

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
CCD fotometrie vybrané otevřené hvězdokupy I.

Petr Kurfürst

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Jan Janík, Ph.D.

2008

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D., konzultantu RNDr. Miloslavu Zejdovi a Mgr. Filipu Hrochovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, Petru Šafaříkovi a Marku Skarkovi za pomoc při měření a zvládnání textového softwaru LaTeX.

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

V Brně dne 23. 5. 2008

Petr Kurfürst

Abstrakt:

Tato práce představuje astronomickou CCD fotometrii poměrně mladé otevřené hvězdokupy M 35 (NGC 2168). Hvězdokupa obsahuje asi 1000 - 2500 hvězd v prostoru o průměru asi 9 pc, je tedy poměrně řídká, na hvězdné obloze zaujímá plochu, jejíž zdánlivý průměr se blíží 28 úhlovým minutám. Patří k nejjasnějším hvězdokupám, za dobrých podmínek je proto pozorovatelná dokonce pouhým okem. První část práce popisuje teoretická východiska, jsou zde představeny hvězdokupy včetně studované M 35, popsány metody tvorby Hertzsprungova-Russellova diagramu a barevných diagramů otevřených hvězdokup, ukázány principy astronomické CCD fotometrie a jejího zpracování. Navazující praktická část představuje barevné diagramy hvězdokupy M 35, sestavené na základě výsledků vlastních pozorování ve čtyřech fotometrických barvách na observatoři Masarykovy univerzity a jejich porovnání s teoretickými modely. Následuje odhad jejich základních charakteristik - vzdálenosti, stáří, chemického složení, diskuse a závěr.

Klíčová slova: Hvězdokupy, fotometrie, H-R diagram, teoretické modely

Abstract:

This work presents astronomical CCD photometry of relatively young open star cluster M 35 (NGC 2168). This cluster contains 1000 - 2500 stars in space of 9 pc in diameter, so it is relatively thin, on star-sphere covers the area of apparent diameter up to 28 arc minutes. It belongs to brightest clusters, on good conditions is thus observable even by naked eye. The first part of this work describes theoretical resources and presents star clusters, especially M 35 in question, and it describes also methods of Hertzsprung-Russell and color-magnitude diagrams of open star clusters construction and shows principles of astronomical CCD photometry and its processing. Consequential practical part presents color-magnitude diagrams of open star cluster M 35 constructed on basis of results of my own observations in four photometric colors at Masaryk university observatory and their comparison with theoretical models. Estimation of its basic characteristics - distance, age, chemical composition, discussion and conclusions follows.

Keywords: Star clusters, photometry, H-R diagram, theoretical models

Obsah

1	Hvězdokupy a hvězdné asociace	7
1.1	Hvězdokupy obecně, jejich dělení	7
1.2	Otevřené hvězdokupy	9
1.3	Otevřená hvězdokupa M 35 (NGC 2168) – – faktografie a historie jejího pozorování	12
2	Hertzsprungův-Russellův diagram	14
2.1	Historie H-R diagramu, jeho obecná podoba	14
2.2	H-R diagramy a barevné diagramy otevřených hvězdokup	16
3	Astronomická fotometrie	19
3.1	Záření hvězd a jeho měření	19
3.2	Fotometrické systémy	22
3.3	CCD fotometrie	23
3.4	Eliminace nepříznivých vlivů	24
4	Pozorování a jeho zpracování	27
4.1	Pořízení snímků a jejich redukce	27
4.2	Výsledky pozorování	29
4.3	Kalibrace snímků	32
5	Barevné diagramy a jejich analýza	35
5.1	Konstrukce barevných diagramů	35
5.2	Stáří, vzdálenost a podíl těžších prvků	42
5.3	Odhad mezihvězdného zčervenání	44
5.4	Diskuse výsledků	46
6	Závěr	48

A Přílohy	49
A.1 Výsledky CCD fotometrie	49
A.2 Lineární regrese barevné kalibrace	57
Literatura	59

Kapitola 1

Hvězdkupy a hvězdné asociace

1.1 Hvězdkupy obecně, jejich dělení

Hvězdkupy jsou gravitačně vázaná uskupení hvězd určitých společných vlastností. Tyto hvězdy vznikly ve stejném okamžiku, zaujímají relativně nevelký objem a prodělaly společný vývoj. Hvězdkupy obecně můžeme podle jejich vzhledu dělit na [9]:

- hvězdkupy kulové, které jsou sféricky symetrické,
- hvězdkupy otevřené, které nemají pravidelný tvar,
- hvězdné asociace, které lze identifikovat teprve porovnáním fyzikálních vlastností hvězd ve větším hvězdném poli.

Hvězdkupy se mezi sebou liší nejen vzhledem, ale především stářím a počtem členů. Nejstarší a nejbohatší bývají kulové hvězdkupy, nejmladší s nejmenším počtem členů hvězdné asociace. Rozdílné je také jejich rozmístění v prostoru Galaxie. Tyto odlišnosti různých typů hvězdných uskupení zaznamenal už v roce 1926 Jan Oort. V roce 1944 zavedl Walter Baade na základě zásadních odlišností v H-R diagramech kulových a otevřených hvězdekup pojmy *hvězdných populací I a II*.

Nejstarší populace hvězd, označovaná někdy jako hypotetická *populace III*, vznikla pravděpodobně velmi brzy po velkém třesku, před 11 - 13 miliardami let, tyto hvězdy se skládaly výhradně z vodíku a z hélia. Jednalo se nejspíš o velmi hmotné hvězdy s krátkou dobou existence, končící jako supernovy. V nitrech těchto hvězd však již vznikaly těžší prvky, jejichž část dalším vývojem obohacovala mezihvězdnou látku, z níž potom vznikly další generace hvězd, hvězdy populace I a II. Hvězdy populace I jsou mladší s vyšším obsahem těžších

prvků, hvězdy populace II jsou starší a sestávají prakticky pouze z vodíku a z hélia s nepatrnou příměsí těžších prvků.

Toto dělení se netýká pouze stáří a chemického složení, ale také prostorového uspořádání v rámci Galaxie. Zatímco mladší hvězdy populace I (jejichž typická hodnota obsahu těžších prvků $Z = 0,04$) a uskupení z nich složená se soustřeďují k rovině Galaxie a účastní se galaktické rotace, jsou starší hvězdy populace II (typické $Z = 0,003$) rozmístěny prakticky všude, jejich koncentrace stoupá směrem k centru Galaxie, galaktické rotace se téměř neúčastní. Časem se ukázalo, že i toto dělení je pouze hrubé a v naší galaxii se prolíná několik prostorových subsystémů. V této souvislosti se uvádí rozdělení na tzv. *diskové a sféroidální hvězdné populace*.

Nejméně kompaktním seskupením hvězd jsou málo výrazné tzv. hvězdné asociace, rozpoznané až v polovině 20. století na základě zjištění, že mladé žhavé hvězdy spektrálních typů O a B, stejně jako proměnné hvězdy typu T Tauri (chladnější spektrální typy G až M) se v určitých oblastech sdružují mnohem více, než by vyplývalo z náhodného rozdělení. Podle toho se rozlišují na asociace O a asociace T. Tyto hvězdy vznikly také ve stejném okamžiku, rozptýlily se však již do okolí. V centrálních částech hvězdných asociací se mohou nacházet otevřené hvězdokupy.

Zvláštní skupinou (otevřených) hvězdokup jsou tzv. *pohybové hvězdokupy*, tj. takové, jejichž vzájemná sounáležitost je rozeznatelná až studiem vlastního pohybu hvězd, jehož zdánlivé vektory se protínají ve společném bodě.

S obsahem těžších prvků Z ve hvězdném materiálu souvisí i tzv. *metalicita*, zjistitelná spektroskopicky a označovaná $[Fe/H]$, používaná častěji, než obtížně zjistitelný celkový obsah těžších prvků. Metalicita je definovaná jako dekadický logaritmus poměru koncentrace atomů železa vůči koncentraci atomů vodíku zkoumaného objektu, vztažený k téže veličině v případě Slunce [7]:

$$\left[\frac{Fe}{H} \right] = \log \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right) - \log \left(\frac{N_{Fe}}{N_H} \right)_{\odot} . \quad (1.1)$$

Velmi zajímavá je rovněž otázka celkové hmotnosti hvězdokupy, kterou lze odhadnout pomocí *věty o viriálu*, odvozené Rudolphem Clausiem (1822 - 1888) pro vázané systémy částic. V případě gravitační interakce má tento viriálový teorém tvar:

$$2\langle E_k \rangle + \langle E_p \rangle = 0, \quad (1.2)$$

kde $\langle E_k \rangle$ a $\langle E_p \rangle$ jsou střední hodnoty kinetické a potenciální energie soustavy. Střední kinetická energie je dána střední rychlostí \bar{v} hvězd (v souřadné sou-

stavě, spojené s hvězdokupou) a její hmotností M , celková potenciální energie se stanoví pro hodnotu $0,5R$ (kde R je poloměr hvězdokupy), která vyjadřuje střední vzdálenost hvězd ve hvězdokupě od středu soustavy. Pro celkovou hmotnost hvězdokupy pak dostáváme (přibližný) vztah:

$$M = \frac{R\bar{v}^2}{2G}. \quad (1.3)$$

1.2 Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy jsou tedy gravitačně vázané skupiny hvězd, zaujímající mnohem menší prostor, než je jejich vzdálenost od nás, takže lze říci, že všechny hvězdy dané hvězdokupy jsou od nás zhruba stejně vzdálené. Předpokládá se, že vznikají z velkých prachoplynových oblaků, soustředěných převážně v blízkosti roviny Galaxie (případně jiných galaxií) a pokračují v galaktické rotaci ve stejném místě nebo poblíž místa svého vzniku. V naší galaxii je známo přes 1100 otevřených hvězdokup, což je s největší pravděpodobností malá část jejich populace, existují odhady jejich celkového množství v počtu až 100 000.



Obrázek 1.1: Kulová hvězdokupa ω Centauri. Zdroj [10].



Obrázek 1.2: Otevřená hvězdokupa Plejády. Zdroj [10].

V mnoha takových oblacích proces tvorby hvězd probíhá i nyní, takže můžeme přímo pozorovat jevy, probíhající v etapě formování nových hvězdokup. Tento proces ovšem zaujímá podstatně kratší čas ve srovnání s dobou existence hvězdokupy, takže všichni její členové jsou zhruba stejného stáří. Navíc, protože všechny hvězdy ve hvězdokupě vznikly ze stejného zárodečného oblaku, mají podobné počáteční chemické složení.

Otevřené hvězdokupy jsou předmětem velkého zájmu astrofyziků především z těchto důvodů:

- všechny hvězdy ve hvězdokupě jsou prakticky stejně vzdálené,
- všechny hvězdy ve hvězdokupě jsou prakticky stejného stáří,
- všechny hvězdy ve hvězdokupě mají přibližně stejné počáteční chemické složení,
- jednotlivé hvězdy mají rozdílné hmotnosti, od zhruba 80–100 slunečních hmotností u nejhmotnějších hvězd ve velmi mladých hvězdokupách až po méně než 0,08 sluneční hmotnosti.

Z těchto důvodů otevřené hvězdokupy reprezentují mimořádně vhodný vzorek hvězd pro studium hvězdné stavby a vývoje díky jasně definovaným posloupnostem ve stavových diagramech, známých jako Hertzsprungův - Russellův diagram (HRD), nebo barevný diagram (color magnitude diagram - CMD). Srovnání "standardních" HRD, odvozených pro blízké hvězdy s dobře známými vzdálenostmi nebo z teorie hvězdného vývoje, s měřenými barevnými diagramy hvězdokup je výbornou metodou pro určování jejich vzdálenosti a stáří. Fakt, že všechny takovéto diagramy jsou v dobré shodě s teorií hvězdného vývoje, je přesvědčivým důkazem její platnosti, včetně platnosti výchozích fyzikálních teorií, zahrnujících atomovou a jadernou fyziku, kvantovou fyziku a termodynamiku.

Většina otevřených hvězdokup existuje pouze relativně krátkou dobu. Někteří členové opouštějí hvězdokupu po změnách rychlostí, způsobených vzájemným těsnějším přiblížením, slapovými silami v galaktickém gravitačním poli a díky vzájemným přiblížením s hvězdami galaktického pole a s oblaky mezihvězdné látky. Průměrná otevřená hvězdokupa tak ztratí většinu svých členů během několika stovek miliónů let. Hvězdy, uniklé z hvězdokup se stávají hvězdami galaktického pole. Dobu života t otevřené hvězdokupy lze vyjádřit vztahem [8]:

$$t = 2 \times 10^8 \rho \text{ let}, \quad (1.4)$$

kde ρ je hustota látky v hvězdokupě v hmotnostech Slunce na krychlový parsek. První otevřené hvězdokupy byly známé už v prehistorii: Plejády (M 45), Hyády a Praesepe (M 44) jsou nejvýznamnějšími příklady, ve starověku Ptolemaios rovněž zmiňuje hvězdokupu M 7 v souhvězdí Štíra a hvězdokupu v souhvězdí Vlasů Bereniky (Melotte 111). Galileo Galilei v letech 1609 - 1610 objevil, právě při pozorování M 44, že se nejedná o mlhoviny, nýbrž o shluky hvězd. Poněvadž mnoho otevřených hvězdokup jsou poměrně jasné objekty, snadno

pozorovatelné i malými dalekohledy, byly často objevovány již během 17. a 18. století, 33 z nich je zařazeno v Messierově katalogu právě z konce 18. století. V roce 1767 reverend John Michell odvodil, že hvězdokupy jsou s největší pravděpodobností fyzikálně vázané systémy hvězd. Následovalo nalezení vlastního pohybu Plejád Mädlerem a pohybové hvězdokupy Velké medvědice (Ursa Major Moving Cluster) Richardem A. Proctorem v roce 1869. Potvrzení toho, že jednotliví členové leží zhruba stejně daleko, přineslo přímé měření paralaxy několika nejbližších hvězdokup, jak z pozemských observatoří, tak z družice Hipparcos.

První klasifikaci hvězdných uskupení do kategorií *a–g* podle jejich koncentrace a bohatosti provedl Harlow Shapley v roce 1930 (hvězdokupy patří do kategorií *c–g*):

- a* nepravidelnosti pole
- b* hvězdné asociace
- c* velmi chudé a nepravidelné hvězdokupy
- d* chudé hvězdokupy
- e* středně bohaté kompaktní hvězdokupy
- f* bohaté kompaktní hvězdokupy
- g* velmi bohaté a koncentrované kompaktní hvězdokupy.

Další a ještě promyšlenější systém byl představen v roce 1930 Robertem Juliem Trumplerem. Tento systém sestává ze tří částí a charakterizuje každou hvězdokupu podle stupně koncentrace, rozsahu jasností jejich hvězd a její bohatosti (termínem oddělená se rozumí dobře odlišitelná od okolních hvězd pole):

- | | | |
|---------------------|-----|---|
| Stupeň koncentrace: | I | oddělená, silná koncentrace ke středu |
| | II | oddělená, slabá koncentrace ke středu |
| | III | oddělená, žádná koncentrace ke středu |
| | IV | špatně odlišitelná od okolních hvězd pole |
| Rozsah jasností: | 1 | malý rozsah jasností |
| | 2 | střední rozsah jasností |
| | 3 | velký rozsah jasností |
| Bohatost: | p | chudé - méně než 50 hvězd |
| | m | středně bohaté - 50 až 100 hvězd |
| | r | bohaté - více než 100 hvězd |

Pokud je Trumplerova klasifikace ještě následována písmenem "n", znamená to přítomnost difúzních mlhovin ve hvězdokupě ("n" - nebulosity).

1.3 Otevřená hvězdokupa M 35 (NGC 2168) – – faktografie a historie jejího pozorování

Rektascenze	6 ^h 09 ^m 05 ^s	(ekvinokcium J2000)
Deklinace	+ 24° 20′ 19″	(ekvinokcium J2000)
Vzdálenost	~ 900 pc	
Vizuální hv. velikost	5,3 mag	
Stáří	~ 2 × 10 ⁸ let	
Rozměr	~ 9,2 pc, obsahuje 1000 hvězd jasnějších, než $m_V = 22$ mag, celkem se uvádí až 2500 hvězd	
Zdánlivý rozměr	28,0′ v nejdelším směru	

Její objev bývá připisován švýcarskému astronomu a matematikovi Philippu Loys de Chéseaux (1718–1751), který v letech 1745–1746 sestavil katalog 21 pozorovaných „mlhovin“. Hvězdokupu v něm tehdy označil pořadovým číslem 12. Je ovšem možné, že byla pozorována již předtím Johnem Bevisem (anglickým fyzikem a amatérským astronomem, který žil v letech 1695–1771, mimo jiné prvním novodobým pozorovatelem známé Krabí mlhoviny v roce 1731, 27 let před Charlesem Messierem), v jehož hvězdném atlase Uranographia Britannica, dokončeném v roce 1750, je rovněž uvedena. Charles Messier (1730 - 1817) ji 30. srpna 1764 zařadil do svého katalogu právě pod pořadovým číslem 35.

Hvězdokupa je při stáří cca 180 miliónů let poměrně mladá a (při počtu, který se uvádí minimálně 1000, někdy až asi 2500 hvězd, rozptýlených v prostoru 9,2 pc) poměrně řídká, difúzní. Průměrný počet členů hvězdokupy tak dobře odpovídá dalšímu přibližnému vztahu [8]:

$$\log N = 1,3 \log D + 2,0, \quad (1.5)$$

kde N je počet hvězd, z nichž se hvězdokupa skládá a D je její průměr v parsecích.

Asi 15′ JZ směrem na hvězdné obloze se nachází další otevřená hvězdokupa NGC 2158 (vizuální jasnost 8,6 mag, zdánlivý průměr 5′), která je pětkrát vzdálenější (udává se až 4850 pc), desetkrát starší (cca $1,05 \times 10^9$ let) a mnohem kompaktnější. NGC 2158 byla ve své době (50. léta 20. století) dokonce vážným kandidátem na kulovou hvězdokupu.

Vzájemná zdánlivá poloha obou hvězdokup na hvězdné obloze je dobře patrná z obrázku 1.3 na následující straně. Hvězdokupa M 35 se nachází v pásu Mléčné dráhy, v blízkosti ramene Orionu.

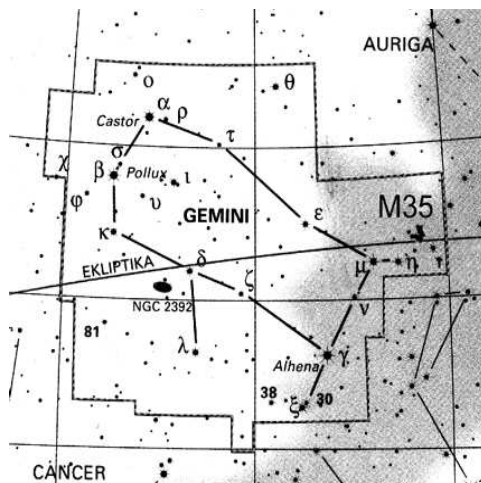
Hvězdotrupa M 35 leží na samé hranici viditelnosti pouhým okem. Její vizuální hvězdná velikost je 5,3 mag, takže za velmi dobrých pozorovacích podmínek je možné ji takto na obloze rozeznat. Již v menším dalekohledu je patrný její téměř kruhový tvar s poměrně nevýrazným rozložením hvězd.



Obrázek 1.3: Hvězdotrupa M 35 (NGC 2168) vlevo nahoře, vpravo dole NGC 2158, velikost pole obrázku $\sim 33' \times 30'$. Zdroj [10].

Dva obrázky na této stránce zobrazující hvězdotrupu M 35 různým způsobem. První obrázek je snímkem hvězdotrupy včetně blízké NGC 2158, druhý je schématickou mapkou souhvězdí Gemini (Blíženci) s vyznačením umístění hvězdotrupy M 35:

Obrázek 1.4: Schématická mapka souhvězdí Blíženci (Gemini) se zakreslenou hvězdotrupou M 35 v její pravé části. Zdroj [10].



Hvězdotrupa M 35 je podle Trumplerovy klasifikace typu III 3 r, jedná se o bohatou otevřenou hvězdotrupu s velkým rozsahem jasností jejich členů, dobře odlišitelnou od pozadí, nejevící však koncentraci ke středu.

Kapitola 2

Hertzsprungův-Russellův diagram

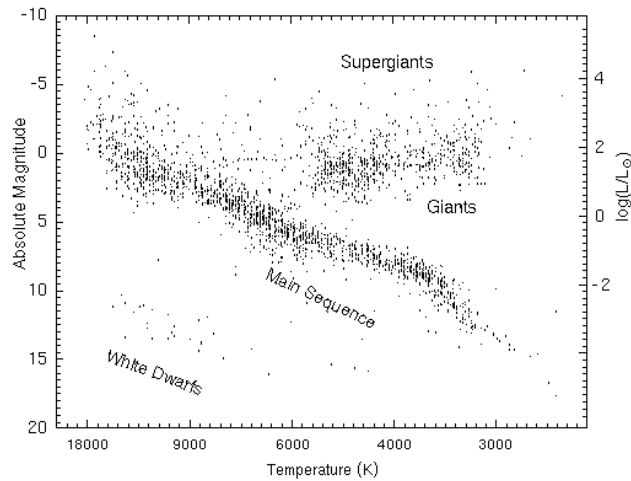
2.1 Historie H-R diagramu, jeho obecná podoba

Na počátku 20. století byl poprvé sestrojen diagram, zachycující závislost zářivého výkonu hvězd ($\log L$) na jejich efektivní teplotě ($\log T_{ef}$). Od té doby se všeobecně označuje jako tzv. *Hertzsprungův-Russellův diagram* (*H-R diagram*). Tomu však muselo předcházet věrohodné určení vzdáleností alespoň několika nejbližších hvězd pomocí trigonometrických paralax, aby bylo možné pozorované jasnosti (hvězdné velikosti) převádět na jasnosti (hvězdné velikosti) absolutní.

H-R diagram sestrojili víceméně na sobě nezávisle v letech 1910 - 1913 astronomové Hans Rosenberg (1879 - 1940), Ejnar Hertzsprung (1873 - 1965) a Henry Norris Russell (1877 - 1939). Prvně jmenovaný publikoval již v roce 1910 diagram, znázorňující vztah mezi jasností a spektrálním typem hvězd v Plejádách. H. N. Russell potom předložil v roce 1913 diagram, znázorňující vztah mezi absolutní hvězdnou velikostí a spektrálním typem pro hvězdy slunečního okolí. H-R diagram se stal nejvýznamnějším astrofyzikálním diagramem vůbec. Nejčastěji se uvádí v podobě, kdy se na vodorovnou osu vynáší v logaritmické škále efektivní teplota, spektrální typ nebo barevný index hvězd, na svislou osu (rovněž v logaritmické škále) zářivý výkon nebo absolutní hvězdná velikost. Jak je patrné z obrázku 2.1, zaujímají jednotlivé hvězdy v diagramu body (L, T_{ef}), jejichž hustota a rozložení nejsou rovnoměrné, ale hvězdy se sdružují podél určitých linií či větví.

Napříč diagramem, z pravého dolního do levého horního rohu leží *hlavní posloupnost* (Main Sequence). Poté co hvězdy o různých počátečních hmotnostech projdou ranými fázemi kontrakcí, kdy se v nich ustaví kompletní konvek-

tivní rovnováha a projdou tzv. *Hayashiho linií*, nacházející se na pravé straně H-R diagramu, začne se v jejich centrálních částech uvolňovat termonukleární přeměnou vodík na helium. Hvězdy "dosedají" do určitých míst na hlavní posloupnosti, jejichž poloha je dána výhradně jejich hmotností (resp. z ní plynoucího zářivého toku) a vytvářejí *hlavní posloupnost nulového stáří* (*Zero Age Main Sequence - ZAMS*).



Obrázek 2.1: Obecná podoba Hertzsprungova-Russellova diagramu. Zdroj [19].

Na hlavní posloupnosti pak hvězdy stráví 80 - 90% svého aktivního života, přičemž jejich poloha na ní se mění velmi pomalu. To je dáno jejich mimořádnou stabilitou a velmi pomalou změnou jejich fyzikálních charakteristik.

V pravé horní části diagramu se nachází *větev obrů* (Giants), kteří při teplotách řádu 10^8 K spalují ve svých jádrech helium, vodík zde hoří pouze v tenké slupce, obklopující heliové jádro. Na ni potom navazuje větev *červených obrů* - méně hmotných hvězd se slupkovým zdrojem hořícího vodíku, obklopujícího elektronově degenerované heliové jádro, která splývá s *asymptotickou větví obrů*, v nichž se nachází neaktivní elektronově degenerované uhlíko-kyslíkové jádro obalené vrstvou hořícího helia, vrstvou neaktivního helia a vrstvou hořícího vodíku. V H-R diagramu je rovněž dobře patrná posloupnost *bílých trpaslíků* (White Dwarfs), ležící v levé dolní části. Zahrnuje chladnoucí elektronově degenerované hvězdy v posledním stádiu svého vývoje, jejichž poloměr se při chladnutí už prakticky nemění a které se nesmírně pomalu posouvají po své větvi směrem dolů doprava. V horní části je ještě větev vzác-

ných *veleobřů* (Supergiants) a našli bychom ještě další, zde se však už jedná o rychlé fáze vývoje, zastoupené několika vzácnými jedinci.

H-R diagram je jedním z nejučinnějších nástrojů při studiu vlastností a stavby hvězd - jejich hmotnosti, hustoty, stáří, chemického složení, i při studiu hvězdného vývoje.

2.2 H-R diagramy a barevné diagramy otevřených hvězdokup

Při konstrukci H-R diagramů hvězdokup je výhodnější vynášet závislost pozorované hvězdné velikosti na *barevném indexu*, který je dán rozdílem hvězdných velikostí téže hvězdy, určených ve dvou rozdílných barvách c_1 a c_2 , jejichž efektivní vlnové délky jsou λ_{c_1} a λ_{c_2} , kde $\lambda_{c_1} < \lambda_{c_2}$, takže barevný index má tvar [7]:

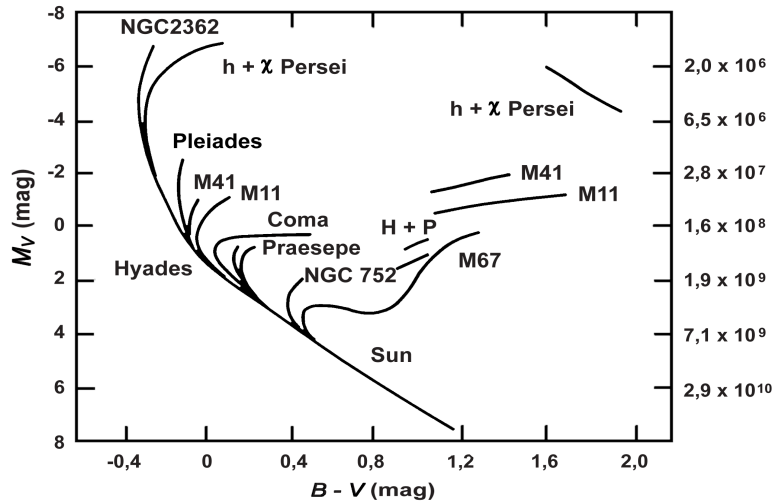
$$CI = m_{c_1} - m_{c_2}. \quad (2.1)$$

Diagram takovýchto závislostí se nazývá *barevným diagramem*. H-R diagramy (barevné diagramy) hvězdokup se odlišují od diagramů obecného pole nejvíce tím, že jeho větve jsou mnohem užší a výraznější. Stáří a vzdálenost jednotlivých členů hvězdokupy jsou prakticky totožné, jejich pozorované hvězdné velikosti se od absolutních liší o konstantní *modul vzdálenosti* - viz kapitola 3.1. Posloupnosti diagramu tak můžeme proložit víceméně souvislou křivkou, procházející body, které jsou obsazeny hvězdami stejného stáří, nazývanou *izochrona*.

U velmi mladých hvězdokup izochrona kopíruje hlavní posloupnost nulového stáří, po pár miliónech let nejhmotnější hvězdy začnou díky svému rychlému vývoji hlavní posloupnost opouštět směrem k nižším teplotám a vyšším výkonům (na barevném diagramu směrem k vyšším barevným indexům i hvězdným velikostem). Místo, kde dochází k výraznému ohybu izochrony se nazývá *bod obratu*, ten jednoznačně vyjadřuje stáří hvězdokupy, neboť odpovídá době, kterou hvězda určité hmotností stráví na hlavní posloupnosti. Čím je hvězdokupa starší, tím více bod obratu sestupuje směrem k méně hmotným hvězdám a tím více se izochrona zakřivuje směrem k červeným obrům [9].

Tento scénář velmi dobře souhlasí s pozorovanými skutečnostmi. H-R diagramy jednotlivých otevřených hvězdokup se od sebe nápadně odlišují díky svému značně rozdílnému stáří, které může být od 10^6 do 7×10^9 let. V případě kulových hvězdokup pozorujeme bod obratu již v oblasti hvězd s nižší hmotností než je hmotnost Slunce, což znamená, že kulové hvězdokupy musí

být několikanásobně starší. Mají také dobře definované všechny výše popsané větve obrů - viz obrázek 2.3. Z H-R diagramů hvězdokup lze odvodit nejen jejich stáří, ale i jejich modul vzdálenosti, neboli jejich vzdálenost [7].



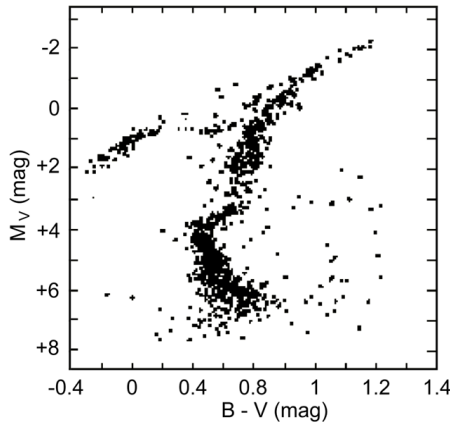
Obrázek 2.2: Schématické barevné diagramy různých otevřených hvězdokup, složené do jednoho obrázku. Historická práce Allana Sandage - 1958. Na vodorovné ose je vynesena barevný index $B - V$, na levé svislé ose absolutní hvězdná velikost, na pravé svislé ose stupnice stáří (odpovídající poloze bodu obratu) v letech. Zdroj [7].

Z diagramů tedy vyplývá, že čím vyšší teplota (směrem doleva na vodorovné ose), tím nižší barevný index (tento vztah by platil zcela přesně kdyby hvězdy zářily jako absolutně černé těleso - viz kapitola 3.1).

Vycházíme-li z barevného indexu, jsme schopni do diagramu zahrnout i velmi slabé hvězdy, pro které by bylo určení jejich spektrální klasifikace složité. Nejčastěji se při tvorbě barevných diagramů používá barevný index $B - V$, který může být ovšem značně zkreslen vlivem mezihvězdné extinkce, způsobující tzv. *mezihvězdné zčervenání*, které vytváří zdání, že hvězda je chladnější než ve skutečnosti. V poslední době se proto stále více prosazuje používání dlouhovlnnějších barevných indexů, např. $V - R$, $R - I$, které jsou mezihvězdnou extinkcí ovlivněny méně. To je také výhodou spektrální klasifikace, která je na ní prakticky nezávislá.

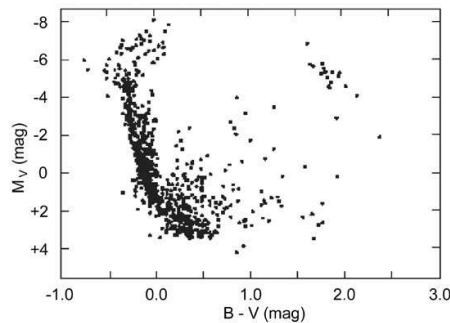
Protože se otevřené hvězdokupy vyskytují velmi často poblíž roviny Galaxie, promítá se do jejich pole zvýšené množství hvězd z galaktického pozadí, které

je pak nutné z jejich barevných diagramů vyřadit. Zároveň také mnoho hvězdokup obklopuje velké množství prachu, což vyvolává zvýšenou extinkci závislou na směru, ve kterém hvězdokupa leží.



Obrázek 2.3: H-R diagram kulové hvězdokupy M5 s jasně patrným bodem obratu, větvemi červených obrů a asymptotickou větví obrů, které se na vrcholu stýkají. Specifickým prvkem pro kulové hvězdokupy (hvězdy populace II) je *horizontální větev obrů*, rozprostírající se vlevo nahoře, což jsou hvězdy hmotnosti zhruba sluneční i menší, které v nitru spalují hélium na uhlík. Zdroj [9].

Při analýze barevných diagramů hvězdokup musíme nalézt rozdíl mezi jejich pozorovanými a absolutními hvězdnými velikostmi, jinými slovy jejich modul vzdálenosti. Toto se provádí srovnáním průběhu pozorované hlavní posloupnosti (resp. dalších posloupností) s některým z teoretických modelů, sestavených na základě fyzikálních předpokladů a znalostí, především stavby a vývoje hvězd, nebo odvozených z vlastností již dříve dobře prozkoumaných hvězdokup, jejichž vzdálenosti byly spolehlivě stanovené jiným způsobem.



Obrázek 2.4: H-R diagram mladé dvojité otevřené hvězdokupy $H + \chi$ Persei (stáří $\sim 10^7$ let). V diagramu je vidět hlavní posloupnost, vedoucí přes téměř 12 magnitud, v horní části viditelně rozdvojená, v dolní části vpravo od hlavní posloupnosti mladé hvězdy, vpravo nahoře skupinka obrů. Zdroj [12] - upraveno.

Obrázky, uvedené na této stránce dokumentují zásadní rozdíly mezi vzhledem H-R diagramů kulových a otevřených hvězdokup. Za zdůraznění tedy stojí u kulových hvězdokup dlouhé větve obrů včetně horizontální větve, u otevřených hvězdokup, zejména mladých, výskyt velkého počtu hvězd malé hmotnosti a svítivosti vpravo dole od hlavní posloupnosti.

Kapitola 3

Astronomická fotometrie

3.1 Záření hvězd a jeho měření

Většina hvězd o sobě "dává vědět" prostřednictvím *elektromagnetického záření*, které vyzařuje. Toto záření se svým charakterem blíží (alespoň v prvním přiblížení) záření *absolutně černého tělesa*, které je v termodynamické rovnováze, tj. rovnováze mezi množstvím vyzářených a pohlcených fotonů a charakteristiky jeho záření (koncentrace fotonů, rozdělení podle energií) závisí pouze na jeho teplotě. Záření takového tělesa se řídí *Planckovým zákonem*:

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \text{ resp. } B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (3.1)$$

kde B_ν , resp. B_λ je tok záření závislý na jeho frekvenci ν , resp. vlnové délce λ , T je termodynamická teplota, h je Planckova konstanta ($h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js) a k je Boltzmannova konstanta ($k = 1,38065 \cdot 10^{-26}$ JK⁻¹). V astrofyzice zejména má klíčový význam tzv. *Stefanův zákon*, který byl znám dříve než Planckův zákon a který popisuje vztah mezi celkovým množstvím vyzářené energie a tzv. *efektivní teplotou* vyzařujícího tělesa:

$$\Phi_e = \sigma S T_{ef}^4, \text{ kde } \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}. \quad (3.2)$$

Zde je Φ_e zářivý výkon, S velikost plochy, T_{ef} efektivní teplota a σ je *Stefanova-Boltzmannova konstanta* ($\sigma = 5,67040 \cdot 10^{-8}$ Wm⁻²K⁻⁴) [7].

Hvězdy je možné (opět alespoň v prvním přiblížení) považovat za zdroje elektromagnetického záření, které do prostoru vyzařují izotropně. Celkovou

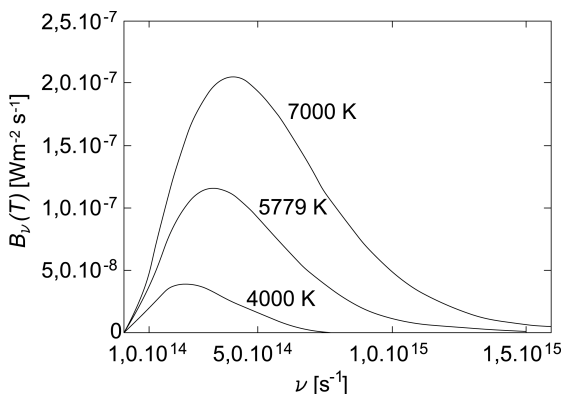
energii, vyzářenou ve všech vlnových délkách za jednotku času vyjadřuje veličina zvaná *celkový zářivý výkon* L , vyjadřovaná zpravidla ve wattech. Efektivní teplota hvězd je potom definována jako teplota, jakou by měla koule o poloměru R hvězdy (vyzařující jako absolutně černé těleso) s odpovídajícím celkovým zářivým výkonem. Dosadíme-li do Stefanova zákona, potom platí:

$$L = \sigma 4\pi R^2 T_{ef}^4. \quad (3.3)$$

S celkovým zářivým výkonem souvisí veličina zvaná *bolometrická jasnost* (*hustota zářivého toku*) F , která označuje množství záření (všech vlnových délek), které za časovou jednotku projde jednotkovou plochou kolmou ke směru paprsků ve vzdálenosti r od zdroje, udává se ve Wm^{-2} . Mezi bolometrickou jasností a celkovým zářivým výkonem pak platí vztah:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (3.4)$$

Bolometrická jasnost se měří obtížně, poněvadž je nutné detekovat pomocí tzv. *bolometrů* velmi slabé toky energií v širokém rozsahu spektra, navíc různě (v některých oborech značně) ovlivněné atmosférickou i mezihvězdnou extinkcí.



Obrázek 3.1: Rozdělení energie ve spektru záření absolutně černého tělesa, dané Planckovým zákonem pro různé teploty. Zdroj [7].

Výhodnější je proto měřit pouze v určitém oboru elektromagnetického spektra, vymezeném nějakým filtrem s přesně definovanou propustností. Nejvýznamnějším takovým oborem je *vizuální obor*, vymezený filtrem V , jehož propustnost odpovídá spektrální citlivosti lidského oka při denním vidění a jehož maximum propustnosti leží poblíž $\lambda = 550 \text{ nm}$. Hustota zářivého toku ve vizuálním oboru se potom označuje jako *jasnost* (hustota světelného toku) j .

V astronomii se z historických i praktických důvodů jasnost hvězd (nebo jiných svítících zdrojů) určuje jako tzv. *hvězdná velikost*, značená m , jejíž jed-

notkou je *magnituda* (mag). Vztah mezi jasností j a hvězdnou velikostí m příslušného zdroje vyjadřuje *Pogsonova rovnice*:

$$m = -2,5 \log \left(\frac{j}{j_0} \right) \text{ mag}, \quad (3.5)$$

kde j_0 značí tzv. referenční jasnost zdroje s hvězdnou velikostí 0 mag¹. Hvězdné velikosti lze analogicky stanovovat i v jiných oborech, než vizuálním. Bolometrickou hvězdnou velikost lze vyjádřit obdobně:

$$m_{bol} = -2,5 \log \left(\frac{F}{F_0} \right) \text{ mag}, \quad (3.6)$$

kde F_0 označuje hustotu zářivého toku hvězdy s bolometrickou hvězdnou velikostí 0 mag (vně zemské atmosféry)².

Porovnáním rovnic 3.4 a 3.7 lze snadno odvodit vztah, svazující bolometrické hvězdné velikosti a vzdálenosti:

$$m_2 - m_1 = 5 \log \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \text{ mag}. \quad (3.7)$$

Zavedeme-li tzv. *absolutní hvězdnou velikost* M , definovanou jako hvězdnou velikost zdroje ve vzdálenosti 10 pc, bude mít rovnice 3.7 tvar [7]:

$$\left(\frac{m - M}{1 \text{ mag}} \right) = 5 \log r - 5, \quad (3.8)$$

kde výraz $(m - M)$ označujeme jako tzv. *modul vzdálenosti*. Tato veličina hraje v astrofyzice velmi významnou úlohu - viz kapitola 2.2.

Mezi bolometrickou a vizuální hvězdnou velikostí platí [7]:

$$m_{bol} = m_v + BC, \quad (3.9)$$

kde BC je tzv. *bolometrická korekce*, vyjadřující rozložení energie ve spektru. U hvězd s teplotou okolo 7000 K, jejichž záření má nejvyšší světelnou účinnost se rovná nule, jinak je záporná. Pokud tedy hvězdy v určitém zjednodušení považujeme za absolutně černá tělesa a známe jejich efektivní teplotu T_{ef} ze Stefanova zákona nebo z jejich spektrálního typu (spektrální klasifikaci hvězd zde nebudu podrobněji uvádět, neboť při vlastní práci se z ní nevycházelo), můžeme

¹ $j_0 = 3,2 \cdot 10^{-9} \text{ Wm}^{-2}$
² $F_0 = 2,553 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$

určit vlnovou délku, na které zdroj (hvězda) vyzařuje maximálně z tzv. *Wienova posunovacího zákona* (předchůdce Planckova zákona):

$$\lambda_{max}T \cong 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^{-1}. \quad (3.10)$$

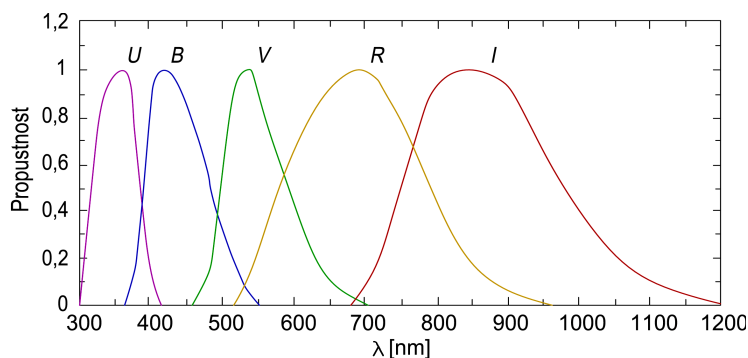
3.2 Fotometrické systémy

Se vzrůstající teplotou se tedy vyzařovací maximum přesouvá směrem ke kratším vlnovým délkám, s čímž souvisí závislost jejich barvy na efektivní teplotě.

Nejstarším a nejzákladnějším z detektorů, užívaným dodnes, je lidské oko, které je maximálně citlivé na vlnové délky okolo 550 nm (Slunce) a dokáže registrovat zdroje do hvězdné velikosti cca 6 mag s přesností několik desetín magnitudy (subjektivní chování).

Historicky první způsob objektivní detekce záření přišel s použitím fotografie (přesnost 0,1 mag), fotografická emulze je nejcitlivější v modré oblasti spektra [6]. Po zavedení ještě přesnějších a citlivějších metod detekce (fotoelektrická fotometrie, CCD fotometrie) přišla také možnost selekce určitých intervalů (pásem) vlnových délek pomocí fotometrických filtrů. Soustavy těchto filtrů vytvářejí *fotometrické systémy*, které se podle šířky pásem propustnosti dělí na:

- širokopásmové (šířka pásem od 30 nm do několika stovek nm)
- středněpásmové (šířka pásem od 10 do 30 nm)
- úzkopásmové (šířka pásem jen několi nm, téměř monochromatické.)



Obrázek 3.2: Graf spektrální citlivosti filtrů v Johnsonově fotometrickém systému *UBVRI*. Zdroj [7].

Nejrozšířenější fotometrický systém *UBV* byl zaveden H. L. Johnsonem a W. W. Morganem v roce 1953, Tento systém původně sestával ze tří širokopásmových filtrů s maximy: *U* (365 nm), *B* (440 nm), *V* (545 nm), s rozsahy propustností od 120 do 280 nm, který byl později rozšířen do červené a infračervené oblasti filtry *R* (700 nm), *I* (900 nm) a dále *J*, *K*, *L*, které leží v infračervené oblasti málo ovlivněné extinkcí. Schématické znázornění propustností filtrů tohoto systému je na obrázku 3.2.

Nevýhodou tohoto systému je jeho značná šířka pásem, proto byl v 60. letech 20. století vytvořen středněpásmový systém (Strömgrenův) *uvby*, který má maxima propustnosti po řadě 350 nm, 410 nm, 465 nm, 545 nm, s šířkou pásem od 15 do 35 nm. Existují i další systémy (např. ženevský nebo vlastní systém družice Hipparcos atd.). Při měření v jakémkoli systému je nezbytná znalost vzájemné transformace, zejména transformace do standardního systému *UBV*, který tvoří nejširší bázi pro porovnávání výsledků pozorování - viz kapitola 4.3.

3.3 CCD fotometrie

V současnosti se používá k optické detekci CCD fotometrie, která má podstatně větší citlivost, než fotografické desky, navíc rozšířenou i mimo optický obor. Obraz je snímán tzv. CCD kamerou (charge-coupled device), což je zobrazovací detektor, který zaznamenává obraz, vytvořený v ohniskové rovině objektivem dalekohledu. Ten je možné na různých místech zobrazit jako světlejší nebo tmavší a to úměrně počtu dopadajících fotonů. CCD detektor je schopný zachycené fotony po určitou dobu střídat (integrovat) a převést na elektrický signál (zdigitalizovat). Snímky jsou posléze ukládány na disk počítače ve formátu FITS. Ze snímků lze získat dva základní typy informace [2]:

- o poloze a úhlovém vzezření objektu
- o toku energie (jasnosti) daného objektu

Oba typy informace jsou většinou vzájemně provázané, protože žádný objekt se nezobrazí pouze na jeden pixel. Obecně existují dvě základní metody na získání fotometrické informace ze snímku hvězdného pole: aperturní a profilová fotometrie. V případě aperturní fotometrie jde o sečtení veškerého signálu od daného objektu v uměle vytvořené clonce (apertuře). Profilová fotometrie – měřeným objektem (hvězdou) se proloží vhodný profil a z něj se odvodí měřený signál.

Největší přesnost jednoho CCD fotometrického měření při použití menšího dalekohledu a několikaminutové expozici se pohybuje okolo 0,003 mag (10-krát

nižší než teoretický limit) [3]. Určitou nevýhodou CCD fotometrie je malý rozměr detektoru, takže záběry většího pole je nutné skládat z více snímků. CCD detektor je schopen registrovat velmi nízké hodnoty zářivého toku, spíše dochází k tzv. *přetečení* snímku v případě příliš jasných hvězd, kdy v detektoru dochází k uvolnění příliš mnoha elektronů, z nichž část se přesouvá do vedlejších pixelů - tzv. *blooming* - viz [3].

Při CCD snímkování je třeba co nejvíce potlačit vliv tzv. *šumu* (ponejvíce *tepelného*), v jehož důsledku vzniká temný proud, jehož elektrony mohou pixely v krajním případě zahltit, takže dopadající záření už neuvolní další. Hodnota tepelného šumu se přičítá k obrazu objektu.

Při vyčítání elektronů z pixelu a následné digitalizaci vzniká tzv. *výstupní šum*, lišící se podle typu CCD detektoru. Tzv. *multiplikatívni* šum je výsledkem různé citlivosti pixelů na dopadající fotony. Vyskytují se tzv. *hot spots*, což jsou pixely produkující více temného proudu a tzv. *dark spots* (necitlivé pixely), rovněž osvětlení čipu nemusí být zcela rovnoměrné.

K potlačení vlivu tepelného šumu je třeba CCD chladit, ne však více než na -120° C (nebezpečí poškození přístroje). I po zchlazení detektoru však působí vlivy vyčítacího šumu a temného proudu, které se sníží odečtením tzv. *temného snímku* (dark frame) a podělením tzv. *flat fieldem* [2] [3].

Temný snímek (resp. více snímků, z nichž je zprůměrován tzv. *master-dark*) se pořizuje se stejnou expoziční dobou a při stejné teplotě kamery jako vlastní, tzv. surový vědecký snímek, avšak se zakrytou optikou, takže zobrazuje pouze vliv a rozložení temného proudu. Jeho odečtením od vlastního snímku tento vliv odstraníme. Vliv multiplikatívniho šumu a nerovnoměrného osvětlení detektoru odstraníme následným podělením snímku zprůměrovaným flat-fieldem (tzv. *master-flat*), (od kterého byl již předtím také odečten temný snímek), což je snímek rovnoměrně osvětlené plochy (oblohy) za soumraku nebo za úsvitu, kdy není ještě natolik jasná aby hrozilo přesvětlení detektoru. Flat-field musí být opět pořízen za stejných podmínek jako vlastní snímek, pokud používáme více barevných filtrů, musí být pořízen zvlášť pro každý z nich.

3.4 Eliminace nepříznivých vlivů

Při astronomické fotometrii a jejím vyhodnocování je třeba počítat i s jevy, které ovlivňují intenzitu a frekvenci k nám přicházejícího záření. Jsou to především:

- Atmosférická extinkce
- Mezihvězdná extinkce

Atmosférická extinkce (zeslabení světla průchodem atmosférou) závisí na zenitové vzdálenosti pozorovaného objektu (tj. velikosti vzdušné hmoty, definované jako násobek této hmoty v zenitu, kterou musí světlo projít), na vlnové délce záření (čím kratší vlnová délka, tím větší extinkce). Samozřejmě také závisí na dalších těžko měřitelných veličinách souvisejících s okamžitým stavem atmosféry (vlhkost, znečištění), který může být proměnlivý.

Při výpočtu velikosti extinkce platí tzv. *exponenciální zákon extinkce* [6]:

$$I = I_0 \cdot e^{-k_\lambda \cdot \Delta x}, \quad (3.11)$$

kde I_0 je původní intenzita světla před vstupem do atmosféry, Δx je dráha, kterou musí světlo urazit v zeslabujícím prostředí (atmosféře) a k je tzv. extinkční koeficient, který navíc závisí na vlnové délce světla, jinými slovy na barevném indexu hvězdy.

Pokud přejdeme k magnitudám, dostaneme poměrně jednoduchý, i když samozřejmě přibližný vztah pro stanovení atmosférické extinkce ve tvaru: $\Delta m \sim k \times \Delta x$, tedy: $m = m_0 + k \times \Delta x$, kde m_0 je hvězdná velikost objektu, neovlivněná extinkcí (mimoatmosférická magnituda). Zvolíme-li velikost vzdušné hmoty Δx v zenitu = 1, potom dostaneme vztah [6]:

$$m = m_0 + k \times X, \quad (3.12)$$

kde X je tzv. vzdušná hmota jako funkce zenitové vzdálenosti. Pokud vyneseme závislost instrumentální magnitudy na vzdušné hmotě X , potom směrnice lineární regrese, tzv. *Bouguerovy přímky*, odpovídá extinkčnímu koeficientu k , konstanta m_0 mimoatmosférické magnitudě ($X = 0$). Pokud bychom například zvolili $X = 1$, dostali bychom (teoreticky extrapolovanou) instrumentální magnitudu stejného objektu v zenitu.

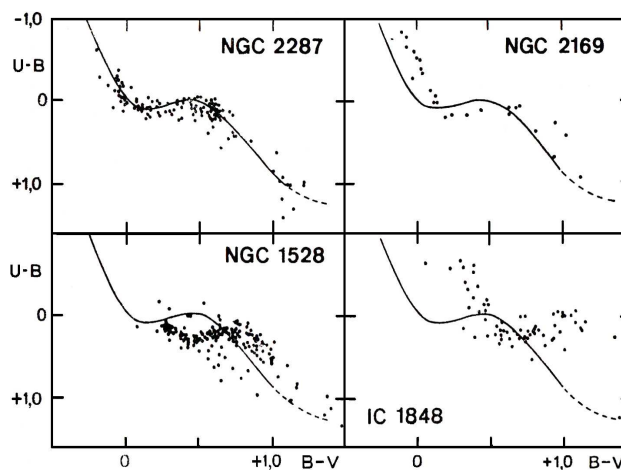
Extinkční koeficient lze stanovit na základě měření i jediné hvězdy během noci (pokud se nemění její skutečná jasnost a nemění se extinkce). Na základě vztahu 3.12 lze (při současném výpočtu vzdušné hmoty v závislosti na zenitové vzdálenosti, pro který existuje řada vztahů - viz [9] stanovit mimoatmosférické magnitudy pozorovaných hvězd, jinou možností je barevná fotometrická kalibrace instrumentálních magnitud způsobem, popsáním v kapitole 4.3.

Činitelem, který může značně zkreslovat naše předpoklady, vzešlé z naměřených hodnot, může být *mezihvězdná extinkce*, jejíž hlavní příčinou je existence mezihvězdného prachu. Mezihvězdná extinkce ovlivňuje barevný index. Dochází k tzv. *mezihvězdnému zčervenání*, v jehož důsledku se pozorované hvězdy jeví jako chladnější. Rozdíl mezi pozorovaným barevným indexem CI

a "nezčervenálým" barevným indexem CI_0 , který bychom naměřili bez vlivu extinkce, označujeme jako [7] tzv. *barevný exces* $E(\lambda_1, \lambda_2)$. (V anglicky psaných publikacích bývá tato veličina E nazývána přímo *reddening*, zčervenání).

Jedním z nástrojů na určení barevného excesu (mezihvězdného zčervenání) může být vícebarevná fotometrie, např. standardní fotometrie UBV , kde lze barevný exces odečíst z tzv. *trojbarevného diagramu* $(U - B)/(B - V)$. To je znázorněné na všech čtyřech segmentech obrázku 3.3, na kterých je plnou čarou vyznačená teoretická hlavní posloupnost, tj. jak by probíhala bez extinkce. Body odpovídají pozorovaným hodnotám. Vzájemné posunutí je způsobené extinkcí:

Obrázek 3.3: Příklady vlivu mezihvězdné extinkce na diagram $(U - B)/(B - V)$ u některých otevřených hvězdokup. Pro NGC 2287 je téměř bez vlivu (průběh křivky naměřených hodnot je shodný s teoretickým modelem), u IC 1848 je značný - $E(B - V) \cong 0,7$ mag. Zdroj [9].



Čím kratkovlnnější je barevný index, tím více je mezihvězdnou extinkcí ovlivněn, hodnoty barevného excesu jsou větší. Tak tomu je až do vlnové délky 218 nm v ultrafialové oblasti, u ještě kratších vlnových délek, stejně jako v infračervené oblasti je vliv extinkce na vlnovou délku složitější a na jejím průběhu lze vysledovat leccos o chemickém složení mezihvězdného prachu [7].

Na základě experimentálních ověření byl dokonce vypracován numerický vztah, publikovaný v [1], umožňující určit (nepřesněji u horkých hvězd tzv. raných spektrálních typů) "nezčervenálý" barevný index $(B - V)_0$ z naměřených hodnot U, B a V , tedy opravu o mezihvězdnou extinkci.

Na základě takového "opraveného" barevného indexu lze potom odvodit i rovněž "opravenou" pozorovanou vizuální hvězdnou velikost V_0 , což dále z barevného diagramu $V_0/(B - V)_0$ extinkcí nezatíženého umožní odečíst např. skutečnou vzdálenost otevřené hvězdokupy.

Kapitola 4

Pozorování a jeho zpracování

4.1 Pořízení snímků a jejich redukce

Pozorování vybrané hvězdokupy M 35 se uskutečnilo na observatoři Masarykovy university na Kraví hoře:

- Zeměpisná šířka observatoře: $49,204128^\circ = 49^\circ 12' 14,86''$
- Zeměpisná délka observatoře: $16,58395^\circ = 16^\circ 35' 2,22''$
- Nadmořská výška observatoře: 304 m n.m.

Pozorování probíhalo ve třech pozorovatelsky nejvhodnějších nocích, které v daném období vůbec přicházely v úvahu. Vzhledem k poměrně značnému zdánlivému rozměru pozorované hvězdokupy (max. cca $30'$) na hvězdné obloze byly, v relaci s reálnými časovými možnostmi, pořízeny snímky dvou hvězdných polí nadále označovaných jako pole "1" a pole "2" (viz dále přiložené obrázky). Pole "1" zahrnuje centrální oblast hvězdokupy M 35 a je nejbohatší na hvězdy, tvořící její členy, pole "2" je poněkud mimo centrum a je o něco chudší. Obě pole se částečně překrývají.

Tabulka 4.1: Časy pozorování

datum	čas pozorování (UT)	čas pozorování (JD)
29.3.2008	21:53:23 - 23:31:07	2454555,41207 - 2454555,47994
30.3.2008	18:55:50 - 20:19:51	2454556,28877 - 2454556,34712
31.3.2008	19:07:56 - 21:40:40	2454557,29718 - 2454557,40324

Použité vybavení:

- Dalekohled: 62 cm zrcadlový dalekohled - systém Newton.
- Kamera: SBIG ST-8 Dual CCD Camera s čipem KAF 1600.
- Filtry: B, V, R, I

Tabulka 4.2: Pořízené snímky

datum	počet	filtr	expozice	pole
29.3.2008	25	V	60 s	2
	24	R	60 s	2
30.3.2008	10	B	100 s	1
	20	V	60 s	1
	20	R	60 s	1
31.3.2008	35	B	100 s	1
	25	B	100 s	2
	20	I	60 s	2

K pořízení vlastních snímků i snímků, potřebných k jejich redukci, tedy odečtení temného snímku (darkframu) a podělení světlým snímkem (flatfieldem) jsem použil programy pro ovládání dalekohledu a kamery, vytvořené Filipem Hrochem [2]. Pozorování ve filtrech V, R probíhalo vždy v sérii po sobě jdoucích snímků, tedy za prakticky totožných pozorovacích podmínek. Z časových důvodů bylo nutné pořídit v příslušný pozorovací den nejprve všechny snímky ve filtru B (následně již v sérii filtrů V, R). Snímky ve filtru I (nejmenší extinkce) byly rovněž z důvodu nedostatku pozorovacího času pořizovány nakonec.

Identifikace a následná fotometrie hvězd byla provedena s použitím programového balíku Munipack [16], respektive jeho rovnocenné verze Muniwin [16], určené pro prostředí systému Windows. Jedná se o velice komplexní a propracovaný software, který přiřazuje jednotlivým objektům o určitých souřadnicích na snímku instrumentální magnitudy i s jejich odchylkami. Instrumentální magnitudy jsou získávány pomocí aperturní fotometrie, pro niž je možné volit různě velké clonky (z celkového počtu 12), například podle seeingu. Program Muniwin pomocí svých funkcí Matching a Merge frames (odpovídající příslušným programovým utilitám Munimatch a Combine v Munipacku) dokáže provést vzájemné ztotožnění jednotlivých, často vzájemně posunutých snímků, resp. je posléze vzájemně složit, což dává výsledným snímkům zcela novou dimenzi. Výsledky fotometrie jsou vypsány na textových

výpisech s příponou .mat, ve kterých odpovídající si hvězdy ze vzájemně ztožněných a složených snímků se nacházejí na stejných řádcích (jejich uvedené souřadnice na snímku se mohou pro stejné hvězdy na různých snímcích lišit, pro všechny hvězdy by se ovšem měly lišit o přibližně stejnou hodnotu).

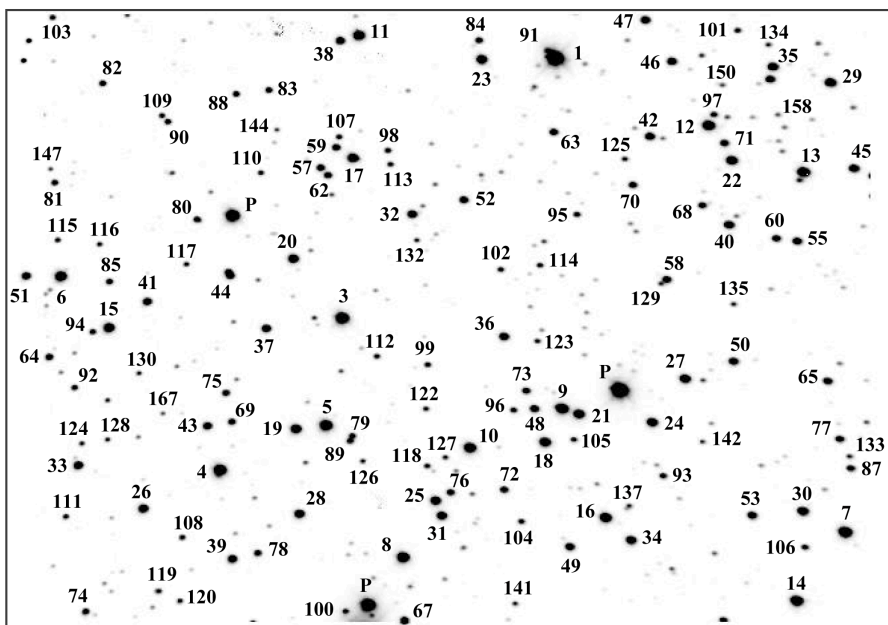
Je nutné poznamenat, že intenzita a frekvence pozorování byly negativně ovlivněny jednak podzimní a zimní přestavbou kopule observatoře, která v tomto období pozorování znemožňovala, jednak dlouhodobě nepříznivým počasím v březnu a dubnu 2008, kdy pozorování hvězdokupy M 35 ještě přichází vzhledem k její poloze na hvězdné obloze v úvažu. Uvedené tři noci (resp. jejich první poloviny) byly v celém tomto období jediné prakticky možné.

4.2 Výsledky pozorování

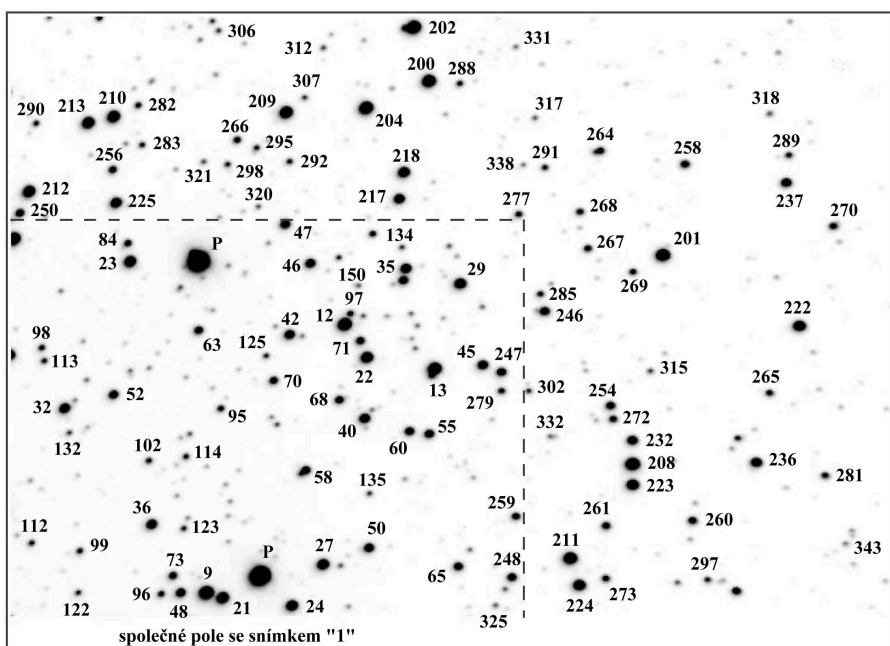
Jak je patrné z tabulky 4.2 byly snímkovány dvě částečně se překrývající hvězdná pole, označená "1" a "2", každé o ploše $12' \times 18'$. Oba snímky jsou vyobrazeny na následující straně s vyznačením oblasti jejich překryvu. Jednotlivé hvězdy, které byly předmětem fotometrického zpracování, jsou opatřeny pořadovými čísly, převzatými z tabulky .mat programu Munipack; pokud nějaké číslo v pořadí chybí, chybělo i ve zmíněné tabulce. V oblasti společné oběma snímkům mají stejné hvězdy stejné číslo. Na poli "2" v oblasti mimo dosah pole "1" začínají hvězdy z praktických důvodů pořadovým číslem 200 – oba snímky jsem sice kalibroval (viz následující kapitola Kalibrace snímků) na základě 20-ti hvězd z každého snímku, pokrývajících pokud možno celé jeho pole, při následné konstrukci barevných diagramů jsem pro barevné indexy $(B - V)$, $(V - R)$ vybíral primárně hvězdy z pole "1" (bohatší pole), z pole "2" jsem pro tyto indexy pouze přidal hvězdy z oblasti mimo překryv. Při konstrukci barevného diagramu pro barevný index $(V - I)$ jsem vycházel pouze z pole "2", jen na něm byly z časových důvodů pořízeny snímky ve filtru I .

Hvězdy, označené písmenem "P" (ty nejjasnější) nebyly do fotometrie zahrnuty ("přetečené"), naštěstí hvězda s pořadovým číslem 1 na poli "1" ano a je v rámci barevného diagramu velmi zajímavá – viz strana 35.

I když zvýšení počtu hvězd v diagramech $(B - V)$, $(V - R)$ o hvězdy z pole "2" není nijak závratné (ovšem zase není zanedbatelné), bylo především zajímavé takto spojit data ze dvou různých snímků, pořízených v jinou dobu s jinými pozorovacími podmínkami, především s jinou atmosférickou extinkcí. V rámci jednoho diagramu tak bylo možné ověřit vhodnost a preciznost provedených kalibrací.



Obrázek 4.1: Pole "1" - čísla jsou označené hvězdy, u kterých byla provedena fotometrie. Písmenem P jsou označené hvězdy, které byly na snímku přetečené.



Obrázek 4.2: Pole "2" - hvězdy, které nejsou v poli "1" začínají číslem 200.

Kalibrace snímků (podrobný způsob jejího provedení je posán v následující kapitole 4.3), tj. přepočítání instrumentálních hvězdných velikostí na skutečné hvězdné velikosti, byla provedena pomocí 20-ti srovnávacích hvězd, jejichž hvězdné velikosti v jednotlivých fotometrických barvách byly katalogizovány na základě dřívějších pozorování. V této práci byla použita data z [11]. Jako výše uvedené srovnávací hvězdy byly pro jednotlivá pole použity tyto:

- Pro pole "1" - obrázek 4.1 - hvězdy č. 36, 58, 65, 71, 72, 75, 76, 77, 78, 82, 87, 88, 95, 99, 102, 112, 122, 124, 128, 135.
- Pro pole "2" - obrázek 4.2 - hvězdy č. 36, 58, 60, 63, 65, 71, 95, 99, 112, 122, 132, 135, 212, 217, 247, 250, 277, 279, 298, 320.

Srovnávací hvězdy byly vybírány tak, aby pokryly co největší částí obou polí. Snímaná pole hvězdokupy mají tak malý rozměr (i společně), že není třeba brát v úvahu rozdílnou extinkci pro jednotlivé části pole.

Vzhledem k tomu, že otevřená hvězdokupa M35 se nachází přímo v prostoru Mléčné dráhy, tj. v prostoru s největší koncentrací hvězd pozadí, bylo poměrně důležité oddělit skutečné členy hvězdokupy od těchto hvězd pozadí galaktického disku, které se do pole hvězdokupy pouze náhodně promítají. Toto je možné provést různým způsobem, např. na základě rozboru zčervenání (barevného excesu) nebo analýzou vlastního pohybu hvězd. Tu je opět možné provést odečtením katalogových hodnot (např. katalogy Hipparchos, Tycho, atd., obsahující údaje o vlastních pohybech), nebo vycházet z již publikovaných údajů. Já jsem k tomuto účelu použil poměrně podrobná data ze studie [17], analyzující právě vlastní pohyby. Procentuální pravděpodobnost příslušnosti ke hvězdokupě je uvedena vždy v posledním sloupci tabulek výsledků CCD fotometrie, které jsou uvedené v příloze této práce - viz strany 49 - 56.

Ve zkonstruovaných barevných diagramech (viz obrázky 5.1 – 5.6 v kapitole 5.1) je pro všechny barevné indexy vždy dokumentován rozdíl mezi diagramem, obsahujícím všechny fotometricky zpracované hvězdy z příslušných snímků a diagramem, obsahujícím pouze příslušníky hvězdokupy. Do diagramů, které obsahují pouze hvězdy, náležející ke hvězdokupě, byly zahrnuty pouze ty, jejichž pravděpodobnost příslušnosti, uvedená v [17] je vyšší než 50%. U některých hvězd není pravděpodobnost příslušnosti ke hvězdokupě uvedena, to znamená, že se dotyčnou hvězdu v [17] nepodařilo identifikovat. Vzhledem k tomu, že počet takto nenalezených hvězd je poměrně sporadický a jednalo se spíše o slabší hvězdy, u kterých je jejich pravděpodobnost příslušnosti ke hvězdokupě spíše menší, nebyly do nich rovněž zahrnuty.

4.3 Kalibrace snímků

Zcela důsledně a korektně provedená kalibrace, tj. přechod od měřených, instrumentálních hvězdných velikostí k mezinárodně srovnávatelným může být záležitostí značně komplikovanou, záviselou na mnoha faktorech [1]. Následující stať se částečně odkazuje právě na tuto práci a také na [4].

Osvětlení, které zaznamená detektor našeho fotometru (CCD prvek) neodpovídá barevnému rozložení jasnosti hvězdy, protože dopadající záření je dvojím způsobem transformováno. Prvním transformačním prostředím je zemská atmosféra. V optické oblasti spektra platí, že čím kratší je vlnová délka dopadajícího záření, tím více je zemskou atmosférou zeslabováno. Toto zeslabení – atmosférická extinkce – je výsledným efektem absorpce a rozptylu dopadajícího záření. Více o atmosférické extinkci - viz kapitola 3.4.

Ke druhé transformaci měřeného světla dochází ve vlastním měřicím přístroji. Skutečnost, že žádný detektor neměří monochromatickou hvězdnou veličinu, nýbrž hvězdnou veličinu integrální, danou vztahem:

$$F = \int_0^{\infty} F(\lambda)R(\lambda)d\lambda, \quad (4.1)$$

kde F je tok zářivé energie zaznamenaný fotometrem, $F(\lambda)$ je tok zářivé energie v závislosti na vlnové délce (barvě) a $R(\lambda)$ je tzv. spektrální propustnost, kterou právě ovlivňujeme tím, že při pozorování jasnosti hvězd před detektor zařadíme nějaký barevný filtr, propouštějící záření pouze v určitém známém intervalu vlnových délek. Všechny optické části dalekohledu a fotometru (čočky, filtry) zeslabují ovšem světlo různých vlnových délek různě a rovněž citlivost detektoru fotometru ke světlu různých barev je různá. Proto je nutné měření jasnosti hvězd vždy pečlivě redukovat na standardní systém.

Určitým, avšak méně přesným způsobem by bylo možné určit hodnotu standardní hvězdné velikosti v každé barvě odečtením příslušného posunu od instrumentální hvězdné velikosti. Tento posun by byl stanoven jako aritmetický průměr rozdílů instrumentálních (naměřených) a standardních (tabelovaných) hodnot hvězdných velikostí, získaných z co největšího množství srovnávacích hvězd na příslušném snímku. To znamená, že od každé instrumentální hvězdné velikosti v každé barvě bychom odečítali určitou konstantní, byť pečlivě stanovenou hodnotu (včetně stanovení odpovídajících chyb). Tento postup by mohl být dostatečně korektní, pokud bychom měření prováděli ve zcela standardizované optické soustavě, tj. soustavě se spektrální propustností zcela standardní a kalibrované soustavy filtrů. Vzhledem k tomu, že tomu

tak není, je přesnější provést tzv. barevnou fotometrickou kalibraci, tj. převod měření získaného specifickou sadou filtrů na výsledek, který by byl naměřen s užitím filtrů standardních [4]. Spektrální propustnosti specifických filtrů lze vyjádřit jako lineární kombinaci spektrálních propustností standardních filtrů. Při zcela korektní barevné kalibraci se čtyřmi filtry mají transformační rovnice poměrně komplikovaný tvar a to takový, že pro tři z nich vystupuje na levé straně rozdíl sousedních instrumentálních magnitud. Tedy například:

$$m_b - m_v = \zeta_{bv} + \alpha(m_B - m_V) + a(m_R - m_B) + b(m_I - m_B) + c(m_R - m_V) + d(m_I - m_V). \quad (4.2)$$

V každém takovém vztahu je jeden (případně dva) z koeficientů výrazně dominantnější. Na základě teoretického odvození i praktickým statistickým rozbohem v [4] je to právě koeficient příslušný odpovídajícímu barevnému indexu na obou stranách rovnice, v tomto případě α . Vzhledem k tomu, že veškerá měření provádíme s omezenou přesností, lze potom takovéto závislosti při kalibraci se čtyřmi filtry vyjádřit pomocí teoretických vztahů:

$$m_b - m_v = \zeta_{bv} + \alpha(m_B - m_V), \quad (4.3)$$

$$m_v - m_r = \zeta_{vr} + \beta(m_V - m_R), \quad (4.4)$$

$$m_r - m_i = \zeta_{ri} + \gamma(m_R - m_I), \quad (4.5)$$

kde malé indexy označují hvězdné velikosti, naměřené ve specifických filtrech, velké indexy ve standardních filtrech. Transformační rovnice lze za určitých nevyhnutelných aproximací rovněž podle [4] vyjádřit ve tvaru:

$$m_b - m_B = \zeta_b + \xi(m_B - m_V), \quad (4.6)$$

$$m_v - m_V = \zeta_v + \eta(m_V - m_R), \quad (4.7)$$

$$m_r - m_R = \zeta_r + \chi(m_V - m_R), \quad (4.8)$$

$$m_i - m_I = \zeta_i + \psi(m_R - m_I), \quad (4.9)$$

Při praktickém provedení barevné fotometrické kalibrace snímků jsem vycházel právě z této poslední sady rovnic 4.6 - 4.9. Hvězdné velikosti, vyjádřené magnitudami s velkými indexy, reprezentují tabelované hvězdné velikosti vybraných srovnávacích hvězd, s malými indexy potom naměřené hodnoty. Protože po provedení lineárních regresí (fitování) hodnot, vzešlých z dosazení tabelovaných hvězdných velikostí srovnávacích hvězd do těchto vztahů budou nadále skutečné hvězdné velikosti pro jednotlivé hvězdy (reprezentované na levé straně rovnic magnitudami s velkými indexy) určovány dosazováním

jejich instrumentálních magnitud do rovnic přímek, daných již zmíněnými lineárními regresemi, byly pravé strany těchto rovnic ještě doplněny o rozdíly příslušných instrumentálních magnitud, takže na nich vlastně dochází ke zprůměrování tabelovaných a instrumentálních hodnot. Například první rovnice 4.6 potom bude mít tvar:

$$m_b - m_B = \zeta_b + \xi[((m_B - m_V) + (m_b - m_v))/2]. \quad (4.10)$$

Jak již bylo uvedeno, rovnice přímek daných lineární regrese všech dosazených hodnot pro vybrané srovnávací hvězdy slouží posléze jako transformační rovnice pro převod instrumentálních hvězdných velikostí na kalibrované. Po provedení lineárních regrese podle [5] (grafy fitovaných přímek jsou vyobrazené rovněž v příloze na obrázcích A.1 - A.7) bylo (po jednoduchých úpravách) dosaženo těchto výsledných kalibračních rovnic:

- Kalibrační rovnice pro pole "1" (viz obrázek 4.1):

$$m_B = m_b + (0,128 \pm 0,151) \times (m_b - m_v) - (3,775 \pm 0,072), \quad (4.11)$$

$$m_V = m_v - (0,069 \pm 0,348) \times (m_v - m_r) - (2,204 \pm 0,126), \quad (4.12)$$

$$m_R = m_r + (0,061 \pm 0,418) \times (m_v - m_r) - (1,712 \pm 0,151). \quad (4.13)$$

Kalibrační rovnice jsou pouze tři, protože snímky pole "1" nebyly pořizovány ve fotometrickém filtru *I*. Velké indexy u magnitud na levých stranách rovnic značí v tomto případě výsledné kalibrované hvězdné velikosti, malé indexy na pravých stranách naměřené instrumentální hvězdné velikosti. V kalibračních rovnicích už nefigurují katalogové hvězdné velikosti srovnávacích hvězd, protože už se jedná o obecné kalibrační rovnice pro všechny hvězdy daného pole. Totéž platí i pro pole "2". Tam už ovšem byly pořizeny i snímky ve fotometrickém filtru *I*:

- Kalibrační rovnice pro pole "2" (viz obrázek 4.2):

$$m_B = m_b - (0,078 \pm 0,145) \times (m_b - m_v) - (3,628 \pm 0,079), \quad (4.14)$$

$$m_V = m_v - (0,052 \pm 0,329) \times (m_v - m_r) - (3,171 \pm 0,129), \quad (4.15)$$

$$m_R = m_r + (0,058 \pm 0,312) \times (m_v - m_r) - (2,595 \pm 0,122), \quad (4.16)$$

$$m_I = m_i + (0,044 \pm 0,247) \times (m_r - m_i) - (2,316 \pm 0,104). \quad (4.17)$$

Absolutní členy těchto rovnic, odpovídající členům ζ v rovnicích 4.3 - 4.9 tak přibližně odpovídají posunu aritmetického průměru rozdílů instrumentálních a tabelovaných hodnot hvězdných velikostí, koeficienty, odpovídající členům $\alpha - \psi$ v rovnicích 4.3 - 4.9 znamenají směrnice přímek daných lineárními regresemi - viz obrázky A.1 - A.7 v příloze.

Kapitola 5

Barevné diagramy a jejich analýza

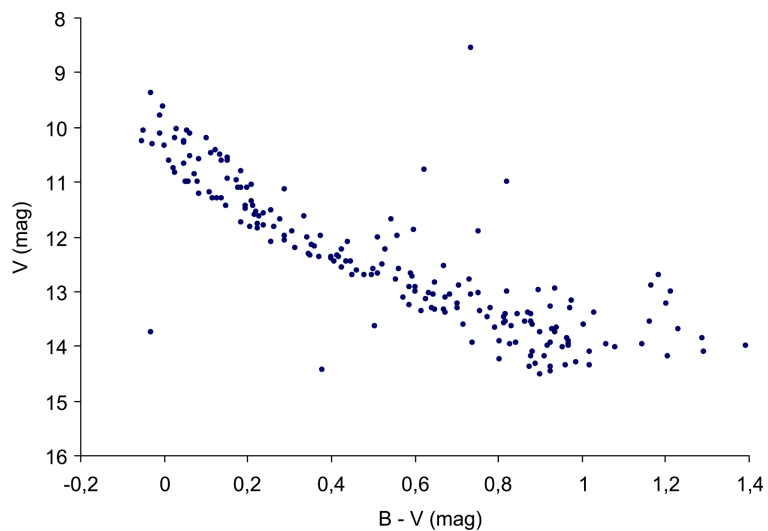
5.1 Konstrukce barevných diagramů

Barevné diagramy pro jednotlivé barevné indexy $(B - V)$, $(V - R)$, $(V - I)$ byly sestrojeny na základě výsledků CCD fotometrie - viz tabulky na stranách 49 - 56. Na vodorovnou osu grafu byl vždy vynášen příslušný barevný index, na svislou osu naměřená hvězdná velikost ve filtru V . Barevné diagramy jsou na obrázcích 5.1 - 5.6.

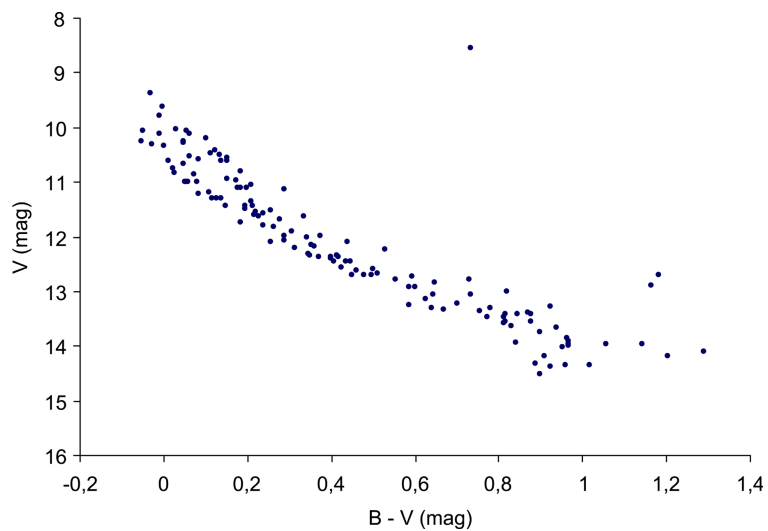
Na všech diagramech je patrná především jasně definovaná hlavní posloupnost. Na diagramech, obsahujících všechny fotometricky zpracované hvězdy se vyskytují rovněž početné skupiny hvězd mimo hlavní posloupnost, jedná se tedy o hvězdy z galaktického pozadí. I na diagramech, obsahujících pouze členy hvězdokupy, jsou patrné jednotlivé hvězdy vpravo od dolní části hlavní posloupnosti. Podle teoretických znalostí (viz kapitola 2.1) se jedná o mladé hvězdy, ve kterých se dosud nezapálily termionukleární reakce, leží tedy vpravo od Hayashiho linie. Je jich ovšem velmi málo, z toho lze usuzovat, že hvězdokupa neobsahuje mnoho hvězd v raných fázích vývoje, nebude tedy extrémně mladá.

Na druhou stranu na diagramech není patrná ani větev obrů, tj. hvězdy nacházející se za bodem obratu (viz kapitola 2.1). Nemůže tudíž jít ani o hvězdokupu starou, v jejímž barevném diagramu by byly jak bod obratu, tak větev obrů zřetelné. Jediným výjimečným objektem je hvězda, nacházející se v diagramech $(B - V)$, $(V - R)$ viditelně za bodem obratu, jedná se o nejjasnější fotometricky zpracovanou hvězdu, označenou na obrázku 4.1 číslem 1. Patrně se jedná o hvězdu ve stadiu rudého obra. Na barevném diagramu $(V - I)$ tato hvězda chybí, na snímcích pole "2" se jí nepodařilo fotometricky zpracovat.

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, vyjadřující závislost hvězdné velikosti ve filtru V na barevném indexu ($B - V$):

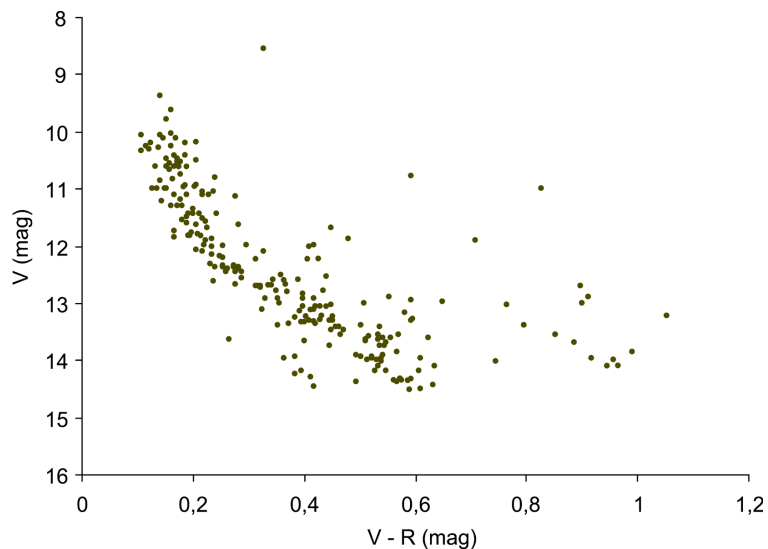


Obrázek 5.1: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující všechny fotometricky zpracované hvězdy z obou polí.

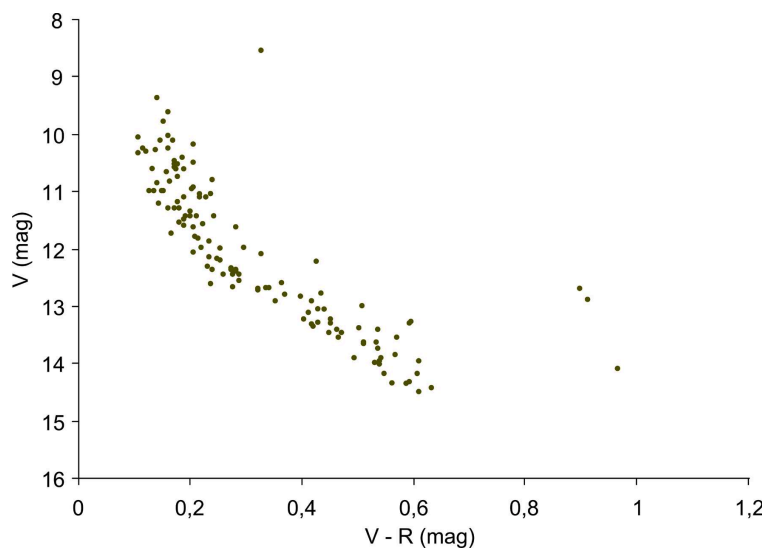


Obrázek 5.2: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující pouze členy hvězdokupy.

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, vyjadřující závislost hvězdné velikosti ve filtru V na barevném indexu ($V - R$):

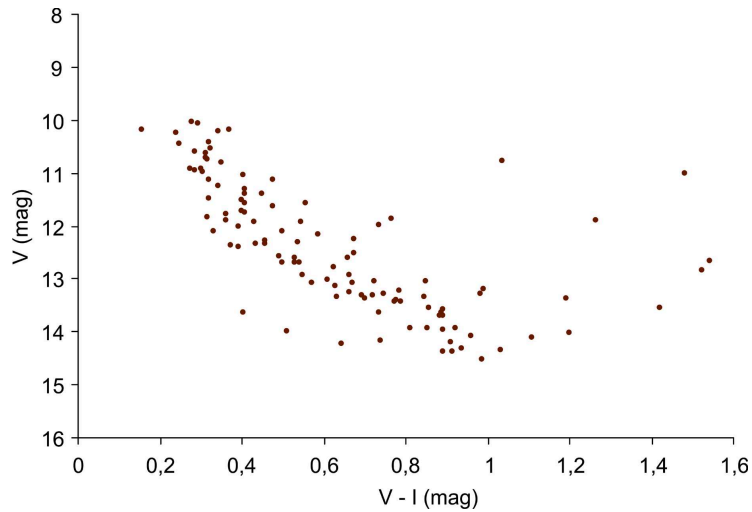


Obrázek 5.3: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující všechny fotometricky zpracované hvězdy z obou polí.

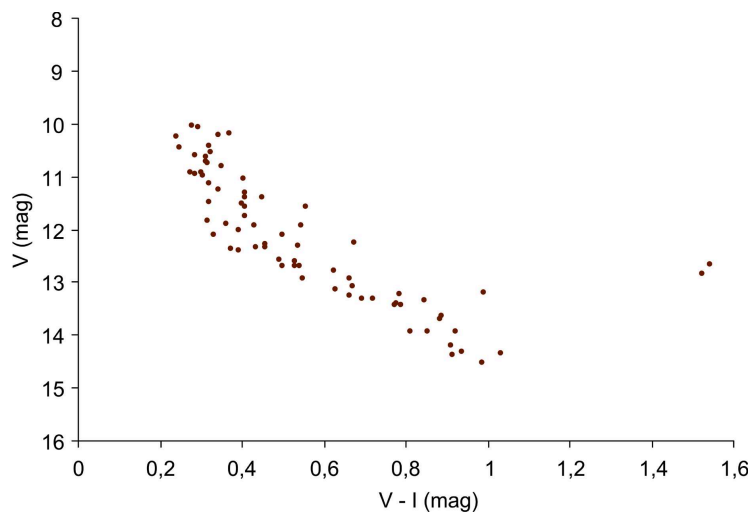


Obrázek 5.4: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující pouze členy hvězdokupy.

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, vyjadřující závislost hvězdné velikosti ve filtru V na barevném indexu ($V - I$):

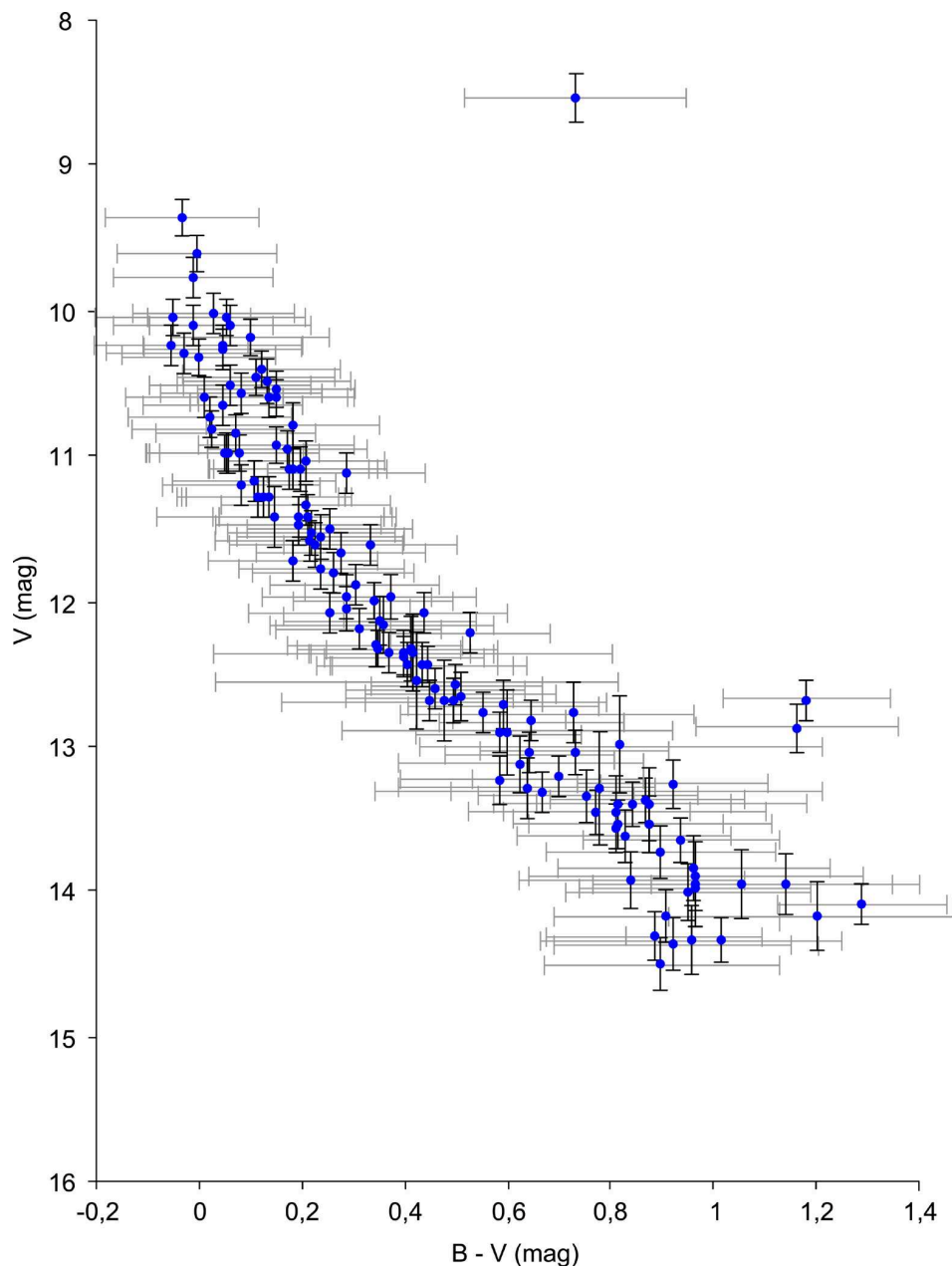


Obrázek 5.5: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující všechny fotometricky zpracované hvězdy z obou polí.



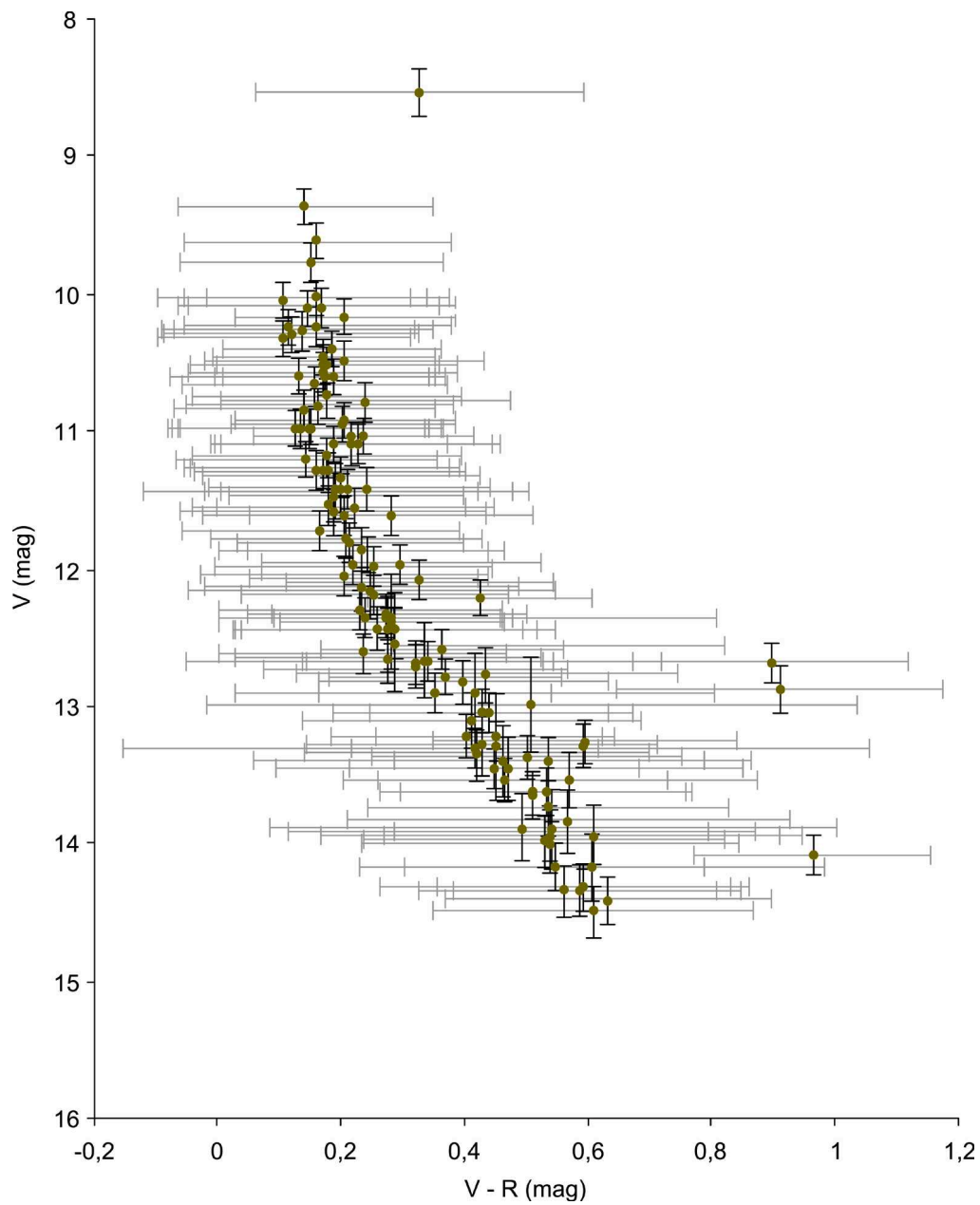
Obrázek 5.6: Barevný diagram hvězdokupy M 35, zahrnující pouze členy hvězdokupy.

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, zahrnující velikosti chybových úseček:



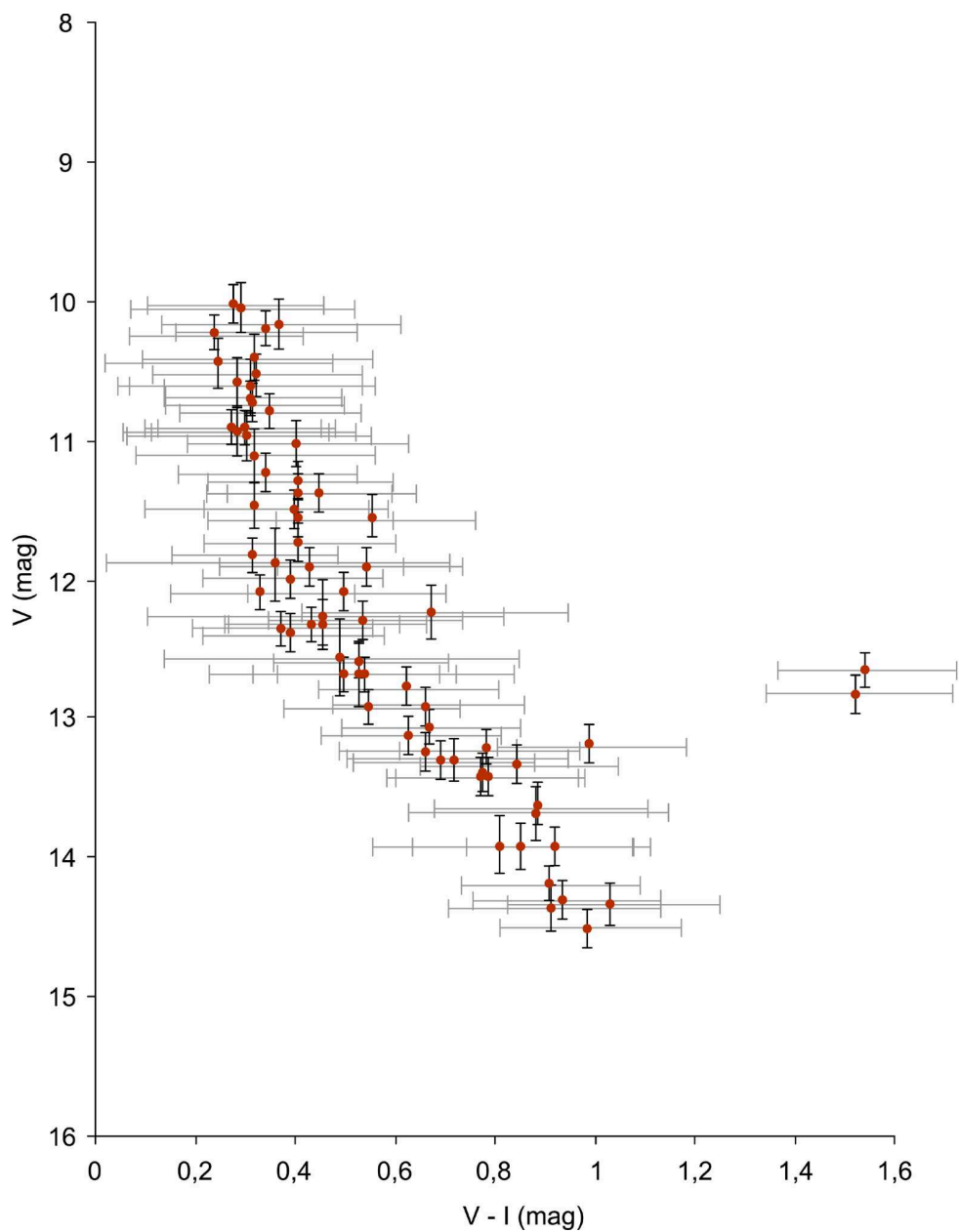
Obrázek 5.7: Diagram, znázorňující chyby barevného indexu $B - V$ a vizuální hvězdné velikosti V .

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, zahrnující velikosti chybových úseček:



Obrázek 5.8: Diagram, znázorňující chyby barevného indexu $V - R$ a vizuální hvězdné velikosti V .

Barevné diagramy hvězdokupy M 35, zahrnující velikosti chybových úseček:



Obrázek 5.9: Diagram, znázorňující chyby barevného indexu $V - I$ a vizuální hvězdné velikosti V .

5.2 Stáří, vzdálenost a podíl těžších prvků

Stáří i vzdálenost otevřených hvězdokup lze určit metodou porovnání průběhu jejich hlavní posloupnosti (případně dalších posloupností) s průběhem teoretického modelu (viz kapitola 2.2). Existuje celá řada již publikovaných teoretických modelů. Zde byly použity modely, dostupné v [13], jejichž vytváření je součástí širšího projektu označovaného *Padova database of stellar evolutionary tracks and isochrones*. V [13] jsou publikovány rozsáhlé sady takových modelů, které jsou zároveň teoretickými izochronami (viz kapitola 2.2), pro celou škálu stáří a hodnot obsahu těžších prvků.

Nejvýznamnějším vodítkem při určování stáří otevřených hvězdokup je poloha bodu obratu izochrony od hlavní posloupnosti (viz kapitola 2.2) v barevném diagramu. Pomocí barevných diagramů s vynesnými teoretickými izochronami (viz obrázky 5.10 - 5.12) bylo stanoveno stáří hvězdokupy do intervalu:

$$10^{8,2} - 10^{8,3} \cong 1,6 \times 10^8 - 2 \times 10^8 \text{ let.}$$

Pro určení vzdálenosti hvězdokupy je třeba vycházet z modulu vzdálenosti (viz kapitola 3.1), který bude odpovídat posunu hlavní posloupnosti, získané z pozorování, vůči teoretickým izochronám, získaným z [13]. Po vynesení teoretických izochron do barevných diagramů pro všechny tři barevné indexy byla odečtena průměrná hodnota modulu vzdálenosti $V - M_V = (9,89 \pm 0,14)$ mag. V obrázcích 5.10 - 5.12 je na svislou osu vlevo vynesena pozorovaná hvězdná velikost V , na osu vpravo absolutní hvězdná velikost M_V . Rozdíl mezi nimi je hledaný modul vzdálenosti. Vzdálenost hvězdokupy v parsecích určíme z upravené Pogsonovy rovnice:

$$r = 10^{\frac{V - M_V + 5}{5}}. \quad (5.1)$$

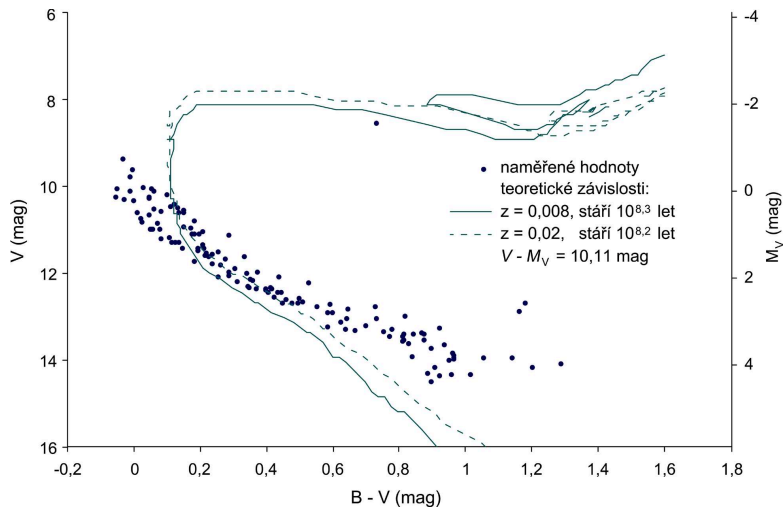
Takto určená vzdálenost potom vychází:

$$r = (951 \pm 60) \text{ pc.}$$

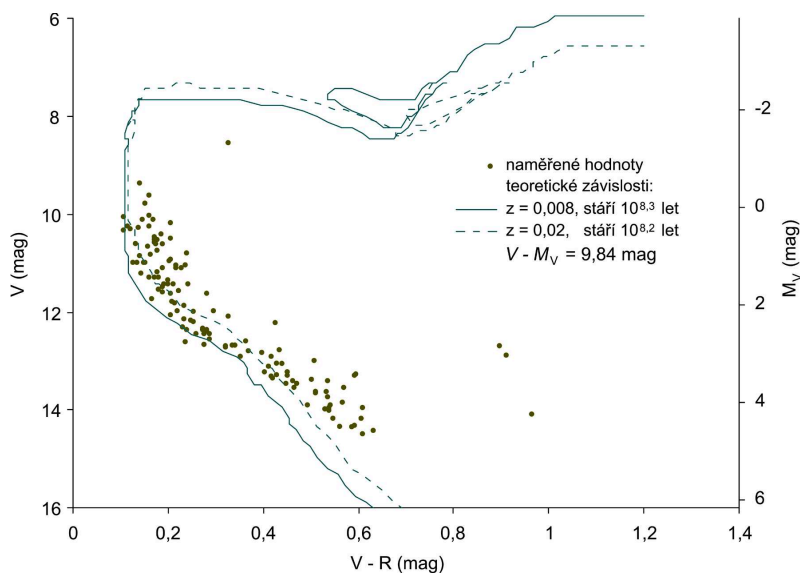
V obrázcích 5.10 - 5.12 je vidět, že zatímco pro barevné indexy $V - R$, $V - I$ se sklon naměřené i teoretické hlavní posloupnosti dobře shoduje, pro barevný index $B - V$ je mírně odlišný, což lze vysvětlit zvětšením tohoto barevného indexu vlivem mezihvězdného zčervenání. Právě barevný index $B - V$ je jí nejvíce ovlivněn.

Do teoretických modelů jsou rovněž zahrnuty různé podíly těžších prvků (viz [13]), v tomto případě byla stanovena jejich hodnota v intervalu:

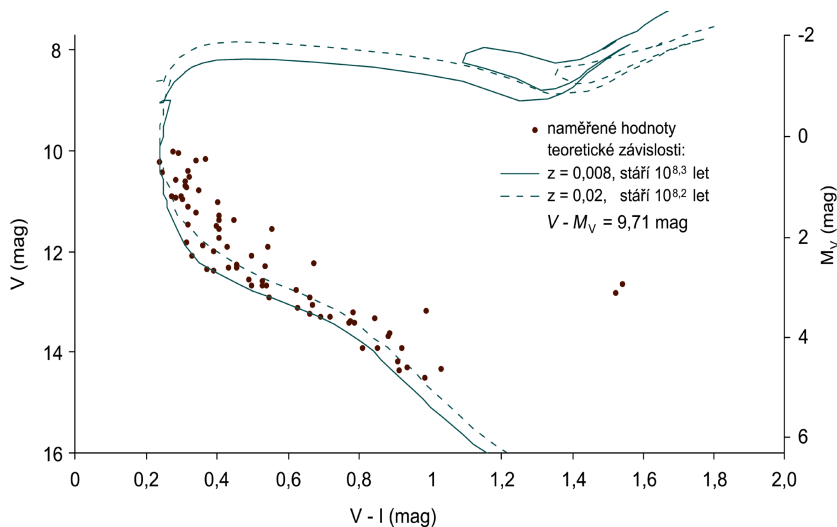
$$Z = 0,008 - 0,02.$$



Obrázek 5.10: Barevný diagram hvězdokupy M 35 pro barevný index $(B - V)$ s teoretickými izochronami pro stáří $10^{8,3}$ let, $Z = 0,008$; $10^{8,2}$ let, $Z = 0,02$.



Obrázek 5.11: Barevný diagram hvězdokupy M 35 pro barevný index $(V - R)$ s teoretickými izochronami pro stáří $10^{8,3}$ let, $Z = 0,008$; $10^{8,2}$ let, $Z = 0,02$.



Obrázek 5.12: Barevný diagram hvězdokupy M 35 pro barevný index $(V - I)$ s teoretickými izochronami pro stáří $10^{8,3}$ let, $Z = 0,008$; $10^{8,2}$ let, $Z = 0,02$.

5.3 Odhad mezihvězdného zčervenání

Pomocí tzv. trojbarevného diagramu, tj. grafu závislostí barevných indexů – např. $B - V$ na $V - R$ nebo $V - R$ na $V - I$ pro naměřené i teoretické hodnoty, lze stanovit hodnotu mezihvězdného zčervenání, způsobeného mezihvězdnou extinkcí (viz kapitola 3.4). To se určuje z posunutí naměřené hlavní posloupnosti vůči hlavní posloupnosti teoretické, která je touto extinkcí neovlivněná. Na obrázku 5.13 je sestrojena závislost barevných indexů $B - V$ na $V - R$ pro naměřené hodnoty i pro teoretickou závislost, získanou z [13].

I když zde půjde pouze o odhad, přece jen lze pro obě závislosti provést alespoň lineární regresi (viz [5]), přesnější by bylo závislosti proložit křivkami, odpovídajícími přesněji jejich tvaru - viz obrázek 3.3. V tomto případě přímku, proloženou naměřenými hodnotami lze popsat rovnicí:

$$(B - V) = (1,753 \pm 0,065) \cdot (V - R) - (0,258 \pm 0,028).$$

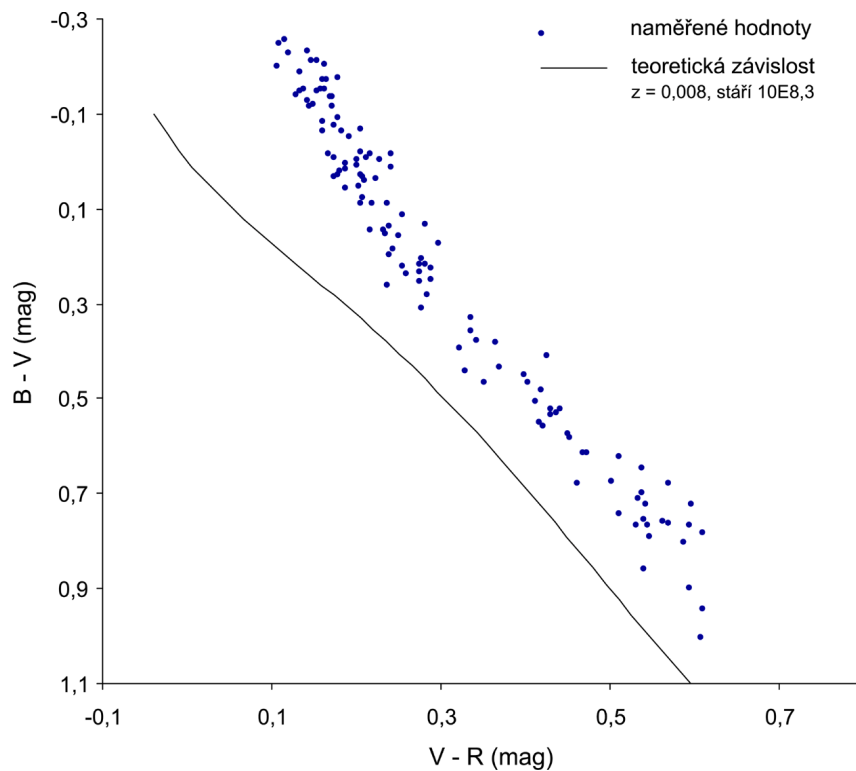
Lineární regresi grafu teoretické závislosti barevného indexu $B - V$ na $V - R$ lze popsat rovnicí:

$$(B - V) = (1,531 \pm 0,038) \cdot (V - R) + (0,061 \pm 0,021).$$

Směrnice obou přímk se od sebe odlišují poměrně málo, posun ve směru svislé osy obrázku 5.13, tj. ve smyslu barevného indexu $B - V$ udává přibližně hodnotu zčervenání (barevného excesu) $E(B - V)$. Tento posun samozřejmě není, jak je z grafu patrné, v celém průběhu konstantní, jeho nejpravděpodobnější hodnota může být:

$$E(B - V) \cong 0,25 \text{ mag.}$$

Z toho, že koeficient směrnice je výrazně vyšší než 1 (pohybuje se mezi hodnotami 1,5 - 2) je zřejmé, že hodnota $E(B - V)$ je větší, než hodnota $E(V - R)$, což je opět ve shodě s teoretickými předpoklady.



Obrázek 5.13: Trojbarevný diagram - graf závislost barevného indexu $B - V$ na $V - R$ pro naměřené i teoretické hodnoty - stanovení hodnoty mezihvězdného zčervenání.

5.4 Diskuse výsledků

Barevné diagramy a následné určení stáří, vzdálenosti, podílu těžších prvků a mezihvězdného zčervenání otevřené hvězdokupy M 35 (NGC 2168) byly provedené na podkladě série CCD snímků, pořízených ve třech různých (byť po sobě následujících) nocích s relativně slušnými, avšak nikterak dokonalými pozorovacími podmínkami. Ty pochopitelně nebyly v každou z těchto nocí úplně shodné (což lze doložit mj. hodnotami, uvedenými v tabulkách výsledků CCD fotometrie, uvedených v příloze na stranách 49 - 56). Naměřené hodnoty byly redukovány a kalibrovány natolik důkladným a korektním způsobem (postup je popsán v kapitolách 4.2 a 4.3), že výsledné diagramy jeví výrazné a jasně definované hlavní posloupnosti (Pouze diagramy s barevnými indexy $V - I$ jsou poněkud "chudší", což je způsobeno menším množstvím pozorovacích dat, získaných pouze z jednoho pole).

V barevných diagramech v podstatě schází větev obrů, odklon od hlavní posloupnosti a bod obratu je nevýrazný, průběh a tvar hlavní posloupnosti je však velmi dobře čitelný. To je způsobeno jednoznačně stářím hvězdokupy, které lze odhadnout na $1,6 \times 10^8 - 2 \times 10^8$ let. Právě díky nezřetelnému bodu obratu a větvi obrů může jít skutečně pouze o odhad s výše udanou přesností. Jedná se tudíž o otevřenou hvězdokupu středního stáří, kromě pozdních stádií v diagramu téměř chybí i mladé hvězdy, vyskytující se v H-R diagramech vpravo dole od hlavní posloupnosti. Většina hvězd se koncentruje ke střední části hlavní posloupnosti, což odpovídá výše uvedenému věku.

Vzdálenost hvězdokupy byla v kapitole 5.2 na základě modulu vzdálenosti $V - M_V = (9,89 \pm 0,14)$ mag, odečteného z diagramů určena na $r = (951 \pm 60)$ pc, podíl těžších prvků odečtením údajů z teoretických izochron na $Z = 0,008 - 0,02$. Mezihvězdné zčervenání v barevném indexu $B - V$ bylo na základě trojbarevného diagramu odhadnuto na 0,25 mag, oprava na mezihvězdnou extinkci prováděna nebyla. Pravděpodobně se tato projevuje v poněkud odlišném sklonu průběhu hlavní posloupnosti v barevném indexu $B - V$.

Porovnáme-li tyto výsledky se závěry nejnovějších prací, zabývajícími se hvězdokupou M 35, především [14] a [15], celkem shodně pro ni uvádějí počet nejméně 1000 hvězd jasnějších než $V = 22$ mag a stáří ~ 180 miliónů let. Barevné diagramy hvězdokupy v barevném indexu $B - V$, publikované v této práci ukazují jasné a ostré hlavní posloupnosti, rozprostírající se přes 14 magnitud. (Fotometrie ovšem zahrnovala všechny objekty až do již uvedené hvězdné velikosti 22 mag). Na základě odvozeného modulu vzdálenosti $V - M_V = (9,80 \pm 0,16)$ mag je uváděna vzdálenost hvězdokupy $r = 912 \left(\begin{smallmatrix} +70 \\ -65 \end{smallmatrix} \right)$ pc.

Hodnota zčervenání je zde uváděna v mezích 0,1 až 0,2, obsah těžších prvků $Z = 0,12$. Stejně jako v mé práci (viz strana 35), je i v barevných diagramech, uváděných v [14] poukazováno na nápadnou přítomnost potenciálního rudého obra, který má v jejich diagramech $B - V$ polohu $V = 8,48$ mag, $B - V = 1,32$ mag. Jeho poloha v této práci je $V \cong 8,50$ mag, $B - V \cong 0,75$ mag, rozdíl v barevném indexu je způsoben opravou o mezihvězdné zčervenání. V případě této hvězdy (na obrázku 4.1 označená číslem 1) není bohužel zcela jisté, zda je členem hvězdokupy, v [17] je její procentuální pravděpodobnost příslušnosti označená jako 56 (viz tabulka A.1).

Další významnou novější prací, zabývající se touto hvězdokupou je [18]. Tato práce se zabývá zkoumáním většího počtu otevřených hvězdokup, pro ilustraci zde připojuji (přepsanou, ale s originálními daty) tabulku, obsahující nejpodstatnější údaje:

Tabulka 5.1: (ukázka – převzato z [18]):

Name	$V - M_V$	Log age	$E(B - V)$	[Fe/H]
M35 (NGC 2168)	10.16	8.17	0.19	-0.160
M37 (NGC 2099)	11.55	8.73	0.27	0.089
NGC 1817	12.10	8.80	0.26	-0.268
NGC 2477	11.55	9.04	0.23	0.019
NGC 2420	12.12	9.24	0.05	-0.266
M67 (NGC 2682)	9.80	9.60	0.04	0.000

V tabulce je za názvem příslušné hvězdokupy uveden ve sloupcích vždy postupně modul vzdálenosti, dekadický logaritmus stáří v letech, hodnota mezihvězdného zčervenání a metalicita [Fe/H] (viz kapitola 1.1).

V této práci vychází vzdálenost hvězdokupy poněkud větší, stáří a zčervenání menší. To je zajímavé vzhledem k tomu, že jako teoretický model byly použity velmi podobné izochrony (Padova). Z této tabulky by mohl vzniknout dojem, zvláště při srovnání s téměř 30-krát starší hvězdokupou M 67 (která je mimochodem velmi oblíbenou právě pro svoje krásně vyvinuté větve obrů), že hvězdokupa M 35 je velmi mladá, ovšem v porovnání s nejznámějšími otevřenými hvězdokupami vůbec, kterými jsou Plejády (stáří 7×10^7 let) a Hyády (stáří 8×10^8 let) vidíme, že se jedná spíše o hvězdokupu středního stáří.

Kapitola 6

Závěr

Na základě série fotometrických měření otevřené hvězdokupy M 35 byly zkonstruovány její barevné diagramy ve třech barevných indexech $B - V$, $V - R$, $V - I$, pomocí nichž potom bylo odhadováno stáří, vzdálenost, podíl těžších prvků a mezihvězdné zčervenání.

Stáří hvězdokupy vychází v rozmezí $1,6 \times 10^8 - 2 \times 10^8$ let, což se velmi dobře shoduje s hodnotami, publikovanými i jinými autory, jakkoli se zde jedná o odhad, který může být zatížen chybou v řádu až 10^8 let. Hodnota vzdálenosti hvězdokupy $r = (951 \pm 60)$ pc se rovněž neliší od hodnot, uváděných v jiných studiích o více než 10%, platí zde ovšem totéž co u stanovování jejího stáří. Při určování modulu vzdálenosti se muselo vycházet pouze z průběhu a tvaru hlavní posloupnosti bez zcela zřetelného bodu obratu, který je mnohem spolehlivějším vodítkem při určování zmíněných vlastností. Tvar hlavní posloupnosti je nicméně v tomto případě natolik charakteristický, že sám umožňuje poměrně spolehlivé srovnávání s teoretickými modely.

Ještě přesvědčivějších výsledků by mohlo být nejspíš dosaženo při větší konzistentnosti, četnosti a délce pozorování, pokud by se snímky v různých filtrech pořizovaly opakovaně v po sobě jdoucích sériích a ve větším počtu, včetně fotometrického proměření standardních hvězd.

Dodatek A

Přílohy

A.1 Výsledky CCD fotometrie

Tabulka A.1: Tabulka výsledků CCD fotometrie hvězd pole 1

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	P
1	9,284	0,132	8,549	0,170	8,220	0,204	56
3	9,375	0,072	9,343	0,132	9,233	0,158	99
4	9,627	0,072	9,627	0,138	9,468	0,166	99
5	9,773	0,072	9,783	0,137	9,630	0,164	99
6	10,168	0,073	10,105	0,139	9,936	0,168	99
7	10,063	0,072	10,034	0,138	9,874	0,165	97
8	9,999	0,072	10,048	0,132	9,940	0,158	98
9	10,099	0,072	10,110	0,136	9,964	0,163	99
10	10,291	0,072	10,242	0,138	10,080	0,166	99
11	10,209	0,072	10,263	0,132	10,148	0,158	98
12	10,325	0,072	10,278	0,135	10,140	0,162	99
13	10,284	0,072	10,312	0,133	10,191	0,159	99
14	10,328	0,072	10,329	0,131	10,222	0,157	99
15	10,631	0,075	10,499	0,148	10,294	0,174	98
16	10,586	0,073	10,523	0,140	10,351	0,167	99
17	10,666	0,073	10,583	0,139	10,412	0,167	95
18	10,622	0,072	10,612	0,134	10,479	0,161	99
19	10,720	0,072	10,673	0,137	10,515	0,165	99
20	10,978	0,077	10,794	0,151	10,554	0,181	99
21	10,780	0,072	10,757	0,140	10,579	0,168	99
22	10,857	0,072	10,829	0,138	10,664	0,166	99
23	10,926	0,073	10,854	0,135	10,713	0,162	60
24	11,037	0,073	10,983	0,137	10,830	0,164	99
25	11,075	0,073	10,995	0,136	10,845	0,163	99
26	11,279	0,077	11,095	0,147	10,878	0,176	99
27	11,043	0,072	10,992	0,134	10,857	0,161	99
28	11,316	0,078	11,117	0,149	10,889	0,178	97
29	11,045	0,073	10,985	0,134	10,857	0,160	98

Pokračování tabulky A.1

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	P
30	11,294	0,074	11,185	0,140	11,007	0,168	99
31	11,298	0,073	11,212	0,136	11,067	0,163	99
32	11,417	0,075	11,291	0,140	11,118	0,167	99
33	11,404	0,074	11,289	0,138	11,128	0,165	99
34	11,438	0,075	11,300	0,141	11,118	0,169	99
35	11,556	0,079	11,348	0,144	11,146	0,173	98
36	11,653	0,079	11,439	0,151	11,198	0,182	99
37	11,628	0,078	11,434	0,146	11,221	0,175	99
38	12,214	0,109	11,671	0,201	11,222	0,241	0
39	11,594	0,075	11,446	0,143	11,254	0,171	97
40	11,640	0,078	11,444	0,144	11,243	0,173	99
41	11,817	0,081	11,578	0,148	11,356	0,177	99
42	11,959	0,088	11,624	0,160	11,343	0,191	99
43	11,814	0,079	11,596	0,142	11,408	0,170	99
44	11,787	0,082	11,529	0,147	11,312	0,176	
45	11,779	0,079	11,558	0,141	11,377	0,169	99
46	11,863	0,080	11,635	0,145	11,429	0,174	99
47	11,951	0,084	11,671	0,148	11,447	0,178	
48	12,030	0,081	11,789	0,145	11,581	0,174	99
49	11,926	0,077	11,743	0,139	11,576	0,166	98
50	11,997	0,080	11,773	0,144	11,575	0,172	
51			11,871	0,150	11,637	0,180	99
52	12,028	0,079	11,821	0,142	11,630	0,171	
53	12,515	0,106	12,002	0,190	11,592	0,229	0
55	12,350	0,092	11,976	0,163	11,679	0,196	99
56	12,086	0,080	11,862	0,139	11,695	0,166	
57	12,551	0,098	12,109	0,170	11,780	0,204	98
58	12,282	0,084	11,994	0,147	11,774	0,177	99
59	12,347	0,084	12,058	0,145	11,853	0,174	99
60	13,878	0,193	12,693	0,337	11,795	0,404	71
62	12,541	0,090	12,182	0,153	11,932	0,184	97
63	12,508	0,090	12,156	0,150	11,921	0,180	99
64	12,523	0,087	12,209	0,154	11,955	0,185	99
65	12,663	0,097	12,238	0,167	11,925	0,200	41
68	14,050	0,191	12,884	0,342	11,971	0,410	83
69	13,202	0,124	12,532	0,198	12,092	0,238	0
70	12,654	0,089	12,309	0,150	12,077	0,179	99
71	12,756	0,096	12,340	0,158	12,065	0,190	98
72	12,793	0,096	12,375	0,160	12,093	0,192	99
73	12,773	0,094	12,374	0,151	12,135	0,181	99
74	14,213	0,197	13,001	0,338	12,010	0,406	0
75	12,885	0,098	12,448	0,155	12,189	0,186	99
76	12,856	0,095	12,449	0,159	12,171	0,190	99
77	12,899	0,099	12,450	0,161	12,163	0,193	99
78	13,001	0,097	12,573	0,161	12,286	0,193	99
79	14,438	0,196	13,237	0,388	12,183	0,466	
80	13,266	0,115	12,676	0,180	12,309	0,215	
81	13,866	0,162	12,970	0,258	12,321	0,310	0
82	13,512	0,132	12,783	0,197	12,347	0,237	99
83	13,877	0,159	12,942	0,242	12,348	0,291	0
84	13,091	0,101	12,628	0,151	12,391	0,181	99
85	13,332	0,115	12,739	0,168	12,418	0,202	98
87	13,172	0,106	12,661	0,159	12,384	0,190	99

Pokračování tabulky A.1

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	P
88	13,498	0,122	12,848	0,187	12,450	0,225	99
89	13,590	0,129	12,883	0,230	12,330	0,276	
90	13,835	0,144	13,014	0,218	12,504	0,261	99
91	13,792	0,135	13,041	0,294	12,276	0,354	
92	14,157	0,165	13,182	0,238	12,601	0,286	0
93	13,789	0,133	13,055	0,196	12,625	0,235	99
94	13,757	0,127	13,071	0,187	12,674	0,224	0
95	14,190	0,158	13,266	0,243	12,670	0,291	99
96	14,280	0,165	13,307	0,242	12,714	0,290	
97	13,796	0,125	13,124	0,193	12,706	0,231	1
98	13,688	0,113	13,114	0,169	12,791	0,203	0
99	14,002	0,129	13,300	0,200	12,855	0,240	
100	14,922	0,208	13,691	0,334	12,804	0,401	0
102	14,263	0,151	13,390	0,215	12,889	0,258	99
104	14,264	0,148	13,417	0,226	12,879	0,271	99
105	15,152	0,213	13,865	0,367	12,874	0,441	0
106	14,095	0,139	13,315	0,202	12,862	0,242	99
107	14,120	0,136	13,362	0,193	12,941	0,232	99
108	13,988	0,122	13,339	0,188	12,939	0,225	0
109	14,284	0,152	13,405	0,204	12,943	0,245	96
110	14,605	0,169	13,601	0,251	12,977	0,301	0
111	14,438	0,153	13,557	0,235	12,988	0,282	99
112	14,283	0,144	13,468	0,207	12,995	0,249	98
113	14,060	0,126	13,385	0,176	13,032	0,211	0
114	14,247	0,138	13,471	0,201	13,022	0,241	96
115	14,318	0,164	13,602	0,231	13,045	0,278	0
116	15,386	0,227	13,992	0,356	13,034	0,428	0
117	16,413	0,377	13,972	0,344	13,054	0,413	0
118	14,357	0,145	13,541	0,206	13,074	0,247	99
119	14,493	0,153	13,611	0,227	13,068	0,273	
120	14,592	0,161	13,650	0,218	13,139	0,262	97
122	14,671	0,160	13,734	0,228	13,190	0,273	
123	14,649	0,156	13,749	0,226	13,211	0,271	99
124	14,819	0,165	13,855	0,235	13,286	0,281	99
125	14,465	0,141	13,672	0,188	13,272	0,225	0
126	15,097	0,190	13,954	0,247	13,344	0,296	94
127	14,869	0,166	13,900	0,227	13,357	0,273	97
128	15,027	0,179	13,968	0,226	13,428	0,271	99
129	13,713	0,073	13,743	0,200	13,298	0,240	0
130	14,914	0,159	13,995	0,219	13,481	0,263	0
132	14,982	0,163	14,028	0,227	13,488	0,272	85
133	14,868	0,160	13,942	0,215	13,441	0,258	0
134	14,929	0,165	13,962	0,222	13,438	0,266	0
135	14,966	0,165	13,998	0,224	13,468	0,268	93
137	14,725	0,144	13,922	0,214	13,427	0,256	
141	14,683	0,135	13,945	0,184	13,561	0,221	0
142	15,381	0,200	14,177	0,246	13,570	0,295	99
144	15,304	0,166	14,344	0,233	13,781	0,280	96
147	14,801	0,150	14,422	0,254	13,788	0,305	96
150	15,057	0,156	14,177	0,187	13,782	0,224	0
158	15,294	0,172	14,306	0,192	13,893	0,230	0
167	15,376	0,163	14,451	0,193	14,033	0,231	2

Tabulka A.2: Tabulka výsledků CCD fotometrie hvězd pole 2

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	I (mag)	σ_I (mag)	P
9	9,983	0,079	10,037	0,130	9,982	0,123	9,759	0,118	99
12	10,148	0,080	10,222	0,130	10,172	0,123	9,880	0,127	99
13	10,111	0,082	10,249	0,129	10,229	0,122	10,009	0,117	97
21	10,658	0,079	10,714	0,131	10,637	0,124	10,401	0,119	99
22	10,682	0,080	10,757	0,130	10,699	0,123	10,440	0,122	99
23	10,760	0,079	10,805	0,131	10,733	0,124	10,457	0,124	60
24	10,894	0,079	10,931	0,130	10,872	0,123	10,630	0,120	99
27	10,893	0,079	10,913	0,130	10,862	0,123	10,640	0,118	99
29	10,884	0,080	10,961	0,130	10,919	0,123	10,674	0,120	98
32	11,270	0,079	11,247	0,132	11,159	0,125	10,905	0,121	99
35	11,347	0,079	11,312	0,133	11,211	0,126	10,904	0,129	98
36	11,508	0,081	11,389	0,139	11,234	0,131	10,938	0,127	99
40	11,451	0,079	11,392	0,134	11,287	0,126	10,986	0,128	99
42	11,728	0,082	11,574	0,142	11,397	0,134	11,016	0,140	99
45	11,553	0,079	11,510	0,133	11,410	0,126	11,111	0,128	99
46	11,656	0,080	11,586	0,133	11,492	0,125	11,177	0,130	99
47	11,734	0,080	11,639	0,135	11,520	0,128	11,162	0,136	
48	11,886	0,081	11,757	0,136	11,624	0,129	11,350	0,124	99
50	11,818	0,081	11,710	0,134	11,600	0,127	11,309	0,126	
52	11,860	0,080	11,772	0,132	11,691	0,125	11,409	0,125	
55	12,149	0,086	11,920	0,143	11,732	0,135	11,373	0,137	99
58	12,075	0,082	11,927	0,137	11,790	0,129	11,496	0,127	99
60	13,495	0,146	12,651	0,280	11,896	0,265	11,108	0,221	71
63	12,293	0,083	12,117	0,139	11,957	0,132	11,616	0,134	99
65	12,464	0,089	12,176	0,148	11,958	0,140	11,589	0,138	41
68	13,756	0,156	12,834	0,282	12,072	0,267	11,310	0,215	83
70	12,460	0,084	12,273	0,137	12,129	0,130	11,814	0,130	99
71	12,516	0,085	12,296	0,141	12,126	0,133	11,758	0,138	98
73	12,587	0,088	12,328	0,141	12,158	0,133	11,869	0,126	99
84	12,854	0,088	12,586	0,139	12,428	0,132	12,095	0,133	99
95	13,922	0,131	13,208	0,199	12,747	0,189	12,218	0,167	99
96	14,076	0,141	13,282	0,206	12,796	0,195	12,301	0,161	
97	13,573	0,111	13,036	0,160	12,751	0,151	12,313	0,150	1
98	13,479	0,099	13,076	0,146	12,868	0,138	12,504	0,138	0
99	13,883	0,118	13,282	0,172	12,939	0,162	12,538	0,144	
102	13,961	0,120	13,347	0,185	12,946	0,175	12,502	0,151	99
112	14,132	0,129	13,437	0,177	13,072	0,167	12,650	0,147	98
113	13,799	0,104	13,338	0,155	13,077	0,147	12,705	0,139	0
114	14,018	0,117	13,428	0,173	13,081	0,163	12,657	0,148	96
122	14,424	0,134	13,696	0,189	13,277	0,179	12,806	0,156	
123	14,379	0,129	13,684	0,188	13,270	0,178	12,801	0,156	99
125	14,197	0,115	13,631	0,160	13,345	0,152	12,897	0,152	0
132	14,754	0,147	13,921	0,178	13,552	0,168	13,109	0,151	85
134	14,599	0,125	13,955	0,185	13,553	0,175	13,065	0,159	0
135	14,581	0,125	13,930	0,181	13,544	0,172	13,078	0,155	93
150	14,718	0,115	14,176	0,163	13,891	0,153	13,438	0,153	0
200	11,629	0,120	11,008	0,263	10,312	0,249	9,526	0,220	0
201	11,196	0,100	10,774	0,199	10,311	0,189	9,738	0,176	0
202	10,087	0,082	10,046	0,129	9,912	0,122	9,764	0,125	98
204	10,087	0,080	10,186	0,130	10,130	0,123	9,817	0,130	99
208	10,013	0,083	10,187	0,129	10,191	0,122	10,031	0,111	0

Pokračování tabulky A.2

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	I (mag)	σ_I (mag)	P
209	10,353	0,080	10,429	0,130	10,393	0,123	10,108	0,126	99
210	10,496	0,079	10,546	0,129	10,517	0,122	10,224	0,127	99
211	10,374	0,080	10,462	0,129	10,439	0,122	10,216	0,118	99
212	10,563	0,080	10,625	0,130	10,587	0,126	10,314	0,124	98
213	10,562	0,079	10,611	0,129	10,587	0,122	10,324	0,123	98
217	12,458	0,113	11,905	0,230	11,325	0,218	10,638	0,199	2
218	11,048	0,079	11,038	0,132	10,952	0,125	10,636	0,130	98
222	11,217	0,080	11,128	0,138	10,980	0,130	10,651	0,132	0
223	10,901	0,079	10,949	0,130	10,893	0,123	10,663	0,119	99
224	10,947	0,079	10,972	0,130	10,920	0,123	10,667	0,121	99
225	11,093	0,079	11,115	0,130	11,077	0,123	10,797	0,125	99
232	12,263	0,098	11,866	0,173	11,516	0,164	11,101	0,146	0
236	11,492	0,079	11,496	0,130	11,438	0,123	11,175	0,123	99
237	12,351	0,095	11,992	0,160	11,703	0,152	11,255	0,152	0
246	11,888	0,080	11,825	0,131	11,759	0,124	11,508	0,121	99
247	12,003	0,081	11,898	0,133	11,804	0,125	11,535	0,123	99
248	12,573	0,092	12,243	0,158	11,968	0,149	11,568	0,143	99
250	12,145	0,082	12,002	0,134	11,898	0,126	11,610	0,126	99
254	12,157	0,079	12,099	0,132	12,012	0,125	11,767	0,120	99
256	12,837	0,092	12,513	0,150	12,284	0,141	11,838	0,151	0
258	12,488	0,082	12,336	0,135	12,211	0,128	11,900	0,129	98
259	12,956	0,095	12,594	0,155	12,336	0,146	11,934	0,144	6
260	12,543	0,083	12,371	0,135	12,246	0,128	11,999	0,121	99
261	12,609	0,084	12,409	0,136	12,276	0,129	12,016	0,122	99
264	12,900	0,090	12,598	0,147	12,384	0,139	12,068	0,130	98
265	14,526	0,162	13,564	0,270	12,842	0,256	12,142	0,202	0
266	13,149	0,095	12,795	0,148	12,575	0,140	12,170	0,144	99
267	12,981	0,089	12,703	0,143	12,518	0,135	12,163	0,136	99
268	13,470	0,101	13,035	0,166	12,717	0,157	12,185	0,168	0
269	14,216	0,145	13,386	0,254	12,720	0,241	12,192	0,167	0
270	12,946	0,087	12,695	0,143	12,509	0,135	12,165	0,134	99
272	12,997	0,090	12,698	0,144	12,506	0,136	12,199	0,129	96
273	13,318	0,099	12,917	0,156	12,649	0,148	12,254	0,143	99
277	13,312	0,097	12,927	0,145	12,725	0,137	12,377	0,135	99
279	13,508	0,102	13,064	0,161	12,773	0,152	12,394	0,140	98
281	13,407	0,098	13,006	0,149	12,780	0,141	12,396	0,141	0
282	13,736	0,108	13,235	0,163	12,934	0,154	12,449	0,159	99
283	15,196	0,181	14,100	0,298	13,286	0,282	12,480	0,225	86
285	13,555	0,101	13,127	0,155	12,866	0,147	12,498	0,138	99
288	13,750	0,102	13,309	0,159	13,030	0,150	12,589	0,151	99
289	13,631	0,097	13,244	0,154	12,990	0,145	12,581	0,145	87
290	14,021	0,120	13,402	0,168	13,076	0,159	12,626	0,152	0
291	13,797	0,105	13,327	0,156	13,060	0,148	12,633	0,148	99
292	13,776	0,100	13,360	0,152	13,119	0,144	12,660	0,154	0
295	14,198	0,120	13,584	0,182	13,197	0,172	12,693	0,162	0
297	14,228	0,126	13,563	0,186	13,158	0,176	12,704	0,153	0
298	14,274	0,122	13,644	0,181	13,262	0,171	12,756	0,163	99
302	14,893	0,153	14,014	0,240	13,399	0,227	12,815	0,178	0
306	14,934	0,145	14,115	0,211	13,609	0,200	13,007	0,181	0
307	14,578	0,124	13,935	0,183	13,543	0,173	13,011	0,167	97
312	14,774	0,129	14,090	0,186	13,686	0,175	13,132	0,172	0

Dokončení tabulky A.2

číslo	B (mag)	σ_B (mag)	V (mag)	σ_V (mag)	R (mag)	σ_R (mag)	I (mag)	σ_I (mag)	P
315	13,945	0,091	13,641	0,137	13,505	0,129	13,235	0,124	0
317	14,908	0,132	14,197	0,184	13,799	0,174	13,289	0,164	97
318	13,569	0,086	13,351	0,148	13,265	0,131	13,141	0,128	1
320	15,171	0,147	14,352	0,196	13,907	0,185	13,318	0,179	89
321	14,424	0,134	13,696	0,189	13,277	0,179	12,806	0,156	0
325	15,009	0,135	14,322	0,196	13,878	0,185	13,383	0,161	98
329	15,097	0,136	14,373	0,194	13,936	0,183	13,458	0,157	99
331	15,050	0,130	14,373	0,177	14,009	0,167	13,480	0,167	0
332	14,609	0,123	13,979	0,151	13,743	0,143	13,469	0,124	0
338	15,213	0,134	14,512	0,200	14,052	0,189	13,525	0,167	95
343	14,833	0,121	14,231	0,154	13,976	0,146	13,587	0,142	1

Tabulka A.3: Tabulka barevných indexů hvězd, náležejících ke hvězdokupě

číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	P	číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	P
1	0,735	0,216	0,329	0,266	56	58	0,288	0,170	0,220	0,230	99
3	-0,032	0,150	0,142	0,206	99	59	0,290	0,168	0,205	0,226	99
4	-0,002	0,156	0,162	0,216	99	60	1,185	0,388	0,898	0,526	71
5	-0,011	0,155	0,153	0,214	99	62	0,359	0,178	0,249	0,239	97
6	0,063	0,157	0,169	0,217	99	63	0,353	0,175	0,235	0,234	99
7	0,029	0,156	0,160	0,215	97	64	0,313	0,177	0,254	0,240	99
8	-0,049	0,150	0,109	0,205	98	68	1,167	0,391	0,913	0,534	83
9	-0,011	0,154	0,146	0,212	99	70	0,346	0,174	0,232	0,234	99
10	0,050	0,156	0,162	0,216	99	71	0,416	0,185	0,275	0,247	98
11	-0,054	0,151	0,114	0,206	98	72	0,418	0,186	0,282	0,249	99
12	0,047	0,153	0,138	0,211	99	73	0,399	0,178	0,240	0,236	99
13	-0,028	0,151	0,120	0,207	99	75	0,437	0,183	0,259	0,242	99
14	-0,001	0,150	0,107	0,205	99	76	0,407	0,185	0,277	0,248	99
15	0,133	0,163	0,205	0,226	98	77	0,449	0,189	0,287	0,251	99
16	0,063	0,157	0,172	0,218	99	78	0,427	0,188	0,287	0,251	99
17	0,083	0,157	0,171	0,218	95	82	0,730	0,237	0,436	0,308	99
18	0,010	0,152	0,132	0,209	99	84	0,463	0,181	0,237	0,235	99
19	0,047	0,155	0,158	0,215	99	85	0,593	0,204	0,321	0,263	98
20	0,184	0,170	0,241	0,236	99	87	0,511	0,191	0,276	0,248	99
21	0,024	0,158	0,178	0,219	99	88	0,649	0,224	0,398	0,293	99
22	0,027	0,156	0,165	0,216	99	90	0,822	0,261	0,510	0,340	99
23	0,072	0,154	0,141	0,211	60	93	0,734	0,236	0,430	0,306	99
24	0,054	0,155	0,153	0,214	99	95	0,925	0,289	0,596	0,379	99
18	0,010	0,152	0,132	0,209	99	84	0,463	0,181	0,237	0,235	99
19	0,047	0,155	0,158	0,215	99	85	0,593	0,204	0,321	0,263	98
20	0,184	0,170	0,241	0,236	99	87	0,511	0,191	0,276	0,248	99
21	0,024	0,158	0,178	0,219	99	88	0,649	0,224	0,398	0,293	99
22	0,027	0,156	0,165	0,216	99	90	0,822	0,261	0,510	0,340	99
23	0,072	0,154	0,141	0,211	60	93	0,734	0,236	0,430	0,306	99
24	0,054	0,155	0,153	0,214	99	95	0,925	0,289	0,596	0,379	99
25	0,080	0,155	0,149	0,213	99	102	0,873	0,263	0,502	0,336	99
26	0,184	0,166	0,217	0,229	99	104	0,847	0,270	0,537	0,352	99
27	0,051	0,153	0,134	0,210	99	106	0,781	0,245	0,453	0,315	99
28	0,199	0,168	0,228	0,232	97	107	0,758	0,237	0,421	0,302	99

Pokračování tabulky A.3

číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	P	číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	P
29	0,060	0,152	0,128	0,209	98	109	0,879	0,255	0,462	0,319	96
30	0,109	0,159	0,178	0,219	99	111	0,880	0,280	0,569	0,367	99
31	0,086	0,154	0,145	0,212	99	112	0,815	0,252	0,473	0,324	98
32	0,126	0,158	0,173	0,218	99	114	0,776	0,244	0,449	0,314	96
33	0,115	0,157	0,161	0,215	99	118	0,817	0,252	0,467	0,321	99
34	0,138	0,160	0,182	0,220	99	120	0,942	0,271	0,512	0,341	97
35	0,208	0,164	0,202	0,225	98	123	0,900	0,274	0,537	0,352	99
36	0,214	0,171	0,242	0,237	99	124	0,965	0,287	0,568	0,366	99
37	0,194	0,166	0,213	0,228	99	126	1,143	0,312	0,610	0,386	94
39	0,149	0,229	0,192	0,223	97	127	0,969	0,282	0,543	0,355	97
40	0,196	0,161	0,201	0,225	99	128	1,060	0,289	0,539	0,353	99
41	0,239	0,168	0,223	0,231	99	132	0,954	0,279	0,540	0,354	85
42	0,334	0,182	0,281	0,249	99	135	0,968	0,278	0,530	0,349	93
43	0,218	0,163	0,188	0,222	99	142	1,204	0,317	0,607	0,384	99
45	0,220	0,162	0,181	0,220	99	144	0,960	0,286	0,563	0,364	96
46	0,229	0,166	0,208	0,226	99	147	0,379	0,295	0,634	0,397	96
48	0,240	0,166	0,209	0,227	99	55	0,374	0,187	0,297	0,255	99
49	0,183	0,159	0,167	0,217	98	57	0,441	0,197	0,329	0,266	98
51			0,234	0,234	99						

číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	$V - I$ (mag)	σ_{V-I} (mag)	P
204	0,513	0,153	0,206	0,179	0,369	0,184	99
209	0,485	0,152	0,186	0,178	0,321	0,180	99
210	0,493	0,152	0,179	0,178	0,322	0,181	99
211	0,423	0,152	0,173	0,178	0,246	0,175	99
212	0,474	0,152	0,188	0,178	0,312	0,179	98
213	0,463	0,152	0,174	0,178	0,287	0,178	98
218	0,516	0,154	0,236	0,182	0,402	0,185	98
223	0,430	0,153	0,207	0,179	0,287	0,176	99
224	0,454	0,152	0,202	0,179	0,306	0,178	99
225	0,480	0,152	0,188	0,178	0,318	0,180	99
236	0,463	0,153	0,208	0,180	0,321	0,179	99
246	0,452	0,153	0,216	0,180	0,317	0,178	99
247	0,469	0,155	0,244	0,183	0,363	0,181	99
248	0,601	0,183	0,426	0,217	0,676	0,213	99
250	0,488	0,157	0,255	0,184	0,392	0,184	99
254	0,444	0,154	0,238	0,182	0,332	0,179	99
258	0,511	0,158	0,275	0,186	0,436	0,187	98
260	0,447	0,159	0,275	0,186	0,372	0,181	99
261	0,460	0,160	0,283	0,188	0,393	0,183	99
264	0,516	0,173	0,364	0,202	0,530	0,196	98
266	0,605	0,176	0,369	0,204	0,625	0,207	99
267	0,555	0,168	0,335	0,196	0,540	0,197	99
270	0,544	0,167	0,336	0,197	0,529	0,196	99
272	0,508	0,170	0,342	0,198	0,499	0,193	96
273	0,596	0,185	0,418	0,215	0,663	0,212	99
277	0,548	0,175	0,352	0,200	0,550	0,198	99
279	0,579	0,191	0,441	0,221	0,670	0,213	98

Pokračování tabulky A.3

číslo	$B - V$ (mag)	σ_{B-V} (mag)	$V - R$ (mag)	σ_{V-R} (mag)	$V - I$ (mag)	σ_{V-I} (mag)	P
282	0,685	0,195	0,451	0,224	0,786	0,227	99
273	0,596	0,185	0,418	0,215	0,663	0,212	99
277	0,548	0,175	0,352	0,200	0,550	0,198	99
279	0,579	0,191	0,441	0,221	0,670	0,213	98
282	0,685	0,195	0,451	0,224	0,786	0,227	99
283	1,006	0,349	0,966	0,411	1,622	0,373	86
285	0,568	0,185	0,411	0,214	0,629	0,208	99
288	0,641	0,189	0,429	0,218	0,721	0,219	99
289	0,609	0,182	0,403	0,212	0,662	0,211	87
291	0,627	0,188	0,417	0,215	0,694	0,215	99
298	0,706	0,218	0,532	0,249	0,888	0,243	99
307	0,731	0,221	0,542	0,252	0,923	0,248	97
317	0,711	0,227	0,547	0,253	0,909	0,246	97
320	0,789	0,245	0,595	0,270	1,034	0,265	89
325	0,695	0,238	0,594	0,270	0,939	0,254	98
329	0,678	0,237	0,587	0,267	0,915	0,250	99
338	0,727	0,240	0,610	0,275	0,987	0,260	95

Popis tabulek A.1 a A.2:

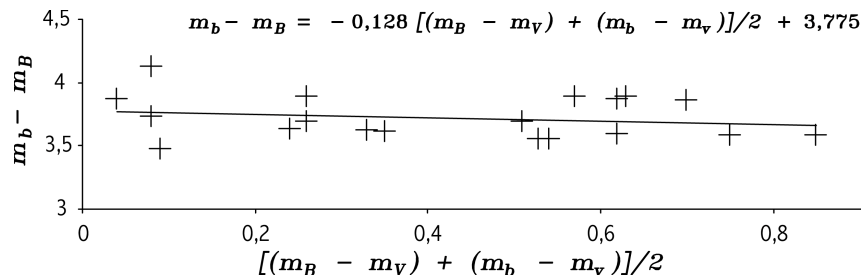
- číslo – odpovídá označení hvězdy na obrázcích 4.1 a 4.2.
- B (mag), V (mag), R (mag) – pozorované hvězdné velikosti v příslušných, filtrech, kalibrované do standardního fotometrického systému.
- σ_B (mag), σ_V (mag), σ_R (mag) – směrodatné odchylky kalibrovaných hvězdných velikostí, vypočítané ze zákona šíření chyb ze vztahů 4.14 – 4.17.
- P – procentuální pravděpodobnost příslušnosti hvězdy ke hvězdokupě, převzato z [17]. Pokud je hvězda neočíslována, nebyla v uvedené práci identifikována.

Popis tabulky A.3:

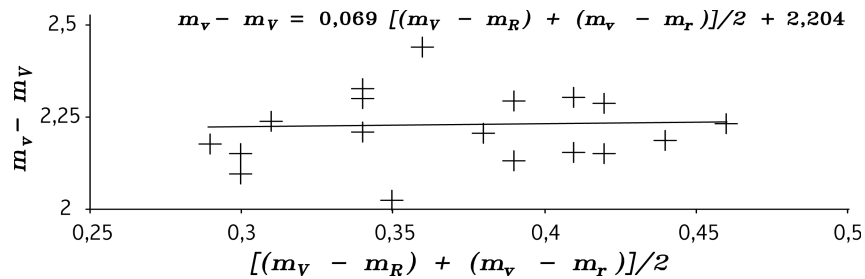
- číslo – odpovídá označení hvězdy na obrázcích 4.1, 4.2.
- ostatní odpovídá popisu pro tabulky A.1, A.2, pouze se jedná o příslušné barevné indexy.

A.2 Lineární regrese barevné kalibrace

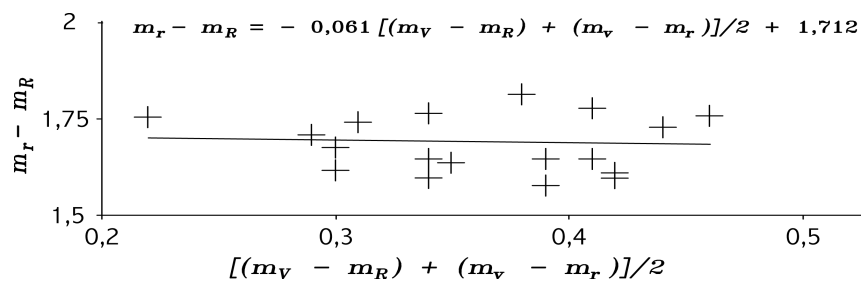
- Křížky jsou označené hodnoty pro srovnávací hvězdy - viz kapitola 4.2.
- Malé indexy - instrumentální magnitudy, velké indexy - kalibrované magnitudy. Popis barevné kalibrace - viz kapitola 4.3.



Obrázek A.1: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "1" pro $m_b - m_B$.

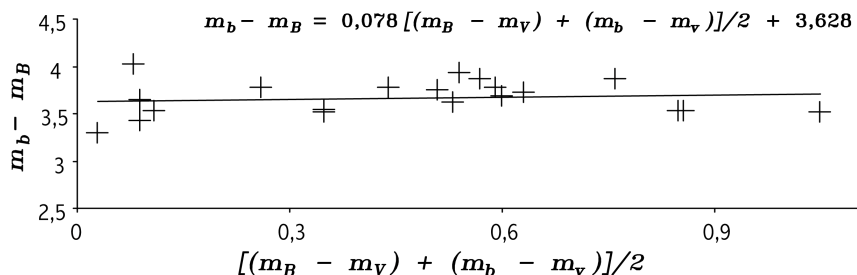


Obrázek A.2: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "1" pro $m_v - m_V$.

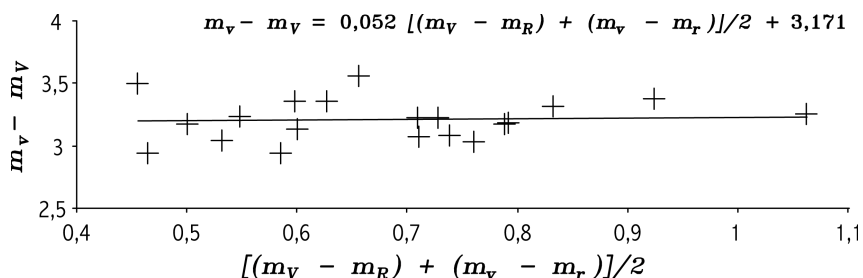


Obrázek A.3: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "1" pro $m_r - m_R$.

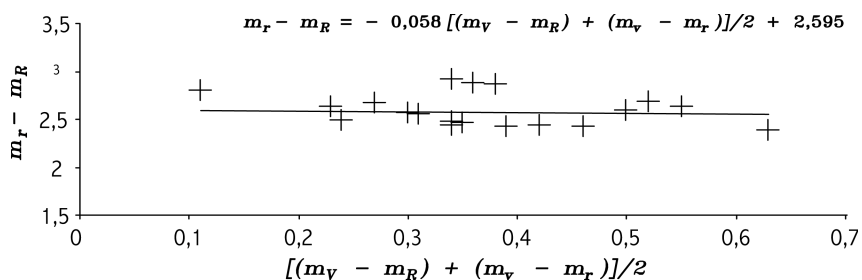
Pokračování grafů lineární regrese barevné kalibrace:



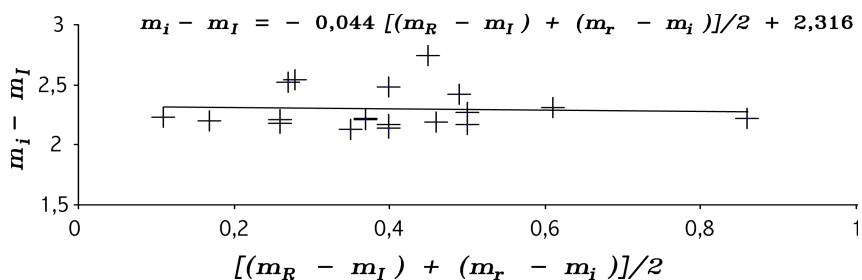
Obrázek A.4: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "2" pro $m_b - m_B$.



Obrázek A.5: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "2" pro $m_v - m_V$.



Obrázek A.6: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "2" pro $m_r - m_R$.



Obrázek A.7: Lineární regrese srovnávacích hvězd pole "1" pro $m_i - m_I$.

Literatura

- [1] Petr Harmanec: *Základy astronomie a astrofyziky II - verze 6*, Praha, 2007.
- [2] Filip Hroch: *Astronomické praktikum*, skripta, Brno, 2006.
- [3] Marek Chrastina: *Záludnosti CCD fotometrie*, ÚTFA MU, Brno, 2007.
- [4] Lucie Jílková: *Barevná kalibrace fotometrického systému*, Brno, 2006.
- [5] Zdeněk Mikulášek: *Metoda nejmenších čtverců a její aplikace*, studijní materiál, Brno, 2003.
- [6] Zdeněk Mikulášek, Jan Janík: *Astronomické pozorování*, skripta, Brno.
- [7] Zdeněk Mikulášek, Jiří Krtička: *Základy fyziky hvězd*, skripta, Brno, 2005.
- [8] Jaroslav Pavloušek, Oldřich Hlad: *Přehled astronomie*, Praha, 1990.
- [9] Vladimír Vanýsek: *Základy astronomie a astrofyziky*, Academia, Praha, 1980.
- [10] *Vesmír, obrazová encyklopedie*, Praha, 2005.
- [11] [http://aladin.u-strasbg.fr/The GSC-II Catalog](http://aladin.u-strasbg.fr/The_GSC-II_Catalog), Version 2.3.2 (2006)
- [12] <http://www.astro.cz>
- [13] G. Bertelli, A. Bressan, C. Chiosi, F. Fagotto, E. Nasi, *Astronomical and Astrophysical Suppl. Service 106, 275 (1994)*, <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J/A+AS/106/275>
- [14] Jasonjot Singh Kalirai, Gregory D. Fahlman, Harvey B. Richer, Paolo Ventura: *The CFHT Open Star Cluster Survey. IV. Two Rich, Young Open Star Clusters: NGC 2168 (M35) and NGC 2323 (M50)*, <http://adswwww.harvard.edu>, 2003

- [15] Jasonjot Singh Kalirai, Monica Tosi: *Interpreting the colour-magnitude diagrams of open star clusters through numerical simulations*, <http://adswww.harvard.edu>, 2004
- [16] <http://c-munipack.sourceforge.net>
- [17] Bernard McNamara, Kazuhiro Sekigouchi, *A Proper Motion Analysis of the Cluster M35*, <http://adswww.harvard.edu>, March 1986
- [18] Ata Sarajedini, Aaron J. Grocholski: *WIYN Open Cluster Study - XVI. Optical/infrared photometry and comparisons with theoretical isochrones*, <http://adswww.harvard.edu>, 2003
- [19] Nick Strobel – <http://www.astronomynotes.com>