha složek 1 a 2 je označena jako 0, oběžnou dráhu složek 3 a 4 nazýváme 1. Vzájemná oběžná dráha je označena číslem 2 a pátá složka obíhá po oběžné dráze 3 (viz obrázek 3.1). Dráhu 3 lze využít k separaci telurických čar v těch oblastech spektra, kde jsou přítomny. V heliocentrické škále se budou pohybovat až od  $\pm 30$  km/s (rychlost obíhání Země kolem Slunce).  $K_1$  se předepíše jako velmi malá amplituda.

Program funguje na principu minimalizace sumy čtverců. V ní se však vyskytují i nelineární členy a KOREL k minimalizaci používá metodu simplexu publikovanou Kallrathem a Linnellem z roku 1987. Ta v prostoru parametrů spočte sumu čtverců ve třech různých bodech a poté se čtyřmi různými operacemi snaží nahradit bod s nejhorší sumou čtverců jiným bodem. Čtyři operace, jež program využívá, jsou (Hadrava 2004):

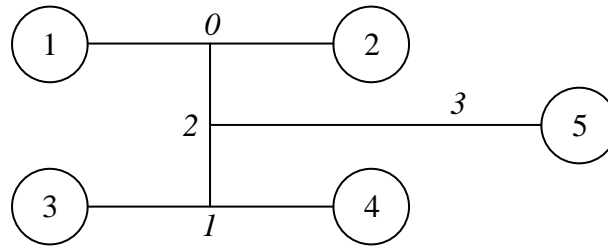
- *Zrcadlení (A)* - nový bod je zvolen na stejné straně vůči spojnici dvou bodů s lepší sumou čtverců, a to ve stejné vzdálenosti od ní, než původní bod.
- *Dělení (B)* - nový bod je zvolen na stejné straně vůči spojnici dvou bodů s lepší sumou čtverců, a to v poloviční vzdálenosti od ní, než původní bod.
- *Násobení (C)* - nový bod je zvolen na stejné straně vůči spojnici dvou bodů s lepší sumou čtverců, a to v dvojnásobné vzdálenosti od ní, než původní bod.
- *Stažení (D)* - dojde k přiblížení dvou bodů s horší sumou na polovinu původní vzdálenosti k bodu s nejmenší sumou čtverců odchylek.

### 3.2 Vstupní soubory pro KOREL

Vstupními soubory pro program KOREL jsou `korel.dat` a řídicí soubor `korel.par`.

---

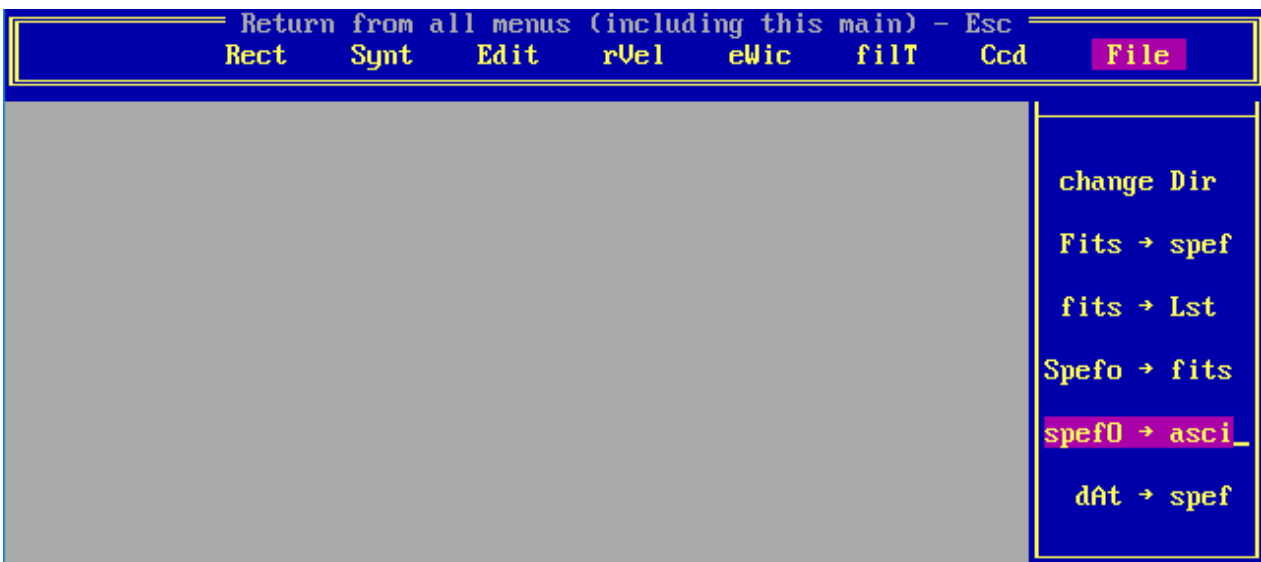
<sup>4</sup><http://stelweb.asu.cas.cz/vo-korel>



Obrázek 3.1: Hierarchická soustava 5 hvězd modelovaná KORELEM (viz Hadrava 1995)

### 3.2.1 Soubor korel.dat

Soubor `korel.dat` jsem připravila pomocí programu HEC 35D<sup>5</sup> (Harmanec 2008). Vstupním souborem tohoto programu je `prekor.LST` (viz soubor 5). První sloupec obsahuje jména 61 ASCII souborů s rektifikovanými spektry, druhý je čas, následuje váha - nejprve nastavena na 1,0, další sloupec obsahující nulu říká, že se používají ASCII soubory a poslední sloupec obsahuje korekci radiálních rychlostí. ASCII soubory jsem získala s využitím programu SPEFO (viz obr. 3.2).



Obrázek 3.2: Vytvoření souborů .ASC

Soubor 5: Soubor <code>prekor.LST</code>				
<code>dor42001.asc</code>	55836.5692	1.000	0	.0
<code>dor42002.asc</code>	55836.5827	1.000	0	.0
<code>dor42003.asc</code>	55836.5963	1.000	0	.0
<code>dor42004.asc</code>	55836.6137	1.000	0	.0
<code>dor42005.asc</code>	55836.6287	1.000	0	.0
<code>dor42006.asc</code>	55836.6434	1.000	0	.0
<code>dor42007.asc</code>	55837.5877	1.000	0	.0
<code>dor42008.asc</code>	55837.6016	1.000	0	.0
<code>dor42009.asc</code>	55837.6152	1.000	0	.0

<sup>5</sup><http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/HEC35/>

dor42010.asc	55837.6294	1.000	0	.0
dor42011.asc	55871.5969	1.000	0	.0
dor42012.asc	55893.4601	1.000	0	.0
dor42013.asc	55893.4820	1.000	0	.0
dor42014.asc	55953.4009	1.000	0	.0
dor42015.asc	55953.4226	1.000	0	.0
dor42016.asc	55953.4508	1.000	0	.0
dor42017.asc	55953.4692	1.000	0	.0
dor42018.asc	55953.4871	1.000	0	.0
dor42019.asc	55956.3498	1.000	0	.0
dor42020.asc	55959.2469	1.000	0	.0
dor42021.asc	55977.3276	1.000	0	.0
dor42022.asc	55990.3318	1.000	0	.0
dor42023.asc	55991.2779	1.000	0	.0
dor42024.asc	55992.2949	1.000	0	.0
dor42025.asc	56003.3328	1.000	0	.0
dor42026.asc	56011.3498	1.000	0	.0
dor42027.asc	56167.6213	1.000	0	.0
dor42028.asc	56241.4709	1.000	0	.0
dor42029.asc	56257.4224	1.000	0	.0
dor42030.asc	56257.6273	1.000	0	.0
dor42031.asc	56330.3789	1.000	0	.0
dor42032.asc	56354.3038	1.000	0	.0
dor42033.asc	56357.3761	1.000	0	.0
DOR42034.asc	56596.5631	1.000	0	.0
DOR42035.asc	56608.6423	1.000	0	.0
DOR42036.asc	56609.4312	1.000	0	.0
DOR42037.asc	56621.6375	1.000	0	.0
DOR42038.asc	56629.6451	1.000	0	.0
DOR42039.asc	56642.5644	1.000	0	.0
DOR42040.asc	56643.3817	1.000	0	.0
DOR42041.asc	56643.6078	1.000	0	.0
DOR42042.asc	56666.3166	1.000	0	.0
DOR42043.asc	56666.4940	1.000	0	.0
DOR42044.asc	56704.3508	1.000	0	.0
DOR42045.asc	56714.2672	1.000	0	.0
DOR42046.asc	56719.3096	1.000	0	.0
DOR42047.asc	56721.3496	1.000	0	.0
DOR42048.asc	56737.3202	1.000	0	.0
DOR42049.asc	56737.3202	1.000	0	.0
DOR42050.asc	56738.3020	1.000	0	.0
DOR42051.asc	56746.2894	1.000	0	.0
DOR42052.asc	56928.5832	1.000	0	.0
DOR42053.asc	57105.2900	1.000	0	.0
DOR42054.asc	57106.2877	1.000	0	.0
DOR42055.asc	57106.3182	1.000	0	.0
DOR42056.asc	57116.3066	1.000	0	.0
DOR42057.asc	57128.2762	1.000	0	.0
DOR42058.asc	57297.5482	1.000	0	.0
DOR42059.asc	57364.5793	1.000	0	.0



DOR42060.asc	57445.3477	1.000	0	.0
DOR42061.asc	57464.3540	1.000	0	.0

Výsledné řešení s programem KOREL je více stabilní, pokud váhy volíme úměrné druhé mocnině poměru  $S/N$  - poměr signál (signal) a šum (noise). K tomuto účelu existují programy SN2.FOR, který odhadne poměr  $S/N$ , a program SNVAHY, který využije výstupní soubor z programu SN2 k určení relativních vah spekter a vytvoří výstupní soubor identický se souborem `prekor.LST` se změněnými vahami.

## Program SN2

Pro použití programu SN2 je nutné, aby si uživatel prohlédl spektra a určil interval vlnové délky, na kterém je ve spektru kontinuum (část bez spektrálních čar) - takový interval je vhodný pro odhad poměru  $S/N$ . Program se ptá na vstupní soubor (`prekor.LST`), na název výstupního souboru a na hranice vybraného intervalu (obr. 3.3). Program vypočítá poměr  $S/N$  dle vztahu

$$S/N = \frac{\sum S}{\sqrt{\frac{\sum S^2 - \frac{(\sum S)^2}{m}}{m-1}}}, \quad (3.1)$$

což je poměr průměrného signálu (hodnota blízká 1,0) a chyby tohoto průměru.  $m$  je počet pixelů ve zvoleném intervalu. Výstupní soubor obsahuje časy v prvním sloupci,  $S/N$  v druhém, průměrnou hodnotu signálu, její chybu a v posledním sloupečku jsou názvy souborů se spektry.

```
C:\HEC_35D>sn2.exe
Input file with filenames and HJDs?
prekor.lst
Output file with HJDs and S/N ratios?
snratio
Define the minimum and maximum continuum wavelength
4393,4412
```

Obrázek 3.3: Program SN2

## Program SNVAHY

Program SNVAHY se přeložil pomocí gfortranu poté, co jsem do terminálu napsala příkaz `dos2unix snvahy.for`, který konvertuje soubor `snvahy.for` do unixového formátu. Příkazem `f95 snvahy.for` se vytvořil soubor `a.out`. Dále jsem postupovala podle obrázku 3.4. Výstupní soubor `prekor_result` jsem poté přejmenovala na soubor `prekor.LST`, který ve třetím sloupci nemá hodnoty 1,0, ale poměry  $S/N$  (viz soubor 6).

```
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ gfortran snvahy.for
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ ./a.out
Input file with HJDs, S/N etc. from SN2 program?
snratio
Output PREKOR.LST file?
prekor_result
```

Obrázek 3.4: Program snvahy v terminálu

**Soubor 6: Soubor prekor.LST s váhou  $S/N$** 

dor42001.asc	55836.5692	1.149	0	0.0
dor42002.asc	55836.5827	1.494	0	0.0
dor42003.asc	55836.5963	0.980	0	0.0
dor42004.asc	55836.6137	1.175	0	0.0
dor42005.asc	55836.6287	1.158	0	0.0
dor42006.asc	55836.6434	1.341	0	0.0
dor42007.asc	55837.5877	0.953	0	0.0
dor42008.asc	55837.6016	1.190	0	0.0
dor42009.asc	55837.6152	1.124	0	0.0
dor42010.asc	55837.6294	1.167	0	0.0
dor42011.asc	55871.5969	0.978	0	0.0
dor42012.asc	55893.4601	1.065	0	0.0
dor42013.asc	55893.4820	1.058	0	0.0
dor42014.asc	55953.4009	1.050	0	0.0
dor42015.asc	55953.4226	1.233	0	0.0
dor42016.asc	55953.4508	1.299	0	0.0
dor42017.asc	55953.4692	1.318	0	0.0
dor42018.asc	55953.4871	0.971	0	0.0
dor42019.asc	55956.3498	1.099	0	0.0
dor42020.asc	55959.2469	1.103	0	0.0
dor42021.asc	55977.3276	0.906	0	0.0
dor42022.asc	55990.3318	0.886	0	0.0
dor42023.asc	55991.2779	1.382	0	0.0
dor42024.asc	55992.2949	0.824	0	0.0
dor42025.asc	56003.3328	0.724	0	0.0
dor42026.asc	56011.3498	0.418	0	0.0
dor42027.asc	56167.6213	0.498	0	0.0
dor42028.asc	56241.4709	0.826	0	0.0
dor42029.asc	56257.4224	1.001	0	0.0
dor42030.asc	56257.6273	1.076	0	0.0
dor42031.asc	56330.3789	1.251	0	0.0
dor42032.asc	56354.3038	1.210	0	0.0
dor42033.asc	56357.3761	0.603	0	0.0
DOR42034.asc	56596.5631	0.936	0	0.0
DOR42035.asc	56608.6423	0.680	0	0.0
DOR42036.asc	56609.4312	0.575	0	0.0
DOR42037.asc	56621.6375	1.448	0	0.0
DOR42038.asc	56629.6451	1.120	0	0.0
DOR42039.asc	56642.5644	1.156	0	0.0
DOR42040.asc	56643.3817	0.993	0	0.0
DOR42041.asc	56643.6078	1.259	0	0.0
DOR42042.asc	56666.3166	0.807	0	0.0
DOR42043.asc	56666.4940	1.171	0	0.0
DOR42044.asc	56704.3508	1.625	0	0.0
DOR42045.asc	56714.2672	1.409	0	0.0
DOR42046.asc	56719.3096	1.203	0	0.0
DOR42047.asc	56721.3496	1.365	0	0.0
DOR42048.asc	56737.3202	1.063	0	0.0

DOR42049.asc	56737.3202	0.706	0	0.0
DOR42050.asc	56738.3020	0.703	0	0.0
DOR42051.asc	56746.2894	0.828	0	0.0
DOR42052.asc	56928.5832	1.022	0	0.0
DOR42053.asc	57105.2900	0.877	0	0.0
DOR42054.asc	57106.2877	0.291	0	0.0
DOR42055.asc	57106.3182	0.578	0	0.0
DOR42056.asc	57116.3066	0.505	0	0.0
DOR42057.asc	57128.2762	0.519	0	0.0
DOR42058.asc	57297.5482	0.731	0	0.0
DOR42059.asc	57364.5793	1.003	0	0.0
DOR42060.asc	57445.3477	0.990	0	0.0
DOR42061.asc	57464.3540	0.926	0	0.0

## Program HEC35D

Vstupním souborem programu HEC35D je `prekor.LST`. Kompilaci jsem provedla příkazy:  
`chmod 755 *`  
`dos2unix.`

Příkazem `gfortran -o hec35d hec35d.for` se vytvoří spustitelný program `hec35d`. Dále jsem program spustila dle obrázku 3.5 a odpověděla na tři otázky. Krok byl nejprve zvolen jako 1 a následně seřízen (podrobněji viz kapitola 3.3). Výstupní soubor je vždy nazván `korel.dat` - jeden ze vstupních souborů programu KOREL. Tento soubor obsahuje data v osmi sloupcích a první řádek tvoří pět čísel, např. krok v radiální rychlosti nebo počet pixelů, který je vždy celým násobkem 512 - v tomto případě je počet pixelů 16384 ( $32 \cdot 512$ ).

```
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ ./hec35d
HEC35D rel.3   February 11, 2008/
Create also korel.asc output with lambda & rel. flux?
      NO = 0          YES = 1
0
Do you want to eliminate some wavelength intervals?
The program will replace the measured flux by 1.000?
      NO = 0          YES = 1
0
First and last wavelength and step in RV?
4281,4503,1.01
STOP 7
```

Obrázek 3.5: Program HEC35D v terminálu

### 3.2.2 Soubor `korel.par`

Soubor `korel.par` obsahuje parametry zkoumaného systému, co se nechá konvergovat a co je fixované, nastavuje se v něm, kde jsou vstupní data, jaké se požadují výstupní soubory, apod. Lze jej napsat v libovolném textovém editoru.

## Kontrolní klíč

První řádek souboru `korel.par` tvoří kontrolní klíč, všechny parametry mohou nabývat pouze celá čísla (Hadrava 2004):

$$KEY(j)|_{j=1}^5, K0, IFIL, KR, KPR, rv, \quad (3.2)$$

kde  $j$  reprezentuje komponentu systému (1 až 5).  $KEY(j)$  zahrnuje prvních 5 pozic v prvním řádku a určuje, které komponenty se ve spektru nacházejí. Její hodnota se počítá následovně (Hadrava 2004):

$$KEY(j) = 10 \cdot K_1 + K_0. \quad (3.3)$$

Parametr  $K_0$  může nabývat hodnotu 1, pokud je intenzita čar komponenty  $j$  konstantní, nebo 2, jestliže se intenzita čar komponenty  $j$  mění a je počítána programem. Hodnota  $K_1$  je 0, pokud je radiální rychlost komponenty  $j$  závislá na fázi systému. V případě, že  $K_1 = 1$ , radiální rychlosti jsou volné parametry.

Dalším parametrem v souboru `korel.par` je  $K0$ , který říká, s jakými daty bude KOREL pracovat:

- $K0 > 0$  - data budou načtena ze souboru `korel.dat`,
- $K0 = 0$  - program použije na výpočty předchozí data,
- $K0 < 0$  - spektrum bude simulováno.

Hodnota  $IFIL$  udává filtr, který odstraňuje příslušné harmonické módy. Další parametr  $KR$  určuje typ grafického výstupu `phg.out`:

- $KR = 0$  - grafický výstup `phg.out` se nevytvoří,
- $KR = 1$  - výstup bude ve formátu PCX (rastrová grafika),
- $KR = 2$  - výstup bude ve formátu PostScript.

Předposlední parametr  $KPR$  určuje, jaký bude textový výstup z výpočtu, jeho hodnota je určena vztahem (Hadrava 2004)

$$KPR = 10 \cdot KPR_1 + KPR_0 \quad (3.4)$$

a význam je:

- $KPR_0 > 0$  - výsledek konvergence parametrů je zapsán do souboru `korel.res`,
- $KPR_1 > 0$  - bude vytvořen soubor `korel.0-C`, kde bude zapsán rozdíl  $O - C$  v závislosti na vlnové délce komponenty  $KPR_1$ . Pokud uživatel vyžaduje původní vlnovou délku, zvolí komponentu  $KPR_1$  větší než 5. Pro  $KPR = 70$  bude soubor `.o-c` v referenční soustavě těžiště.

Poslední parametr  $rv$  potlačí tisk radiálních rychlostí, pokud je  $rv \neq 0$ , takže se výpočet zrychlí.

## Parametry systému

Další řádky popisující parametry systému a jejich očekávané hodnoty mají následující strukturu (Hadrava 2004):

$$n, Kc, L1, L2, EL(n), \Delta(n), \quad (3.5)$$

kde  $n$  představuje tři symboly. První znak může být  $o, s, w$  nebo  $e$  a udává význam následujících symbolů  $i, j$ .

V souboru `korel.par` jsem použila symbol  $o$ , který značí objekt. Další znak  $i$  udává číslo dráhy dle obrázku 3.1 a následuje  $j$  určující orbitu dle tabulky 3.1. Čtvrté číslo  $Kc > 0$ , pokud veličina  $j$  konverguje, a  $Kc = 0$ , pokud je veličina  $j$  konstantní. Hodnota  $L1$  (resp.  $L2$ ) se volí 0, pokud není žádoucí, aby se načel počáteční odhad veličiny  $EL(j, i)$  (resp. krok iterace  $delta(j, i)$ ). Příklad `korel.par` je ukázán v souboru 7.

Číslo parametru	Veličina a jednotky	Význam
1	$P$ [dny]	perioda
2	$t_0$ [dny]	průchod periastrum
3	$e$ []	excentricita
4	$\omega$ [°]	délka periastra
5	$K$ [km/s]	K-rychlost
6	$q$ []	poměr hmotností ( $m_2/m_1$ )
7	$\omega$ [°/den]	časová změna periastra
8	$P$ [dny]	časová změna periody

Tabulka 3.1: Parametry v KORELU

### Soubor 7: Příklad souboru `korel.par` (počáteční parametry nastaveny dle článku (Nichols et al. 2015))

```

1 0 1 0 0 1 0 2 70 1
o 0 1 0 1 1 5.732821 0.46744E-05 | PERIOD
o 0 2 1 1 1 54002.7775 0.7 | PERIASTRON EPOCH
o 0 3 0 1 1 0.0883 -0.010 | EXCENTRICITY
o 0 4 0 1 1 149.1 2.5 | PERIASTRON LONG.
o 0 5 0 1 1 108.2 0.5 | K1
o 0 6 0 1 1 0.5 -0.04 | q=M2/M1
o 0 7 0 1 1 0.00422 0.000057 | d omega/dt
o 2 1 0 1 1 73413. 0.0001
o 2 2 0 1 1 36097.18 105.0
o 2 3 0 1 1 0.56 0.01
o 2 4 0 1 1 236.0 10.0
o 2 5 0 1 1 7.5 2.0
o 2 6 0 1 1 0.48 0.25
o 3 1 0 1 1 365.256360000 0.1
o 3 2 0 1 1 51547.520600000 10.0
o 3 3 0 1 1 0.016710220 0.001
o 3 4 0 1 1 291.249055189 10.0
o 3 5 0 1 1 0.001000000 0.0001
o 3 6 0 1 1 0.000036626 0.000001

```

```
o 3 7 0 1 1 0.000009111 0.00000001
x 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 | end of elements
```

## Veličiny popisující pohyb hvězdy

Do souboru `korel.par` je třeba zadat hodnoty následujících veličin:

- **Perioda** (PERIOD) - jak dlouho trvá jedno opakování děje neboli za jak dlouho se systém dostane opět do výchozího stavu. V astronomii se pro periodu  $P$  používá jednotka den d.
- **Průchod periastrém** (PERIASTRON EPOCH) - okamžik v čase, kdy hvězda projde periastrém. Označuje se veličinou  $T$  a udává se v Juliánských datech.
- **Excentricita dráhy** (ECCENTRICITY) - výstřednost, bezrozměrné číslo  $e$ , které říká, jak mnoho se liší orbita od kruhové dráhy.
- **Argument šířky pericentra** (PERIASTRON LONG.) - úhel  $\omega$  ve stupních mezi spojnicí ohniska s periastrém a uzlovou přímkou.
- **Rychlost  $K$**  ( $K_1$ ) - rychlost  $K$  udávaná v jednotce km/s souvisí dle Keplerových rovnic s hlavní poloosou eliptické dráhy  $a$ , inklinací  $i$ , periodou  $P$  a excentricitou  $e$  dle vztahu

$$K = \frac{2\pi a \sin i}{P\sqrt{1-e^2}}. \quad (3.6)$$

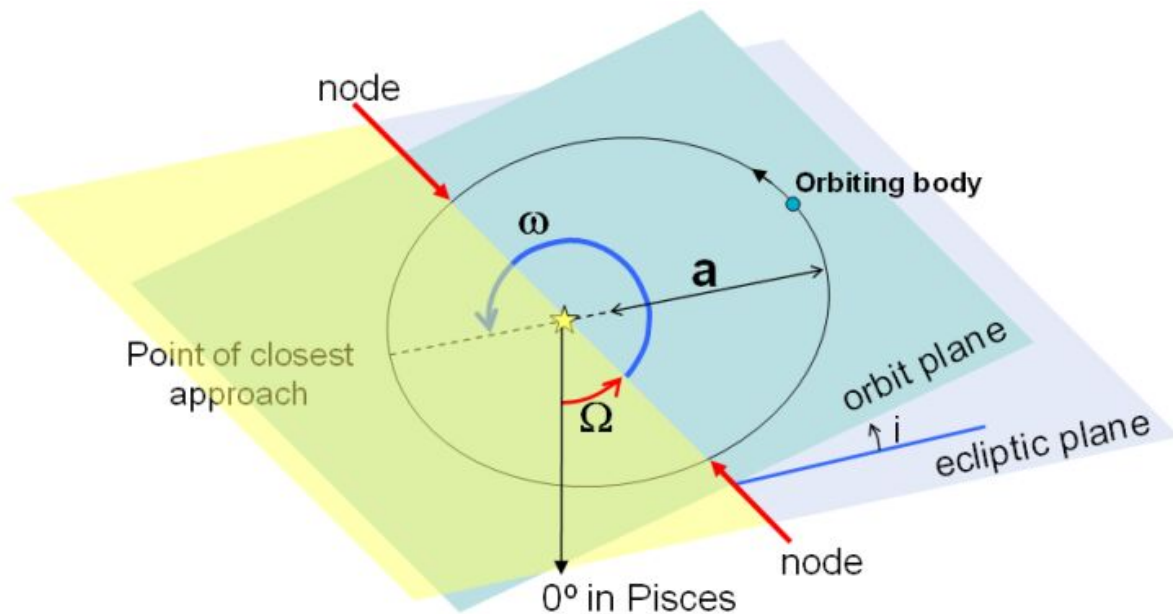
Rychlost  $K$  je různá pro různé složky systému, jelikož závisí na hlavní poloose  $a$ , která se pro různé složky liší.

- **Poměr hmotností** ( $M_2/M_1$ ) - poměr hmotností  $q$  je definovaný vztahem

$$q = \frac{M_2}{M_1}, \quad (3.7)$$

kde  $M_2 < M_1$ .

- **Korekce** ( $K_2$ ) - Korekce  $K_2$  je získaná z měření radiálních rychlostí.



Obrázek 3.6: Dráhové elementy (Germany et al. 2012)

### 3.3 Spuštění programu KOREL

Ke spuštění programu KOREL jsem potřebovala soubory `korel.f` a `korelpar.f`, který nastavuje pixely KORELU. Spustitelný program `run` jsem vytvořila následujícími příkazy:

```
gfortran -o korel korel.f
gfortran -o korelph korel.f
chmod 755 *
dos2unix *
vi korel.par
```

a příkazem `./run` se KOREL spustí. Po spuštění programu je zobrazován průběh konvergence a tyto operace jsou označovány písmeny A až D (viz obr. 3.7). Výstupní soubory se nastavují vstupním souborem `korel.par` viz kapitola 3.2.2. Pro mě byl důležitý výstupní soubor `korel.res` (záznam o řešení programu KOREL) a `graf.pdf` (grafické znázornění řešení).

Dalším krokem bylo seřadit výstupní graf tak, aby bylo na koncích grafu přibližně stejně angstrémů kontinua. Tím, že bude řešení uprostřed grafu, se zaručí přesnější řešení. Graf se vyrovnává změnou kroků v radiální rychlosti při vytváření souboru `korel.dat` pomocí programu HEC35D. Nejlepší krok v radiální rychlosti vyšel 1,01.

```

Linux@Linux-VirtualBox ~ $ ./run
KOREL - release 2.12.04      (c) P. Hadrava
(28.01.2007 output of spectra format modified)
(10.10.2008 format of period and "s" lines enlarged)
Length of spectrum=      16384
chpt 1    0.0000000000000000
End of input: 61 spectra of 1 stars in 1 regions.  1 elements to be converged.
filtered   0 harmonics, plot mode= 2, print mode= 0

  1 B 2 0.14270E+08 0.54004E+05
  2 B 2 0.14243E+08 0.54003E+05
  3 B 2 0.14097E+08 0.54003E+05
  4 B 2 0.14089E+08 0.54003E+05
  5 B 2 0.14087E+08 0.54003E+05
  6 B 2 0.14087E+08 0.54003E+05
  7 B 2 0.14086E+08 0.54003E+05
  8 D 1 0.14085E+08 0.54003E+05
  9 B 1 0.14085E+08 0.54003E+05
 10 D 1 0.14085E+08 0.54003E+05
 11   1 0.14085E+08 0.35467E-04
 11   2 0.14084E+08 0.54003E+05
14084357.414689951      14084357.414689951      3.7540252673720929

```

Obrázek 3.7: Program KOREL

### 3.4 Hledání sekundární složky programem KOREL

Problémem při hledání sekundární složky  $\delta$  Ori jsou silné spektrální čáry primární a třetí složky. Příspěvek sekundární složky v sumě čtverců by tak byl nerozeznatelný od šumu, jelikož sekundární složka je velmi slabá. Při jejím hledání jsem tedy zafixovala orbitální řešení první a třetí složky. Program KOREL dovoluje získ zbytkového spektra systému, které je velmi malé, proto je k němu nutné přidat jedničku a použít KOREL znovu, čímž se rozmotá spektrum třetí složky.

Hledání sekundární složky delta Ori tedy probíhalo tak, že jsem nejprve nastavila v souboru `korel.par` řešení pro první a třetí složku. Prvních pět parametrů prvního řádku tedy bylo 1 0 1 0 0. KOREL rozložil spektrum na primární a třetí složku. Cílem bylo zlepšit pomocí konvergence počáteční parametry. Provedla jsem dvě iterace v parametru 2 (průchod periastrum  $T$ ), 4 (délka periastra  $\omega$ ) a 5 (K-rychlost  $K$ ). Parametry, které vyšly z konvergence programem KOREL jsou uvedeny v souboru 8 a grafické řešení je zobrazeno na obrázku 3.8.

#### Soubor 8: Výsledné parametry souboru `korel.par`

```

o 0 1 0 1 1      5.732821000      0.000 = PERIOD(0)
o 0 2 0 1 1 54002.813760848      0.000 = PERIASTRON EPOCH
o 0 3 0 1 1      0.088300000      -0.010 = ECCENTRICITY
o 0 4 0 1 1 150.503940056      2.500 = PERIASTRON LONG.
o 0 5 0 1 1 108.416980920      0.500 = K1
o 0 6 0 1 1      0.390000000      -0.040 = q = M2/M1,  K2 = 277.992259
o 0 7 0 1 1      0.004220000      0.000 = d omega/dt
o 0 8 0 1 1      0.000000000      0.100 = d P/dt
o 0 9 0 1 1      0.000000000      0.100 = d e/dt
o 0 10 0 1 1      0.000000000      0.100 = d K1/dt
o 0 11 0 1 1      0.000000000      0.100 = d q/dt

```



```

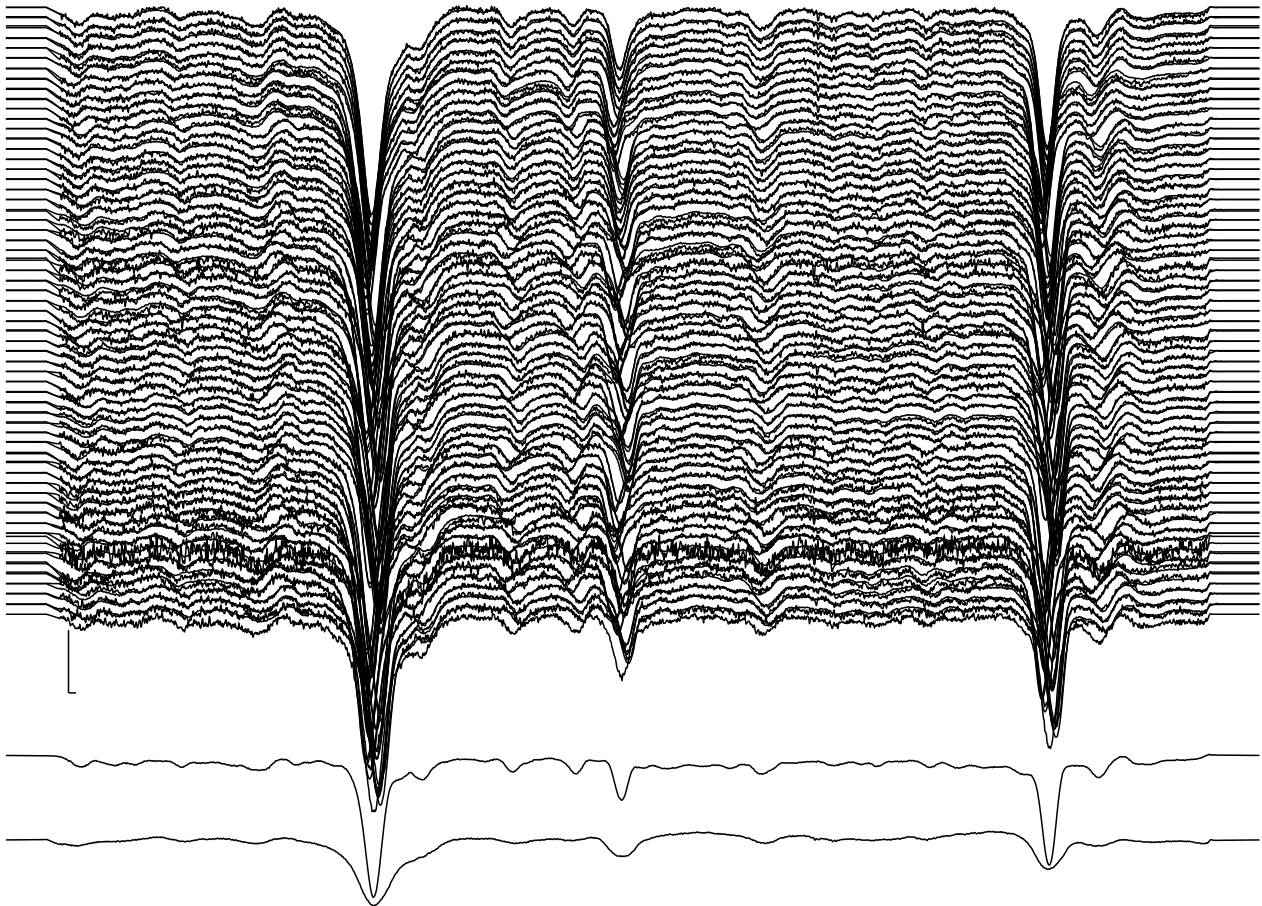
o 2 1 0 1 1 73413.000000000 0.000 = PERIOD(2)
o 2 2 0 1 1 36139.145034869 105.000 = PERIASTRON EPOCH
o 2 3 0 1 1 0.560000000 0.010 = ECCENTRICITY
o 2 4 0 1 1 231.368723333 10.000 = PERIASTRON LONG.
o 2 5 0 1 1 7.081186962 2.000 = K1
o 2 6 0 1 1 0.480000000 0.250 = q = M2/M1, K2 = 14.752473
o 2 7 0 1 1 0.000000000 5.730 = d omega/dt
o 2 8 0 1 1 0.000000000 0.100 = d P/dt
o 2 9 0 1 1 0.000000000 0.100 = d e/dt
o 2 10 0 1 1 0.000000000 0.100 = d K1/dt
o 2 11 0 1 1 0.000000000 0.100 = d q/dt

o 3 1 0 1 1 365.256360000 0.100 = PERIOD(3)
o 3 2 0 1 1 51548.049995536 10.000 = PERIASTRON EPOCH
o 3 3 0 1 1 0.016710220 0.001 = ECCENTRICITY
o 3 4 0 1 1 295.088636004 10.000 = PERIASTRON LONG.
o 3 5 0 1 1 0.001035479 0.000 = K1
o 3 6 0 1 1 0.000036626 0.000 = q = M2/M1, K2 = 28.271692
o 3 7 0 1 1 0.000009111 0.000 = d omega/dt
o 3 8 0 1 1 0.000000000 0.100 = d P/dt
o 3 9 0 1 1 0.000000000 0.100 = d e/dt
o 3 10 0 1 1 0.000000000 0.100 = d K1/dt
o 3 11 0 1 1 0.000000000 0.100 = d q/dt

```

Dále je třeba vytvořit soubor `korel.o-c`, což se nastaví v souboru `korel.par` napsáním čísla 70 na osmé místo v prvním řádku. Soubor `korel.o-c` má podobnou strukturu jako `korel.dat`, ale všechna čísla jsou blízká nule. Na přičtení jedničky ke všem číslům jsem využila program KOROC. Jako vstupní soubor slouží `korel.o-c` a výstupním souborem bude nový `korel.dat`. Spuštění programu je na obrázku 3.9.

V dalším kroku jsem použila jako vstupní soubory KORELU právě získaný `korel.dat` a `korel.par` se zpřesněnými parametry a s nastavením pro řešení sekundární složky - prvních pět čísel souboru bude 0 1 0 0 0. Všechny parametry zůstaly zafixované, měnila jsem poměr hmotností  $q$  a sledovala jsem, jak se mění suma čtverců. Získané hodnoty jsou zapsané v tabulce 3.2 a grafické znázornění zachycuje graf na obrázku 3.10. Nejmenší hodnota čtverců byla nalezena pro  $q = 0,38$ . Pro tuto hodnotu je vykresleno řešení na obrázku 3.11.



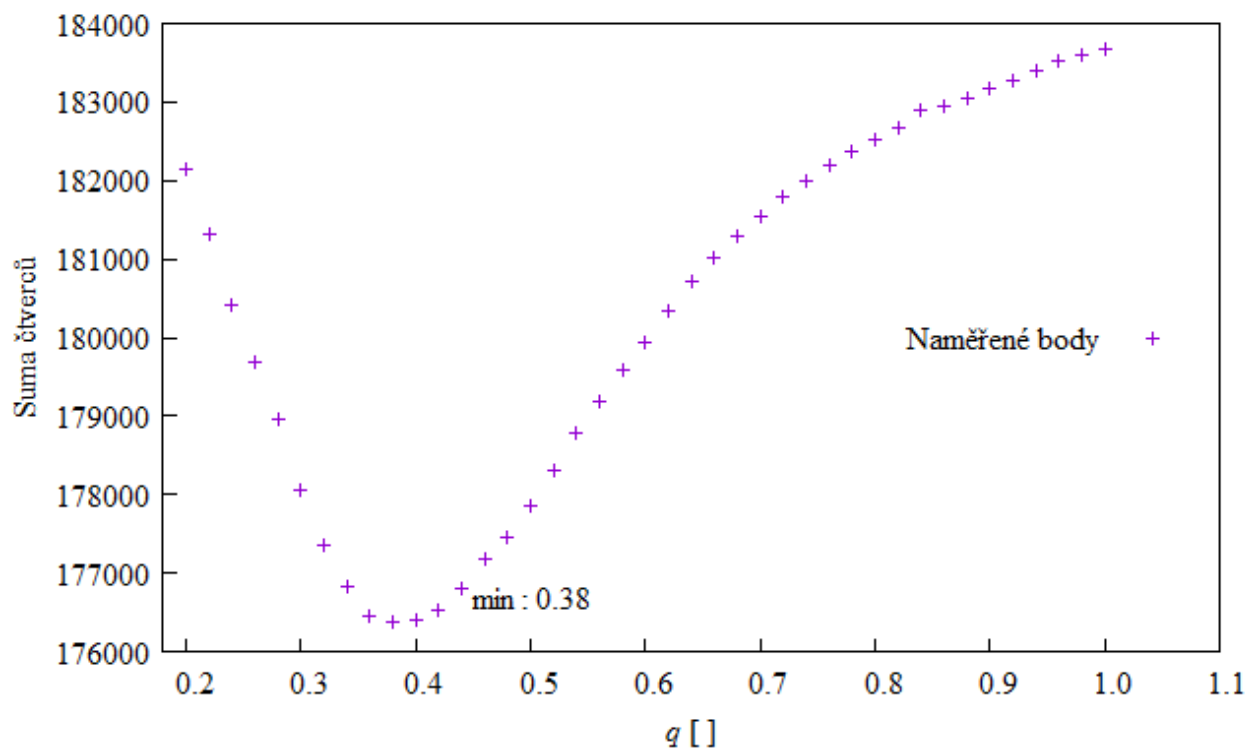
Obrázek 3.8: Grafické řešení pro první a třetí složku

```
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ dos2unix koroc.f
dos2unix: converting file koroc.f to Unix format ...
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ f95 koroc.f
Linux@Linux-VirtualBox ~ $ ./a.out
1639.4000000000001 1639
STOP 777
```

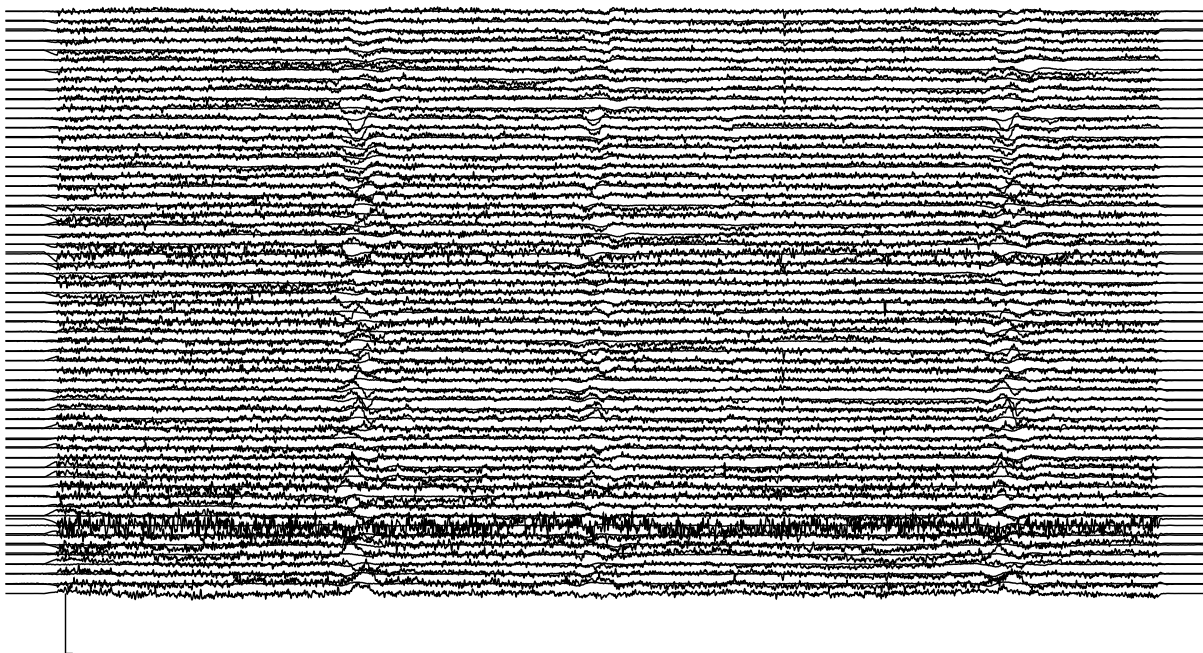
Obrázek 3.9: Program KOROC

Poměr hmotností $q$	Suma čtverců	Poměr hmotností $q$	Suma čtverců
0,10	181857,08575001534	0,56	179185,86742339630
0,12	182118,29496848161	0,58	179598,36225847207
0,14	182022,28874099065	0,60	179939,91425664729
0,16	181938,10273012464	0,62	180329,98987535323
0,18	182163,18029154875	0,64	180704,24917768163
0,20	182133,30997605924	0,66	181019,32036480287
0,22	181307,30893927286	0,68	181286,75159698355
0,24	180408,05805276838	0,70	181542,00494387897
0,26	179679,33371076014	0,72	181787,97346579403
0,28	178962,88251384906	0,74	181995,07232257075
0,30	178051,75712053294	0,76	182199,00082969872
0,32	177359,45350330143	0,78	182367,23973001653
0,34	176818,66512425954	0,80	182525,93787973266
0,36	176459,41964430228	0,82	182675,06295897439
0,38	176382,55325897469	0,84	182893,36957268053
0,40	176390,58163065667	0,86	182947,86367103102
0,42	176520,76843412526	0,88	183057,66291365985
0,44	176807,42614976224	0,90	183169,44585624782
0,46	177181,91639906593	0,92	183282,23514670227
0,48	177452,17880950417	0,94	183408,55850558521
0,50	177863,95071854358	0,96	183512,82210877736
0,52	178317,11269313371	0,98	183604,83996463282
0,54	178771,85890555813	1,00	183685,89845550503

Tabulka 3.2: Závislost sumy čtverců na poměru hmotností  $q$



Obrázek 3.10: Grafické znázornění sumy čtverců na poměru hmotností  $q$



Obrázek 3.11: Grafické řešení pro sekundární složku,  $q = 0,38$

# Závěr

Spektrální čáry sekundární složky hmotné zákrytové dvojhvězdy  $\delta$  Orionis byly nalezeny. Při hledání jsem použila 61 spekter z modré oblasti pořízené na dvoumetrovém dalekohledu v Ondřejově.

Spektra jsem s využitím programu SPEFO nejprve rektifikovala, následně jsem změřila radiální rychlosti a programem SPEL90 jsem našla individuální řešení jednotlivých čar. Na rozmotávání spekter jsem použila program KOREL, ke kterému jsem musela vytvořit vstupní soubor `korel.dat` pomocí programů SN2, SNVAHY a HEC35D i `korel.par`, což je řídicí soubor.

Sekundární složku jsem hledala tak, že jsem nejprve pomocí konvergence parametrů v programu KOREL zpřesnila počáteční údaje hledáním řešení pro primární a třetí složku. Poté jsem hledala řešení pro sekundární složku delta Orionis. Měnila jsem hmotnostní poměr  $q$  a sledovala jsem měnící se sumu čtverců. Nejmenší suma čtverců vyšla pro  $q = 1,38$ .

...

# Literatura

- Germany, L., Proctor, R., Fluke, C., et al. 2012, Cosmos - The SAO Encyclopedia of Astronomy: Orbital elements, <http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/0/Orbital+Elements>, citováno: 2018-08-15
- Hadrava, P. 1995, A&AS, 114, 393
- Hadrava, P. 1997, A&AS, 122, 581
- Hadrava, P. 2004, Publications of the Astronomical Institute of the Czechoslovak Academy of Sciences, 92, 15
- Harmanec, P. 2008, HEC 35D - USER'S MANUAL, <http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/HEC35/hec35man.pdf>, citováno: 2018-07-29
- Harmanec, P., Mayer, P., & Šlechta, M. 2013, in Massive Stars: From alpha to Omega, 70
- Harvin, J. A., Gies, D. R., William G. Bagnuolo, J., Penny, L. R., & Thaller, M. L. 2002, The Astrophysical Journal, 565, 1216
- Horn, J. 2014, SPEL - USER'S INFO, J. HORN, <http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/SPEL90/spe1.pdf>, citováno: 2018-07-31
- Horn, P., Krpata, J., & Harmanec, P. 2010, SPEFO - USER'S MANUAL, <http://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/SPEFO/spefo.pdf>, citováno: 2018-07-31
- Mayer, P., Harmanec, P., Wolf, M., Božić, H., & Šlechta, M. 2010, A&AS, 520, A89
- Nichols, J., Huenemoerder, D. P., Corcoran, M. F., et al. 2015, The Astrophysical Journal, 809, 133
- Simon, K. P. & Sturm, E. 1994, A&A, 281, 286