MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta

ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY

Bakalářská práce

BRNO 2023

Adam Přadka

MASARYKOVA UNIVERZITA Přírodovědecká fakulta Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

UBVRI fotometrie otevřené hvězdokupy NGC 6811

Bakalářská práce

Adam Přadka

Vedoucí práce: RNDr. Jan Janík, Ph.D. Brno 2023

Bibliografický záznam

Autor:	Adam Přadka Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita Ústav teoretické fyziky a astrofyziky			
Název práce:	UBVRI fotometrie otevřené hvězdokupy NGC 6811			
Studijní program:	PřF B-FYZ Fyzika			
Studijní obor:	PřF ASTRO Astrofyzika			
Vedoucí práce:	RNDr. Jan Janík, Ph.D.			
Akademický rok:	2022/2023			
Počet stran:	ix + 43			
Klíčová slova:	Otevřená hvězdokupa; NGC 6811; CCD fotometrie; UBVRI fo- tometrie; Absolutní fotometrie; Barevný diagram; Mezihvězdná extinkce			

Bibliographic Entry

Author:	Adam Přadka Faculty of Science, Masaryk University Department of Theoretical Physics and Astrophysics
Title of Thesis:	UBVRI photometry of open cluster NGC 6811
Degree Programme:	PřF B-FYZ Physics
Field of Study:	PřF ASTRO Astrophysics
Supervisor:	RNDr. Jan Janík, Ph.D.
Academic Year:	2022/2023
Number of Pages:	ix + 43
Keywords:	Open cluster; NGC 6811; CCD photometry; UBVRI photo- metry; Absolute photometry; Colour diagram; Interstellar ex- tinction

Abstrakt

V této bakalářské práci se věnujeme studiu otevřené hvězdokupy NGC 6811 za pomocí absolutní CCD fotometrie ve filtrech *UBVRI*. Data byla pořízena v létě 2022 na polské observatoři Suhora. Po redukci o atmosférickou extinkci byly vytvořeny barevné diagramy ze 71 pravděpodobných členů hvězdokupy. Následně byla určena hodnota mezihvězdné extinkce, stáří, vzdálenosti a metalicity hvězdokupy. Nakonec byly výsledné parametry porovnány s předchozími studiemi a s daty pozorování družice Gaia.

Abstract

In this bachelor's thesis, we study the open star cluster NGC 6811 using absolute CCD photometry in *UBVRI* filters. The data were acquired in the summer of 2022 at the Suhora Observatory in Poland. After atmospheric extinction reduction, colour diagrams of 71 probable cluster members were created. Subsequently, the value of the interstellar extinction, age, distance and metallicity of the star cluster was determined. Finally, the resulting parameters were compared with previous studies and with Gaia satellite observation data.

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Akademický rok: 2022/2023

Ústav:	Ústav teoretické fyziky a astrofyziky		
Student:	Adam Přadka		
Program:	Fyzika		
Specializace:	Astrofyzika		

Ředitel ústavu PřF MU Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu MU určuje bakalářskou práci s názvem:

Název práce: UBVRI fotometrie otevřené hvězdokupy NGC 6811				
Název práce anglicky:	UBVRI photometry of open cluster NGC 6811			
Jazyk závěrečné práce: čeština				
Oficiální zadání: Student na základě vlas zjistí mezihvězdnou exi družice GAIA.	tních UBVRI pozorování sestrojí barevné diagramy hvězd otevřené hvězdokupy NGC 6811, nkci a její vzdálenost. Provede porování získaných výsledků s hodnotami z astrometrické			
Vedoucí práce:	RNDr. Jan Janík, Ph.D.			
Datum zadání práce:	3. 3. 2022			

Zadání bylo schváleno prostřednictvím IS MU.

2.1.2023

Adam Přadka, 14. 12. 2022 RNDr. Jan Janík, Ph.D., 15. 12. 2022 RNDr. Luboš Poláček, 16. 12. 2022

V Brně dne:

Poděkování

Chtěl bych velice poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D. za věnovaný čas, trpělivost a odborné rady při zpracování dat a psaní této práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s využitím informačních zdrojů, které jsou v práci citovány.

Brno 2. ledna 2023

Adam Přadka

Obsah

Ú	vod		1
1	Hvě	zdokupy	2
	1.1	Historie pozorování	2
	1.2	Dělení hvězdokup	3
	1.3	Otevřené hvězdokupy	4
	1.4	Vznik otevřených hvězdokup	5
2	\mathbf{HR}	diagram	7
	2.1	Historie HR diagramu	7
	2.2	Spektrální klasifikace	7
	2.3	Popis HR diagramu	8
	2.4	Pozdní vývoj hvězd na HR diagramu	11
	2.5	Barevný diagram	13
	2.6	Otevřené hvězdokupy na HR diagramu	14
3	Fot	ometrie	16
	3.1	Historie fotometrie	16
	3.2	Atmosférická extinkce	16
	3.3	Absolutní a diferenciální fotometrie	17
	3.4	Aperturní a profilová fotometrie	18
	3.5	Fotometrické systémy	18
	3.6	CCD	19
4	Hvě	ézdokupa NGC 6811	21
5	Měi	ření a zpracování dat	23
	5.1	Standardní hvězdy	23
	5.2	Zpracování snímků hvězdokupy	23
	5.3	Absolutní fotometrie	26
	5.4	Mezihvězdná extinkce	27
		5.4.1 Určení mezihvězdné extinkce z naměřených $UBVRI$ dat	27

		5.4.2	Srovnání barevného excesu s předchozími studiemi	28
	5.5	Barevi	né diagramy	29
		5.5.1	Hledání vzdálenosti, stáří a metalicity hvězdokupy NGC 6811 $\ \ldots$.	29
	5.6	Diskuz	æ a srovnání výsledků s předchozími studiemi	32
Zá	věr			33
Po	užita	á litera	itura	34
A	Tab	ulka zi	skané absolutní fotometrie	40
В	B Fotometrie zákrytové dvojhvězdy V* V648 Lyr			42

Úvod

Pozorování hvězdné oblohy se lidská civilizace věnovala již od pradávna. S postupem času se rozvíjely metody, které nám pomohly pozorovat hvězdy detailněji, a dokonce jsme díky nim byli schopni porozumět principu jejich existence. Jednou z těchto metod je pozorování otevřených hvězdokup, což jsou skupiny gravitačně vázaných hvězd se srovnatelnou vzdáleností od Země. Právě tato metoda je uplatněna v této bakalářské práci, kde za pomocí UBVRI fotometrie studujeme otevřenou hvězdokupu NGC 6811.

V první kapitole se věnujeme samotným hvězdokupám. Nejdříve je přiblížena historie jejich pozorování od pravěku až do moderní doby, obsahující nejdůležitější průlomové objevy. Dále je definován rozdíl mezi otevřenými a kulovými hvězdokupami. Nakonec kapitola blíže zkoumá vznik a charakteristiku otevřených hvězdokup.

Druhá kapitola se zabývá HR diagramem, což je důležitý nástroj pro studium nejenom otevřených hvězdokup. Věnujeme se zde jeho historii i popisu a jeho využití pro získání cenných výsledků z dat pozorovaných hvězdokup. V této kapitole je dále stručně popsán vývoj hvězd od začátku do konce jejich života, což je důležité právě pro pochopení užitečnosti HR diagramu.

Ve třetí kapitole je přiblížena funkce fotometrie, a to od vlivu atmosférické extinkce na získaná data přes rozdělení fotometrických systémů až po fungování samotných CCD čipů, díky kterým dnes můžeme fotometrii provádět. Ve čtvrté kapitole se pak detailněji věnujeme samotné hvězdokupě NGC 6811, její poloze a jasnosti na obloze a minulým studiím zabývajících se touto hvězdokupou.

V poslední páté kapitole přecházíme od teoretické části k praktickému vyhodnocení dat. Je zde popsáno získání fotometrických snímků z polské observatoře Suhora a jejich následné zpracování a redukce o atmosférickou extinkci. Z dat je následně určena hodnota mezihvězdné extinkce. Nakonec jsou sestrojeny barevné diagramy a za pomocí teoretických izochron určena vzdálenost, stáří a metalicita hvězdokupy NGC 6811. Výsledné parametry jsou pak srovnány s předchozími studiemi a s astrometrickými daty z družice Gaia.

Kapitola 1

Hvězdokupy

1.1 Historie pozorování

Lidé pozorovali hvězdy a s nimi i hvězdokupy již od pravěku. Prvním záznamem pozorování hvězdokup je pravděpodobně nástěnná malba Plejád (M45) v jeskyni Lascaux v jihozápadní Francii (obr. 1.1). Malby z této jeskyně jsou datované mezi roky 15 000 a 13 000 př. n. l. (Rappenglück, 1997). Plejády jsou tam vyobrazené nad kresbou zubra, ze kterého se později vyvinulo souhvězdí Býka. Další známý záznam Plejád můžeme najít na disku z Nebry pocházejícího patrně z 16. století př. n. l. Plejády a další dobře viditelné hvězdokupy byly známé v mnoha dalších starověkých civilizacích, včetně keltské, babylonské a řecké.



Obrázek 1.1: Nástěnná malba plejád v jeskyni Lascaux. Plejády lze nalézt uprostřed obrázku, nad hlavou zubra. Zdroj: [E1].

První astronomický katalog sepsal ve 2. století př. n. l. řecký astronom Hipparchos. V katalogu je mimo jiné zapsána i hvězdokupa Jesličky (M44) a Dvojitá hvězdokpa. Na Hipparcha později navázal Ptolemaios, který kolem roku 150 n. l. uvádí v *Almagestu* hvězdokupy M7 a Melotte 111 (Peiresc et al., 2007). V roce 964 publikoval perský astronom Abd al-Rahman al-Sufi knihu o astronomii, kde zmiňuje hvězdokupu Omikron Velorum (Zejda et al., 2013). Po vynálezu dalekohledu v roce 1608 bylo možné pozorovat hvězdokupy detailněji a dokonce v nich rozeznat jednotlivé hvězdy. Toho využil Galileo Galilei a v roce 1610 publikoval práci *Sidereus Nuncius*, ve které uvedl nákres Plejád s 36 hvězdami. Pomocí dalekohledu Galileo dále odhalil i nové hvězdokupy dříve identifikované Ptolemaiem jako skvrny (Zejda et al., 2013). Galileem se později inspiroval sicilský astronom Giovanni Battista Hodierna, který v roce 1654 objevil mnoho nových objektů včetně otevřených hvězdokup M36, M37, M38 a M41 (Peiresc et al., 2007).

Anglický vědec John Mitchell v roce 1767 jako první odhadnul, že hvězdokupy nejsou pouze náhodná uskupení hvězd, ale jsou pravděpodobně gravitačně propojené (Michell, 1767). O několik let později v roce 1771 vydal Charles Messier astronomický katalog objektů hlubokého vesmíru. První vydání Messierova katalogu obsahovalo pouze 45 objektů, ale v pozdějších vydáních katalogu vzrostl počet objektů až na 110. V katalogu zaznamenal desítky nových objektů hlubokého vesmíru jako galaxie, mlhoviny a hvězdokupy (například M2 a M3) ([E2]).

Dalším významným objevitelem hvězdokup byl William Herschel, který v letech 1782 až 1802 publikoval několik katalogů objevených hvězdokup a mlhovin. V práci pak pokračoval jeho syn John Herschel, který v roce 1829 objevil hvězdokupu NGC 6811. V roce 1864 publikoval Obecný katalog mlhovin a hvězdokup (*Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*), který obsahoval přes pět tisíc objektů (Tenn, 2013).

Na konci 19. století se začaly rozlišovat dva typy hvězdokup, kulové a otevřené hvězdokupy. Kulové hvězdokupy byly sférického tvaru a obsahovaly tisíce hvězd. Bylo možné je pozorovat kdekoliv na obloze, ale největší koncentraci měly poblíž galaktické roviny, přímo na galaktické rovině se však nevyskytovaly (Shapley, 1918). Otevřené hvězdokupy byly naopak tvarem nepravidelné, obsahovaly menší počet hvězd a byly většinou pozorovatelné pouze kolem galaktické roviny.

V roce 1918 jako první změřil astronom Adriaan van Maanen vlastní pohyb hvězd ve hvězdokupě Plejády porovnáním fotografických desek pořízených v různých časech (Maanen, 1919). O několik let později porovnal desky pořízené v roce 1918 s deskami z roku 1943 a tím identifikoval, které hvězdy měly podobný vlastní pohyb a tedy pravděpodobně patřily do hvězdokupy Plejády (Maanen, 1945).

První barevný diagram otevřené hvězdokupy publikoval v roce 1911 Ejnar Hertzsprung, který vytvořil pro hvězdokupy Plejády a Hyády. Ukázal tím závislost mezi barvou hvězd a jejich absolutní magnitudou. Později si v roce 1929 všiml, že hvězdokupy Hyády a Jesličky mají jiné složení hvězd než Plejády, což vysvětlil jejich rozdílným stářím (Strand, 1977).

1.2 Dělení hvězdokup

Hvězdokupy jsou uskupení několika desítek až milionů hvězd, které vznikly přibližně ve stejné době a jsou vzájemně gravitačně vázané. Rozlišujeme dva základní typy, otevřené a kulové hvězdokupy. Kulové hvězdokupy mají většinou souměrný tvar koule, kde koncentrace hvězd

směrem k centru roste. Mohou obsahovat desetitisíce až miliony hvězd. Naopak otevřené hvězdokupy mají nepravidelný tvar a jsou zpravidla tvořeny jen desítkami až stovkami hvězd (Zejda et al., 2013). Od roku 1947 se také rozlišuje další typ hvězdokup, hvězdné asociace. V nich jsou hvězdy velice slabě gravitačně vázány, ale stále mají stejný věk a směr pohybu. Rozdíl mezi kulovou a otevřenou hvězdokupou můžeme vidět na obrázku 1.2 a 1.3.



Obrázek 1.2: Kulová hvězdokupa M80 Obr v souhvězdí Štíra. Zdroj: [E4]. (M4

M80 Obrázek 1.3: Otevřená hvězdokupa Plejády (M45) v souhvězdí Býka. Zdroj: [E5].

1.3 Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy jsou gravitačně vázané objekty obsahující desítky až tisíce hvězd. Obývají pouze relativně malý prostor, poměrně mnohem menší než je jejich vzdálenost od Země, a proto mají jejich hvězdy od nás přibližně stejnou vzdálenost. Vznikají ve velkých molekulových mračnech, a to i v dnešní době, takže jejich zrod můžeme stále pozorovat. Protože hvězdy pocházejí ze stejného mračna, mají taktéž při vzniku podobné chemické složení. Jednotlivé hvězdy se však liší v hmotnostech, které mohou být v rozmezí od zlomků až do několika stovek hmotností Slunce. V naší galaxii je zatím objeveno přes 3300 otevřených hvězdokup (Cantat-Gaudin et al., 2018), jejich skutečný počet je však pravděpodobně mnohem vyšší, některé odhady dosahují až ke sto tisícům (Frommert et al., 2007).

Protože otevřené hvězdokupy jsou obecně mladé útvary, jejich rozložení v Galaxii se podobá rozložení nejmladších hvězd. Většina se soustřeďuje kolem galaktické roviny, kde se nachází velké množství mezihvězdného prachu a tím pádem i mezihvězdné extinkce. To ztěžuje pozo-rování otevřených hvězdokup a určení jejich přesného rozložení v Galaxii. Z výzkumu ostatních spirálních galaxií však lze vyvodit, že otevřené hvězdokupy zhruba sledují rozložení jasu v galaxii s výjimkou, že se v centrálních částech tak často nevyskytují. Podle pozorování v okolí Slunce se navíc mladé otevřené hvězdokupy, na rozdíl od těch starých, přimykají více ke spirálním ramenům (Mikulášek et al., 2005).

Kvůli jejich nepravidelné struktuře a slabším gravitačním vazbám nejsou otevřené hvězdo-

5

kupy dlouhodobě stabilní. V okolí Slunce dokáže pouze polovina z nich vzdorovat slapovým silám déle než 200 milionů let a jen asi 2 % otevřených hvězdokup přežije více něž miliardu let (Mikulášek et al., 2005). Z toho důvodu je v dnešní době nacházíme pouze ve spirálních a nepravidelných galaxiích, kde se stále vytváří nové hvězdy. Například v eliptických galaxiích, ve kterých se už nové hvězdy netvoří, se všechny otevřené hvězdokupy již rozpadly [E6].

Protože všechny hvězdy v otevřené hvězdokupě mají přibližně stejný věk, můžeme určit jejich stáří srovnáním vývojového stavu jednotlivých členů s teoretickými modely sestrojenými pro stejný věk a počáteční chemické složení (blíže v kapitole 2). Vzhledem k tomu, že otevřené hvězdokupy patří k velmi mladým objektům v naší Galaxii, obsahují jejich hvězdy dvakrát až třikrát více těžkých prvků něž Slunce (Mikulášek et al., 2005).

1.4 Vznik otevřených hvězdokup

Otevřené hvězdokupy vznikají z obřích molekulárních mračen (GMC – giant molecular cloud). Molekulární mračno je typ mezihvězdného mračna, ve kterém se nachází převážně molekulární vodík (H₂). Dosahují hmotností přibližně od 10³ do 10⁷ M_{\odot} (Krause et al., 2020) a mají velice komplexní fraktální morfologie (Elmegreen et al., 1996). Mračna s hmotností nad 10⁴ M_{\odot} jsou pak klasifikována jako obří molekulová mračna, ve kterých je možný vznik hvězdokup.

Před kolapsem je obří molekulové mračno v rovnováze, která je udržována magnetickým polem, vnitřním pohybem částí mračna a rázovými vlnami. Tato rovnováha však může být narušena vnějšími jevy jako je například výbuch blízké supernovy, kolize s jiným mračnem nebo srážka dvou galaxií (Shu et al., 1987). Po narušení rovnováhy dochází ke kolapsu mračna, které se začne fragmentovat do menších a hustších shluků, ze kterých se později mohou vytvořit hvězdy. Protože ke vzniku hvězd dochází uvnitř mračna, které absorbuje většinu světla, je možné v této fázi pozorovat vznikající hvězdy pouze v infračervené oblasti (porovnání ve viditelném a infračerveném světle na obrázku 1.4 a 1.5).

Po vzniku prvních hvězd začne jejich hvězdný vítr a tlak záření odpuzovat zbývající plyn z molekulového mračna. O několik milionů let později dojde k prvním supernovám v mračnu, které toto vypuzování ještě urychlí. Do deseti milionů let je pak většina plynu z mračna pryč a dále už nedochází ke vzniku nových hvězd. Po této fázi záleží tvorba otevřené hvězdokupy na tom, zda jsou nově vytvořené hvězdy dostatečně silně gravitačně vázány. Pokud nejsou, dochází ke vzniku hvězdné asociace, případně zůstanou hvězdy samostatně.

Občas dochází ke vzniku dvou otevřených hvězdokup ze stejného molekulového mračna. Známým příkladem jsou hvězdokupy Hodge 301 a R136 v galaxii Velký Magellanův oblak, kde obě vznikly z mlhoviny Tarantule (NGC 2070) (Grebel et al., 2000). V naší Galaxii pak tímto způsobem vznikla například Dvojitá hvězdokupa (NGC 869 a NGC 884) nebo otevřené hvězdokupy Plejády a Hyády, které pravděpodobně před 600 miliony lety vznikly ze stejného mračna (Eggen, 1960).



Obrázek 1.4: Porovnání otevřené hvězdokupy Trapezium v Mlhovině v Orionu (M 42) ve viditelném světle (vlevo) a infračerveném světle (vpravo). Na levém obrázku lze ve viditelném spektru vidět pouze několik hvězd zahalených v mračnu. Na obrázku vpravo můžeme v infračerveném spektru vidět mnohem více hvězd, dokonce i hnědé trpaslíky. Pořízeno Hubblovým teleskopem. Zdroj: [E7], [E8].



Obrázek 1.5: Porovnání fotek Sloupů stvoření v Orlí mlhovině. Vlevo vidíme Sloupy pořízené v roce 2015 Hubblovým teleskopem ve viditelném světle, zachycující záření plynových mračen a pouze několik viditelných hvězd. Vpravo pak vidíme snímek pořízený v roce 2022 dalekohledem Jamese Webba v infračerveném světle, které dokáže proniknout mračnem plynu a prachu, ukazující mnohem větší počet hvězd. Zdroj: [E9].

Kapitola 2

HR diagram

2.1 Historie HR diagramu

V roce 1910 publikoval německý astronom Hans Rosenberg diagram závislosti relativní hvězdné velikosti Plejád na jejich určitých spektrálních čarách (čára K a dvě čáry z Balmerovy série vodíku), které mohou sloužit jako indikátory teploty hvězdy (Rosenberg, 1910). Protože jsou hvězdy v otevřené hvězdokupě přibližně stejně vzdálené od Země, jejich relativní hvězdná velikost je přímo úměrná jejich absolutní hvězdné velikosti. V principu tedy vytvořil Rosenberg první diagram závislosti zářivého výkonu na teplotě. Tento diagram se používá u otevřených hvězdokup i v dnešní době, když není známá právě vzdálenost a světelný výkon jednotlivých hvězd.

Ve vývoji HR diagramu dále pokračoval dánský astronom a chemik Ejnar Herzsprung. Ten v roce 1911, nezávisle na Rosenbergovi, publikoval podobný hvězdný diagram (také použil pouze relativní hvězdné velikosti a pracoval s otevřenými hvězdokupami) (Hertzsprung, 1911). O tři roky později pak publikoval svou verzi diagramu americký astronom Henry Norris Russel, ve které, na rozdíl od předchozích diagramů, použil závislost absolutní hvězdné velikosti na hvězdné třídě (Russell, 1914). Ve svém diagramu tedy musel použít pouze velmi blízké hvězdy, pro které byla změřena paralaxa a byla tedy známá jejich vzdálenost od Země.

2.2 Spektrální klasifikace

Protože se v HR diagramu často vyskytuje spektrální třída místo teploty, je vhodné si spektrální třídy definovat. V dnešní době se nejčastěji používá Morganův-Keenanův (MK) systém, který navázal na Harvardskou klasifikaci (tabulka 2.1), ke které navíc přidal i závislost na svítivosti hvězdy. V harvardské klasifikaci rozlišujeme 7 základních tříd, od nejteplejších - O, B, A, F, G, K, M, které dále rozlišujeme písmeny 0 až 9, kde 0 označuje nejteplejší a 9 nejstudenější hvězdy dané třídy. V MK systému je navíc rozlišována luminozitní třída (I – VII), která zhruba lokalizuje polohu obrazu hvězdy v HR diagramu (tabulka 2.2).

Spektrální třída	Přibližná povrchová teplota hvězdy	Barva	Četnost
0	>30 000 K	Modrá	0,00003 %
В	$10000-30000{\rm K}$	Modrobílá	$0,\!13~\%$
A	$7500-10000{ m K}$	Bílomodrá	$0,\!60~\%$
F	$6000-7500{ m K}$	Žlutobílá	$3{,}00~\%$
G	$5\ 200-6\ 000\ { m K}$	Žlutá	$7,\!60~\%$
K	$3500-5200{ m K}$	Oranžová	$12,\!10~\%$
M	$2 400 - 3700{ m K}$	Červená	$76,\!45~\%$

Tabulka 2.1: Harvardská spektrální klasifikace. Kritériem pro zařazení hvězd jsou vybrané spektrální čáry, které jsou silně závislé na teplotě. Četností se v tabulce myslí skutečná četnost (tj. skutečné rozložení ve vesmíru), liší se od pozorované četnosti, kde převládají nejjasnější hvězdy (výběrový efekt) (Mikulášek et al., 2005) (Ledrew, 2001).

Luminozitní třída	Popis
Ia	Jasní veleobři
Ib	Veleobři
II	Nadobři
III	Obři
IV	Podobři
V	Hvězdy hlavní posloupnosti
VI	Podtrpaslíci
VII	Bílí trpaslíci

Tabulka 2.2: Luminozitní třídy Morganovy-Keenanovy klasifikace (Mikulášek et al., 2005).

2.3 Popis HR diagramu

Jak již bylo naznačeno, Hertzsprungův–Russellův diagram vyjadřuje závislost mezi absolutní hvězdnou velikostí (M_v) nebo zářivým výkonem (L) hvězdy na její efektivní teplotě (T_{eff}) . Na svislou osu vynášíme log L nebo M_v (případně M_{bol} – bolometrická hvězdná velikost, vyjadřuje hvězdnou velikost integrovanou přes všechny vlnové délky). Na vodorovnou osu pak vynášíme log T_{eff} , spektrální třídu nebo barevný index (podrobněji v podkapitole 2.5.). Z historických důvodů je logaritmus teploty v grafu orientován opačným směrem, nejvyšší hodnoty teploty jsou v levé části diagramu. V Russellově HR diagramu byl na místo teploty vynášen spektrální typ, řazený od nejteplejší třídy O k nejstudenější M (Mikulášek et al., 2005).

Hvězdy nezaplňují celý diagram rovnoměrně, jak bychom mohli očekávat, ale shlukují se pouze v určitých oblastech, které závisí na jejich velikostech, hmotnostech a stáří. Nejvýraznější oblastí je hlavní posloupnost, jež se táhne napříč celým HR diagramem z levého horního rohu. Patří do ní například Slunce nebo hvězda Sirius. V levém dolním rohu nalezneme oblast bílých trpaslíků, malých a relativně horkých hvězd tvořených převážně elektronově degenerovaným plynem. Vpravo nahoře se pak nacházejí rozměrné hvězdy z řad obrů a veleobrů, do kterých patří například veleobr Betelgeuse (Mikulášek et al., 2005). Schéma HR diagramu s detailnějším popisem můžeme vidět na obr. 2.1.



Hertzsprung-Russell Diagram

Obrázek 2.1: Hertzsprungův–Russellův diagram ukazující jednotlivá vývojová stádia s příklady hvězd. Na hlavní posloupnosti (*main sequence*) můžeme vidět například Slunce nebo Sirius. Vpravo nahoře máme skupinu obrů (*giants*) a veleobrů (*supergiants*). Vlevo dole pak vidíme bílé trpaslíky (*white dwarfs*). Zdroj: [E10].

Většina hvězd, včetně Slunce, se v diagramu nachází na hlavní posloupnosti. Tam se hvězda usídlí poté, co se v jejím jádře zažehnou termonukleární reakce vodíku a hvězda se dostane do hydrostatické rovnováhy. Výjimkou jsou hvězdy s hmotnostmi do 0,075 M_{\odot} , u nich k zažehnutí normálního vodíku nikdy nedojde a stávají se z nich hnědí trpaslíci. U hvězd s hmotností nižší než 0,013 M_{\odot} pak nedojde ani k zapálení deuteria, pro které je potřebná teplota ještě nižší než pro normální vodík (Mikulášek et al., 2005). Hvězdy hlavní posloupnosti se navzájem výrazně liší svojí efektivní teplotou a obecně s jejich teplotou roste i zářivý výkon. To udává tvar hlavní posloupnosti na HR diagramu, kterým je pásmo táhnoucí se z jednoho rohu s nejchladnějšími a nejméně svítivými hvězdami až do druhého rohu s nejteplejšími a nejzářivějšími hvězdami ([E10]). Tuto závislost zářivého výkonu na teplotě popisuje pro absolutně černá tělesa (hvězdy tak můžeme aproximovat) Stefanův-Boltzmannův zákon:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\rm eff}^4, \tag{2.1}$$

kde L je zářivý výkon, R poloměr hvězdy, $T_{\rm eff}$ je efektivní teplota a σ je Stefanova–Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$). Tato rovnice může být také zjednodušena pro

KAPITOLA 2. HR DIAGRAM

parametry relativní ke Slunci:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{T}{T_{\odot}}\right)^4.$$
(2.2)

Několik příkladů poloměrů, hmotností a zářivého výkonu pozorovaných hvězd na hlavní posloupnosti můžeme vidět v tabulce 2.3.

	Poloměr	Hmotnost	Zářivý výkon	Teplota	
Spektrální tř.	$[\mathrm{R}_{\odot}]$	$[{ m M}_{\odot}]$	$[L_{\odot}]$	[K]	Příklady
O2	12,00	100	800 000	50000	BI 253
B0	$7,\!40$	18,0	20000	30 000	Phi ¹ Orionis
A0	$2,\!50$	$3,\!20$	$80,\!00$	10 800	Alpha CrB A
F0	$1,\!30$	1,70	6,00	7 240	Gamma Vir
G0	$1,\!05$	$1,\!10$	1,26	$5 \ 920$	Beta Com
G2	$1,\!00$	1,00	1,00	$5\ 780$	Slunce
$\mathrm{K0}$	$0,\!85$	0,78	$0,\!40$	$5\ 240$	70 Ophiuchi A
M0	$0,\!51$	$0,\!60$	0,072	3 800	Lacaille 8760

Tabulka 2.3: Parametry několika vybraných hvězd podle spektrálních tříd, typických pro hlavní posloupnost (Zombeck, 2006). Teplota vyjadřuje povrchovou teplotu hvězdy.

Hvězdy na hlavní posloupnosti se vyznačují tím, že ve svých jádrech spalují vodík na helium. Většinu svého aktivního života stráví hvězdy pravě na hlavní posloupnosti (80–90 %). Ve svém jádru musí vytvářet stejné množství energie jako vyzáří na povrchu. Jakmile je vodík spálen, hvězda může přejít ke spalování helia na uhlík a z hlavní posloupnosti odchází. Životnost hvězdy na hlavní posloupnosti se váže na její hmotnost. Při porovnání se Slunečními modely můžeme odhadnout, jak dlouho na hlavní posloupnosti hvězdy vydrží, podle vztahu:

$$\tau_{\rm MS} \approx 10^{10} \cdot \left(\frac{M}{\rm M_{\odot}}\right)^{-2.5} \text{let},$$
(2.3)

kde $\tau_{\rm MS}$ je odhadovaná životnost na hlavní posloupnosti v letech, M je hmotnost zkoumané hvězdy a M_{\odot} je hmotnost Slunce (Hansen et al., 2012). Ze vztahu 2.3 vidíme, že s rostoucí hmotností hvězdy její životnost na hlavní posloupnosti rychle klesá. Přestože mají hmotnější hvězdy celkově více vodíku na spálení, dokážou ho díky vyššímu tlaku v jádru spalovat mnohem rychleji než méně hmotné hvězdy. Proto zůstanou nejhmotnější hvězdy typu O na hlavní posloupnosti pouze několik milionů let a naopak málo hmotně hvězdy s hmotností například $M = 0,20 \,\mathrm{M}_{\odot}$ zůstanou na hlavní posloupnosti přibližně až 10¹² let (Laughlin et al., 1997).

V průběhu života hvězdy se vlivem spalování vodíku na helium jádro zahřívá a tím se zvyšuje i celkový výkon hvězdy. Vnější vrstvy hvězdy pozvolna expandují a dochází ke změně teploty hvězdy. U hvězd hmotnějších než 2 M_{\odot} teplota mírně klesá, naopak u hvězd s hmotností sluneční a menší teplota mírně roste po celou dobu jejího setrvání na hlavní posloupnosti (Mikulášek et al., 2005). To vysvětluje, proč není hlavní posloupnost na HR diagramu pouhou křivkou, ale pásem – hvězdy se na diagramu v průběhu času pohybují ([E11]).

2.4 Pozdní vývoj hvězd na HR diagramu

Další vývoj hvězdy na HR diagramu silně závisí na její hmotnosti. Nejméně hmotné hvězdy (červení trpaslíci) s hmotností přibližně 0,1 M_{\odot} zůstanou na hlavní posloupnosti až několik bilionů let. Protože u nich naprostou většinu výměny tepla zprostředkovává konvekce, nevytvoří se u nich žádné jádro a hvězdy postupně spalují celou svou zásobu vodíku na helium. S časem se jejich zářivý výkon a povrchová teplota zvyšují a stávají se z nich teoretičtí modří trpaslíci (vzhledem k věku vesmíru ještě pravděpodobně neexistují). Po spálení veškerého vodíku se z nich stávají elektronově degenerovaní bílí trpaslíci, u kterých už fúze neprobíhá a postupně chladnou (Adams et al., 2005).

Pro hmotnější hvězdy je závěrečný vývoj složitější. Když hvězdy podobné našemu Slunci s hmotností od 0,4 do 11 M_{\odot} přemění veškerý vodík v jádru na helium, vodíková fúze se zastaví a hvězda se začne vlastní gravitací hroutit a zahřívat. Přestože v jádru už fúze neprobíhá, teplota hvězdy stoupne jejím smrštěním natolik, že vodíková fúze začne probíhat ve slupce, kde vytváří ještě více energie než při fúzi v jádře. Protože je tato nově vytvořená energie silnější než gravitace, hvězda se začne rozpínat, přičemž její povrchová teplota klesá. Hořením vodíku ve slupce se zároveň zvyšuje hmotnost heliového jádra hvězdy. V této fázi se hvězda nazývá podobrem (*subgiant*) a vydrží v ní miliony až miliardy let, podle hmotnosti jejího jádra (Ryan et al., 2010).

Když se hvězda dostatečně ochladí, začnou být její vrchní vrstvy konvektivní a hvězda se přestane rozpínat. Její zářívý výkon roste a z hvězdy se stává červený obr (*red giant*). Heliové jádro se postupně zahřívá, čímž zvyšuje teplotu okolního vodíku ve slupce. Fúze vodíku pak probíhá efektivněji a zářivý výkon hvězdy stoupá, hvězda se v HR diagramu nachází na větvi červených obrů (*red giant branch*). Tento proces končí, když se heliové jádro ohřeje na přibližně 10^8 K, což je dostatečná teplota na zažehnutí heliové fúze, při které se helium mění na uhlík tzv. 3-alfa reakcí. Hvězdy s hmotností do 0,6 M_o však dostatečné teploty pro fúzi helia v jádru nikdy nedosáhnou, a tak po shoření vodíkového paliva odhodí svoji slupku a postupně chladnou na bílého trpaslíka (Laughlin et al., 1997).

Po nastartování heliové fúze se začne jádro rozpínat, čímž se zpomalí vodíková fúze ve slupce a celkový výkon hvězdy klesá. Hvězda se začne smršťovat a tím se její povrchová teplota opět zvedá. V této fázi je hvězda V HR diagramu na horizontální větvi (*horizontal branch*). Jakmile je všechno helium v jádře spáleno, pokračuje hoření vodíku i helia ve slupce hvězdy, kolem jádra tvořeného z uhlíku a kyslíku. Hvězda se na HR diagramu dostává na asymptotickou větev obrů (*asymptotic giant branch*), která je paralelní s větví červených obrů. Na asymptotické větvi je ale energie generována rychleji a hvězda na ní nesetrvá tak dlouhou dobu. Hvězdy s hmotností přibližně nad 8 M_{\odot} spalováním helia nekončí, ale dokáží zažehnout i fúzi uhlíku, čímž vytvářejí těžší prvky a dostávají se do oblasti veleobrů (*supergiants*).

Když hvězdy s hmotností od 0,4 do 11 M_{\odot} spálí své palivo ve slupce, začnou se znovu smršťovat vlivem gravitace. Tím dochází k pulzacím, které s pomocí hvězdného větru odhodí

vrchní vrstvy hvězdy, ze kterých vzniká planetární mlhovina. Zbylé jádro elektronově degeneruje a stává se z něj bílý trpaslík. V jádře planetární mlhoviny pak postupně chladne a vyhasíná řadu miliard let a nakonec končí jako černý trpaslík (Mikulášek et al., 2005).

U nejhmotnějších hvězd nad 11 M_{\odot} pokračuje spalování i dalších prvků. Jejich nukleární vývoj v jádru je však rychlejší než vývoj svrchních vrstev hvězdy (ty jsou hmotnější) a časem dochází v jádru ke gravitačnímu kolapsu. Z jádra se pak za výbuchu supernovy stává neutronová hvězda (pro hvězdy s hmotností menší než 50 M_{\odot}) nebo černá díra (pro hvězdy s hmotností větší než 50 M_{\odot}) (Mikulášek et al., 2005).



Obrázek 2.2: Závěrečný vývoj hvězdy s hmotností Slunce na HR diagramu. Po odchodu hvězdy z hlavní posloupnosti setrvá několik milionů až miliard let jako podobr na větvi podobrů (*Subgiant branch*), kde expanduje a chladne. Po dosažení dostatečně nízké teploty dochází ke vzniku konvekce ve slupce a hvězda se dostává na větev červených obrů (*Red giant branch*). Po zapálení helia v jádře přechází hvězda do horizontální větve (*Horizontal branch*) a po zapálení helia ve slupce se dostává na asymptotickou věvet obrů (*Asymptotic giant branch*), kde setrvá až do spálení veškerého paliva. Zdroj: [E12].

2.5 Barevný diagram

Protože nemůžeme vždy změřit spektrum pozorované hvězdy a přiřadit jí spektrální třídu (případně teplotu), je někdy výhodné ji v HR diagramu nahradit barevným indexem. Barevný index je rozdíl dvou hvězdných velikostí v různých filtrech. V této práci budeme pracovat v systému pěti filtrů UBVRI, kde každé písmeno označuje filtr jiné propustnosti. Filtr U propuští ultrafialové světlo, B modré, V viditelné (žluté a zelené), R červené a I infračervené. Bližší definice UBVRI systému je v následující kapitole 3.

Klasickým příkladem barevného indexu je B - V, což značí rozdíl hvězdných velikostí pozorovaného objektu v B a V filtru. Připomeňme, že menší hvězdná velikost značí jasnější hvězdu podle Pogsonovy rovnice:

$$m - n = -2.5 \log \frac{j_m}{j_n},$$
 (2.4)

kde m, n jsou hvězdné velikosti v magnitudách a j_m , j_n jsou jasnosti hvězd (intenzity osvětlení s jednotkou lux) (Zejda et al., 2013). V tabulce 2.1 můžeme vidět, že nejteplejší hvězdy svítí nejvíce v modrém a ultrafialovém světle. Naopak studenější hvězdy vyzařují nejvíce v červené oblasti. Pro horkou hvězdu je pak hvězdná velikost ve filtru B nižší než ve filtru V, a tudíž je barevný index B - V záporný. U studených hvězd je zase B vyšší, V nižší a barevný index B - V mají kladný. Vzorové hodnoty barevných indexů pro různé spektrální třídy najdeme v tabulce 2.4. Jako referenční hvězda pro nulové barevné indexy se tradičně používá Vega.

Spektrální tř.	B-V	U-B	V-R	R-I	$T_{\rm eff}$ [K]
O5V	-0,33	-1,19	-0,15	-0,32	42 000
B0V	-0,30	-1,08	-0,13	-0,29	30 000
A0V	-0,02	-0,02	0,02	-0,02	$9\ 790$
F0V	$0,\!30$	0,03	0,30	$0,\!17$	$7 \ 300$
G0V	$0,\!58$	0,06	$0,\!50$	0,31	$5\ 940$
K0V	0,81	$0,\!45$	0,64	0,42	$5\ 150$
MOV	$1,\!40$	1,22	$1,\!28$	0,91	$3\ 840$

Tabulka 2.4: Příklady barevných indexů pro vybrané spektrální třídy (Zombeck, 2006).

Pokud hvězdu aproximujeme jako absolutně černé těleso, můžeme pak i získat její teplotu přímo z barevného indexu B - V podle vztahu:

$$T = 4600 \left(\frac{1}{0,92(B-V)+1,70} + \frac{1}{0,92(B-V)+0,62} \right),$$
(2.5)

kde T je povrchová teplota hvězdy (Ballesteros, 2012).

2.6 Otevřené hvězdokupy na HR diagramu

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, otevřená hvězdokupa vzniká z jednoho molekulového mračna. Díky tomu jsou její hvězdy přibližně stejně staré a mají prakticky totožné chemické složení. Zároveň jsou jednotlivé hvězdy v otevřené hvězdokupě od nás přibližně stejně vzdálené. Přestože mohou otevřené hvězdokupy nabývat rozměrů i několika parseků, je tato vzdálenost zanedbatelná se vzdáleností hvězdokupy od Země. Tento fakt nám umožňuje v HR diagramu nahradit absolutní hvězdnou velikost jejich relativní hvězdnou velikostí. Nejzářivější hvězdy ve hvězdokupě se nám jeví jako nejjasnější i ze Země ([E12]).

Jediný parametr, ve kterém se hvězdy v otevřené hvězdokupě liší, je hmotnost. Ta udává, kde se hvězda na HR diagramu usadí po zažehnutí vodíkové fúze v jádře. Po zažehnutí fúze se hvězda nachází na hlavní posloupnosti nulového stáří (ZAMS – zero age main sequence), odkud se pak dále vyvíjí. Hvězdy s vyšší hmotností mají vyšší povrchovou teplotu a zářivý výkon a usadí se tedy na hlavní posloupnosti více vlevo nahoře. ZAMS je tedy křivka, která propojuje hvězdy různých hmotností po jejich vstupu na hlavní posloupnost.

Další důležitou křivkou je *izochrona*, která na HR diagramu spojuje všechny hvězdy stejného stáří, ale rozdílných hmotností. Protože hvězdy vyšších hmotností spálí své vodíkové palivo v jádru rychleji než méně hmotné hvězdy, odcházejí z hlavní posloupnosti do oblasti obrů dříve, přibližně podle vztahu 2.3. To udává tvar izochrony, která se v místě odchodu hvězd z hlavní posloupnosti začne ohýbat. Místu tohoto ohybu se říká *bod obratu*. S postupem času začnou z hlavní posloupnosti odcházet čím dál tím méně hmotné hvězdy, což posunuje bod obratu po hlavní posloupnosti dolů. Bod obratu nám tedy jednoznačně udává stáří hvězdokupy. Izochrony pro různé hvězdokupy můžeme vidět na obrázku 2.3.

Stáří a vzdálenost otevřené hvězdokupy tedy můžeme určit tak, že nejdříve provedeme fotometrické měření hvězdokupy, ze kterého zjistíme relativní hvězdné velikosti m a barevné indexy jednotlivých hvězd. Tyto hodnoty následně vyneseme do barevného diagramu, kde na vertikální ose bude relativní hvězdná velikost (ve filtru V) a na horizontální ose barevný index (např. B - V). Z hvězd na diagramu získáme izochronu naší otevřené hvězdokupy, kterou následně můžeme porovnat s teoretickými modely. Teoretické izochrony jsou samozřejmě platné pro absolutní hvězdné velikosti hvězd, takže budou od našich měřených hvězd posunuty o modul vzdálenosti:

$$m - M = 5\log r - 5, (2.6)$$

kde m je relativní hvězdná velikost, M absolutní hvězdná velikost a r vzdálenost v parsecích. Vzdálenost hvězdokupy pak určíme přímo z rovnice 2.6.



Obrázek 2.3: HR diagram pro izochrony vybraných hvězdokup se známými vzdálenostmi. Žlutý prostor uprostřed diagramu se jmenuje Hertzsprungova mezera (*Hertzsprung gap*), kde probíhá vývoj hvězd velice rychle, takže se jich v této oblasti nachází málo (Hoyle, 1960). Zdroj: [E14].

Kapitola 3

Fotometrie

3.1 Historie fotometrie

Fotometrie je jednou z nejstarších pozorovacích metod v astronomii. Samotné slovo fotometrie znamená ve volném překladu z řečtiny měření světla. Fotometrie je tedy technika snažící se změřit zářivý tok pozorovaného objektu.

První fotometrické měření pravděpodobně prováděl řecký astronom Hipparchos, který kolem roku 129 př. n. l. vydal katalog popisující přibližně 850 hvězd. V katalogu zaznamenal pozice jednotlivých hvězd na obloze a zároveň hvězdy rozdělil podle jasnosti na 3 stupně (magnitudy) (Miles, 2007). Přestože se původní katalog v celém znění nedochoval, nedávno byly jeho části objeveny na středověkém rukopisu *Codex Climaci Rescriptus* ([E28]). Na Hipparchova fotometrická měření později navázal Ptolemaios, který je zaznamenal do svého katalogu, který byl původně zvaný *Hē Megalē Syntaxis*. Katalog ze však zachoval pouze v arabském přepisu *al-majis*țī (v překladu Velká kniha), a proto je dnes nejznámější název *Almagest* (z latinského překladu *Almagestum*). V Almagestu obsahujícím 1028 hvězd hvězdy rozdělil podle jasnosti na šest magnitud, kde první byla nejjasnější a šestá nejslabší (Miles, 2007).

3.2 Atmosférická extinkce

Při průchodu záření zemskou atmosférou může dojít k jeho absorpci nebo rozptýlení. Tyto dva jevy způsobují extinkci, která se projevuje zeslabením přicházejícího světla a změnou jeho barevného složení. Světlo různých vlnových délek neinteraguje se zemskou atmosférou stejně. Fotony vysokých energií s vlnovými délkami od 0 do 300 nm jsou v naprosté většině pohlceny ozonem v atmosféře nebo odchýleny kvůli Rayleighovu rozptylu. Od 400 do 700 nm je atmosféra částečně propustná. Infračervené záření s vlnovou délkou nad 700 nm je absorbováno převážně kvůli přítomnosti vodních par v atmosféře. Dále je atmosféra dobře propustná pro radiové vlny od vlnových délek v řádu cm, absorpce záření s vlnovými délkami nad 10 metrů pak však

postupně klesá (Janík, 2021).

Objekty pozorované v zenitu jsou extinkcí ovlivněny nejméně, protože jejich světlo prochází nejkratší drahou v atmosféře. Tato dráha světla přes atmosféru se nazývá vzdušná hmota a je označována písmenem X. Vzdušná hmota je bezrozměrná veličina, která je závislá na zenitové vzdálenosti z. Tuto závislost lze aproximovat jako:

$$X = \frac{1}{\cos z}.\tag{3.1}$$

V zenitu je tedy vzdušná hmota rovna jedné (X = 1) a s rostoucí vzdáleností se zvyšuje. Protože je však povrch Země kulatý, rovnice 3.1 platí pouze pro malé úhly, přibližně $z < 60^{\circ}$. Podle rovnice 3.1 by se totiž vzdušná hmota s narůstající zenitovou vzdáleností blížila nekonečnu, což pro atmosféru Země samozřejmě neplatí. Přesnější aproximace je tedy například (Young et al., 1967):

$$X = \frac{1}{\cos z} \left[1 - 0,0012 \left(\frac{1}{\cos^2 z} - 1 \right) \right]$$
(3.2)

nebo novější (Pickering, 2002):

$$X = \sin^{-1} \left(h + \frac{244}{165 + 47h^{1,1}} \right), \tag{3.3}$$

kde h je vzdálenost od horizontu $(h = \frac{\pi}{2} - z)$.

K měření atmosférické extinkce se využívá standardních hvězd. Jejich jasnosti byly přesně změřeny v různých fotometrických filtrech a díky dlouhodobému pozorování je vyloučena jejich proměnnost. Do standardních hvězd patří jak zástupci horkých, tak i studených hvězd a to z důvodu závislosti míry extinkce na vlnové délce procházejícího záření. Pokud tedy známe mimoatmosférickou magnitudu hvězdy m_0 , můžeme extinkční koeficient k aproximovat podle rovnice:

$$m = m_0 + kX, \tag{3.4}$$

kde *m* je hvězdná velikost pozorovaná z povrchu. Ve vztahu 3.4 je hodnota extinkčního koeficientu *k* konstantní, což ve skutečnosti není. Protože extinkce závisí na barevném indexu pozorovaného objektu, je nutné pro přesnější měření uvažovat i vyšší mocniny barevného indexu (B - V) (Janík, 2021).

3.3 Absolutní a diferenciální fotometrie

K získání absolutní fotometrie objektu se využívají již zmíněné *standardní hvězdy*. Pro výpočet extinkčních koeficientů jsou standardní hvězdy pozorovány jako první i poslední objekty dané noci. Mezi těmito krajními body jsou standardy v průběhu noci pozorovány v intervalu jedné až dvou hodin. Protože je extinkce závislá na vlnové délce, je nutné měřit horké i chladné hvězdy. Výsledkem absolutní fotometrie jsou hvězdné velikosti hvězd ošetřené o atmosférickou extinkci.

porovnáváme byězdu, u které očekává

U diferenciální fotometrie s pozorovaným objektem porovnáváme hvězdu, u které očekáváme stejné rozložení spektra. Obě hvězdy by zároveň měly být blízko u sebe, ať je rozdíl v atmosférické extinkci co nejmenší. Diferenciální fotometrie je sice časově méně náročná než absolutní fotometrie, ale bohužel se z ní nedají určit extinkční koeficienty.

3.4 Aperturní a profilová fotometrie

Principem aperturní fotometrie je, že se pozorovaný objekt umístí do clonky a zbytek zorného pole je zastíněn. Měříme pak pouze světlo ze sledovaného objektu. Následně je ještě nutné odečíst hodnotu pozadí získanou z okolí objektu. Tento postup lze zjednodušit u CCD snímků, protože výběr clonky i odečtení pozadí můžeme provést až při zpracování samotného snímku. Aperturní fotometrie je vhodná na většinu měření s výjimkou hustých hvězdných polí.

Profilová fotometrie využívá k získání celkového toku záření proložením snímku tzv. *profilovou funkcí*, která se snaží vystihnout tvar obrazu bodového zdroje na snímku. Tato metoda je sice přesnější a citlivější v detekci hvězd, ale většinou jsou rozdíly oproti aperturní fotometrii minimální.

3.5 Fotometrické systémy

Fotometrický systém v astronomii označuje soubor definovaných propustných pásem se známou citlivostí na dopadající záření. Citlivost pak závisí především na použité optické soupravě, detektorech a filtrech. Fotometrické filtry můžeme obecně rozdělit do tří skupin podle šířky propustnosti. Širokopásmové filtry mají propustnost λ_{eff} větší než 30 nm a patří sem například známé filtry *UBV* Johnsonova systému. Středněpásmové filtry pak mají propustnost mezi 10 a 30 nm. Jako příklad můžeme uvést Strömgrenův systém. Nakonec úzkopásmové filtry, které mají propustnost pod 10 nm a využívají se v pozorování okolí vybraných spektrálních čar (Janík, 2021).

V této práci pracujeme se systémem UBVRI. Ten vychází z Johnsonova systému UBV, který byl jedním z prvních a nejpoužívanějších fotometrických systémů. S příchodem CCD detektorů, které jsou citlivější v radiových a infračervených oblastech, však bylo nutné UBVsystém upravit. Pro tyto oblasti vytvořil Alan Cousins systém RI, který byl nakonec s UBVsystémem sloučen do UBVRI (Bessell et al., 2005). Propustnosti jednotlivých filtrů můžeme najít v tabulce 5. Na obrázku 3.1 pak můžeme vidět graf propustností filtrů UBVRI a jejich srovnání s již zmíněným Strömgrenovým systémem uvby.

Filtr	$\lambda_{\rm eff} \ [{\rm nm}]$	$\Delta\lambda \ [nm]$
U	366,3	65,0
B	436,1	89,0
V	$544,\!8$	84,0
R	640,7	158,0
Ι	798,0	154,0

Tabulka 3.1: Hodnoty propustnosti jednotlivých filtrů v UBVRI systému. λ_{eff} označuje střední hodnotu propustnosti, $\Delta\lambda$ pak šířku propustnosti. Zdroj: (Bessell et al., 2005).



Obrázek 3.1: Propustnosti filtrů v systémech UBVRI a uvby. Zdroj: (Bessell et al., 2005).

3.6 CCD

Zařízení s vázanými náboji (z anglického *Charge-Coupled Device*) vynalezli Williard Boyle a George E. Smith v Bellových laboratořích v roce 1969. CCD je polovodičová součástka, která díky fotoefektu dokáže kumulovat náboje vyražené dopadajícími fotony. Vyražené elektrony jsou následně drženy v potenciálové jámě (pixelu), aby se nemohly volně pohybovat po povrchu čipu. Pixely mohou být uspořádány buď do jedné řady (v lineárním CCD), nebo jako matice (v plošném CCD) (Janík, 2021). Ve většině CCD čipech používaných v astronomii jsou pixely řazeny maticově do několika tisíců řad a sloupců. Velikost jednoho pixelu v CCD čipu používaných v astronomii se typicky pohybuje od 10 do 20 μ m ([E19]). Kapacita jednotlivých pixelů je typicky přibližně 10⁵ elektronů (Sze et al., 2021). CCD detektor je tedy schopný jednotlivé fotony ukládat (integrovat) a později i převést na elektrický signál.

Při měření je nutné CCD čip chladit, protože s rostoucí teplotou narůstá i šum způsobený termoemisí – *temný proud*. Temný proud ovlivňuje i čas expozice, s menším temným prou-

dem se zvyšuje doba, se kterou je možné měřit. CCD čip může být chlazen například Peltierovým článkem nebo kapalným dusíkem (Janík, 2021). Pro zredukovaní vlivu temného proudu na snímek se pořizují tzv. *temné snímky* (ang. *dark frames*). Tyto snímky mají stejnou dobu expozice jako ty ze samotného měření, nedopadá na ně však žádné světlo (např. při zakrytém dalekohledu). Vliv temného proudu pak můžeme od původního snímku jednoduše odečíst. Při delších expozicích se zároveň zvyšuje riziko dopadu kosmického záření na čip. Pro eliminaci tohoto jevu se pořizuje více temných snímků, které se spojí dohromady.

Dále můžeme odečíst *bias*, což je temný snímek s nejkratší technicky možnou expozicí. Bias ukazuje určité přednastavení citlivosti jednotlivých pixelů ještě před samotným měřením (Hroch, 2006). Pokud však máme k dispozici temný snímek se stejnou expozicí jako snímek z měření, bias samostatně odečítat nemusíme, odečte se totiž z těchto dvou snímků navzájem.

Jednotlivé pixely na čipu se kvůli nedokonalé výrobě mohou lišit svojí citlivostí na dopadající světlo. Zároveň u některých optických systémů dochází k tzv. *vinětaci*, kde světlo nedopadá na celou plochu čipu rovnoměrně. Na korekci těchto rušivých jevů pořizujeme *flat field* snímek. Jedná se o snímek s teoreticky dokonale rovnoměrně rozloženým světlem. Pořizují se zpravidla před východem či západem Slunce na rovnoměrně osvětleném nebi, kdy ještě nejsou očima viditelné hvězdy.

Kapitola 4

Hvězdokupa NGC 6811

Otevřená hvězdokupa NGC 6811 je zkoumaným objektem této práce. Na obloze ji můžeme najít v souhvězdí Labutě, přibližně ve středu mezi jasnými hvězdami Deneb a Vega. Jejím objevitelem je John Herschel, který ji poprvé pozoroval v roce 1829. V roce 1864 ji pak zařadil do svého Obecného katalogu mlhovin a hvězdokup (Herschel, 1864). Hvězdokupa je relativně jasná, ve filtru V má hvězdnou velikost 6,8 mag, v B filtru pak 7,47 mag. Její nejjasnější hvězdy mají kolem 10 magnitud. Úhlová velikost hvězdokupy je přibližně 22,8'. ([E17]) Přesné souřadnice hvězdokupy můžeme nalézt v tabulce 4.1 a její poloha je zvýrazněna na mapě na obrázku 4.1. Fotografie hvězdokupy je pak k nalezení na obrázku 4.2.

Rektascenze α	$19^{\rm h} \ 37^{\rm m} \ 17^{\rm s}$
Deklinace δ	$46^{\circ}23'18''$
Galaktická délka l	$79,210^{\circ}$
Galaktická šířka \boldsymbol{b}	$12,\!015^{\circ}$

Tabulka 4.1: Rovníkové a galaktické souřadnice hvězdokupy NGC 6811. Zdroj: [E15].

Za několik posledních desetiletí bylo publikováno více fotometrických studií zkoumajících hvězdokupu NGC 6811. První výsledky fotometrického měření publikoval U. Lindoff v roce 1972. Změřením hvězdných velikostí a barevných indexů v *UBV* systému pro 377 hvězd odhadl vzdálenost hvězdokupy na 1100 pc a stáří na $5 \cdot 10^8$ let (Lindoff, 1972). V roce 1978 byla publikována podobná studie, která změřila parametry 2000 hvězd. Výsledná vzdálenost byla 1150 pc, stáří pak $8 \cdot 10^8$ let (Barkhatova et al., 1978). Nejnovější data máme ze dvou fotometrických studií v *UBVRI* systému. Z první v roce 2012 vyšlo stáří hvězdokupy na 1,00 \pm 0,17 \cdot 10⁹ let (Janes et al., 2012). Z novější z roku 2015 pak stáří vychází na 1,00 \pm 0,05 \cdot 10⁹ let (Yontan et al., 2015).



Obrázek 4.1: Mapa ukazující polohu hvězdokupy NGC 6811 na obloze. Zdroj: [E16].



Obrázek 4.2: Otevřená hvězdokupa NGC 6811. Zdroj: [E18].

Kapitola 5

Měření a zpracování dat

Fotometrické měření hvězdokupy NGC 6811 probíhalo na polské observatoři Suhora. Observatoř je položená na jihu Polska, 20°04′03″ východní délky a 49°34′09″ severní šířky, v nadmořské výšce 1009 m nad mořem. Nachází se zde dalekohled s průměrem primárního zrcadla 600 mm, ohniskovou vzdáleností 2400 mm a zorným polem o velikosti 20′ ([E20]). Měření bylo prováděno pomocí CCD kamery *Apogee Aspen CG47* s rozlišením 1024 × 1024 pixelů. Bližší specifikace o kameře jsou k nalezení zde: [E21].

5.1 Standardní hvězdy

Standardní hvězdy byly pozorovány v rámci pěti nocí od 22. do 27. července 2022 ve filtrech *UBVRI*. V průběhu každé noci se sada měřených standardů měnila, aby byly měřené hvězdy vždy blízko zenitu (s časem se zvyšovala rektascenze měřených standardů). Vybrané standardy mají velký barevný rozptyl. Seznam použitých standardních hvězd je k nalezení v tabulce 5.1. Hvězdy byly vybrány z Landoltova měření fotometrických standardů (Landolt, 2013).

5.2 Zpracování snímků hvězdokupy

CCD snímky hvězdného pole studované hvězdokupy NGC 6811 byly pořízeny v rámci tří nocí, od 24. do 27. července 2022. Měření probíhalo ve všech pěti filtrech systému *UBVRI*. Počet snímků a expozice pro jednotlivé filtry můžeme najít v tabulce 5.2. Ve filtrech I a R byly pořízeny snímky ve dvou dobách expozice, 2 a 5 sekund. Důvodem bylo přesnější zachycení jak jasnějších, tak i méně jasných hvězd. Výběr fotek ve filtrech U, B, V, R je k dispozici na obrázcích 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4.

Zachycené snímky byly ošetřeny o dark frame a flat field. Následně byly snímky zpracovány v programu *SIPS* v3.34 (*Scientific Image Processing System*). Tento program je i s dokumentací dostupný zde: [E23]. Po nahrání snímků do programu bylo nutné zadat správné parametry měření (např. ohniskovou vzdálenost teleskopu). Dále přišla na řadu astrometrie, která spočívá



Obrázek 5.1: NGC 6811 ve filtruU.

Obrázek 5.2: NGC 6811 ve filtruB.



Obrázek 5.3: NGC 6811 ve filtruV.



Obrázek 5.4: NGC 6811 ve filtru ${\cal R}.$

Hvězda	α (J200	0,0)	δ (J	2000	,0)	Hvězdné velikosti [mag]						
nvezda	h	m	\mathbf{S}	0	/	//	U	B	V	R	Ι		
SA 41-171	21	54	05	+45	13	14	11,653	11,474	$11,\!155$	10,977	10,760		
SA 41-179	21	54	10	+45	16	31	$12,\!535$	$12,\!374$	$11,\!873$	$11,\!593$	$11,\!283$		
SA 41-182	21	54	13	+45	14	37	10,421	10,264	9,961	9,779	$9,\!578$		
SA 41-190	21	54	18	+45	15	23	10,738	$10,\!644$	$10,\!361$	$10,\!194$	$10,\!018$		
SA 41-204	21	54	32	+45	13	51	$14,\!524$	$12,\!814$	$10,\!947$	$10,\!038$	$8,\!692$		
GD 378	18	23	37	+41	04	03	13,213	14,216	$14,\!295$	$14,\!336$	$14,\!396$		
GD 378A	18	23	31	+41	04	10	$14,\!250$	$14,\!096$	$13,\!481$	$13,\!147$	12,798		
GD 378B	18	23	45	+41	05	48	$14,\!186$	$14,\!082$	$13,\!390$	$12,\!980$	$12,\!581$		
GD 378C	18	23	50	+41	06	44	$12,\!531$	12,369	11,762	$11,\!421$	$11,\!059$		
$GD \ 3910$	20	29	56	+39	13	32	12,282	$13,\!225$	$13,\!375$	$13,\!486$	$13,\!629$		
GD 391A	20	29	55	+39	14	13	$12,\!939$	12,735	$12,\!321$	$12,\!093$	$11,\!823$		
GD 391B	20	29	51	+39	14	20	13,448	$13,\!302$	12,707	$12,\!384$	$12,\!020$		
GD 391C	20	30	03	+39	15	04	$12,\!618$	$12,\!250$	$11,\!432$	$11,\!030$	$10,\!491$		
GD 391D	20	29	54	+39	13	43	16,553	16,048	$15,\!030$	$14,\!495$	$13,\!902$		
GD 391E	20	29	44	+39	17	18	13,036	$12,\!957$	$12,\!402$	$12,\!086$	11,759		
GD 391F	20	29	37	+39	17	18	$13,\!060$	$13,\!026$	$12,\!485$	$12,\!175$	$11,\!822$		
GD 391G	20	29	46	+39	16	35	14,812	$14,\!491$	$13,\!691$	$13,\!254$	12,786		
GD 391H	20	29	45	+39	18	14	$15,\!389$	$15,\!125$	$14,\!399$	$13,\!987$	$13,\!559$		

Tabulka 5.1: Přehled použitých standardních hvězd (Landolt, 2013). Uvedené hodnoty hvězdných velikostí UBVRI pocházejí z vlastního měření.

Filtr	Počet snímků	Expozice [s]
U	81	180
B	81	20
V	81	10
R	31/50	2/5
Ι	31/50	2/5

Tabulka 5.2: Přehled počtu pořízených snímků podle filtrů s časy expozic.

v identifikaci hvězd na snímku a následným určením jejich rovníkových souřadnic. Pro provedení astrometrie snímků bylo možné využít jeden z podporovaných katalogů: UCAC4, UCAC5, USNO-A2.0 a USNO-B1.0. Protože dokumentace SIPS doporučuje katalogy UCAC (některé existující hvězdy nejsou v USNO zaznamenány a UCAC je často přesnější) bylo využito katalogu UCAC5 (dostupný na [E24]). Po provedení astrometrie bylo na každém snímku nalezeno přibližně tisíc hvězd s hvězdnou velikostí do 18 magnitud. Výjimkou byly snímky ve filtru U, kde bylo nalezeno pouze kolem 650 hvězd, pravděpodobně z důvodu vysoké atmosférické extinkce a hlavně menší citlivosti CCD kamery v této barvě.

Po nalezení všech hvězd a jejich identifikace v katalogu následovalo provedení aperturní fotometrie. Tu dokáže program SIPS provést převážně automaticky, celý postup je detailně popsán v manuálu (opět dostupném zde: [E23]). Výsledkem pak už byla tabulka obsahující všechny dostupné informace o nalezených hvězdách. Ke každé hvězdě byly přiřazeny jak souřadnice na snímku, tak i rovníkové souřadnice. Pokud se podařila identifikace hvězdy v katalogu, obsahovala tabulka i informace o katalogových souřadnicích a pojmenování v daném katalogu. V tabulce byla nakonec uvedena pozorovaná a katalogová hvězdná velikost nalezené hvězdy v daném filtru.

Po provedení fotometrie následovalo určení hvězd patřících do pozorované hvězdokupy NGC 6811. K tomu byla využita interaktivní mapa hvězdokupy dostupná na stránkách WEBDA ([E25]). Data o členství hvězd v hvězdokupě byla čerpána ze studie vlastních pohybů W. L. Sanderse (Sanders, 1971). V této studii bylo prověřeno členství 296 hvězd, ze kterých bylo určeno 97 pravděpodobných členů hvězdokupy. Protože většina z určených členů měla pravděpodobnost nad 80 % (89 z 97), hvězdy s menší pravděpodobností nebyly na pořízených snímcích označeny. Několik vzdálenějších hvězd pravděpodobně patřících do hvězdokupy se bohužel na pořízené snímky nevešlo. Dále bylo některé hvězdy nutné vyřadit buď z důvodu jejich proměnnosti, nebo jejich blízkosti k jiné hvězdě (nebylo možné přesně určit hvězdnou velikost). Nakonec bylo na snímcích identifikováno 72 hvězd s pravděpodobností členství nad 80 %.

5.3 Absolutní fotometrie

Po určení hvězd patřících do hvězdokupy NGC 6811 bylo možné provést přepočet jejich instrumentálních jasností na jasnosti absolutní. Toto zpracování bylo provedeno v programu *HEC22*, vytvořeném v programovacím jazyce *Fortran*77. Program HEC22 je určen pro automatickou redukci fotometrických měření z více nocí a jejich transformaci na absolutní fotometrii.

Prvním krokem při zpracování je vložení vstupních dat v tabulce. Tabulka obsahovala informace jak o standardních hvězdách, tak i o hvězdách z hvězdokupy NGC6811. Pro každou hvězdu bylo uvedeno označení pořadovým číslem, rovníkové souřadnice a jasnosti ve filtrech *UBVRI*. Protože však dokáže program HEC22 zpracovat data maximálně čtyř filtrů, bylo nutné rozdělit vstupní soubor na dva, s filtry *UBVI* a *UBVR*.

Ze vstupních dat standardních hvězd byly pro každou noc vypočteny parametry atmosférické extinkce, a to pomocí polynomů až 5. řádu. Ze získaných transformačních matic bylo následně možné pro každou hvězdu přepočítat instrumentální jasnosti na hodnoty absolutní jasnosti. Po celém procesu byly výstupem hodnoty absolutní fotometrie pro všechny hvězdy ve filtrech *UBVRI* včetně jejich nejistot. Výsledné jasnosti pro všechny měřené hvězdy NGC 6811 jsou uvedeny v příloze A. Detailnější postup fungování programu včetně transformačních rovnic je k dispozici v manuálu: [E26].

Při bližším zkoumání výsledných dat si můžeme u hvězdy s číslem 925 všimnout mnohem vyšší chyby než u ostatních hvězd (v řádu desetiny magnitudy). Jedná se totiž o proměnnou hvězdu typu Delta Scuti s označením Cl* NGC 6811 SAN 81. Doplňující informace jsou dostupné v databázi SIMBAD ([E27]). Z dalšího zpracování dat byla hvězda vyřazena.

Ve výsledných datech absolutní fotometrie se dále dokonce u jedné z měřených standardních hvězd objevila větší chyba, a to opět v řádu desetiny magnitudy. Jedná se o hvězdu označenou

v tabulce 5.1 jako GD 391B. Podle databáze SIMBAD jde o zákrytovou dvojhvězdu s označením V* V648 Lyr ([E22]). V dalším zpracování měřených dat tedy byla tato hvězda také vyřazena. Grafy vytvořené z fotometrie této hvězdy jsou uvedeny v příloze B.

5.4 Mezihvězdná extinkce

Světlo dopadající na Zemi je zatíženo extinkcí způsobenou mezihvězdnou látkou. Tato látka však neovlivňuje světlo všech vlnových délek stejně. Úbytek světla je při nižších vlnových délkách světla znatelnější (modré světlo je pohlcováno více než červené), a proto se tento jev nazývá zčervenání. Míru mezihvězdné extinkce lze vyjádřit pomocí přírůstku hvězdné velikosti A v magnitudách. Mezihvězdnou extinkcí jsou kvůli zčervenání ovlivněny i samotné barevné indexy CI. Tento vliv jde vyjádřit podle vztahu:

$$CI = CI_0 + E(\lambda_1, \lambda_2), \tag{5.1}$$

kde se k barevnému indexu bez extinkce CI_0 přičítá veličina $E(\lambda_1, \lambda_2)$ zvaná barevný exces (Mikulášek et al., 2005).

5.4.1 Určení mezihvězdné extinkce z naměřených UBVRI dat

Hodnoty mezihvězdné extinkce A a barevného excesu $E(\lambda_1,\lambda_2)$ lze získat mnoha způsoby. V této práci využijeme podobnou metodu, jakou ve své diplomové práci použil Jaroslav Velčovský (Velčovský, 2016). Metoda je založená na minimalizaci rozdílů naměřených barevných indexů (B - V), (V - R) a (V - I). Vztahy mezi jednotlivými indexy můžeme určit z tabulky 5.3, převzaté ze studie pozorovaných vlastností mezihvězdného prachu (Savage et al., 1979).

Filtr	$\frac{E(\lambda - V)}{E(B - V)}$	$\frac{A_{\lambda}}{E(B-V)}$
B	1,00	4,10
V	0,00	$3,\!10$
R	-0,78	2,32
Ι	-1,60	$1,\!50$

Tabulka 5.3: Průměrné poměry mezihvězdné extinkce a barevných excesů k excesu E(B-V) (Savage et al., 1979).

Z tabulky můžeme odvodit vztahy mezi mezihvězdnou extinkcí ve V filtru A_v a barevnými indexy:

$$A_{\rm v} = 3.1E(B-V) = 2.42E(V-R) = 4.96E(V-I).$$
(5.2)

Naměřené barevné indexy byly zafixovány podle vztahu 5.2 a následně byla metodou nejmenších čtverců nalezena hodnota A_v , při které jsou rozdíly mezi indexy minimální.

Po nalezení minima byla určena hodnota $A_v = 0.14 \pm 0.01$ mag, ze které podle vztahu 5.2 můžeme dopočítat barevné excesy (E(U - B) bylo určeno podle (Cardelli et al., 1989)):

$$E(U - B) = 0,033 \pm 0,003 \text{ mag}$$

$$E(B - V) = 0,045 \pm 0,003 \text{ mag}$$

$$E(V - R) = 0,035 \pm 0,003 \text{ mag}$$

$$E(V - I) = 0,072 \pm 0,005 \text{ mag}$$

Na obrázku 5.5 je možné vidět výsledné rozdíly mezi naměřenými barevnými indexy po jejich opravení o mezihvězdnou extinkci. Hodnoty (V - R) a (V - I) byly podle vztahu 5.2 přepočítány na barevný index (B - V), aby bylo možné je vynést do jednoho grafu.



Obrázek 5.5: Naměřené barevné indexy BVRI, opravené o mezihvězdnou extinkci. Hodnoty pro indexy (V - I) a (V - R) byly podle rovnice 5.2 přepočítány do barevného indexu (B - V).

5.4.2 Srovnání barevného excesu s předchozími studiemi

V tabulce 5.4 je uvedeno srovnání výsledků námi určeného barevného excesu s výsledky z předchozích studií, zabývajících se hvězdokupou NGC 6811. Zároveň jsou v tabulce ještě dvě hodnoty dostupné z *Infrared Science Archive* ([E29]), vycházející ze studií (Schlegel et al., 1998) a (Schlafly et al., 2011). Ze srovnání můžeme vidět, že námi určený barevný exces se nejvíce shoduje se dvěma nejnovějšími studiemi (Janes et al., 2012) a (Yontan et al., 2015).

Studie	E(B-V) [mag]
Vlastní měření	$0,\!045\pm0,\!003$
(Lindoff, 1972)	0,16
(Barkhatova et al., 1978)	$0,\!14$
(Schlegel et al., 1998)	$0.1538 \pm 0,0019$
(Glushkova et al., 1999)	$0,\!12\pm0,\!02$
(Schlafly et al., 2011)	$0{,}1323 \pm 0{,}0016$
(Janes et al., 2012)	$0,\!074\pm0,\!024$
(Yontan et al., 2015)	$0,\!050\pm0,\!010$

Tabulka 5.4: Srovnání barevného excesu s předchozími studiemi.

5.5 Barevné diagramy

Barevné diagramy byly vytvořeny pro čtyři barevné indexy. Na obrázcích 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 můžeme vidět diagramy U-B, B-V, V-R a V-I s klasickou závislostí na V. Na diagramech lze zřetelně vidět hlavní posloupnost, bod obratu a několik hvězd i v oblasti obrů. Dále jsou na obrázcích 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 vyobrazeny diagramy s chybami měření pro již uvedené barevné indexy.



Obrázek 5.6: Barevný diagram hvězdokupy Obrázek 5.7: Barevný diagram hvězdokupy NGC 6811 pro barevný index U - B. NGC 6811 pro barevný index B - V.

5.5.1 Hledání vzdálenosti, stáří a metalicity hvězdokupy NGC 6811

Pro zjištění dalších parametrů hvězdokupy proložíme barevný diagram (B - V na V) teoretickými izochronami. Tyto vývojové křivky byly vygenerovány za pomocí modelové databáze *PARSEC* (Bressan et al., 2012). Před vytvořením dané křivky je nutné zadat několik vstupních dat, kam patří mimo jiné mezihvězdná extinkce A_v , stáří hvězdokupy t a její metalicita Z. Hodnotu mezihvězdné extinkce jsme již určili na $A_v = 0,14$. Další parametry je nutné zvolit tak, aby vygenerovaná teoretická izochrona co nejlépe opisovala naměřená data v barevném diagramu.



Obrázek 5.8: Barevný diagram hvězdokupy Obrázek 5.9: Barevný diagram hvězdokupy NGC 6811 pro barevný index V - R.



NGC 6811 pro barevný index V - I.



s chybami pro barevný index U - B.



Obrázek 5.10: Barevný diagram NGC 6811 Obrázek 5.11: Barevný diagram NGC 6811 s chybami pro barevný index B - V.



s chybami pro barevný index V - R.



Obrázek 5.12: Barevný diagram NGC 6811 Obrázek 5.13: Barevný diagram NGC 6811 s chybami pro barevný index V - I.

Protože ve vytvořených izochronách jsou hvězdné velikosti uvedeny jako absolutní, musíme od nich ještě odečíst modul vzdálenosti m-M, ze kterého následně získáme informaci o vzdálenosti hvězdokupy r (podle rovnice 2.6).

Nejdříve byly nalezeny parametry, při kterých vygenerovaná izochrona alespoň přibližně opisovala naměřená data. Následně byly tyto parametry postupně zpřesňovány. V poslední iteraci byly porovnány izochrony se stářím od 900 do 1100 milionů let vytvořené po krocích 50 mil. let. Pro každou hodnotu stáří hvězdokupy byly vygenerovány metalicity od Z = 0,008 do Z = 0,015 v krocích Z = 0,001. Při hledání modulu vzdálenosti m - M byly pro každou izochronu vyzkoušeny hodnoty od 9,5 do 10,5 mag s jednotlivými kroky 0,1 mag. Nejlépe nakonec odpovídal model s hodnotou stáří $t = 10^9$ let, metalicitou Z = 0,011 a modulem vzdálenosti m - M = 10,0 mag. Naměřená data proložená finální izochronou můžeme vidět na obrázku 5.14.



Obrázek 5.14: Barevný diagram hvězdokupy NGC 6811 proložený teoretickou izochronou (pro hodnoty $t = 10^9$ let, Z = 0,011, m - M = 10,0 mag, $A_v = 0,14$ mag).

Z proložené teoretické izochrony můžeme určit parametry otevřené hvězdokupy NGC 6811. Stáří hvězdokupy odpovídá hodnotě $t = 1000 \pm 50$ milionů let, metalicita $Z = 0,011 \pm 0,001$ a vzdálenost přibližně $r = 1000 \pm 50$ pc.

5.6 Diskuze a srovnání výsledků s předchozími studiemi

Z barevných diagramů proložených teoretickými izochronami jsme dokázali určit mezihvězdnou extinkci, vzdálenost, stáří a metalicitu otevřené hvězdokupy NGC 6811. Srovnání s předchozími studiemi je dostupné v tabulce 5.5.

Studie	E(B-V) [mag]	Stáří $t [10^6 \text{ let}]$	Vzdálenost r [pc]
Vlastní měření	$0,045 \pm 0,003$	1000 ± 50	1000 ± 50
(Lindoff, 1972)	$0,\!16$	500	1100
(Barkhatova et al., 1978)	0,14	800	1150 ± 110
(Glushkova et al., 1999)	$0,\!12\pm0,\!02$	700 ± 100	1040 ± 45
(Janes et al., 2012)	$0,\!074 \pm 0,\!024$	1000 ± 170	1000 ± 50
(Yontan et al., 2015)	$0,\!050\pm0,\!010$	1000 ± 50	960 ± 70

Tabulka 5.5: Srovnání výsledných parametrů NGC 6811 s předchozími studiemi.

Ze srovnání můžeme vidět, že jsou výsledky této práce srovnatelné s ostatními studiemi. V určené vzdálenosti hvězdokupy NGC 6811 jsou všechny studie velice podobné, hodnota se pohybuje přibližně kolem 1000 pc. Ke srovnání můžeme přiložit i vzdálenost změřenou družicí Gaia ([E30]), která vychází na 1112,5 pc. Přestože je tato hodnota o 11 % vyšší než námi určená vzdálenost 1000 pc, stále jsou si ještě relativně blízké.

Na rozdíl od vzdálenosti se již předchozí studie poměrně liší v určeném stáří hvězdokupy. Nejlépe se náš výsledek 10^9 let shoduje s nejnovějšími dvěma studiemi (Janes et al., 2012) a (Yontan et al., 2015). Rozdílné hodnoty stáří hvězdokupy NGC 6811 v minulých studiích jsou pravděpodobně způsobeny mimo jiné jinak určeným barevným excesem E(B - V), kde vyšší exces způsobuje, že se hvězdokupa jeví jako mladší. Toto tvrzení bylo potvrzeno i při zkoušení vyšších hodnot barevného excesu při zpracovávání vlastních dat, kdy při hodnotách excesu E(B - V) = 0,15 mag vycházelo odhadované stáří hvězdokupy na přibližně 500 až 600 milionů let.

Závěr

Podstatou této práce byla fotometrická studie otevřené hvězdokupy NGC 6811 v *UBVRI* filtrech. Zpracovaná data byla získána v rámci pěti nocí na polské observatoři Suhora. Pořízeny byly snímky jak otevřené hvězdokupy NGC 6811, tak i standardních hvězd, pomocí kterých byly stanoveny extinkční koeficienty. Snímky hvězdokupy byly nejdříve zpracovány v programu SIPS, kde byly za pomocí databáze WEBDA určeny hvězdy pravděpodobně patřící do hvězdokupy. Dále byla data díky programu HEC22 opravena o atmosférickou extinkci, čímž byla získána absolutní fotometrie pro hvězdokupu.

Z dat ve filtrech *BVRI* byla určena hodnota mezihvězdné extinkce na $A_v = 0.14 \pm 0.01$ [mag] a barevný exces $E(B - V) = 0.045 \pm 0.003$ [mag]. Následně byly sestrojeny barevné diagramy pro všech pět filtrů *UBVRI*. Barevný diagram B - V na V byl proložen teoretickou izochronou, vytvořenou pomocí modelové databáze PARSEC. Z proložené izochrony bylo zjištěno stáří hvězdokupy NGC 6811 na $t = 1000 \pm 50$ milionů let, vzdálenost $r = 1000 \pm 50$ pc a metalicita $Z = 0.011 \pm 0.001$.

Získané výsledky převážně souhlasí s předchozími studiemi hvězdokupy NGC 6811. Určená vzdálenost r = 1000 pc je srovnatelná se vzdáleností přesněji určenou astrometrickým měřením družice Gaia 1112,5 pc.

Použitá literatura

- ADAMS, FC; BODENHEIMER, P; LAUGHLIN, G, 2005. M dwarfs: planet formation and long term evolution. Astronomische Nachrichten: Astronomical Notes. Roč. 326, č. 10, s. 913– 919.
- BALLESTEROS, FJ, 2012. New insights into black bodies. EPL (Europhysics Letters). Roč. 97,č. 3, s. 34008.
- BARKHATOVA, KA; ZAKHAROVA, PE; SHASHKINA, LP, 1978. The open star cluster NGC 6811. Astronomicheskii Zhurnal. Roč. 55, s. 56.
- BESSELL, Michael S et al., 2005. Standard photometric systems. Annual Review of Astronomy and Astrophysics. Roč. 43, č. 1, s. 293–336.
- BRESSAN, Alessandro; MARIGO, Paola; GIRARDI, Léo; SALASNICH, Bernardo; DAL CERO, Claudia; RUBELE, Stefano; NANNI, Ambra, 2012. PARSEC: stellar tracks and isochrones with the PAdova and TRieste Stellar Evolution Code. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Roč. 427, č. 1, s. 127–145.
- CANTAT-GAUDIN, Tristan; JORDI, C; VALLENARI, Antonella; BRAGAGLIA, Angela; BALAGUER-NÚÑEZ, L; SOUBIRAN, C; BOSSINI, D; MOITINHO, A; CASTRO-GINARD, A; KRONE-MARTINS, A et al., 2018. A Gaia DR2 view of the open cluster population in the Milky Way. Astronomy & Astrophysics. Roč. 618, A93.
- CARDELLI, Jason A; CLAYTON, Geoffrey C; MATHIS, John S, 1989. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. *The Astrophysical Journal*. Roč. 345, s. 245–256.
- EGGEN, Olin J, 1960. Stellar groups, VII. The structure of the Hyades group. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Roč. 120, č. 6, s. 540–562.
- ELMEGREEN, Bruce G; FALGARONE, Edith, 1996. A fractal origin for the mass spectrum of interstellar clouds. *The Astrophysical Journal*. Roč. 471, č. 2, s. 816.
- FROMMERT, Hartmut; KRONBERG, Christine, 2007. Open Star Clusters. Online: http://messier. obspm. fr/open. html August. Roč. 27.
- GLUSHKOVA, EV; BATYRSHINOVA, VM; IBRAGIMOV, MA, 1999. A study of the open cluster NGC 6811. Astronomy Letters. Roč. 25, s. 86–92.

- GREBEL, Eva K; CHU, You-Hua, 2000. Hubble Space Telescope photometry of Hodge 301: an "old" star cluster in 30 Doradus. *The Astronomical Journal*. Roč. 119, č. 2, s. 787.
- HANSEN, Carl J; KAWALER, Steven D; TRIMBLE, Virginia, 2012. Stellar interiors: physical principles, structure, and evolution.
- HERSCHEL, John Frederick William, 1864. Catalogue of nebulae and clusters of stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, s. 1–137.
- HERTZSPRUNG, Ejnar, 1911. Uber die Verwendung photographischer effektiver Wellenlaengen zur Bestimmung von Farbenaequivalenten. Č. 63.
- HOYLE, F, 1960. On the main-sequence band and the Hertzsprung gap. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. Roč. 120, č. 1, s. 22–32.
- HROCH, Filip, 2006. Astronomické praktikum. Brno: Přírodovědecká fakulta Masarykovy univezity.
- JANES, Kenneth; BARNES, Sydney A; MEIBOM, Søren; HOQ, Sadia, 2012. NGC 6811: An Intermediate-age Cluster in the Kepler Field. The Astronomical Journal. Roč. 145, č. 1, s. 7.
- JANÍK, Jan, 2021. Astronomické pozorování, skripta. Brno, ÚTFA PřF MU.
- JONES, Kenneth Glyn, 1986. Some Notes on Hodierna's Nebulae. Journal for the History of Astronomy. Roč. 17, s. 187.
- KRAUSE, Martin GH; OFFNER, Stella SR; CHARBONNEL, Corinne; GIELES, Mark; KLES-SEN, Ralf S; VÁZQUEZ-SEMADENI, Enrique; BALLESTEROS-PAREDES, Javier; GIRI-CHIDIS, Philipp; DIEDERIK KRUIJSSEN, JM; WARD, Jacob L et al., 2020. The physics of star cluster formation and evolution. *Space Science Reviews*. Roč. 216, č. 4, s. 1–46.
- LANDOLT, Arlo U, 2013. UBVRI photometric standard stars around the sky at+ 50 deg declination. *The Astronomical Journal.* Roč. 146, č. 5, s. 131.
- LAUGHLIN, Gregory; BODENHEIMER, Peter; ADAMS, Fred C, 1997. The end of the main sequence. *The Astrophysical Journal*. Roč. 482, č. 1, s. 420.
- LEDREW, Glenn, 2001. The real starry sky. Journal of the Royal Astronomical Society of Canada. Roč. 95, s. 32.
- LINDOFF, U, 1972. The open cluster NGC 6811. Astronomy and Astrophysics. Roč. 16, s. 315.
- MAANEN, Adriaan van, 1919. No. 167. Investigations on proper motion. First paper: The motions of 85 stars in the neighborhood of Atlas and Pleione. Contributions from the Mount Wilson Observatory/Carnegie Institution of Washington. Roč. 167, s. 1–15.
- MAANEN, Adriaan van, 1945. Investigations on Proper Motion. XXIV. Further Measures in the Pleiades Cluster. *The Astrophysical Journal*. Roč. 102, s. 26.
- MICHELL, John, 1767. An inquiry into the probable parallax and magnitude of the fixed stars. *Philosophical Transactions of the Royal Society Abridged*. Roč. 12, s. 423–438.

- MIKULÁŠEK, Zdeněk; KRTIČKA, Jiří, 2005. Základy fyziky hvězd. ÚTFA PřF MU, Brno.
- MILES, Richard, 2007. A light history of photometry: from Hipparchus to the Hubble Space Telescope. *Journal of the British Astronomical Association*. Roč. 117, s. 172–186.
- PEIRESC, Nicholas-Claude Fabri de; CYSATUS, JB; GALILEI, Galileo; MARIUS, Simon, 2007. History of the Discovery of the Deep Sky objects.
- PICKERING, Keith A, 2002. The southern limits of the Ancient Star Catalog and the Commentary of Hipparchos. *DIO*. Roč. 12, s. 3–27.
- RAPPENGLÜCK, Michael, 1997. The Pleiades in the Salle des Taureaux", grotte de Lascaux. Does a rock picture in the cave of Lascaux show the open star cluster of the Pleiades at the Magdalénien era (ca 15.300 BC)". Astronomy and Culture, s. 217–225.
- ROSENBERG, Hans, 1910. Über den Zusammenhang von Helligkeit und Spektraltypus in den Plejaden. Astronomische Nachrichten. Roč. 186, s. 71.
- RUSSELL, Henry Norris, 1914. Relations between the spectra and other characteristics of the stars. ii. brightness and spectral class. *Nature*. Roč. 93, č. 2323, s. 252–258.
- RYAN, Sean G; NORTON, Andrew J, 2010. *Stellar evolution and nucleosynthesis*. Cambridge University Press.
- SANDERS, WL, 1971. Membership of the open cluster NGC 6811. Astronomy and Astrophysics. Roč. 15, s. 368–373.
- SAVAGE, Blair D; MATHIS, John S, 1979. Observed properties of interstellar dust. Annual review of astronomy and astrophysics. Roč. 17, s. 73–111.
- SHAPLEY, Harlow, 1918. Globular clusters and the structure of the galactic system. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*. Roč. 30, č. 173, s. 42–54.
- SHU, Frank H; ADAMS, Fred C; LIZANO, Susana, 1987. Star formation in molecular clouds: observation and theory. Annual review of astronomy and astrophysics. Roč. 25, č. 1, s. 23– 81.
- SCHLAFLY, Edward F; FINKBEINER, Douglas P, 2011. Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey stellar spectra and recalibrating SFD. *The Astrophysical Journal*. Roč. 737, č. 2, s. 103.
- SCHLEGEL, David J; FINKBEINER, Douglas P; DAVIS, Marc, 1998. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds. *The Astrophysical Journal*. Roč. 500, č. 2, s. 525.
- STRAND, K. Aa., 1977. Hertzsprung's Contributions to the HR Diagram. Roč. 80, s. 55.
- SZE, Simon M; LI, Yiming; NG, Kwok K, 2021. *Physics of semiconductor devices*. John wiley & sons.
- TENN, Joseph S, 2013. Keepers of the double stars. arXiv preprint arXiv:1304.5494.

- VELČOVSKÝ, Jaroslav, 2016. Komplexní studium otevřené hvězdokupy NGC 2281.
- YONTAN, Talar; BILIR, Selçuk; BOSTANCI, ZF; AK, Tansel; KARAALI, S; GÜVER, T; AK, Serap; DURAN, Ş; PAUNZEN, Ernst, 2015. CCD UBVRI photometry of NGC 6811. Astrophysics and Space Science. Roč. 355, č. 2, s. 267–281.
- YOUNG, Andrew T; IRVINE, William M, 1967. Multicolor photoelectric photometry of the brighter planets. I. Program and procedure. *The Astronomical Journal*. Roč. 72, s. 945.

ZEJDA, Miloslav et al., 2013. Základy astronomie I.

ZOMBECK, Martin V, 2006. Handbook of space astronomy and astrophysics.

Elektronické zdroje

- [E1] https://hideback.tumblr.com/post/123952760815/taurus-the-pleiades-and-orions-belt-1;
- [E2] https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-s-messier-catalog
- [E2] https://www.nasa.gov/content/goddard/hubble-s-messier-catalog
- [E3] https://www.wikipedia.org/
- [E4] https://esahubble.org/images/opo9926a/
- [E5] https://hubblesite.org/contents/media/images/2004/20/1562-Image.html
- [E6] https://esahubble.org/wordbank/open-cluster/
- [E7] https://esahubble.org/images/opo0019c/
- [E8] https://esahubble.org/images/opo0019b/
- [E9] https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/nasa-s-webb-takes-star-filled-portrait-of-
- [E10] https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/stellarevolution_ hrintro.html
- [E11] https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/stellarevolution_postmain.html
- [E12] https://en.wikipedia.org/wiki/Stellar_evolution
- [E13] https://www.atnf.csiro.au/outreach//education/senior/astrophysics/stellarevolution_ clusters.html
- [E14] https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay1/lec_pdf/Ay1_Lec09.pdf
- [E15] https://webda.physics.muni.cz/cgi-bin/ocl_page.cgi?dirname=ngc6811
- [E16] https://en.wikipedia.org/wiki/NGC_6811
- [E17] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-id?Ident=NGC%206811
- [E18] http://bf-astro.com/ngc6811/ngc6811.htm
- [E19] https://www.mssl.ucl.ac.uk/www_detector/ccdgroup/optheory/ccdoperation.html
- [E20] https://www.as.up.krakow.pl/rzeczy/equip.php
- [E21] https://www.as.up.krakow.pl/rzeczy/Aspen_CG47.pdf
- [E22] https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-id?Ident=%402923595&Name=V*%20V648%
- 20Lyr&submit=submit
- [E23] https://www.gxccd.com/cat?id=146&lang=409
- [E24] http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/cat/I/340#/article
- [E25] https://webda.physics.muni.cz/cgi-bin/ocl_page.cgi?dirname=ngc6811
- [E26] https://astro.troja.mff.cuni.cz/ftp/hec/PHOT/manual.pdf
- [E27] http://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-id?Ident=%406878804&Name=Cl*%20NGC% 206811%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%2081&submit=submit
- [E28] https://arstechnica.com/science/2022/10/part-of-lost-star-catalog-of-hipparchus-for
- [E29] https://irsa.ipac.caltech.edu/applications/DUST/
- [E30] https://vizier.cds.unistra.fr/viz-bin/VizieR-6?-out.form=%2bH&-source=J/A%

POUŽITÁ LITERATURA

2bA/633/A99&Cluster=NGC_6811

Příloha A

Tabulka získané absolutní fotometrie

V následující tabulce jsou uvedeny zjištěné hvězdné velikosti pro měřené členy hvězdokupy NGC 6811. V prvním sloupci jsou pro orientaci čísla hvězd, která byla použita ke zpracování. Následují dva sloupce obsahují souřadnice jednotlivých hvězd. Dále jsou uvedeny hvězdné velikosti ve filtrech *UBVRI* a jejich zjištěné chyby. V posledním sloupci můžeme najít pravděpodobnost členství hvězd ve hvězdokupě NGC 6811 převzatou ze studie vlastních pohybů W. L. Sanderse (Sanders, 1971).

TT × 1		α		δ Hvězdné velikosti [mag]								Б					
Hvezda	h	\mathbf{m}	s	•	/	"	U	ΔU	B	ΔB	V	ΔV	R	ΔR	Ι	ΔI	Р
901	19	37	39	+46	20	12	13,378	0,012	13,343	0,010	12,798	0,011	12,487	0,012	12,155	0,011	0,96
902	19	37	34	+46	20	53	11,847	0,009	11,766	0,008	11,360	0,008	11,120	0,009	10,854	0,004	0,97
903	19	37	31	+46	21	31	12,789	0,012	$12,\!686$	0,011	12,411	0,010	12,251	0,009	12,059	0,007	0,93
904	19	37	50	+46	18	52	12,780	0,012	$12,\!678$	0,009	12,348	0,011	12,142	0,011	11,925	0,005	0,97
905	19	37	53	+46	18	28	13,121	0,014	13,075	0,010	12,673	0,012	12,425	0,010	12,165	0,006	0,94
906	19	38	01	+46	19	06	12,563	0,011	12,454	0,010	12,148	0,011	11,957	0,011	11,748	0,006	0,94
907	19	37	58	+46	14	19	11,578	0,019	11,402	0,016	11,033	0,012	10,811	0,012	10,570	0,012	0,89
908	19	37	42	+46	14	20	14,069	0,016	12,542	0,010	11,225	0,009	10,618	0,008	10,029	0,011	0,92
909	19	37	25	+46	13	35	14,147	0,021	14,157	0,019	13,830	0,017	13,669	0,029	13,599	0,035	0,93
910	19	37	32	+46	19	14	11,874	0,011	11,753	0,009	11,455	0,009	11,282	0,007	11,078	0,009	$0,\!93$
911	19	37	25	+46	18	36	12,041	0,065	11,939	0,040	11,661	0,045	11,483	0,053	11,307	0,046	0,95
913	19	37	25	+46	19	35	12,671	0,010	12,630	0,010	12,264	0,010	12,045	0,008	11,802	0,010	0,97
914	19	37	21	+46	19	53	12,981	0,013	12,875	0,010	12,581	0,009	12,401	0,010	12,209	0,010	0,94
915	19	37	14	+46	18	57	13,223	0,012	13,089	0,009	12,766	0,010	12,587	0,009	12,393	0,009	0,97
916	19	37	13	+46	18	24	14,306	0,019	14,272	0,013	13,757	0,011	13,456	0,009	13,118	0,011	0,97
917	19	37	13	+46	19	24	13,922	0,013	13,911	0,011	13,441	0,017	13,165	0,021	12,856	0,018	0,96
918	19	37	04	+46	18	07	11,918	0,013	11,763	0,008	11,509	0,008	11,373	0,009	11,214	0,012	0,97
919	19	37	03	+46	19	25	11,305	0,011	11,201	0,011	10,815	0,009	10,589	0,011	10,342	0,010	0,96
920	19	36	47	+46	17	33	13,024	0,012	12,941	0,010	12,623	0,010	12,433	0,011	12,213	0,012	0,96
921	19	36	36	+46	18	34	13,361	0,016	13,190	0,013	12,816	0,013	12,611	0,012	12,374	0,015	0,80
922	19	36	37	+46	18	22	14,158	0,019	14,178	0,011	13,720	0,012	13,453	0,010	13,142	0,014	0,89
923	19	36	36	+46	18	07	14,303	0,021	14,315	0,016	13,857	0,016	13,585	0,017	13,291	0,020	0,91
924	19	36	55	+46	15	18	13,510	0,014	13,496	0,011	13,062	0,010	12,800	0,009	12,514	0,010	0,93
925	19	36	49	+46	14	26	12,225	0,208	13,122	0,057	12,029	0,155	$11,\!637$	0,069	10,649	0,126	0,89
926	19	36	48	+46	14	29	13,397	0,067	13,429	0,034	13,068	0,038	12,889	0,031	12,655	0,030	0,96
927	19	36	48	+46	19	37	12,325	0,012	12,163	0,008	11,890	0,008	11,746	0,011	11,575	0,009	0,97
928	19	37	01	+46	20	25	12,552	0,012	12,432	0,010	12,160	0,010	12,007	0,008	11,822	0,009	$0,\!90$
929	19	36	58	+46	20	22	12,445	0,012	12,351	0,009	12,083	0,008	11,921	0,008	11,737	0,010	0,97
930	19	37	21	+46	20	50	13,734	0,013	13,704	0,012	13,319	0,011	13,085	0,011	12,808	0,010	0,97
931	19	37	19	+46	20	55	12,421	0,010	12,252	0,008	11,992	0,009	11,854	0,008	11,703	0,009	0,88
932	19	37	27	+46	22	26	14,139	0,014	14,139	0,013	13,618	0,012	13,320	0,011	12,980	0,010	0,96
933	19	37	29	+46	22	39	13,369	0,011	13,359	0,009	12,931	0,011	12,676	0,011	12,392	0,010	0,96
934	19	37	27	+46	22	53	13,170	0,011	13,053	0,010	12,732	0,011	12,558	0,010	12,366	0,010	0,96
935	19	37	27	+46	23	10	12,391	0,010	12,267	0,008	11,995	0,009	11,846	0,009	11,670	0,010	0,97
936	19	37	22	+46	22	53	13,225	0,012	13,113	0,010	12,742	0,011	12,525	0,009	12,296	0,010	0,96
937	19	37	23	+46	23	26	12,918	0,013	12,813	0,010	12,492	0,011	12,302	0,011	12,086	0,011	0,90
938	19	37	28	+46	24	18	12,336	0,009	12,208	0,010	11,969	0,010	11,840	0,009	$11,\!683$	0,009	0,97
939	19	37	21	+46	24	33	11,503	0,011	11,363	0,007	11,087	0,008	10,932	0,007	10,759	0,011	0,96
940	19	37	18	+46	24	06	13,651	0,012	13,637	0,010	13,192	0,011	12,928	0,011	12,634	0,010	0,97
941	19	37	17	+46	23	42	14,415	0,015	14,383	0,011	13,844	0,010	13,529	0,010	13,194	0,012	0,80
942	19	37	17	+46	23	14	12,147	0,010	12,008	0,009	11,747	0,009	11,597	0,009	11,422	0,012	0,93

PŘÍLOHA A. TABULKA ZÍSKANÉ ABSOLUTNÍ FOTOMETRIE

TT ~ 1		α			δ		Hvězdné velikosti [mag]									Б	
Hvezda	h	m	s	•	'	"	U	ΔU	B	ΔB	V	ΔV	R	ΔR	Ι	ΔI	Р
943	19	37	12	+46	23	29	13,056	0,010	12,973	0,011	12,670	0,011	12,496	0,010	12,296	0,010	0,95
944	19	37	34	+46	24	10	12,621	0,009	11,715	0,008	10,669	0,007	10,179	0,009	9,657	0,011	0,97
945	19	38	10	+46	23	59	13,114	0,013	13,097	0,011	$12,\!622$	0,012	12,332	0,009	12,026	0,009	0,96
946	19	38	02	+46	26	40	14,106	0,015	14,138	0,011	13,717	0,011	13,453	0,011	13,179	0,014	0,95
947	19	38	11	+46	28	02	13,479	0,016	13,350	0,009	12,974	0,011	12,742	0,011	12,516	0,010	0,92
948	19	37	48	+46	27	25	12,449	0,010	12,329	0,010	12,095	0,008	11,952	0,008	11,796	0,009	0,92
949	19	37	43	+46	29	50	12,042	0,010	11,925	0,009	$11,\!687$	0,007	11,551	0,008	11,396	0,011	0,97
950	19	38	03	+46	30	02	13,872	0,014	13,910	0,009	13,511	0,011	13,257	0,012	12,981	0,012	0,96
951	19	37	38	+46	29	12	13,796	0,014	13,817	0,012	13,421	0,011	13,173	0,012	12,902	0,010	0,96
952	19	37	13	+46	25	25	12,054	0,010	11,893	0,008	11,609	0,008	11,456	0,009	11,284	0,010	0,96
953	19	37	05	+46	24	58	12,255	0,011	12,147	0,007	11,871	0,009	11,713	0,008	11,521	0,010	0,95
954	19	37	17	+46	27	45	13,769	0,017	13,747	0,011	13,344	0,012	13,094	0,010	12,813	0,009	0,95
955	19	36	58	+46	26	58	13,995	0,017	13,993	0,011	13,563	0,013	13,302	0,011	13,000	0,012	0,89
956	19	36	56	+46	26	57	13,457	0,016	13,430	0,010	13,082	0,012	12,870	0,012	$12,\!625$	0,009	0,95
957	19	36	55	+46	27	37	12,956	0,012	12,280	0,009	11,329	0,008	10,863	0,008	10,353	0,012	0,94
958	19	36	44	+46	29	57	12,950	0,015	12,856	0,009	12,443	0,010	12,220	0,008	11,969	0,012	0,95
959	19	37	00	+46	31	14	13,100	0,014	13,074	0,009	12,773	0,012	12,590	0,017	12,370	0,015	0,96
960	19	36	51	+46	23	20	11,802	0,012	$11,\!675$	0,009	11,376	0,010	11,199	0,012	10,985	0,015	0,97
961	19	37	02	+46	23	13	12,994	0,011	12,262	0,009	11,287	0,009	10,815	0,009	10,303	0,012	0,97
962	19	37	01	+46	22	59	13,705	0,016	13,695	0,011	13,303	0,012	13,067	0,009	12,796	0,012	0,97
963	19	36	57	+46	22	42	12,845	0,011	12,155	0,008	11,204	0,008	10,743	0,009	10,241	0,013	0,97
964	19	36	54	+46	25	03	13,818	0,015	13,865	0,011	13,465	0,012	13,225	0,010	12,958	0,008	0,97
965	19	36	44	+46	23	13	13,981	0,016	13,988	0,011	13,565	0,012	13,306	0,011	13,016	0,014	0,95
966	19	36	41	+46	23	09	14,184	0,017	14,214	0,013	13,774	0,013	13,514	0,011	13,209	0,008	0,97
967	19	36	39	+46	27	01	13,824	0,016	13,859	0,009	13,450	0,011	13,211	0,011	12,910	0,008	0,95
968	19	37	34	+46	26	01	13,081	0,035	12,951	0,016	12,583	0,045	12,463	0,028	12,250	0,028	0,96
969	19	37	44	+46	25	01	12,505	0,012	12,361	0,009	12,128	0,009	11,996	0,009	11,855	0,009	0,97
970	19	37	51	+46	23	08	13,968	0,016	13,963	0,011	13,534	0,013	13,267	0,012	12,970	0,011	0,96
971	19	37	15	+46	31	00	16,079	0,040	15,103	0,009	13,929	0,013	13,324	0,011	12,667	0,010	0,93
972	19	37	29	+46	30	39	13,314	0,012	13,255	0,011	12,933	0,012	12,738	0,011	12,531	0,013	0,96
973	19	38	16	+46	31	31	12,309	0,014	12,187	0,011	11,979	0,011	11,855	0,013	11,727	0,021	0,97

Příloha B

Fotometrie zákrytové dvojhvězdy V* V648 Lyr

Na následujících dvou grafech je k dispozici výsledná absolutní fotometrie pro zákrytovou dvojhvězdu V* V648 Lyr. Měřená byla jako jedna ze standardních hvězd. Na prvním grafu (B.1) můžeme vidět měření ze všech 5 nocí. U druhé a čtvrté noci můžeme vidět, že byla jasnost pravděpodobně v maximu. Na druhém grafu (B.2) je pak bližší pohled na první měřenou noc, při které bylo patrně změřeno minimum.



Obrázek B.1: Graf měření fotometrie hvězdy V* V648 Lyr z dat všech 5 nocí.



Obrázek B.2: Graf měření fotometrie hvězdy V* V648 Lyr z dat pouze první noci.