

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Stanovení ultrafialové světelné křivky
hvězdy σ Ori E

Milan Prvák

Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Jiří Krtička, Ph. D.

2009

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Mgr. Jiřímu Krtičkovi, Ph. D. za jeho laskavost, rady a čas, který mi věnoval. Můj velký dík také patří pánům L. Torvaldsovi a R. Stallmanovi a přátelské komunitě na www.linuxquestions.org, díky jejichž obětavé práci mám dnes na svém počítači svobodný, stabilní a spolehlivý operační systém, bez něhož by vznik této práce nebyl možný.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne

Milan Prvák

Abstrakt:

V této práci studujeme proměnnost hvězdy σ Ori E v ultrafialové oblasti spektra. Aplikací virtuálních filtrů na sérii spekter získáváme hvězdné velikosti pro několik vybraných vlnových délek. Sestavená světelná křivka se v základních rysech shoduje s pozorováním ve viditelné části spektra a je v dobré shodě s předpokládaným modelem proměnnosti. Tvar křivky je podobný pro většinu zkoumaných délek. Proměnnost je pravděpodobně způsobena absorbcí okolohvězdnou látkou.

Klíčová slova: sigma Ori E, CP hvězdy, světelná křivka, UV

Abstract:

In the present work we study variability of the star σ Ori E in the ultraviolet spectrum. Applying virtual filters on a set of spectra we get magnitudes for several specified wavelengths. Composed light curve is in general features identical to the visual light curve and is in good agreement with the anticipated model of variability. The shape of the curve is similar for most of studied wavelengths. The variability is probably caused by absorption by the circumstellar matter.

Keywords: sigma Ori E, CP stars, light curve, UV

Obsah

1 Úvod	6
1.1 Horké hvězdy	6
1.2 CP hvězdy	7
1.3 σ Ori E	9
2 Určení světelné křivky	13
2.1 Vstupní data	13
2.2 Zpracování spekter	15
2.3 Zpracování časových údajů a určení fáze	16
2.4 Sestavení světelné křivky	18
2.5 Proložení křivek	22
3 Závěr	30
PŘÍLOHA A - TABULKY KE SVĚTELNÝM KŘIVKÁM	32
PŘÍLOHA B - KOEFICIENTY PROLOŽENÍ KŘIVEK	41
Literatura	44

Tabulka 1: Seznam použitých symbolů, zkratek a veličin

Symbol	Popis
Å	Angström – jednotka délky – $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$
ASCII	American Standard Code for Information Interchange – formát textových souborů
AU	astronomická jednotka – jednotka délky ($1,495\,978\,7 \cdot 10^{11} \text{ m}$)
c	rychlost světla ve vakuu ($299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}$)
e	numerická excentricita dráhy Země (0,0167)
E	excentrická anomálie, epocha (efemerida proměnné hvězdy)
FITS	Flexible Image Transport System – digitální datový formát používaný v astronomii
IUE	International Ultraviolet Explorer – družice, která prováděla astronomická pozorování v ultrafialovém oboru
JD_0	referenční juliánské datum ($JD = 2\,452\,400,5$)
m	pozorovaná hvězdná velikost
M	střední anomálie – rovnoměrně s časem plynoucí veličina v intervalu $[0^\circ, 360^\circ]$, počítá se od průchodu periheliem
M_0	střední anomálie v referenčním čase JD_0 ($120,77^\circ$).
P_{an}	anomalistický rok – doba mezi dvěma průchody Země periheliem ($365,259\,64^d$).
α	rektascenze
β	ekliptikální šířka
δ	deklinace (rovníkové souřadnice)
ε	sklon rovníku k ekliptice ($23,45^\circ$)
λ	vlnová délka, ekliptikální délka
ν	pravá anomálie
φ	měrný světelný tok připadající na jednotku vlnové délky
Φ	celkový světelný tok v celém spektru
ω	argument perihelu Země ($180,65^\circ$)
Ω	délka výstupného uzlu Země ($282,22^\circ$)

Kapitola 1

Úvod

1.1 Horké hvězdy

Většina informací v této kapitole byla převzata ze skript *Fyzika horkých hvězd* [1].

Dříve se hvězdy dělily na *rané* a *pozdní*. Toto rozdělení bylo založeno na předpokladu, že hvězdy vznikají jako horká tělesa, která během své existence postupně chladnou. Hvězdy chladnější než Slunce byly tedy označovány jako *pozdní*, hvězdy teplejší pak jako *rané*. Dnes již víme, že zmíněný model vývoje je mylný. Proto dnes raději používáme dělení na hvězdy *horké* a *chladné* (i když dělení na *rané* a *pozdní* se stále používá například ve spektroskopii).

Určujícím parametrem pro vlastnosti a chování hvězd je jejich efektivní teplota. Pod povrchem chladných hvězd existuje silná vrstva, v níž je přenos energie zprostředkován konvekcí. V ní dochází k promíchávání hvězdné látky, s čímž souvisí také vznik a zánik malých, lokálních magnetických polí. To má za následek různé projevy hvězdné aktivity, jako je tomu u Slunce – erupce, protuberance, nebo fotosférické skvrny.

V podpovrchových vrstvách horkých hvězd je energie přenášena převážně prostřednictvím záření. S tím souvisí i kvalitativní rozdíl ve stavbě povrchových vrstev hvězdy. Hvězdy horké jsou klidnější, nesetkáváme se u nich s aktivitou, chromosférou nebo korunou slunečního typu. Má-li horká hvězda magnetické pole, pak je globální a stabilní. Horké hvězdy také často mívají hvězdný vítr, urychlovaný zářením hvězdy. Zářivý výkon chladných hvězd je příliš slabý na to, aby u nich mohlo k tomuto jevu dojít.

Hranice mezi horkými a chladnými hvězdami se nachází přibližně u spektrální třídy F2, tedy u efektivní teploty asi 7000 K. Kromě hvězd hlavní posloupnosti patří k horkým hvězdám také bílí trpaslíci, obří, veleobří, hvězdy heliové hlavní posloupnosti, Wolfovy-Rayetovy hvězdy, Herbigovy hvězdy a jádra planetárních mlhovin.

Ačkoli jsou horké hvězdy v Galaxii poměrně vzácné (jen asi 7 % všech hvězd), díky výběrovému efektu (jsou totiž mnohem zářivější) jich můžeme na obloze pozorovat velké množství – ze sto nejjasnějších hvězd na obloze patří zhruba 2/3 mezi hvězdy horké. Většina horkých hvězd je soustředěna v rovině Galaxie. Hvězdy spektrálních typů O a B nalezneme především ve spirálních ramenech Galaxie, často tvoří tzv. *asociace OB* – skupiny hvězd se společným místem a časem vzniku, které ovšem, narozdíl od hvězdokup nebývají gravitačně vázány.

V důsledku svého velkého zářivého výkonu setrvávají tyto hvězdy na hlavní posloupnosti poměrně krátkou dobu, což je také jedním z důvodů jejich nízké četnosti. Většina z nich je hvězdami *populace I*, které se vyznačují vyšším obsahem těžších prvků.

1.2 CP hvězdy

Chemicky pekuliární hvězdy (CP hvězdy) jsou hvězdy s neobvyklým charakterem spektra. Zpravidla se jedná o hvězdy hlavní posloupnosti spektrálních tříd B0–F2 (tedy horké hvězdy). Tyto odchylky od normálního spektra jsou dány anomálním složením atmosféry. Těchto zvláštností si jako první všimla (a v souvislosti s tím použila pojem *pekuliární*) Antonia Maury při studiu spektra hvězdy α^2 CVn v roce 1897.

V roce 1913 pak Bělopolskij objevil periodicitu ve změnách intenzity některých spektrálních čar a vysvětlil ji horizontální nehomogenitou rozložení těžších prvků na povrchu hvězdy [1]. O rok později provedli astronomové Guthnick a Prager první fotoelektrické pozorování této hvězdy a stanovili její světelnou křivku. Morgan se ve třicátých letech věnoval studiu dalších pekuliárních hvězd. Poukázal na korelaci mezi typem pekuliárnosti a teplotou a rozdělil CP hvězdy do pěti skupin:

- Mn II hvězdy
- hvězdy s čarou $\lambda 4200$
- Eu II hvězdy

- Cr II hvězdy
- Sr II hvězdy

V roce 1947 Babcock objevil u hvězdy 78 Vir magnetické pole o intenzitě přibližně 0,15 T. Brzy byly objeveny další magnetické hvězdy a zrodil se model *skloněného magnetického rotátoru*, který popisuje hvězdu s přibližně dipólovým magnetickým polem, jehož osa svírá nenulový úhel s osou rotace. Preston pak v roce 1974 navrhl novou klasifikaci CP hvězd [1, 2, 3]:

- **CP1:** Am/Fm hvězdy, většinou bez silného magnetického pole, často složky dvojhvězd s vázanou rotací. Efektivní povrchová teplota se pohybuje v rozmezí 7000–10 000 K.
- **CP2:** Do této skupiny patří hvězdy se silnými čarami Si, Cr, Sr nebo Eu. Často mají magnetické pole v řádu několika desetin T, které se zpravidla mění s periodou několika dní až let. Se změnami magnetického pole pak souvisí i změny spektra. CP2 hvězdy mají teplotu 8000–15 000 K.
- **CP3:** Hvězdy s teplotou 10 000–15 000 K a čarami Hg II λ 3984 a Mn II, většinou bez silného magnetického pole.
- **CP4,5:** He-weak – Podobné jako CP2, ale s vyšší teplotou, slabou čarou He I a nízkým obsahem helia v atmosféře.
- **CP6,7:** He-strong – Obdoba hvězd typu CP2 s vysokou teplotou a nadbytkem helia v atmosféře.

Příčinou pekuliaritů těchto hvězd je přebytek nebo deficit některých prvků v atmosféře způsobený pravděpodobně pomalou zářivou difuzí. Tam pak může docházet k absorpci záření. Absorbovaná energie může být vyžářena na jiné vlnové délce. Tak dochází k přerozdělení energie ve spektru. Proměnnost pekuliárních hvězd může být spojena s nerovnoměrným rozložením těžších prvků na povrchu hvězdy (viz například práce Krtičky a kol. [4]) nebo okolohvězdnou látkou uvězněnou v magnetickém poli a korotující společně s hvězdou [5].

1.3 σ Ori E

σ Ori E je složkou několikanásobného hvězdného systému. V okolí se nachází ještě několik dalších horkých hvězd a pravděpodobně také několik desítek chladných hvězd a hnědých trpaslíků [6]. Systém je zřejmě částí velice mladé asociace OB. Složka E, která nás zajímá, je chemicky pekulární hvězda spektrální třídy B2Vpe s velkým obsahem helia v atmosféře a silným, zhruba dipólovým magnetickým polem.

Již v roce 1973 objevil Walborn u této hvězdy proměnnou emisi v čáře H_α [7]. Z výsledků své práce dospěl k závěru, že σ Ori E je pravděpodobně spektroskopickou dvojhvězdou. Bolton [8] se o rok později zaměřil na studium spekter v modré a fialové oblasti spektra, kde se snažil nalézt čáry, které by vykazovaly podobné vlastnosti. Žádné takové čáry ovšem nenašel. Jeho závěr nevyvrací podvojnost hvězdy, klade však omezující podmínky na hmotnost případného průvodce. Ve stejném roce objevil Hunger [9] při studiu čar H I, že u všech z nich dochází k periodickým změnám ekvivalentní šířky. Hvězda σ Ori E je tedy spektroskopicky proměnná.

Groote a Hunger [10] změřili v roce 1977 radiální rychlosti v čarách H I a He I. Kromě podvojnosti σ Ori E uvažují také možnost existence retrográdně rotujícího prstence a v souvislosti s předchozím objevem proměnného magnetického pole u hvězdy HR 7129 také model skloněného rotátoru. Zároveň ale kladou omezení na každou z uvažovaných alternativ.

V roce 1978 objevili Landstreet a Borra [11] u σ Ori E proměnné magnetické pole. Jeho indukce se pohybuje v rozmezí od $-0,23$ do $0,31$ T a časový průběh jeho pozorované intenzity zhruba odpovídá sinusoidě. Perioda 1,19 dne je shodná s periodou fotometrických změn. Přitom minima na světelné křivce nastávají v okamžicích, kdy je pozorovaná intenzita magnetického pole nulová. Tento objev podporuje hypotézu skloněného rotátoru, kdy okolohvězdná látka je uvězněna v magnetosféře hvězdy v oblasti magnetického rovníku.

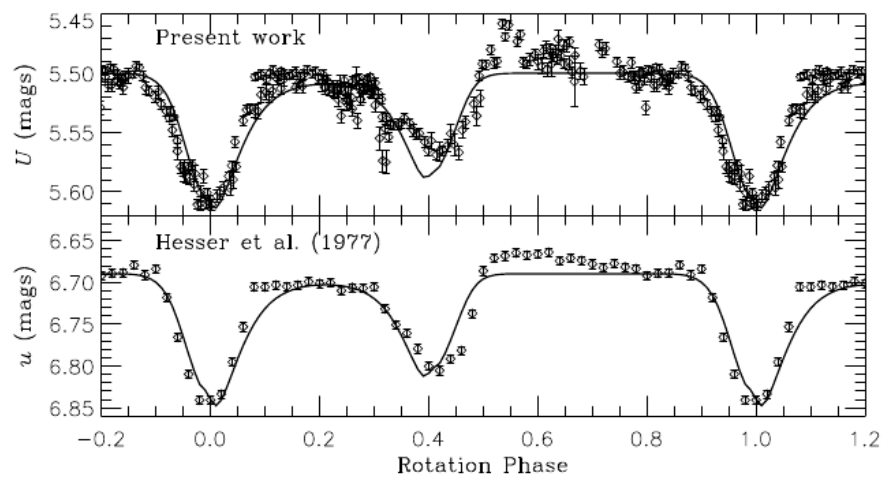
V roce 1982 publikovali Groote a Hunger [12] článek, v němž se podrobně zabývají studiem proměnnosti σ Ori E v oborech J, H, K, L a M a rozбором spekter pořízených družicí IUE. Stanovili některé důležité parametry hvězdy. Dále studují rozložení hmoty v okolohvězdné obálce, přičemž docházejí k závěru, že tato látka je soustředěna ve dvou korotujících oblacích nacházejících se zhruba na protějších místech hvězdy v oblastech, kde se protíná rovník hvězdy s rovníkem magnetickým.

Nakajima [13] tento model podrobněji rozpracoval v roce 1985. Vytvořil model magnetosféry hvězdy. Na siločarách tohoto pole z podmínky rovnováhy sil našel potenciálová minima, v nichž může být uvězněna ionizovaná látka. Předpokládá hydrostatickou rovnováhu pro okolohvězdný materiál, odvodil rozložení hmoty v okolí hvězdy.

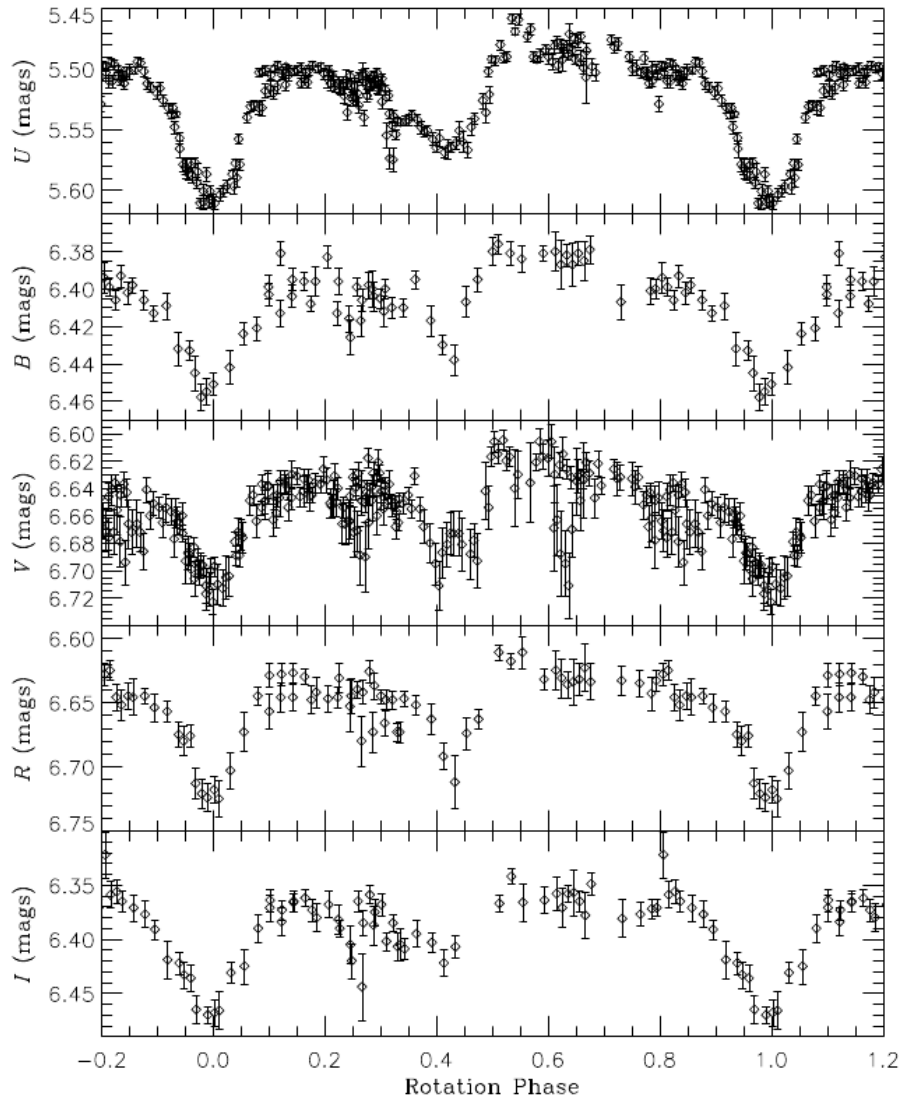
Při výpočtu uvažoval, že tato látka byla v potenciálových minimech uvězněna již v době gravitačního smršťování hvězdy. Podařilo se mu objasnit proměnnou emisi v čáře $H\alpha$ a vztah mezi maximem této emise, světelným maximem a extrémem magnetického pole. Nadměrnou emisi v infračerveném oboru však vysvětlit nedokázal.

Vetř a kol. [14] v roce 1991 studovali proměnnost čar helia u několika pekuliárních hvězd, mezi nimi i σ Ori E . Ve své práci se pokoušeli zjistit rozložení helia v atmosférách těchto hvězd. To je u σ Ori E pravděpodobně soustředěno ve dvou velkých skvrnách, oddělených pásem s nízkou koncentrací helia.

Townsend a Owocki [5] představují v roce 2005 model RRM (Rigidly Rotating Magnetosphere). Magnetosféra hvězdy rotuje jako tuhé těleso společně s hvězdou. Autoři vycházejí z předpokladu, že plasma se může volně pohybovat pouze podél magnetických siločar. Tyto siločáry jsou v čase neměnné. Nachází-li se na takové siločáře potenciálové minimum, ionizovaná látka hvězdného větru se v něm bude usazovat. S předpokladem hydrostatické rovnováhy pro tuto látku lze pak získat rozložení hmoty v okolí hvězdy. Výsledky, získané pomocí tohoto modelu poměrně dobře souhlasí s pozorováním. Townsend a Oksala [15] později tento model aplikují na σ Ori E , kde prezentují naměřené světelné křivky v oborech U, V, B, R, I a Ström-grenově u filtru. Křivky v U a u jsou pak porovnávány s teoretickou křivkou předpovězenou modelem RRM. Teoretická křivka se velmi dobře shoduje se světelnou křivkou získanou experimentálně. Tyto křivky jsou uvedeny na obrázcích 1.1 a 1.2



Obrázek 1.1: Světelné křivky σ Ori E v U a u porovnané s křivkou předpovězenou modelem RRM. Převzato z [15].



Obrázek 1.2: Světelné křivky σ Ori E v U, V, B, R a I. Převzato z [15].

Kapitola 2

Určení světelné křivky

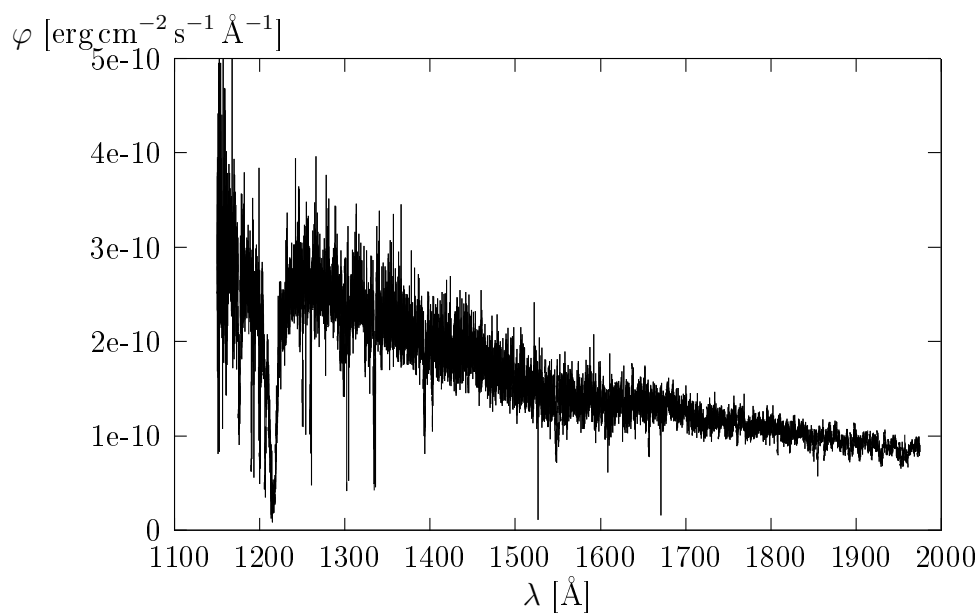
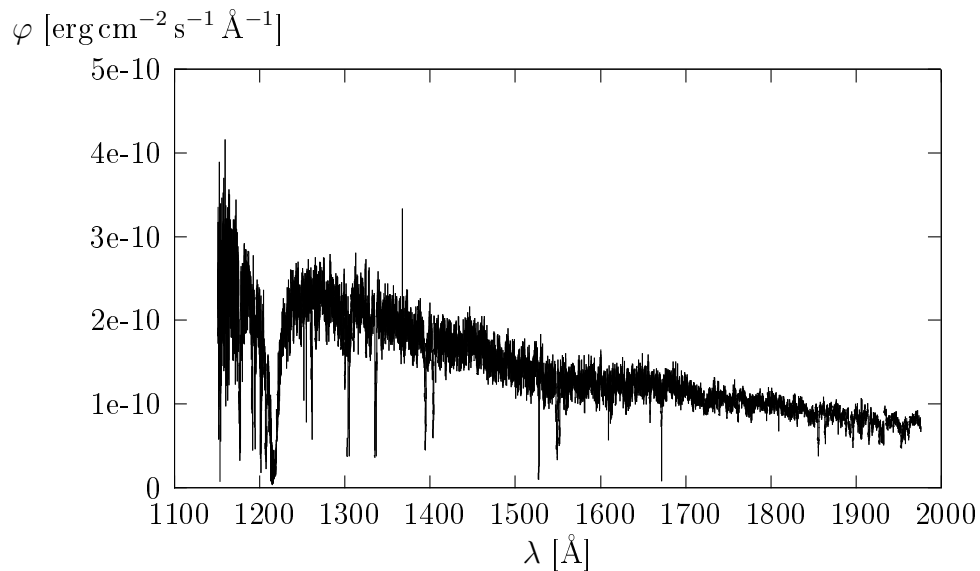
2.1 Vstupní data

Úkolem této práce je určit ultrafialovou světelnou křivku hvězdy σ Ori E. Protože nám však vlastnosti atmosféry naší planety neumožňují provádět astronomická pozorování v této části spektra, musíme použít měření získaná přístrojem, nacházejícím se vně naší atmosféry, tedy umělou družicí.

Pravděpodobně jediným použitelným zdrojem dat se ukázala být družice *International Ultraviolet Explorer* (IUE), která v letech 1978–1981 provedla 39 ultrafialových spektroskopických pozorování σ Ori E pomocí přístroje SWP v rozsahu 1100–1950 Å. Tato data jsou přístupná v archivu MAST [16].

Při zpracování těchto dat jsme však narazili na problém – některá spektra vykazovala mnohem menší hodnoty zářivých toků než většina ostatních. Při pořizování snímků kamerou SWP je totiž možné použít dvě apertury – velkou (LGAP) a malou (SMAP).

Zatímco velká apertura umožňuje získávat snímky s větší světelností, malá apertura poskytuje větší přesnost ve vlnové délce. Proto byla v prvních letech mise IUE používána převážně apertura malá. Později se však ukázalo, že spektra získaná s velkou aperturou se vyznačují mnohem menší nejistotou než se původně předpokládalo, a tak se od používání malé apertury postupně upustilo [17].



Obrázek 2.1: Spektrum σ Ori E nahoře: v minimu (*fáze* = 0,017); dole: v maximu (*fáze* = 0,884)

Malá apertura má *zhruba poloviční* propustnost ve srovnání s aperturou velkou, což je pravděpodobně i příčinou systematického rozdílu mezi spektry pořízenými s malou a velkou aperturou. Všechna spektra pořízená s malou

aperturou (jedná se o 8 spekter pořízených zejména v letech 1978 a 1979) jsou tedy pro naše potřeby zcela nepoužitelná a byla ze souboru vstupních hodnot vyřazena, stejně jako měření s krátkou expozicí. Tato omezení nám ponechala 30 použitelných spekter. Spektra hvězdy σ Ori E v jejím světelném minimu a maximu jsou na obrázku 2.1.

2.2 Zpracování spekter

Spektra z družice IUE jsou k dispozici ve formátu NEWSIPS (FITS) nebo ve formě ASCII, tedy v textovém formátu. V obou případech jsou zkalibrována ve vlnové délce i ve světelném toku. Obsahují mimo jiné datum pozorování ve formě geocentrického juliánského data, délku expozice, rovníkové souřadnice pozorovaného objektu a tabulku hodnot vyjadřující závislost toku záření na vlnové délce. Rozlišení ve vlnové délce je $\Delta\lambda = 0,05 \text{ \AA}$, tok záření je udáván v jednotkách $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$.

K tomu, abychom mohli v dané oblasti spektra stanovit hvězdnou velikost, je třeba zvolit vhodný fotometrický systém. Protože se však ve zkoumaném oboru vlnových délek žádný oficiální fotometrický systém nenachází, je třeba definovat systém vlastní. Fotometrický systém je soubor funkcí $f_n(\lambda)$, které nám pomohou definovat hvězdnou velikost v dané vlnové délce. Je-li $\varphi(\lambda)$ funkce závislosti světelného toku na vlnové délce, pak celkový tok v n -tém filtru Φ_n získáme integrací přes všechny vlnové délky:

$$\Phi_n = \int_0^\infty \varphi(\lambda) f_n(\lambda) d\lambda. \quad (2.1)$$

U některých fotometrických systémů používaných zejména v optickém oboru mají funkce $f_n(\lambda)$ základ v průběhu citlivosti přístroje nebo propustnosti použitého filtru na vlnové délce a jsou určeny experimentálně. My, vycházejíce z měření spektroskopického, známe průběh funkce $\varphi(\lambda)$ a funkce filtrů $f_n(\lambda)$ si můžeme určit zcela libovolně. Z praktických důvodů budeme chtít, aby výsledná hodnota celkového světelného toku vypovídala o nějaké konkrétní, předem dané vlnové délce λ_n – tedy aby na této vlnové délce $f_n(\lambda)$ měla maximum a pro $\lambda \rightarrow \pm\infty$ konvergovala k nule. Jako vhodná funkce nám poslouží funkce Gaussova:

$$f_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\lambda-\lambda_n)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.2)$$

kde σ je pološířka filtru a λ_n je vlnová délka odpovídající středu filtru. Protože však máme data v digitálním formátu (mají tedy diskrétní charakter) a protože máme k dispozici pouze omezený interval spektra $[\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, přechází integrál 2.1 v sumu. Ze získaného celkového toku daným filtrem potom můžeme získat hvězdnou velikost m_n použitím Pogsonovy rovnice:

$$m_n - m_{\text{ref}} = -2,5 \log \frac{\Phi_n}{\Phi_{\text{ref}}}, \quad (2.3)$$

kde Φ_{ref} je světelný tok od nějaké referenční hvězdy tímtež filtrem a m_{ref} je její hvězdná velikost v tomto filtru. My však nemáme v našem fotometrickém systému určenou hvězdnou velikost žádné hvězdy, kterou bychom mohli použít jako hvězdu srovnávací. Nás ovšem nezajímá samotná hvězdná velikost, ale pouze její relativní změny. Můžeme si tedy referenční hvězdnou velikost zvolit libovolně a Pogsonovu rovnici zjednodušit do tvaru

$$m_n = -2,5 \log \Phi_n + C, \quad (2.4)$$

kde C je kalibrační konstanta, kterou si můžeme zvolit libovolně, například tak, aby hvězdná velikost σ Ori E byla v maximu nulová.

Nyní již víme vše, co potřebujeme k tomu, abychom mohli přistoupit k vlastnímu zpracování spekter. Protože soubor dat, které je třeba zpracovat, je poměrně rozsáhlý, využijeme schopností výpočetní techniky a celý problém implementujeme v programovacím jazyce C pomocí lichoběžníkové integrační metody:

$$\Phi_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{1}{2} (f_{ni} \varphi_i + f_{ni+1} \varphi_{i+1}) (\lambda_{i+1} - \lambda_i),$$

kde φ_i je i -tá hodnota v grafu závislosti zářivého toku na vlnové délce a λ_i je i -tá hodnota vlnové délky.

2.3 Zpracování časových údajů a určení fáze

Jak již bylo zmíněno, v hlavičkách použitých souborů jsou obsaženy informace o času pozorování, a to jak ve formě kalendářního data, tak i ve formě data juliánského. Bohužel je však uvedeno pouze datum geocentrické. Země se během roku pohybuje kolem Slunce a její vzdálenost od pozorovaného objektu tak není konstantní. Hvězda σ Ori E se nachází poměrně blízko ekliptiky, pohyb Země kolem Slunce se tedy projeví v téměř maximální míře. Je

tedy vhodné provést heliocentrickou korekci těchto dat, která tuto odchylku eliminuje. K určení heliocentrické korekce musíme nejdříve zjistit vzájemnou polohu pozorovaného objektu a Země na její oběžné dráze kolem Slunce. Necht' v nějakém čase JD_0 je známa střední anomálie Země M_0 . Pak v libovolném jiném čase JD můžeme stanovit střední anomálii M (ve stupních) ze vztahu [18]

$$M = M_0 + (JD - JD_0) \frac{360}{P_{\text{an}}},$$

kde P_{an} je délka anomalistického roku. Od střední anomálie můžeme přejít k excentrické anomálii E , která je s ní svázána Keplerovou rovnicí:

$$M = E - e \sin E,$$

kde e je excentricita dráhy Země. Tuto rovnici vyřešíme numericky. Ze získané excentrické anomálie lze získat anomálii pravou ν a vzdálenost od Slunce r [18]:

$$r = a(1 - e \cos E)$$

$$\text{tg} \frac{\nu}{2} = \sqrt{\frac{1+e}{1-e}} \text{tg} \frac{E}{2},$$

kde $a = 1$ AU je velká poloosa dráhy. Přičtením argumentu perihelia ω a délky výstupného uzlu Ω ke získané pravé anomálii dostaneme ekliptikální délku Země λ_Z vzhledem ke Slunci. Dále převedeme rovníkové souřadnice pozorovaného objektu α a δ na souřadnice ekliptikální λ a β pootočením kolem osy směřující do jarního bodu o úhel ε .

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon & \sin \varepsilon \\ 0 & -\sin \varepsilon & \cos \varepsilon \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \delta \cos \alpha \\ \cos \delta \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \lambda \\ \cos \beta \sin \lambda \\ \sin \beta \end{pmatrix}.$$

Dráhový rozdíl Δs mezi Zemí a Sluncem je pak dán skalárním součinem průvodiče Země s jednotkovým vektorem ve směru k pozorovanému objektu. Zapsáno pomocí ekliptikálních souřadnic

$$\Delta s = r \cos \beta (\cos \lambda \cos \lambda_Z + \sin \lambda \sin \lambda_Z).$$

Velikost heliocentrické korekce ΔT , která je kladná, nachází-li se Země mezi Sluncem a pozorovaným objektem, je pak dána vztahem:

$$\Delta T = \frac{\Delta s}{c}.$$

Tato hodnota se pak přičte k příslušnému juliánskému datu. Při výpočtu zanedbáváme gravitační vlivy ostatních těles sluneční soustavy a relativní polohu pozorovatele na povrchu (nebo oběžné dráze) Země. Přesnost této metody však bude pro naše účely postačující.

Pro sestavení světelné křivky musíme pro každé spektrum určit fázi. K tomu využijeme hodnoty efemeridy pro čas základního minima, které uvádí Landstreet a Borra[11] podle článku Hessera a kol.[19]:

$$JD_{\min} = 2\,442\,778,819 + 1,19080E,$$

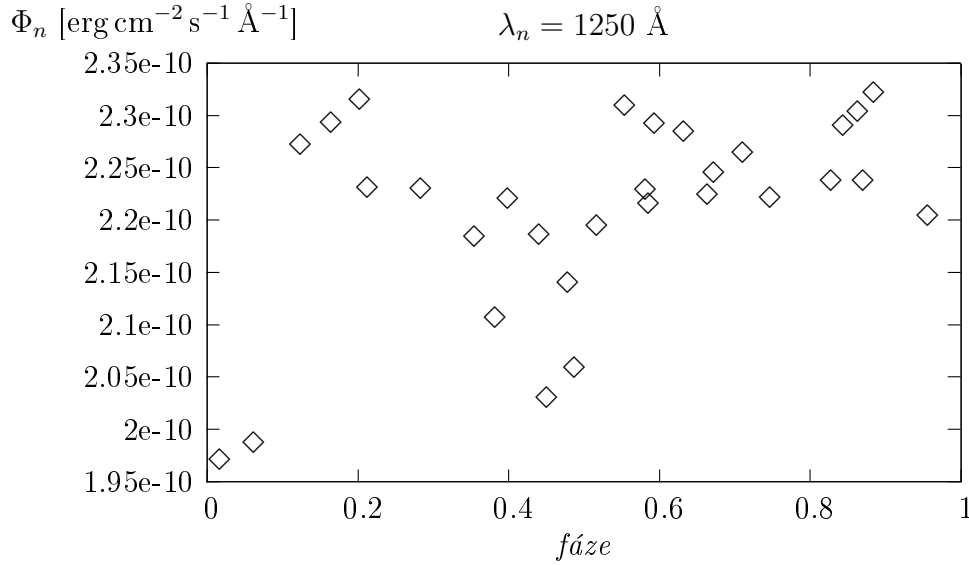
kde E je epocha.

2.4 Sestavení světelné křivky

Nyní již můžeme sestavit světelnou křivku. Proměnnost hvězdy budeme sledovat na 14 různých vlnových délkách od 1250 do 1900 Å. Za pološířku filtru σ jsme zvolili hodnotu 25 Å. Byly testovány i jiné hodnoty pološířky, zúžení ani rozšíření filtrů však nepřineslo žádnou změnu kvality výsledků. Provedeme integraci, heliocentrickou korekci a výpočet fáze. Časová závislost celkového světelného toku Φ_n na fázi během jedné periody na vlnové délce $\lambda_n = 1250$ Å je na obrázku 2.2, odpovídající hodnoty jsou pak uvedeny v tabulce A1.

V grafu je dobře patrné primární i sekundární minimum, celá světelná křivka má však poměrně chaotickou povahu. Jednotlivé body jsou značně rozptýleny. Na tvaru křivky se pravděpodobně projevil fakt, že jednotlivá spektra byla pořízena v průběhu dlouhého časového intervalu (několik let). Pokud během této doby došlo k nějaké dlouhodobé změně, ať již v jasnosti hvězdy nebo v parametrech měřicího přístroje, mohlo by to mít nežádoucí vliv na tvar světelné křivky. Měření by pak bylo zatíženo systematickou chybou.

Když se podíváme blíže na data pořízení každého souboru, zjistíme, že jsou na časové ose rozloženy v několika skupinách. Jedno měření (sp04840) bylo provedeno v dubnu 1979. V lednu následujícího roku pak vznikla v relativně rychlém sledu série 13 spekter a zbylých 17 souborů pochází z prosince roku 1981. Zkusíme tedy do grafu 2.3 vynést každou sérii zvlášť. Obě série (1980 a 1981) vystihují poměrně dobře charakter proměnnosti hvězdy se



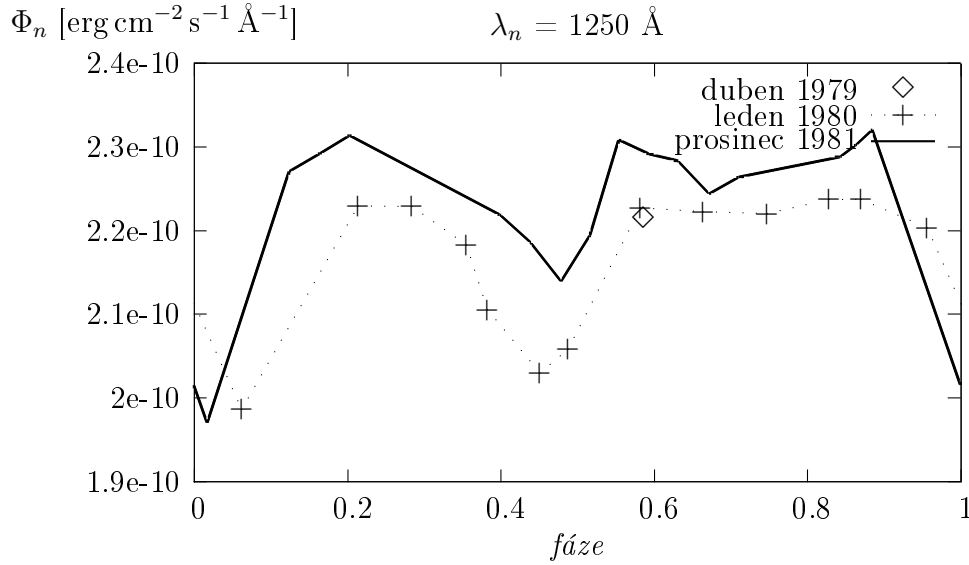
Obrázek 2.2: Průběh světelného toku během jedné periody

dvěma minimy, jsou však navzájem viditelně posunuty. Pokusíme se tedy provést korekci poslední série dat tak, aby bylo možné smístit data z obou sérií. Věrohodnost osamoceného měření z roku 1979 není možné uspokojivě posoudit a tudíž bylo ze souboru hodnot vyřazeno.

Budeme předpokládat, že posun mezi danými sériemi spekter je způsoben změnou vlastností detektoru. Ověření, že tomu tak skutečně je, se vymyká rozsahu této práce. Pro jednoduchost uvažujme, že citlivost detektoru ve filtru Φ_n se mezi oběma skupinami měření změnila na μ_n -násobek své původní hodnoty, tj. hodnoty citlivosti v lednu 1980. Nechť zkalibrovaný světelný tok pro i -té spektrum v n -tém filtru je $F_n^i = \psi_{1n}^i + \mu_n \psi_{2n}^i$, ψ_{1n}^i je rovno Φ_n^i pro spektra ze série 1980 a nula pro spektra z roku 1981 a pro ψ_{2n}^i tomu bude naopak. Budeme hledat hodnotu μ_n takovou, aby součet čtverců vzdáleností sousedních bodů v grafu

$$S_n = \sum_{i=0}^{N-1} [(\chi_n^{i+1} - \chi_n^i)^2 + ((\psi_{1n}^{i+1} - \psi_{1n}^i) + \mu_n(\psi_{2n}^{i+1} - \psi_{2n}^i))^2]$$

byl minimální. χ_n^i a χ_n^{i+1} ve výrazu označují fázi. Výraz zderivujeme podle μ_n a položíme roven nule. Po úpravě získáme podmínku



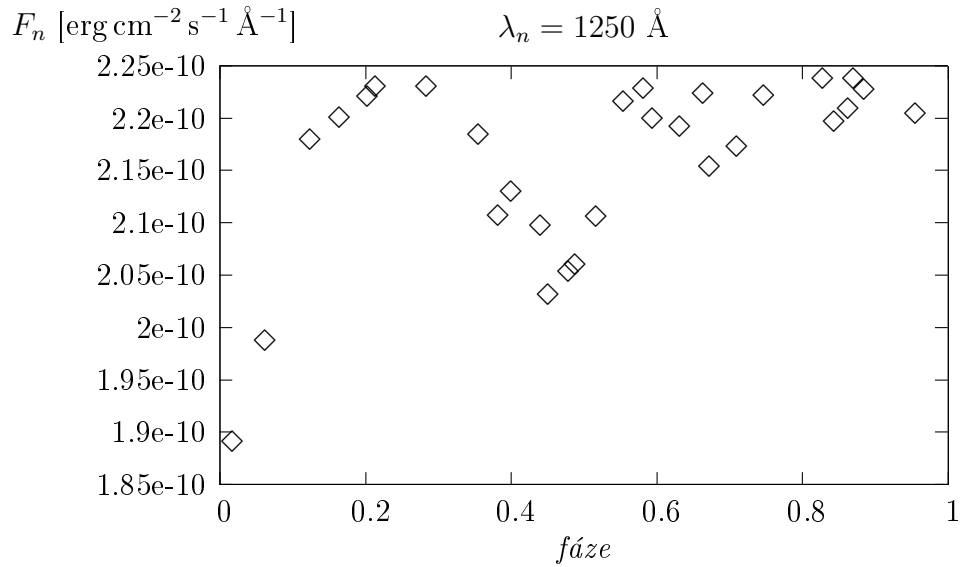
Obrázek 2.3: Průběh světelného toku, rozděleno podle data pořízení spektra

$$\mu_n = - \frac{\sum_{i=0}^{N-1} [(\psi_{1n}^{i+1} - \psi_{1n}^i)(\psi_{2n}^{i+1} - \psi_{2n}^i)]}{\sum_{i=0}^{N-1} (\psi_{2n}^{i+1} - \psi_{2n}^i)^2}.$$

Vypočítané hodnoty μ_n jsou uvedeny v tabulce 2.1. Světelné toky náležející skupině 1981 vynásobíme příslušnými hodnotami μ_n . Nová závislost je pak v tabulce A2 a na obrázku 2.4. Spojnice mezi jednotlivými body v grafu je nakreslena pro lepší odlišení jednotlivých sérií dat. Nyní je třeba převést světelné toky na hvězdnou velikost. Z praktických důvodů od hodnot hvězdných velikostí daných $-2,5$ násobkem logaritmu světelného toku odečteme konstantu $C = 24,0$. Základní tvar světelné křivky je přibližně stejný na všech vlnových délkách, kromě oblasti mezi 1400 a 1600 Å, kde je tvar křivky odlišný zejména v okolí sekundárního minima. To je zřejmě způsobeno chybou měření, možná se však v této oblasti projevuje další druh proměnnosti. Rozptyl hodnot, který postihuje zejména data ze série 1981 (tvar křivky daný starším souborem se zachovává) zůstal částečně přítomen i po kalibraci těchto dat. Nejvíce jsou postiženy křivky na vlnových délkách 1400 až 1600 Å, dále k červenému okraji se pak rozptyl hodnot postupně zmenšuje.

Tabulka 2.1: hodnoty kalibračního koeficientu μ_n

λ_n [Å]	μ_n	λ_n [Å]	μ_n
1250	0.959348	1600	0.984201
1300	0.956997	1650	0.987765
1350	0.961839	1700	0.988319
1400	0.968856	1750	0.989422
1450	0.973564	1800	0.994192
1500	0.979614	1850	0.994841
1550	0.983640	1900	0.994292



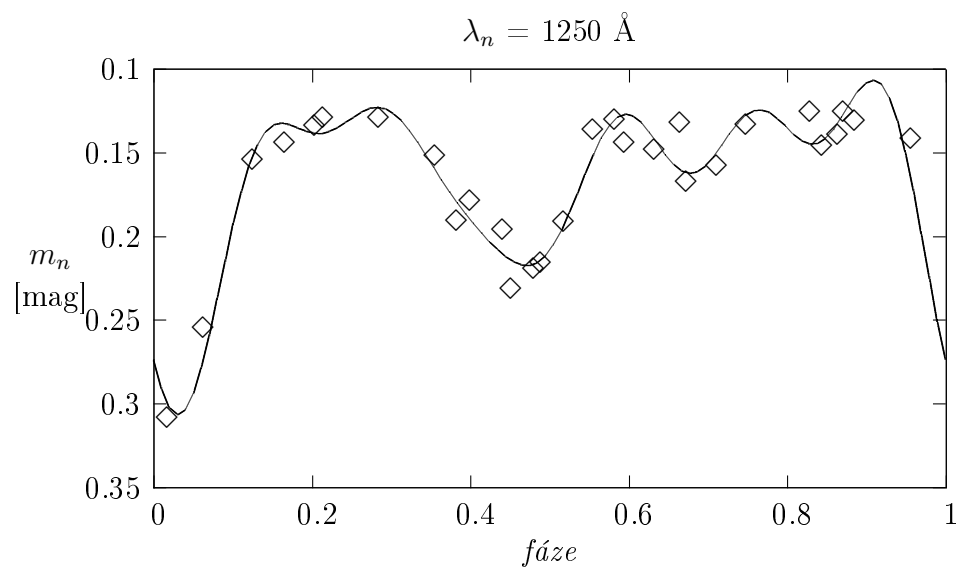
Obrázek 2.4: Zkalibrovaný průběh světelného toku

2.5 Proložení křivek

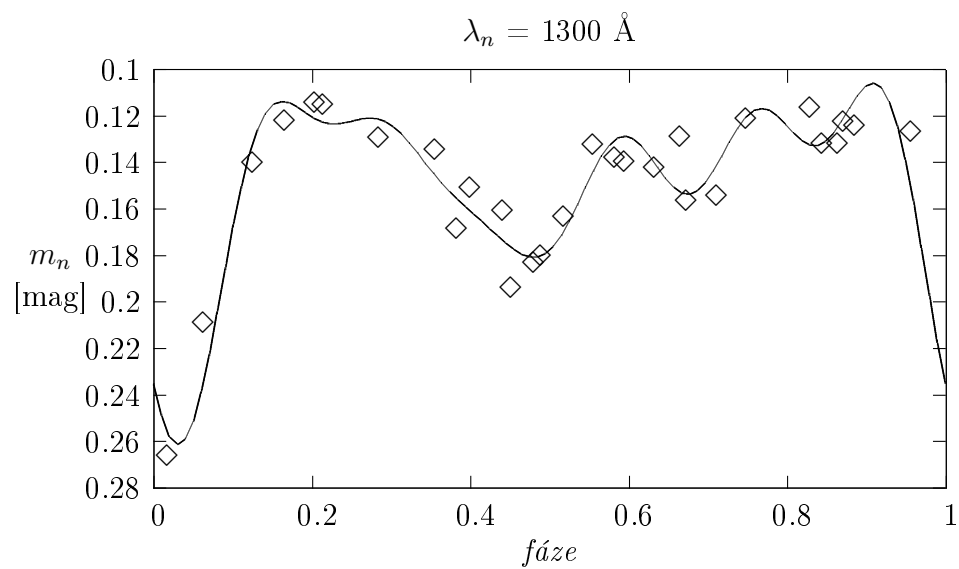
Když teď máme určenou závislost hvězdné velikosti na fázi, bylo by vhodné získanými body proložit nějakou křivku. Protože se jedná o děj periodický, budeme naši závislost prokládat řadou funkcí \sin a \cos . Vhodnější by jistě bylo použít nějaký model, opírající se o fyzikální podstatu pozorovaného jevu, například model RRM. Implementace tohoto modelu a získání teoretických světelných křivek je však poměrně složitá a náročná a z časových důvodů nebyla provedena. Necht' prokládaná funkce $g(f)$ má následující tvar:

$$g(f) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^N a_i \cos 2\pi f + \sum_{i=1}^N b_i \sin 2\pi f. \quad (2.5)$$

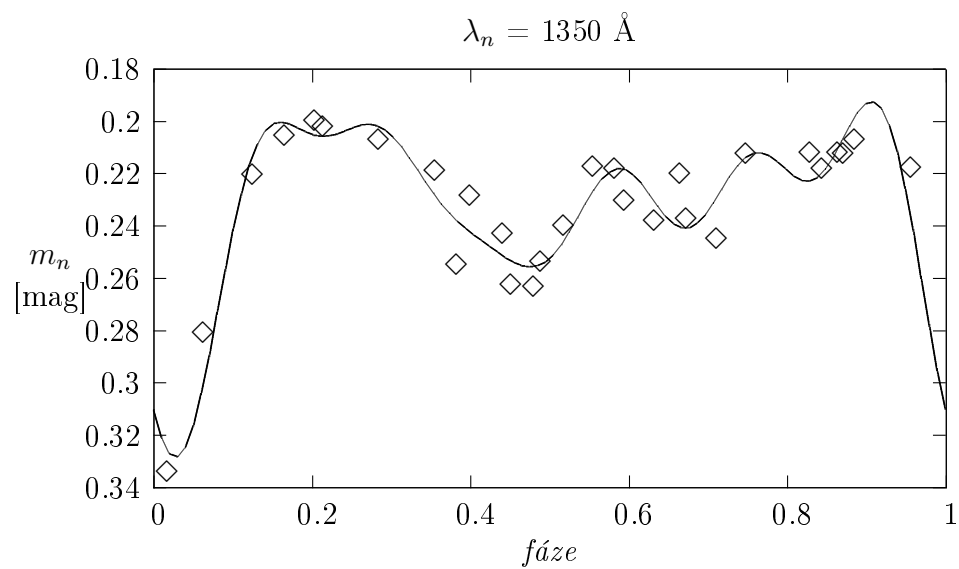
kde f je fáze. Toto proložení je obvykle vhodné pro CP hvězdy (viz například Mikulášek a kol. [20]). V našem proložení použijeme prvních 6 členů obou řad. Proložení provedeme lineární regresí metodou nejmenších čtverců pomocí programu gnuplot [21]. Pro hodnotu v oblasti primárního minima byla použita trojnásobná statistická váha z důvodu nedostatku hodnot v této oblasti světelné křivky. Díky tomu proložení lépe odpovídá experimentálním hodnotám v okolí primárního minima. Vypočtené koeficienty pro jednotlivé světelné křivky jsou uvedeny v tabulkách v příloze B. V grafech 2.5–2.18 jsou získané světelné křivky. Plnou čarou je pak v nich vyneseno proložení funkcí 2.5.



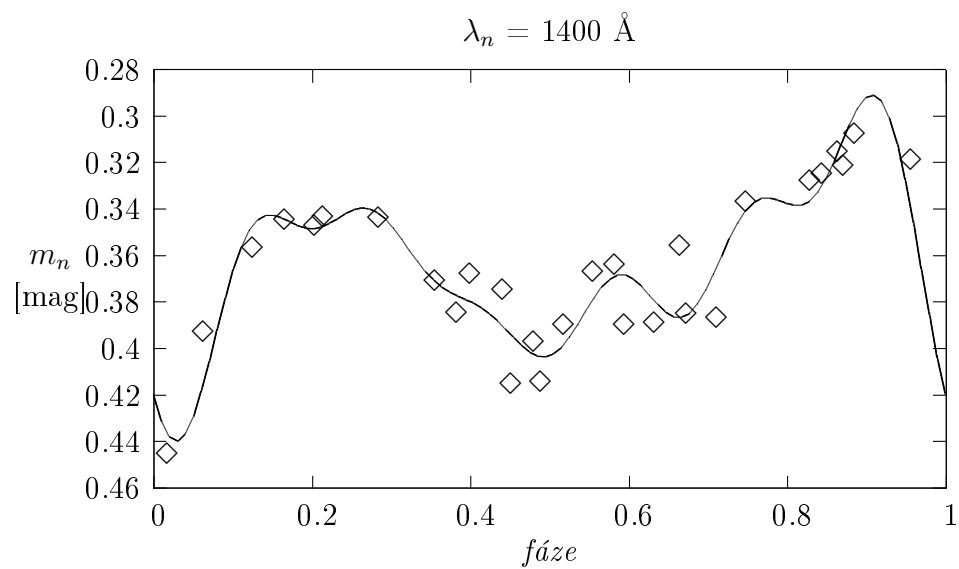
Obrázek 2.5: Světelná křivka pro $\lambda = 1250 \text{ \AA}$



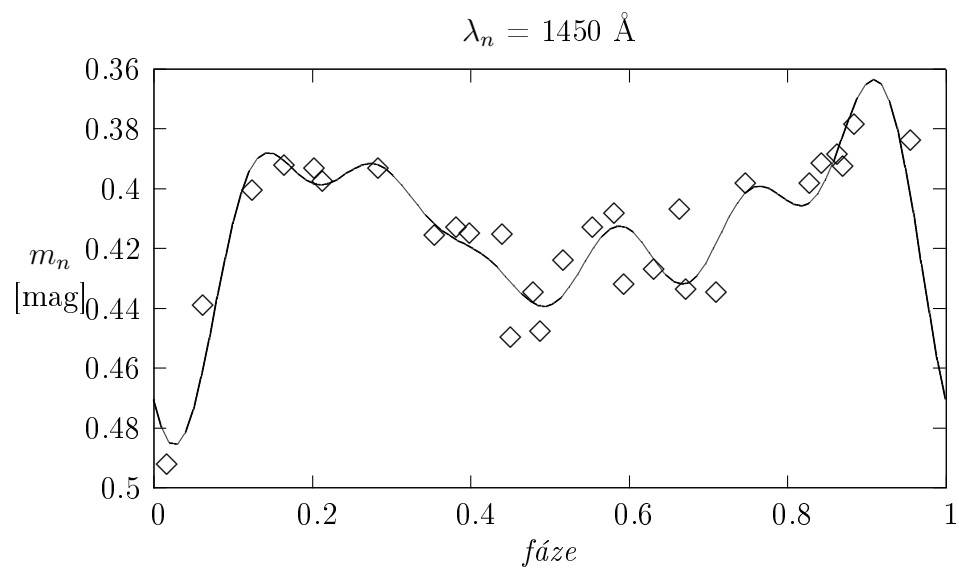
Obrázek 2.6: Světelná křivka pro $\lambda = 1300 \text{ \AA}$



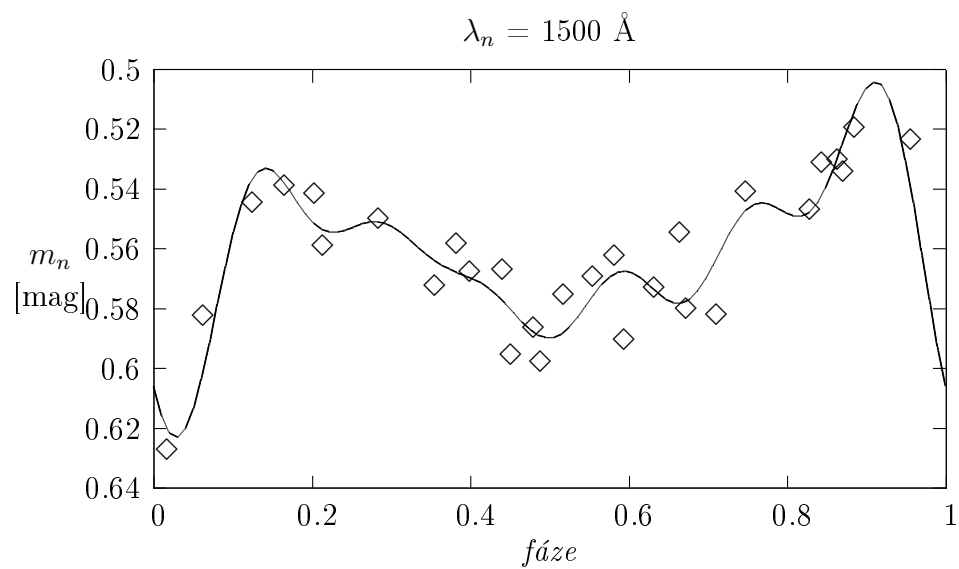
Obrázek 2.7: Světelná křivka pro $\lambda = 1350 \text{ \AA}$



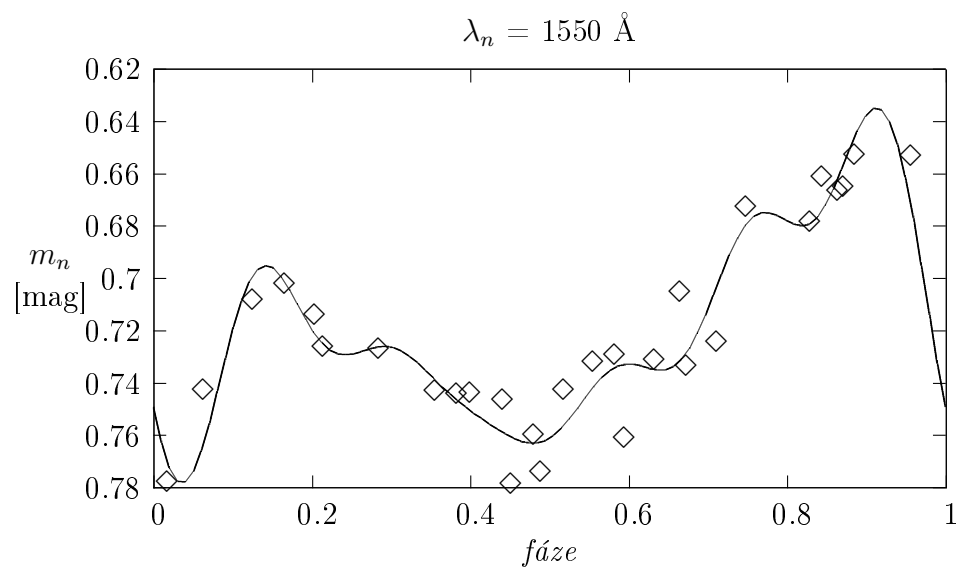
Obrázek 2.8: Světelná křivka pro $\lambda = 1400 \text{ \AA}$



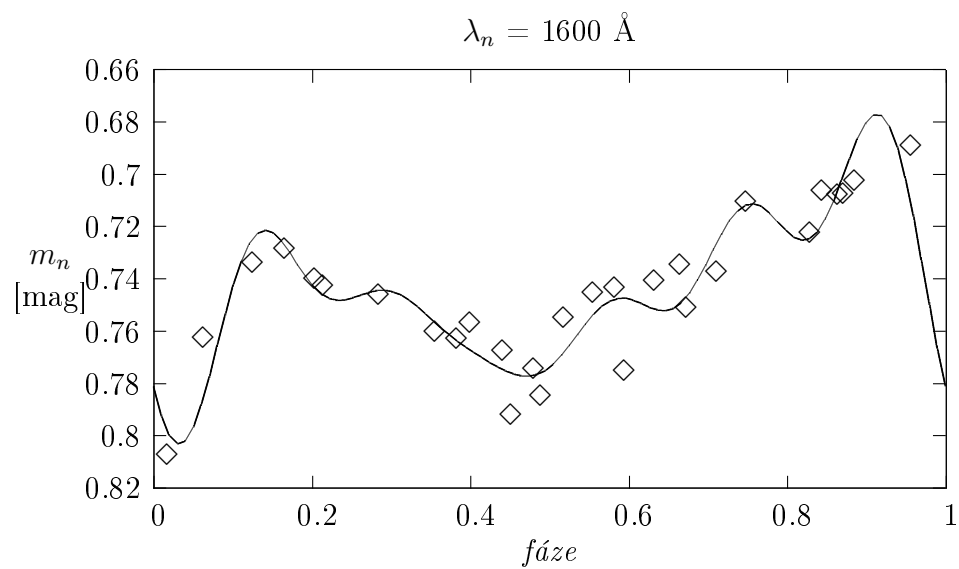
Obrázek 2.9: Světelná křivka pro $\lambda = 1450 \text{ \AA}$



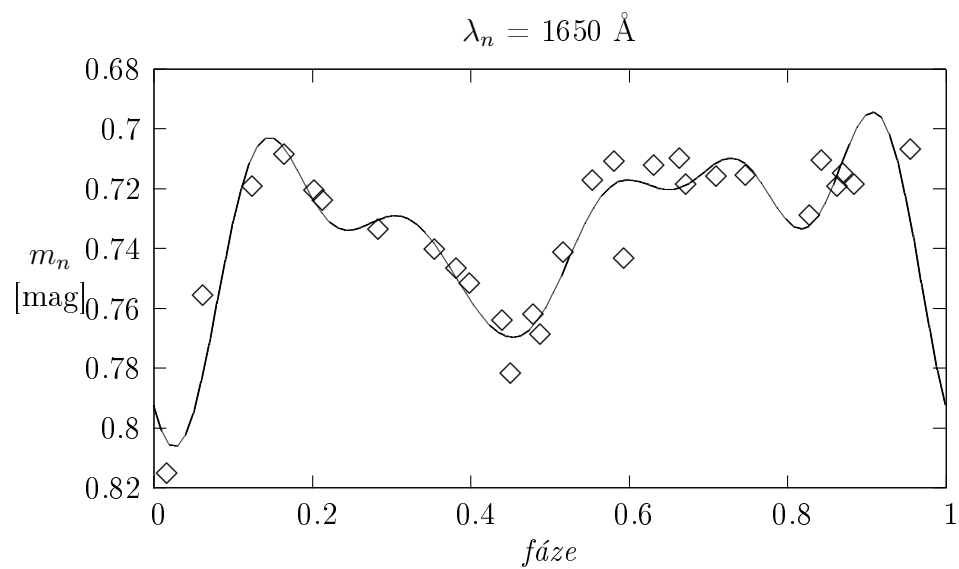
Obrázek 2.10: Světelná křivka pro $\lambda = 1500 \text{ \AA}$



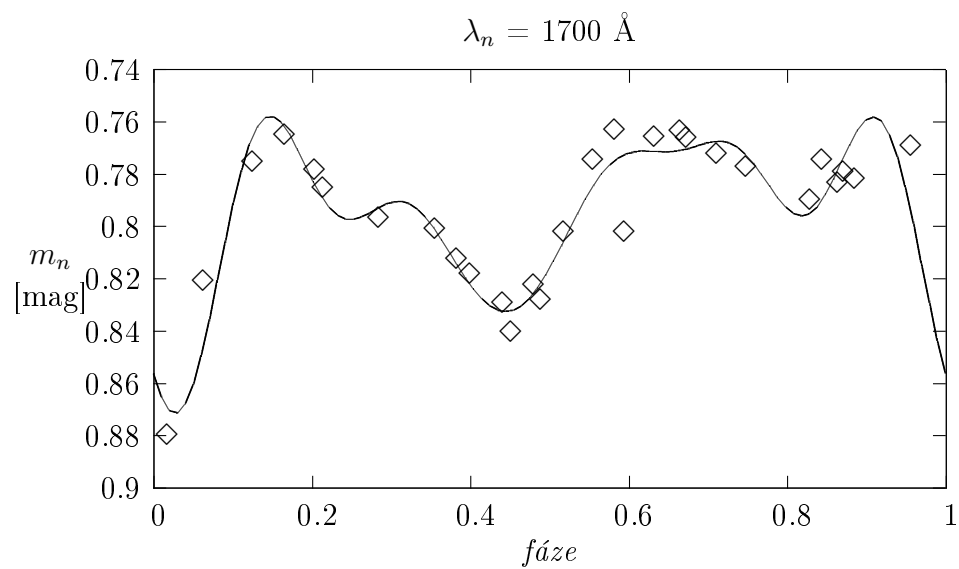
Obrázek 2.11: Světelná křivka pro $\lambda = 1550 \text{ \AA}$



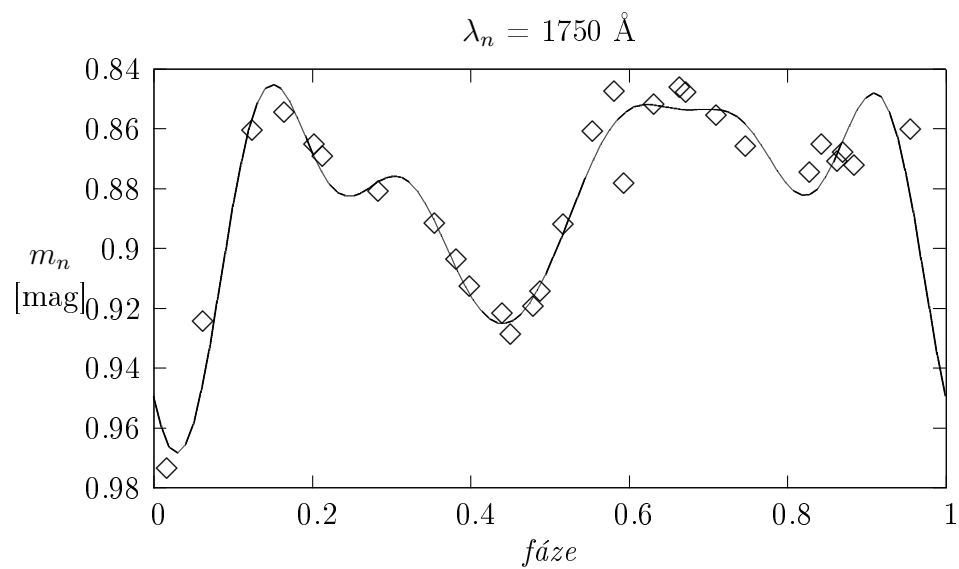
Obrázek 2.12: Světelná křivka pro $\lambda = 1600 \text{ \AA}$



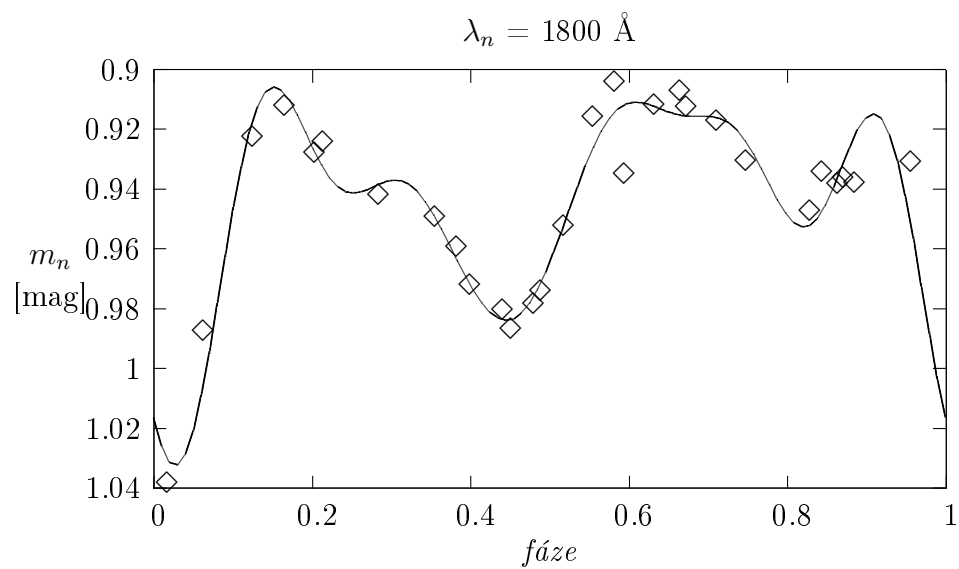
Obrázek 2.13: Světelná křivka pro $\lambda = 1650 \text{ \AA}$



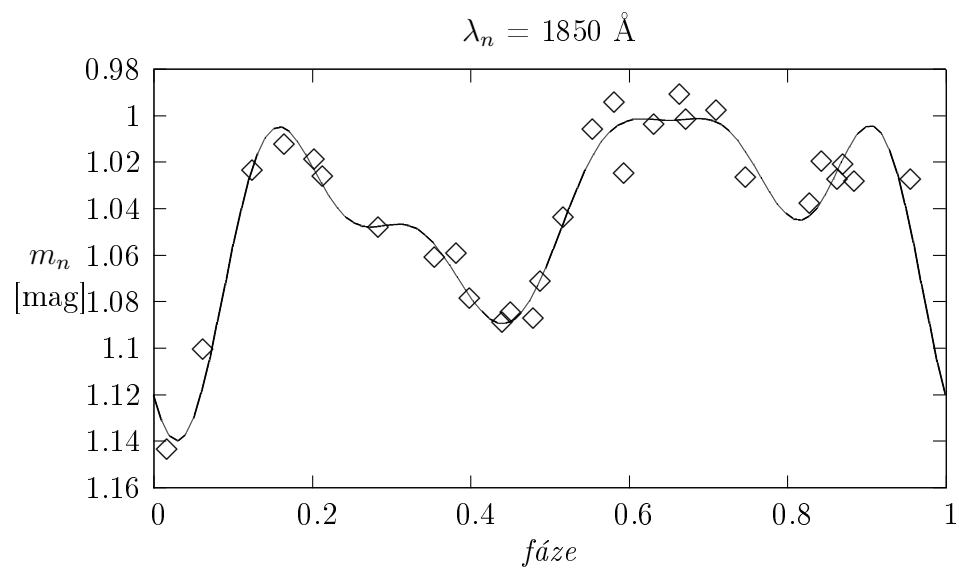
Obrázek 2.14: Světelná křivka pro $\lambda = 1700 \text{ \AA}$



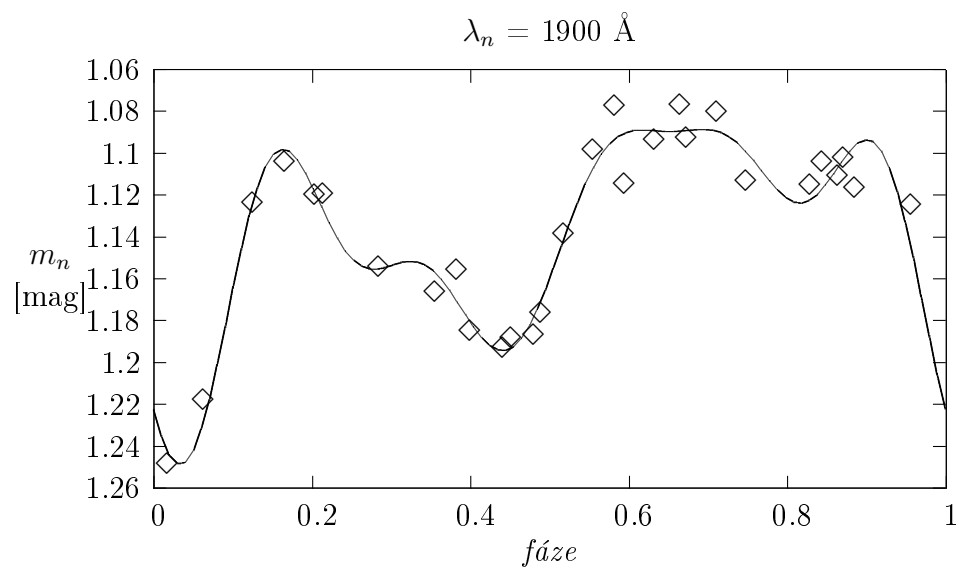
Obrázek 2.15: Světelná křivka pro $\lambda = 1750 \text{ \AA}$



Obrázek 2.16: Světelná křivka pro $\lambda = 1800 \text{ \AA}$



Obrázek 2.17: Světelná křivka pro $\lambda = 1850 \text{ \AA}$



Obrázek 2.18: Světelná křivka pro $\lambda = 1900 \text{ \AA}$

Kapitola 3

Závěr

Stanovili jsme světelnou křivku hvězdy σ Ori E pro 14 různých vlnových délek v ultrafialové oblasti spektra. Vycházeli jsme ze spekter pořízených družicí IUE v letech 1979–1981. Z asi 60 spekter, která byla původně k dispozici jsme museli některá vyřadit z různých důvodů. Na přístroji se během pozorování zřejmě projevila dlouhodobá změna parametrů detektoru, vstupní data bylo nutné kalibrovat. Po provedení této kalibrace se znatelně zvýšila kvalita výsledků. Nejméně kvalitní světelné křivky jsou v oblasti 1400–1600 Å, kde se výrazněji projevuje rozptyl hodnot, způsobený zejména novější sérií použitých dat.

Získané křivky mají tvar připomínající světelnou křivku zákrytové dvojhvězdy. Jsou na ní dobře patrná dvě minima, vzdálená od sebe přibližně o 0,4 periody. Základní minimum se zdá být v čase mírně posunuto – nastává o něco později, než udává efemerida uvedená ve článku [19]. To by mohlo znamenat nepřesnost v původním stanovení efemeridy. Bohužel vzhledem k omezenému množství dat zejména právě v oblasti základního minima není možné stanovit jeho polohu s dostatečnou přesností.

Nicméně tvar křivky v základních rysech dobře odpovídá tvaru předpovězenému modelem RRM i světelnými křivkami v jiných oblastech spektra (viz grafy 1.1 a 1.2). Vzájemná časová vzdálenost obou minim se poměrně dobře shoduje, stejně jako jejich průběh.

Tvar světelné křivky zjevně příliš nezávisí na vlnové délce. Ve zkoumaném rozmezí vlnových délek si světelná křivka v základních rysech udržuje svůj tvar, kromě oblasti 1400–1600 Å. Tam se projevil větší rozptyl hodnot, je ale možné že se v této části spektra projevuje ještě další zdroj proměnnosti. Celkový zářivý tok směrem k delším vlnovým délkám klesá.

Pokles janoosti se zřejmě projevuje na všech vlnových délkách přibližně stejně v celém kontinuu zkoumaného spektra, příčinou proměnnosti tedy může být absorpce a rozptyl záření při průchodu okolohvězdnou látkou, spojený s volně-volnými nebo volně-vázanými procesy. Výsledek práce je tedy v dobré shodě s modelem RRM publikovaným v článku Townsenda a Owockého [5]

Práce se zabývá zpracováním dat, pořízených v době, ze které máme nedostatečné množství pozorování v optickém oboru. Získané výsledky by tak mohly nahradit pozorování v optickém oboru a přispět ke zpřesnění informací o hvězdě. σ Ori E je velmi zajímavá hvězda, jejíž studium může přinést klíč k porozumění mnoha otázek spojených s pekuliárními hvězdami a horkými hvězdami vůbec. Další studium této hvězdy jistě přinese ještě mnoho významných poznatků.

PŘÍLOHA A - TABULKY KE SVĚTELNÝM KŘIVKÁM

Tabulka A1: Průběh toku záření Φ_n pro $\lambda = 1250 \text{ \AA}$

spektrum	HJD	fáze	Φ_n [erg cm ⁻² s ⁻¹ Å ⁻¹]
sp15774	2444955.62198	0.017	1.970e-10
sp07560	2444243.57682	0.061	1.986e-10
sp15778	2444955.74943	0.124	2.270e-10
sp15780	2444955.79736	0.164	2.292e-10
sp15782	2444955.84266	0.202	2.313e-10
sp07607	2444247.32948	0.213	2.229e-10
sp07609	2444247.41321	0.283	2.228e-10
sp07534	2444241.54377	0.354	2.183e-10
sp07583	2444245.14875	0.382	2.105e-10
sp15751	2444953.69539	0.399	2.218e-10
sp15753	2444953.74406	0.440	2.184e-10
sp07536	2444241.65851	0.451	2.029e-10
sp15755	2444953.78986	0.478	2.138e-10
sp07537	2444241.70192	0.487	2.058e-10
sp15757	2444953.83521	0.516	2.194e-10
sp15759	2444953.87999	0.554	2.308e-10
sp07587	2444245.38616	0.581	2.227e-10
sp04840	2443966.74431	0.585	2.214e-10
sp15811	2444958.68993	0.593	2.291e-10
sp15813	2444958.73566	0.632	2.283e-10
sp07589	2444245.48406	0.663	2.222e-10
sp15815	2444958.78326	0.672	2.243e-10
sp15817	2444958.82866	0.710	2.263e-10
sp07553	2444243.20151	0.746	2.220e-10
sp07555	2444243.29817	0.827	2.236e-10
sp15785	2444956.60577	0.843	2.288e-10
sp15786	2444956.62910	0.863	2.302e-10
sp07556	2444243.34808	0.869	2.237e-10
sp15787	2444956.65488	0.884	2.320e-10
sp07558	2444243.45009	0.955	2.203e-10

Tabulka A2: Zkalibrovaný průběh toku záření pro $\lambda = 1250 \text{ \AA}$

spektrum	HJD	fáze	F_n [erg cm ⁻² s ⁻¹ Å ⁻¹]
sp15774	2444955.62198	0.017	1.890e-10
sp07560	2444243.57682	0.061	1.986e-10
sp15778	2444955.74943	0.124	2.178e-10
sp15780	2444955.79736	0.164	2.199e-10
sp15782	2444955.84266	0.202	2.219e-10
sp07607	2444247.32948	0.213	2.229e-10
sp07609	2444247.41321	0.283	2.228e-10
sp07534	2444241.54377	0.354	2.183e-10
sp07583	2444245.14875	0.382	2.105e-10
sp15751	2444953.69539	0.399	2.128e-10
sp15753	2444953.74406	0.440	2.096e-10
sp07536	2444241.65851	0.451	2.029e-10
sp15755	2444953.78986	0.478	2.052e-10
sp07537	2444241.70192	0.487	2.058e-10
sp15757	2444953.83521	0.516	2.105e-10
sp15759	2444953.87999	0.554	2.214e-10
sp07587	2444245.38616	0.581	2.227e-10
sp04840	2443966.74431	0.586	2.214e-10
sp15811	2444958.68993	0.593	2.198e-10
sp15813	2444958.73566	0.632	2.190e-10
sp07589	2444245.48406	0.663	2.222e-10
sp15815	2444958.78326	0.672	2.152e-10
sp15817	2444958.82866	0.710	2.171e-10
sp07553	2444243.20151	0.746	2.220e-10
sp07555	2444243.29817	0.827	2.237e-10
sp15785	2444956.60577	0.843	2.195e-10
sp15786	2444956.62910	0.863	2.208e-10
sp07556	2444243.34808	0.869	2.237e-10
sp15787	2444956.65488	0.884	2.226e-10
sp07558	2444243.45009	0.955	2.203e-10

Tabulka A3: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1250$ a 1300 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1250 \AA)	m [mag] (1300 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.308	0.266
sp07560	2444243.57682	0.061	0.254	0.209
sp15778	2444955.74943	0.124	0.154	0.140
sp15780	2444955.79736	0.164	0.144	0.122
sp15782	2444955.84266	0.202	0.134	0.114
sp07607	2444247.32948	0.213	0.129	0.115
sp07609	2444247.41321	0.283	0.129	0.130
sp07534	2444241.54377	0.354	0.152	0.135
sp07583	2444245.14875	0.382	0.191	0.168
sp15751	2444953.69539	0.399	0.179	0.151
sp15753	2444953.74406	0.440	0.196	0.161
sp07536	2444241.65851	0.451	0.231	0.194
sp15755	2444953.78986	0.478	0.219	0.183
sp07537	2444241.70192	0.487	0.216	0.180
sp15757	2444953.83521	0.516	0.191	0.163
sp15759	2444953.87999	0.554	0.136	0.132
sp07587	2444245.38616	0.581	0.130	0.138
sp04840	2443966.74431	0.586	0.136	0.164
sp15811	2444958.68993	0.593	0.144	0.140
sp15813	2444958.73566	0.632	0.148	0.142
sp07589	2444245.48406	0.663	0.132	0.129
sp15815	2444958.78326	0.672	0.167	0.157
sp15817	2444958.82866	0.710	0.158	0.154
sp07553	2444243.20151	0.746	0.133	0.121
sp07555	2444243.29817	0.827	0.125	0.116
sp15785	2444956.60577	0.843	0.146	0.132
sp15786	2444956.62910	0.863	0.139	0.132
sp07556	2444243.34808	0.869	0.125	0.123
sp15787	2444956.65488	0.884	0.131	0.124
sp07558	2444243.45009	0.955	0.142	0.127

Tabulka A4: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1350$ a 1400 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1350 \AA)	m [mag] (1400 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.334	0.445
sp07560	2444243.57682	0.061	0.281	0.393
sp15778	2444955.74943	0.124	0.220	0.357
sp15780	2444955.79736	0.164	0.205	0.345
sp15782	2444955.84266	0.202	0.200	0.347
sp07607	2444247.32948	0.213	0.202	0.343
sp07609	2444247.41321	0.283	0.207	0.344
sp07534	2444241.54377	0.354	0.219	0.371
sp07583	2444245.14875	0.382	0.255	0.384
sp15751	2444953.69539	0.399	0.228	0.368
sp15753	2444953.74406	0.440	0.243	0.375
sp07536	2444241.65851	0.451	0.262	0.415
sp15755	2444953.78986	0.478	0.263	0.397
sp07537	2444241.70192	0.487	0.254	0.414
sp15757	2444953.83521	0.516	0.240	0.389
sp15759	2444953.87999	0.554	0.217	0.367
sp07587	2444245.38616	0.581	0.218	0.364
sp04840	2443966.74431	0.586	0.248	0.367
sp15811	2444958.68993	0.593	0.230	0.390
sp15813	2444958.73566	0.632	0.238	0.389
sp07589	2444245.48406	0.663	0.220	0.356
sp15815	2444958.78326	0.672	0.237	0.385
sp15817	2444958.82866	0.710	0.245	0.387
sp07553	2444243.20151	0.746	0.212	0.337
sp07555	2444243.29817	0.827	0.212	0.328
sp15785	2444956.60577	0.843	0.218	0.325
sp15786	2444956.62910	0.863	0.212	0.315
sp07556	2444243.34808	0.869	0.212	0.321
sp15787	2444956.65488	0.884	0.207	0.307
sp07558	2444243.45009	0.955	0.217	0.319

Tabulka A5: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1450$ a 1500 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1450 \AA)	m [mag] (1500 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.492	0.627
sp07560	2444243.57682	0.061	0.439	0.582
sp15778	2444955.74943	0.124	0.401	0.544
sp15780	2444955.79736	0.164	0.392	0.539
sp15782	2444955.84266	0.202	0.393	0.541
sp07607	2444247.32948	0.213	0.398	0.559
sp07609	2444247.41321	0.283	0.393	0.550
sp07534	2444241.54377	0.354	0.416	0.572
sp07583	2444245.14875	0.382	0.413	0.558
sp15751	2444953.69539	0.399	0.415	0.568
sp15753	2444953.74406	0.440	0.415	0.567
sp07536	2444241.65851	0.451	0.450	0.595
sp15755	2444953.78986	0.478	0.435	0.586
sp07537	2444241.70192	0.487	0.448	0.597
sp15757	2444953.83521	0.516	0.424	0.575
sp15759	2444953.87999	0.554	0.413	0.569
sp07587	2444245.38616	0.581	0.408	0.562
sp04840	2443966.74431	0.586	0.414	0.566
sp15811	2444958.68993	0.593	0.432	0.590
sp15813	2444958.73566	0.632	0.427	0.573
sp07589	2444245.48406	0.663	0.407	0.555
sp15815	2444958.78326	0.672	0.434	0.580
sp15817	2444958.82866	0.710	0.435	0.582
sp07553	2444243.20151	0.746	0.398	0.541
sp07555	2444243.29817	0.827	0.398	0.547
sp15785	2444956.60577	0.843	0.391	0.531
sp15786	2444956.62910	0.863	0.389	0.530
sp07556	2444243.34808	0.869	0.392	0.534
sp15787	2444956.65488	0.884	0.378	0.519
sp07558	2444243.45009	0.955	0.384	0.523

Tabulka A6: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1550$ a 1600 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1550 \AA)	m [mag] (1600 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.778	0.807
sp07560	2444243.57682	0.061	0.742	0.762
sp15778	2444955.74943	0.124	0.708	0.734
sp15780	2444955.79736	0.164	0.702	0.728
sp15782	2444955.84266	0.202	0.714	0.740
sp07607	2444247.32948	0.213	0.726	0.743
sp07609	2444247.41321	0.283	0.727	0.746
sp07534	2444241.54377	0.354	0.743	0.760
sp07583	2444245.14875	0.382	0.744	0.763
sp15751	2444953.69539	0.399	0.744	0.757
sp15753	2444953.74406	0.440	0.746	0.767
sp07536	2444241.65851	0.451	0.778	0.792
sp15755	2444953.78986	0.478	0.760	0.774
sp07537	2444241.70192	0.487	0.774	0.784
sp15757	2444953.83521	0.516	0.743	0.755
sp15759	2444953.87999	0.554	0.731	0.745
sp07587	2444245.38616	0.581	0.729	0.743
sp04840	2443966.74431	0.586	0.730	0.750
sp15811	2444958.68993	0.593	0.761	0.775
sp15813	2444958.73566	0.632	0.731	0.741
sp07589	2444245.48406	0.663	0.705	0.734
sp15815	2444958.78326	0.672	0.733	0.751
sp15817	2444958.82866	0.710	0.724	0.737
sp07553	2444243.20151	0.746	0.672	0.710
sp07555	2444243.29817	0.827	0.678	0.722
sp15785	2444956.60577	0.843	0.661	0.706
sp15786	2444956.62910	0.863	0.666	0.708
sp07556	2444243.34808	0.869	0.665	0.707
sp15787	2444956.65488	0.884	0.653	0.702
sp07558	2444243.45009	0.955	0.653	0.689

Tabulka A7: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1650$ a 1700 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1650 \AA)	m [mag] (1700 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.815	0.880
sp07560	2444243.57682	0.061	0.755	0.820
sp15778	2444955.74943	0.124	0.719	0.775
sp15780	2444955.79736	0.164	0.708	0.765
sp15782	2444955.84266	0.202	0.720	0.778
sp07607	2444247.32948	0.213	0.724	0.785
sp07609	2444247.41321	0.283	0.733	0.797
sp07534	2444241.54377	0.354	0.740	0.801
sp07583	2444245.14875	0.382	0.747	0.812
sp15751	2444953.69539	0.399	0.752	0.818
sp15753	2444953.74406	0.440	0.764	0.829
sp07536	2444241.65851	0.451	0.782	0.840
sp15755	2444953.78986	0.478	0.762	0.822
sp07537	2444241.70192	0.487	0.768	0.828
sp15757	2444953.83521	0.516	0.741	0.802
sp15759	2444953.87999	0.554	0.717	0.775
sp07587	2444245.38616	0.581	0.711	0.763
sp04840	2443966.74431	0.586	0.728	0.788
sp15811	2444958.68993	0.593	0.743	0.802
sp15813	2444958.73566	0.632	0.712	0.766
sp07589	2444245.48406	0.663	0.710	0.763
sp15815	2444958.78326	0.672	0.718	0.766
sp15817	2444958.82866	0.710	0.716	0.772
sp07553	2444243.20151	0.746	0.716	0.777
sp07555	2444243.29817	0.827	0.729	0.790
sp15785	2444956.60577	0.843	0.711	0.774
sp15786	2444956.62910	0.863	0.719	0.783
sp07556	2444243.34808	0.869	0.715	0.779
sp15787	2444956.65488	0.884	0.718	0.782
sp07558	2444243.45009	0.955	0.707	0.769

Tabulka A8: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1750$ a 1800 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1750 \AA)	m [mag] (1800 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	0.974	1.038
sp07560	2444243.57682	0.061	0.924	0.987
sp15778	2444955.74943	0.124	0.860	0.922
sp15780	2444955.79736	0.164	0.854	0.912
sp15782	2444955.84266	0.202	0.865	0.928
sp07607	2444247.32948	0.213	0.869	0.924
sp07609	2444247.41321	0.283	0.881	0.942
sp07534	2444241.54377	0.354	0.891	0.949
sp07583	2444245.14875	0.382	0.903	0.959
sp15751	2444953.69539	0.399	0.913	0.972
sp15753	2444953.74406	0.440	0.922	0.980
sp07536	2444241.65851	0.451	0.929	0.987
sp15755	2444953.78986	0.478	0.919	0.978
sp07537	2444241.70192	0.487	0.914	0.974
sp15757	2444953.83521	0.516	0.892	0.952
sp15759	2444953.87999	0.554	0.861	0.916
sp07587	2444245.38616	0.581	0.847	0.904
sp04840	2443966.74431	0.586	0.872	0.934
sp15811	2444958.68993	0.593	0.878	0.935
sp15813	2444958.73566	0.632	0.852	0.912
sp07589	2444245.48406	0.663	0.846	0.907
sp15815	2444958.78326	0.672	0.848	0.912
sp15817	2444958.82866	0.710	0.855	0.917
sp07553	2444243.20151	0.746	0.866	0.930
sp07555	2444243.29817	0.827	0.875	0.947
sp15785	2444956.60577	0.843	0.865	0.934
sp15786	2444956.62910	0.863	0.871	0.938
sp07556	2444243.34808	0.869	0.868	0.936
sp15787	2444956.65488	0.884	0.872	0.938
sp07558	2444243.45009	0.955	0.860	0.931

Tabulka A9: Světelná křivka σ Ori E pro $\lambda = 1850$ a 1900 \AA

soubor	HJD	fáze	m [mag] (1850 \AA)	m [mag] (1900 \AA)
sp15774	2444955.62198	0.017	1.144	1.248
sp07560	2444243.57682	0.061	1.101	1.218
sp15778	2444955.74943	0.124	1.024	1.124
sp15780	2444955.79736	0.164	1.013	1.104
sp15782	2444955.84266	0.202	1.019	1.120
sp07607	2444247.32948	0.213	1.026	1.119
sp07609	2444247.41321	0.283	1.048	1.154
sp07534	2444241.54377	0.354	1.061	1.166
sp07583	2444245.14875	0.382	1.059	1.156
sp15751	2444953.69539	0.399	1.079	1.185
sp15753	2444953.74406	0.440	1.089	1.193
sp07536	2444241.65851	0.451	1.085	1.188
sp15755	2444953.78986	0.478	1.087	1.187
sp07537	2444241.70192	0.487	1.071	1.176
sp15757	2444953.83521	0.516	1.044	1.139
sp15759	2444953.87999	0.554	1.006	1.098
sp07587	2444245.38616	0.581	0.994	1.077
sp04840	2443966.74431	0.586	1.0183	1.105
sp15811	2444958.68993	0.593	1.025	1.115
sp15813	2444958.73566	0.632	1.004	1.094
sp07589	2444245.48406	0.663	0.991	1.077
sp15815	2444958.78326	0.672	1.002	1.093
sp15817	2444958.82866	0.710	0.998	1.080
sp07553	2444243.20151	0.746	1.027	1.113
sp07555	2444243.29817	0.827	1.038	1.115
sp15785	2444956.60577	0.843	1.020	1.104
sp15786	2444956.62910	0.863	1.028	1.111
sp07556	2444243.34808	0.869	1.021	1.102
sp15787	2444956.65488	0.884	1.029	1.116
sp07558	2444243.45009	0.955	1.027	1.125

PŘÍLOHA B - KOEFICIENTY PROLOŽENÍ KŘIVEK

Tabulka B1: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1250 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1300 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	0.33117		0.29883	
1	0.01001	0.01222	0.00752	0.00590
2	0.04478	0.00835	0.03405	0.00787
3	0.01536	0.03158	0.01665	0.02110
4	0.01887	0.00693	0.01430	0.00837
5	0.00717	0.02072	0.00459	0.01633
6	0.01169	0.01062	0.00867	0.00860

Tabulka B2: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1350 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1400 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	0.46455		0.72743	
1	0.00635	0.00041	-0.01332	0.00725
2	0.02823	0.00679	0.02402	0.01654
3	0.01568	0.01889	0.01434	0.01816
4	0.01227	0.00667	0.01241	0.00684
5	0.00682	0.01315	0.00724	0.01138
6	0.00848	0.00650	0.01161	0.00629

Tabulka B3: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1450 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1500 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	0.82796		1.12294	
1	-0.00380	-0.00030	-0.01043	0.00345
2	0.01913	0.01051	0.01583	0.01121
3	0.01238	0.01419	0.01146	0.01134
4	0.01201	0.00642	0.01234	0.00803
5	0.00713	0.01095	0.00697	0.01111
6	0.00962	0.00593	0.00823	0.00610

Tabulka B4: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1550 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1600 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	1.43727		1.48705	
1	-0.02526	0.02245	-0.01423	0.01583
2	0.01875	0.01540	0.01653	0.00927
3	0.01195	0.01247	0.00933	0.01200
4	0.01079	0.00898	0.00993	0.00864
5	0.00742	0.01517	0.00858	0.01415
6	0.00689	0.00651	0.00745	0.00517

Tabulka B5: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1650 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1700 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	1.46946		1.59031	
1	0.00014	0.01057	0.00210	0.01200
2	0.02070	-0.00340	0.02175	-0.00730
3	0.00809	0.01369	0.00803	0.01456
4	0.01429	0.00725	0.01551	0.00837
5	0.00933	0.01389	0.00994	0.01459
6	0.00520	0.00319	0.00363	0.00392

Tabulka B6: Koeficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1750 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1800 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	1.76704		1.89096	
1	0.00437	0.01383	0.00846	0.01051
2	0.02536	-0.00864	0.02471	-0.01080
3	0.00807	0.01754	0.00807	0.01780
4	0.01570	0.00874	0.01632	0.00891
5	0.00937	0.01536	0.00933	0.01549
6	0.00300	0.00532	0.00402	0.00390

Tabulka B7: Koefficienty proložení a_i a b_i

i	$\lambda_n = 1850 \text{ \AA}$		$\lambda_n = 1900 \text{ \AA}$	
	a_i	b_i	a_i	b_i
0	2.08713		2.27825	
1	0.00967	0.01964	0.01026	0.03030
2	0.02685	-0.01230	0.03159	-0.01201
3	0.01038	0.02156	0.01406	0.02408
4	0.01745	0.01167	0.01907	0.01267
5	0.00930	0.01640	0.00688	0.01888
6	0.00301	0.00183	0.00144	0.00146

Literatura

- [1] Mikulášek Z., Krτίčka J.: *Fyzika horkých hvězd*, Brno (2008)
- [2] Schnell A.: 2008, *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **38** 87–92
- [3] Preston, G. W.: 1974, *ARAA* **12** 257
- [4] Krτίčka J., Mikulášek Z., Zverko J., Žižňovský J.: *A&A* **470** 1089–1099
- [5] Townsend R. H. D., Owocki S. P.: 2005, *MNRAS* **357** 251–264
- [6] Bouy H., Huélamo N., Martín E. L. a kol.: 2009, *A&A* **493** 931–942
- [7] Walborn, N. R.: 1973, *IAU Circ.*, No. 2612
- [8] Bolton, C. T.: 1974, *ApJ* **192** L7–L9
- [9] Hunger, K.: 1974, *A&A* **32** 449–451
- [10] Groote D., Hunger K.: 1977, *A&A* **56** 129–133
- [11] Landstreet, J. D., Borra, E. F.: 1978, *ApJ* **224** L5–L8
- [12] Groote D., Hunger K.: 1982 *A&A* **116** 64–74
- [13] Nakajima R.: 1985, *Ap&SS* **116** 285–297
- [14] Vetó B., Hempelmann A., Schoeneich W., Stahlberg, J.: 1991, *AN* **2**, 133–145
- [15] Oksala M., Townsend R. H. D.: astro-ph/0511454
- [16] *IUE (MAST)*, <http://archive.stsci.edu/iue/>
- [17] *A Study of the Wavelength Calibration of NEWSIPS High-Dispersion Spectra*, <http://archive.stsci.edu/iue/newsips/wavestudy/>

- [18] Полак, И. Ф.: Курс общей астрономии, Ленинград, Москва (1951)
- [19] Hesser J. E., Walborn N., Ugarte P.: 1976, *Nature* **262** 116–118
- [20] Mikulášek Z., Zverko J., Krtička J. a kol.: 2007, astro-ph/0703521
- [21] *gnuplot homepage*, <http://www.gnuplot.info>