

MASARYKOVA UNIVERZITA
Přírodovědecká fakulta
Ústav teoretické fyziky a astrofyziky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
CCD fotometrie vybrané otevřené
hvězdokupy II

Hana Marková

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

2008

Za věnovaný čas a obrovskou pomoc děkuji vedoucímu své bakalářské práce RNDr. Janu Janíkovi, Ph.D., Marku Skarkovi a Ing. arch. Petru Kurfürstovi děkuji za cenné rady a pomoc při zvládnání softwaru. Také děkuji své rodině, která mě v těžkých dnech podržela.

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

V Brně dne 19. 5. 2008

Hana Marková

Abstrakt:

V předložené bakalářské práci bude na základě výsledků CCD fotometrie studována hvězdokupa M67.

V části teoretické nejprve stručně probereme dostupné znalosti o hvězdokupách, zejména pak o hvězdokupách otevřených. Dále se seznámíme se základy hvězdné fotometrie, následované HR diagramem. Probereme dostupné informace o hvězdokupě M67 a porovnáme je s nově zjištěnými poznatky.

V části praktické se budeme zabývat zpracovanými daty získanými pozorováním této hvězdokupy. Na základě těchto dat budeme schopni určit stáří, vzdálenost a chemické složení. Nakonec bude provedeno srovnání mých výsledků s nejnovějšími hodnotami publikovanými v odborných člancích.

Klíčová slova: CCD fotometrie, hvězdokupa, otevřená hvězdokupa, HR diagram

Abstract:

In this submitted bachelor project we will study open cluster M67 using the results of CCD photometry.

In theory section, at first we will get some information about star clusters and focus on open clusters. Next we will try to understand the basics of star photometry followed by HR diagram. Also we will get some information about star cluster M67 and compare them with newly discovered evidence.

In practice section, we will process Science findings we observed. Using those results we will be able to set age, distance and chemical structure. At the end we will compare my results with findings that have been published in scientific papers.

Keywords: CCD photometry, star cluster, open cluster, HR diagram

Obsah

1	Hvězdokupy	6
1.1	Otevřené hvězdokupy	7
1.2	Vlastnosti otevřených hvězdokup	7
1.3	Klasifikace otevřených hvězdokup	8
1.4	Spektrální klasifikace hvězd	9
2	Hvězdná fotometrie	11
2.1	Elektromagnetická záření. Fotony	11
2.2	Záření absolutně černého tělesa	12
2.3	Zářivý výkon hvězd, hvězdná velikost	12
2.4	Efektivní teploty hvězd, barevný index	14
2.5	Fotometrické barvy, fotometrické systémy	14
2.6	Redukce měřených jasností	16
3	HR diagram	17
3.1	Vznik HR diagramu	17
3.2	Vzhled HR diagramu	19
3.3	HR diagram otevřených hvězdokup	20
3.4	Messier 67	21
4	CCD fotometrie	25
4.1	Princip CCD	25
4.2	Korekce CCD snímků	26
4.2.1	Bias, Dark frame	26
4.2.2	Flat field	27
5	Praktická část	28
5.1	Pozorování a pozorovací přístroje	28
5.2	Redukce a zpracování měření	28

5.3	Vzdálenost a stáří hvězdokupy	32
5.4	Trojbarevný diagram	34
5.5	Diskuse výsledků	35
6	Závěr	37
A	Přílohy	38
A.1	Výsledky CCD fotometrie	38

Kapitola 1

Hvězdokupy

Hvězdy se v Galaxii seskupují do hvězdných soustav zvaných *hvězdokupy* a *hvězdné asociace*. Hvězdokupy jsou skupiny hvězd, které mají určité společné vlastnosti a jsou soustředěny v relativně malém objemu. Nejznámějšími příklady jsou *Plejády*, které byly známy odedávna, a také méně nápadné *Hyady*. Hvězdokupy jsou seskupení hvězd, které prodělaly společný vývoj a vznikly ve stejném okamžiku.

Hvězdokupy se dělí podle vzhledu na:

- hvězdokupy otevřené - nemají pravidelný tvar
- hvězdokupy kulové - kulově symetrické seskupení hvězd
- hvězdné asociace - lze zjistit teprve srovnáním fyzikálních vlastností hvězd ve větším hvězdném poli

Nicméně jsou zde podstatné rozdíly jak ve stáří, tak v počtu členů hvězdokupy. Nejmladší (několik milionů roků staré) a nejméně početné (desítky hvězd) jsou hvězdné asociace. Nejstarší jsou kulové hvězdokupy (stáří se odhaduje na více než 10 miliard let). Největší a nejpočetnější jsou opět kulové hvězdokupy (obsahují statisíce až milióny hvězd). Rozložení hvězdokup v Galaxii je také odlišné a je obrazem jejich stáří a oběžné dráhy. Mladé útvary jsou poblíž galaktické roviny, naproti tomu kulové hvězdokupy jsou v různých vzdálenostech od galaktické roviny, většina z nich se nachází v halu Mléčné dráhy, nicméně se najdou i takové, které můžeme považovat za mimogalaktické objekty.

1.1 Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy jsou fyzikálně příbuzné skupiny hvězd, které drží pohromadě vzájemnou gravitační přitažlivostí. Proto se rozprostírají v omezené oblasti vesmíru - mnohem menší než je jejich vzdálenost od nás, takže se všechny nacházejí zhruba ve stejné vzdálenosti. Pravděpodobně vznikly z rozsáhlých kosmických mračen plynu a prachu (difúzní mlhoviny) v Galaxii a pokračovaly v obíhání Galaxie. V mnoha mračnech, která jsou vidět jako jasné difúzní mlhoviny, dochází stále ke tvorbě hvězd a tak můžeme pozorovat vytváření velmi mladých hvězdokup (např. v *Orlí mlhovině*, *Velké mlhovině v Orionu*, *Laguně* a jinde). Proces vytváření zabírá pouze značně krátký čas v porovnání s životností hvězdokupy, jsou tudíž všechny hvězdy podobné-ho stáří. Většina hvězd se vytvořila ze stejné difúzní mlhoviny, mají tedy také podobné počáteční chemické složení. Vnitřní srážky mezi členy kupy mohou mít za následek vypuzení hvězd, tento proces je znám jako vypařování. Nejen v důsledku vypařování, ale také působením slapových interakcí s Galaxií jako celkem, nebo v důsledku srážek s mezihvězdnými mračny mají sklon k rozpadu. Jen ty nejbohatší otevřené hvězdokupy dosahují věku staršího než miliardu let, zatímco menší a nejmenší, těsně k sobě vázané, nepřežívají déle než několik milionů let.

Otevřená hvězdokupa se rozpadne za dobu (Pavloušek, Hladil 1990):

$$t = 2 \cdot 10^8 \rho \text{ let}, \quad (1.1)$$

kde ρ je hustota v hmotnostech Slunce na krychlový parsek.

1.2 Vlastnosti otevřených hvězdokup

Otevřené hvězdokupy obvykle obsahují několik stovek členů. Jejich průměry se pohybují v rozmezí 5–50 světelných let, u velké většiny 5–20 světelných let (Kleczek 2002). Vztah mezi počtem hvězd a jejím průměrem je následující (Pavloušek, Hladil 1990):

$$\log N = 1,3 \log D + 2,0, \quad (1.2)$$

kde N je počet hvězd tvořící hvězdokupu a D je její průměr v parsecích.

Typický zářivý výkon otevřených hvězdokup je $500 L_{\odot}$. Rekordní zářivý výkon však činí $50\,000 L_{\odot}$. Hmotnost je několik desítek hmotností Slunce.

Jak už jsem zmínila dříve, otevřené hvězdokupy nejsou příliš pevně gravitačně svázané, proto se jedná o velmi mladé objekty. Jen několik otevřených hvězdokup přesahuje 10^9 let, většina je mladších než $2 \cdot 10^8$ let. Některé jsou však ještě mladší než 10^6 let. Vzhledem k tomu, že otevřené hvězdokupy patří k nejmladším galaktickým objektům, obsahují dvakrát až třikrát více těžších prvků než Slunce.

V otevřených hvězdokupách najdeme řadu různých typů hvězd. Najdeme zde hvězdy s kovovými a s emisními čarami. V Hyadách bylo například objeveno 10 bílých trpaslíků. Skutečný počet bílých trpaslíků bude patrně větší. Ve hvězdokupách najdeme také vizuální, spektroskopické dvojhvězdy i zákrytové proměnné. Například v *NGC 6231* je polovina zkoumaných hvězd spektroskopickými dvojhvězdami. Najdeme však i takové hvězdokupy, kde spektroskopické dvojhvězdy zjištěny nebyly. Proměnné hvězdy se ve hvězdokupách moc nevyskytují. Je známo přes deset cefeid v celkem asi 9 hvězdokupách. Avšak v některých kupách je velké množství proměnných typů T Tauri, které patří mezi nejmladší hvězdy vůbec.

Celkem je v Galaxii známo asi 1200 otevřených hvězdokup. Byly objeveny také v jiných galaxiích (např. v *Magellanových oblacích*, ve *Velké galaxii v Andromedě* a jinde).

1.3 Klasifikace otevřených hvězdokup

Otevřené hvězdokupy lze rozlišit podle různých vlastností následujícími klasifikacemi:

- podle bohatosti a koncentrace (HARLOW SHAPLEY 1930)
 - c - velmi volné a nepravidelné
 - d - volné a slabé
 - e - středně bohaté
 - f - zcela bohaté
 - g - značně bohaté a koncentrované
- podle stupně koncentrace, jasnosti hvězd a bohatosti (TRUMPLER 1930)
 - Stupeň koncentrace
 - I - oddělené, silně koncentrované směrem ke středu
 - II - oddělené, slabě koncentrované směrem ke středu
 - III - oddělené, bez koncentrace směrem ke středu
 - IV - špatně oddělitelné od kolem ležících hvězdných polí

Rozsah jasnosti

- 1 - malý rozsah jasnosti
- 2 - průměrný rozsah jasnosti
- 3 - velký rozsah jasnosti

Bohatost

- p - slabé, méně než 50 hvězd
- m - průměrně bohaté, 50 až 100 hvězd
- r - bohaté, více než 100 hvězd

Písmeno *n*, které následuje po Trumplerově klasifikaci značí, že se zde nachází mlhovina, která je přidružená k hvězdokupě.

- podle typu spektra hvězd (TRUMPLER)

Hlavní dělení

- 1 - všechny hvězdy jsou na hlavní posloupnosti v HR diagramu
- 2 - většina hvězd na hlavní posloupnosti, avšak malá část už se dostala na větev obrů
- 3 - převážně zestárlí žlutí a červení obři

Jemnější dělení

- o, b, f nebo g - spektrální typ nejjasnější hvězdy na hlavní posloupnosti

1.4 Spektrální klasifikace hvězd

Hvězdy jsou podle svých spekter zařazovány do spektrálních tříd. Pokud rozložíme světlo hvězdy do spektra, uvidíme tmavé absorpční a světlé emisní čáry. Polohy těchto čar označují jednotlivé příměsi fotosféry hvězdy, jejich intenzita určuje povrchovou teplotu hvězdy.

Ital *Angelo Secchi* v 60. letech 19. století poprvé roztřídil hvězdy podle vizuálního pozorování jejich spekter. Secchiho klasifikace měla čtyři třídy. Mnohem přesnější klasifikace umožnila fotografie. V 90. letech 19. století *Edward Pickering* a *Williamina Flemingová* rozšířili posloupnost spektrálních tříd od bílých až po nejchladnější červené. Avšak *Anthona Mauryová* přišla na to, že některé třídy jsou nadbytečné, jiné je nutno v klasifikaci přesunout. Vznikla tak harvardská spektrální klasifikace. Astronomové na Harvardské observatoři ji použili v Henry Draper Catalogue - *HD katalog*. Zde je v harvardské klasifikaci spektrálně zařazeno kolem 500 000 hvězd. Označení hvězd podle HD katalogu se používá dodnes - HD+šestimístné číslo.

Velká většina hvězd spadá do některé ze sedmi spektrálních tříd: O, B, A,

F, G, K, M. Je to zároveň posloupnost barev od horkých (O) k chladným (M) hvězdám. K základním sedmi spektrálním třídám jsou dnes ještě připojeny další, které se však ve vesmíru vyskytují vzácně: Q, P, W se předřazují třídě O, neboť mají vyšší teplotu. Třída Q jsou novy, P plynné mlhoviny, W Wolfovy-Rayetovy hvězdy (pojmenované podle dvou pařížských astronomů, kteří je v roce 1876 objevili). Za třídu M se řadí vzácné typy spekter S, R, N velmi chladných hvězd.

Hvězdy R a N se označují jako uhlíkové hvězdy (často se označují společným písmenem C, jelikož se vyznačují výraznými pásy sloučenin uhlíku: CN, CO, C₂). Pro hnědé trpaslíky byla zavedena spektrální třída L.

Spektrální třídy jsou (s výjimkou Q a P) ještě dále rozděleny na deset podtříd, které jsou označeny 0, 1, 2, ..., 9. Označení podtříd se klade za velké písmeno označující třídu. Toto podrozdělení je založeno především na zkušenostech pozorovatelů, kteří odhadují poměr určitých čar. Za symbol spektrální třídy (nebo před něj) se někdy připojují malá písmena. Upozorňují na spektrální anomálie. Písmeno *e* označuje, že ve spektru jsou emisní čáry, *s* označují čáry s ostrým profilem, *n* široké rozmazané čáry, *k* přítomnost mezihvězdných absorpčních čar ve spektru, *m* kovové čáry, *p* zvláštní spektrum a *v* proměnné spektrum.

Od druhé poloviny 20. století se používá *Morganovy-Keenanovy klasifikace*. V této klasifikaci se spektrální typ harvardské spektrální klasifikace na základě rozboru vzhledu spektra hvězdy doplňuje o tzv. luminozitní třídu (I-VII), která zhruba lokalizuje polohu obrazu hvězdy v HR diagramu.

Ia - jasní obři
 Ib - veleobři
 II - nadobři
 III - obři

IV - podobři
 V - hvězdy hlavní posloupnosti
 VI - podtrpaslíci
 VII - bílí trpaslíci

Kapitola 2

Hvězdná fotometrie

2.1 Elektromagnetická záření. Fotony

Elektromagnetické záření tvoří významnou část materiálu hvězd. Zprostředkovává přenos energie z centrální oblasti na povrch, také se významně podílí na tlaku hvězdného materiálu v nitru relativně horkých a řídkých hvězd. Jelikož se dokáže šířit i vakuem přenáší také důležité informace o hvězdách.

Elektromagnetické záření je příčné vlnění s proměnnými vektory magnetické indukce a elektrické intenzity, které jsou navzájem kolmé a současně jsou kolmé ke směru šíření. Základními charakteristikami jsou frekvence (kmitočet) ν udávaná v hertzech nebo vlnová délka λ udávaná v metrech nebo jeho zlomcích. Elektromagnetické záření se ve vakuu šíří rychlostí světla c . Frekvence a vlnová délka elektromagnetického záření ve vakuu jsou spolu vázány relací:

$$c = \nu\lambda. \quad (2.1)$$

Elektromagnetické záření je podle kvantové teorie tvořeno fotony. Foton se v různých situacích projevuje jako vlna nebo částice, má nulový náboj, celočíselný spin a nulovou klidovou hmotnost. Ve vakuu se fotony pohybují právě rychlostí světla. Foton s frekvencí ν a vlnovou délkou λ nese ve vakuu energii danou následujícím vztahem:

$$E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.2)$$

kde h je Planckova konstanta, $h = 6,62607 \cdot 10^{-34}$ Js, c je rychlost světla $c = 2,99792458 \cdot 10^8$ ms⁻¹

2.2 Záření absolutně černého tělesa

Záření hvězd můžeme v prvním přiblížení považovat za záření absolutně černého tělesa. Dokonalé černé těleso je teoretický pojem, k němuž se skutečná tělesa mohou do jisté míry přiblížit. Nejvíce se vlastnostem černého tělesa přibližuje žhavé plazma ve středu hvězd.

Už v roce 1859 Kirchhoff ukázal, že charakteristiky záření absolutně černého tělesa závisejí pouze na teplotě, nikoliv na vlastnostech stěn. V laboratoři lze AČT realizovat pomocí dobře tepelně vodivého kovového bloku, který je udržován na zvolené termodynamické teplotě. Uvnitř bloku je dutina s vyčerněnými stěnami, ty pohlcují elektromagnetické záření. V dutině se pohybují fotony záření, které vyzařují samotné stěny dutiny. Po krátké době se v dutině ustaví rovnováha popsaná termodynamickou teplotou stěn dutiny.

Dalším úspěchem bylo nalezení Stefanova vztahu pro celkový zářivý výkon. Výkon je přímo úměrný 4. mocnině absolutní termodynamické teploty:

$$\Phi_e = \sigma ST_{ef}^4. \quad (2.3)$$

V roce 1900 Max Planck učinil odvážný předpoklad, že zářivá energie není vysílána spojitě ale po kvantech (po fotonech). Zformuloval správný a teoreticky zdůvodněný vztah absolutně černého tělesa:

$$B_\nu(\nu, T) = 2\pi \frac{\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (2.4)$$

kde k je Boltzmannova konstanta, $k = 1,3806503(24) \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$.

2.3 Zářivý výkon hvězd, hvězdná velikost

Hvězdy vydávají do svého okolí energii v podobě elektromagnetického záření. Množství zářivé energie vydané za jednotku času se nazývá zářivý výkon L . Výkon se vyjadřuje ve watttech nebo ve výkonech tzv. nominálního Slunce L_\odot . Ten byl definován jako $L_\odot = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Bolometrická jasnost, nebo také hustota zářivého toku F je množství záření, které za jednotku času projde jednotkovou plochou kolmo ke směru paprsků ve vzdálenosti r od hvězdy. Vyjadřuje se ve Wm^{-2} . Pokládáme-li hvězdy za izotropní zářiče, můžeme pro pozorovatele ve vzdálenosti r od hvězdy psát:

$$L = 4\pi r^2 F. \quad (2.5)$$

Asi 150 let před začátkem našeho letopočtu publikoval *Hipparchos* katalog poloh a jasností asi 800 hvězd. Jasnosti hvězd v něm rozdělil do šesti kategorií, přičemž v první byly hvězdy nejjasnější. *Ptolemaios* později tento katalog rozšířil o dalších 200 hvězd. To se stalo základem pro vytvoření škály hvězdných velikostí, což jsou jasnosti hvězd seřazené sestupně. To znamená, že hvězda druhé velikosti je méně jasná, než hvězda první velikosti atd. Významně, v těchto raných stádiích hvězdné fotometrie, přispěli svými pozorováními pánové *William Herschel* a *Friedrich Wilhelm Argelander*.

Hvězdná velikost m je logaritmická veličina svázaná s příslušnou jasností j *Pogsonovou rovnicí*:

$$m = -2,5 \log \frac{j}{j_0}, \quad (2.6)$$

kde j_0 je *referenční jasnost*, kterou má zdroj s $m = 0$ mag. Podle typu jasností rozeznáváme např. vizuální hvězdnou velikost, bolometrickou hvězdnou velikost aj.

Vztah mezi bolometrickou jasností F a bolometrickou hvězdnou velikostí m_{bol} , kde hvězda z $m_{bol} = 0$ mag působí mimo zemskou atmosféru hustotou zářivého toku $F_0 = 2,553 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}$, je následující:

$$m_{bol} = -2,5 \log \frac{F}{F_0}. \quad (2.7)$$

Mezi bolometrickou hvězdnou velikostí a vizuální hvězdnou velikostí platí tento vztah:

$$m_{bol} = m_v + BC, \quad (2.8)$$

kde BC je *bolometrická korekce* vyjadřující rozložení energie ve spektru zdroje. V případě hvězd je určeno teplotou. Nulová hodnota bolometrické korekce je u hvězd o povrchové teplotě kolem 7 000 K, jejichž záření má největší světelnou účinnost. Směrem k vyšším i nižším teplotám bolometrická korekce klesá.

Jelikož hvězdná velikost závisí na vzdálenosti, pro pozorování zářivých výkonů hvězd se zavádí absolutní hvězdná velikost M , což je hvězdná velikost zdroje pozorovaného ze vzdálenosti 10 parseků ($3,08568 \cdot 10^{17}$ m). Rozdíl mezi pozorovanou a absolutní hvězdnou velikostí je tzv. *modul vzdálenosti* ($m - M$):

$$(m - M) = 5 \log r - 5 = -5 \log \pi - 5. \quad (2.9)$$

kde π je paralaxa - převrácená hodnota vzdálenosti v pc. Modul vzdálenosti závisí pouze na vzdálenosti.

2.4 Efektivní teploty hvězd, barevný index

Efektivní teplota hvězdy T_{ef} je definována jako teplota, kterou by měla koule o poloměru hvězdy R zářít jako absolutně černé těleso, jež do prostoru vysílá zářivý výkon L , odpovídající zářivému výkonu hvězdy. Podle *Stefanova zákona* platí (Mikulášek 2005):

$$L = \sigma T_{ef}^4 4\pi R^2, \quad (2.10)$$

kde σ je *Stefanova-Boltzmanova konstanta*, $\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Efektivní teplotu můžeme také odhadnout na základě rozložení energie ve spektru hvězd reprezentovaného např. barevnými indexy, polohou maxima vyzařování ve spektru atd.

Barevný index CI je rozdíl monochromatických hvězdných velikostí pozorované hvězdy měřených ve dvou různých barvách c_1 , c_2 , pro jejichž efektivní vlnové délky platí: $\lambda_{c_1} < \lambda_{c_2}$:

$$CI = m(c_1) - m(c_2). \quad (2.11)$$

Čím vyšší je teplota hvězdy, tím menší je její barevný index. Vztah je monotónní, takže barevný index může teplotu nahradit. Není však pouze funkcí efektivní teploty (jako u absolutně černého tělesa), získáme tedy jen odhad teploty. Teplota určená z barevného indexu se nazývá *barevná teplota*. Od efektivní teploty se poněkud liší a je rozdílná pro různé barevné indexy.

2.5 Fotometrické barvy, fotometrické systémy

Bolometrické a monochromatické hvězdné velikosti jsou pouze idealizací, ve skutečnosti měříme jasnost objektu v určitém oboru vlnových délek.

Fotometrický systém je určen několika barevnými filtry, ty definují barvy fotometrického systému. Výběr systému závisí na mnoha okolnostech: typ pozorovaného objektu, spektrální citlivost detektorů atd. Šířka pásma propustnosti dělí fotometrické systémy na tři třídy:

- širokopásmové systémy - šířka pásem nejméně 30 nm
- středněpásmové systémy - šířka pásem 10-30 nm
- úzkopásmové systémy - šířka pásem pouze několik nanometrů (téměř monochromatické systémy)

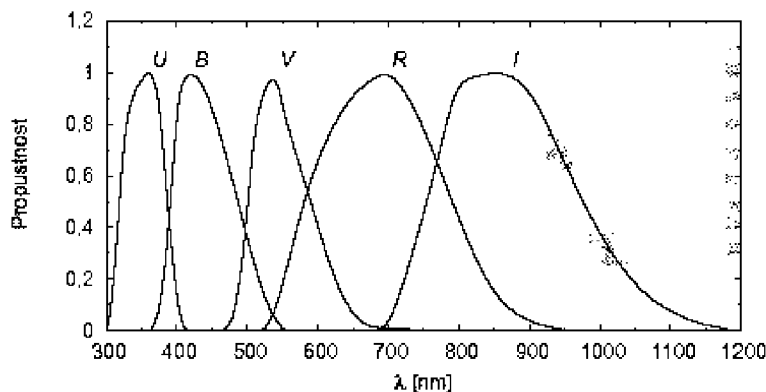
Každý ze systému má svůj postup, jímž se pozorované hvězdné velikosti převádějí na standardní.

Vůbec prvním používaným detektorem bylo lidské oko. Je nejcitlivější ve žlutozelené oblasti spektra, maximum kolem 550 nm. Po vynálezu fotografických emulzí začaly být jasnosti hvězd získávány proměřováním fotografií hvězd. Dosahovaná přesnost určení hvězdných velikostí činí zhruba 0,1 mag. Maximum citlivosti fotografické desky je v modré oblasti spektra. V důsledku různé citlivosti se tyto hvězdné velikosti od sebe lišily v závislosti na barvě (tedy i teplotě) hvězd. Barevný index $m_{pg} - m_{viz}$ tak souvisel se spektrálním typem hvězd. S rozvojem fotonásobičů se začaly provádět měření v různých barvách a přesnost měření rostla.

Nejznámějším a nejrozšířenějším standardním systémem je *UVB systém* zavedený *Johnsonem* a jeho spolupracovníky (Johnson a Morgan 1953, Johnson a kol. 1966). Je definován třemi filtry:

- *U*: propustnost od 300 nm do 420 nm s maximem u 360 nm (ultrafialový)
- *B*: propustnost od 360 nm do 560 nm s maximem u 420 nm (modrý)
- *V*: propustnost od 460 nm do 740 nm s maximem u 535 nm (žlutý)

Systém byl později rozšířen do červené a infračervené oblasti spektra prostřednictvím filtrů *R*(700 nm), *I*(900 nm), *K*(2200 nm) a *L*(3400 nm). Trefují se do oblasti s minimálním postižením spektrálních pásů vodní páry.



Obrázek 2.1: Propustnost filtrů Johnsonova systému *UBVRI*, [13]

Existují i další barevné systémy např. *Strömgrenův uvby* (Strömgren 1966), který má oproti Johnsonova systému výhodu - je zde možno určit výšku Balmerova skoku. U Johnsonova systému filtr U zahrnuje oblast vlnových délek před i za Balmerovým skokem. Vlastní systém používají i pozorovací družice například HIPPARCOS.

2.6 Redukce měřených jasností

Dopadne-li záření na zemskou atmosféru, dochází k jeho výraznému ovlivnění. Atmosféra je propustná jen v určitých oblastech spektra (v takzvaných atmosférických oknech). Atmosféra světlo rozptyluje a pohlcuje, dochází tak k atmosférické extinkci. Intenzita extinkce závisí na vlnové délce světla, na vlastnostech atmosféry a na tloušťce vrstvy atmosféry nacházející se mezi pozorovatelem a hvězdou. Intenzita extinkce se liší v různých oborech spektra, při jejím určování je tedy třeba měřit zvlášť pro každý filtr.

Ve hvězdné fotometrii se extinkční koeficient udává jako zeslabení v magnitudách pro hvězdy ležící v zenitu, kde je nejmenší sloupec vzdušné hmoty ($X = 1$). Platí, že vzdušná hmota je zhruba nepřímou úměrná kosinu zenitové vzdálenosti. V oblastech, kde se provádějí fotometrická měření, přibližně platí následující vztah:

$$X = (1 - 0,0012 \tan^2 z) \sec z, \quad (2.12)$$

či přesnější vztah, odvozený Bemporadem:

$$X = \sec z - 0,0018167Q - 0,02875Q^2 - 0,008083Q^3, \quad (2.13)$$

$$Q = \sec z - 1. \quad (2.14)$$

Pro pozorovanou hvězdnou velikost pak platí:

$$m = m_0 + kX, \quad (2.15)$$

kde m je pozorovaná hvězdná velikost, m_0 je skutečná hvězdná velikost (vně atmosféry), k je lineární extinkční koeficient.

Kapitola 3

HR diagram

3.1 Vznik HR diagramu

HR diagram vyjadřuje vztah mezi povrchovou teplotou hvězdy a jejím výkonem (zářivostí). Vztah objevil v roce 1911 dánský astronom *Ejnar Hertzsprung* a nezávisle v roce 1913 americký astronom *Henry Norris Russell*.

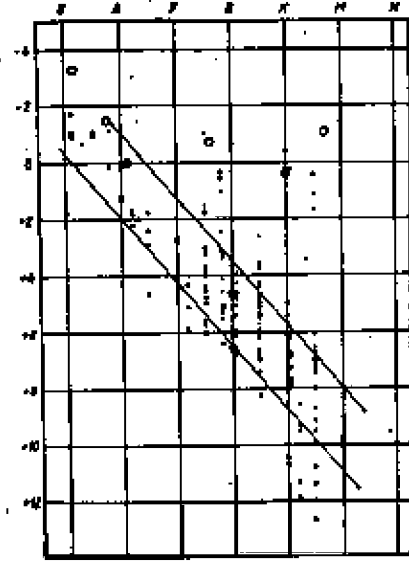
Enjar Hertzsprung v roce 1905 uvedl rozdělení hvězd na posloupnost obrů a trpaslíků. Sestrojil také diagram závislosti zdánlivé magnitudy na barvě pro členy hvězdokup Plejády a Hyády.

V roce 1910, nezávisle na Hertzsprungovi, dospěl Russell k závěru, že rozdíl ve svítivosti hvězd jsou v korelaci s jejich spektrální třídou. Roku 1913 sestrojil diagram závislosti absolutní hvězdné magnitudy na spektrální třídě pro všechny hvězdy se známými paralaxami, který začal být nazýván HR diagram - viz obr. 3.1 (Štefl, 1988).

Úplnější HR diagram hvězd byl sestaven později po získání potřebných charakteristik hvězd. Bylo zjištěno podrobnější rozdělení hvězd do posloupností na HR diagramu: *hlavní posloupnost, obří, veleobří, podobří, podtrpaslíci a bílí trpaslíci*.

Holandský astrofyzik *Peter van de Kamp* sestavil v roce 1953 první HR diagram pro hvězdy do vzdáleností 5 pc od Slunce. Od dvacátých let dvacátého století začal být HR diagram využíván při studiu hvězdokup. Vycházelo se ale z předpokladu, že všechny hvězdy hvězdokupy se nachází přibližně ve stejné vzdálenosti od Země, nebylo tedy nutné určovat jejich absolutní magnitudu.

Novější HR diagramy, zachycující závislost barva-svítivost, byly sestrojeny *H. L. Johnsonem, W. W. Morganem* a jinými pro hvězdokupy Plejády,



Obrázek 3.1: Původní HR diagram sestrojený Russellem, [19]

Jesle a další. Díky srovnání těchto diagramů různých hvězdokup byly stanoveny relativní vzdálenosti od Slunce a určení skutečných rozdílů na hlavních posloupnostech různých hvězdokup, umožnilo to ověřit teorie vývoje hvězd.

Od roku 1925 studoval americký astrofyzik *R. J. Trumpler* větší počet otevřených hvězdokup. Odhalil význam počáteční hmotnosti pro vývoj hvězd, dospěl k závěru, že existují rozdíly mezi hmotnostmi hvězd ve hvězdokupách různých typů.

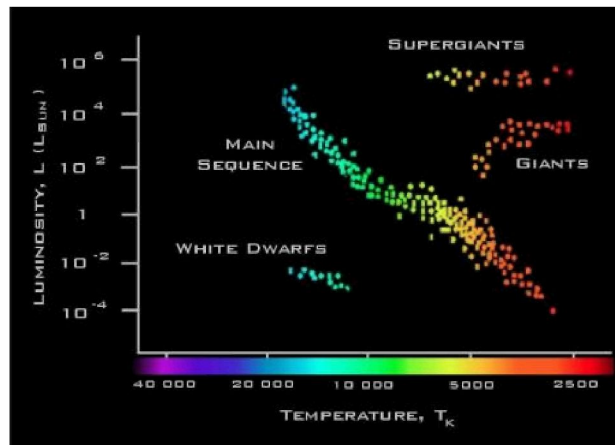
Trumplerovy práce radikálně změnilly teorie vývoje křivek na HR diagramu. Astrofyzika postupně dospěla k současné koncepci vývoje od hlavní posloupnosti k oblasti obrů. Takovýto vývoj hvězd znamená, že řada otevřených hvězdokup jsou relativně mladými hvězdnými soustavami. V roce 1943 Morgan zavedl ke spektrální třídě římské číslice. Toto označení jednoznačně umožňovalo určení polohy hvězdy, celkem bylo zavedeno sedm tříd svítivosti I-VII.

Roku 1957 upozornil americký astrofyzik *Allan Rex Sandage* na další skutečnost. Při sestrojení souhrnného HR diagramu pro větší počet hvězdokup lze z bodu odklonu od hlavní posloupnosti a z rozložení hvězd na diagramu srovnáním určit stáří jednotlivých hvězdokup. Čím je hvězdokupa starší, tím níže je na diagramu místo odklonu od hlavní posloupnosti.

3.2 Vzhled HR diagramu

HR diagram je soustava pravoúhlých souřadnic v rovině. Na vodorovnou osu se nanáší spektrální typ a na svislou osu absolutní magnituda. Jelikož barva hvězd je funkcí spektrální třídy, lze nahradit spektrální třídu barevným inde-
xem a diagram spektrum-svítivost se nahradí diagramem barva-svítivost, který je velmi vhodný pro studium vzdálených hvězdokup.

Pokrytí diagramu není rovnoměrné, ale kupí se do skupin. Hlavní je v pásu, který probíhá šikmo od levého horního rohu - od horkých hvězd o vysoké zářivosti, k pravému dolnímu rohu - k chladným červeným hvězdám s malou zářivostí. Tento pás se nazývá hlavní posloupnost. Zde se nachází asi 90% hvězd z našeho hvězdného okolí. Všechny hvězdy se po svém zrodu dostanou na hlavní posloupnost a tam stráví převážnou většinu svého života. Jsou chemicky homogenní, jejich stavba je jednoduchá a ve středových oblastech spalují vodík v helium.



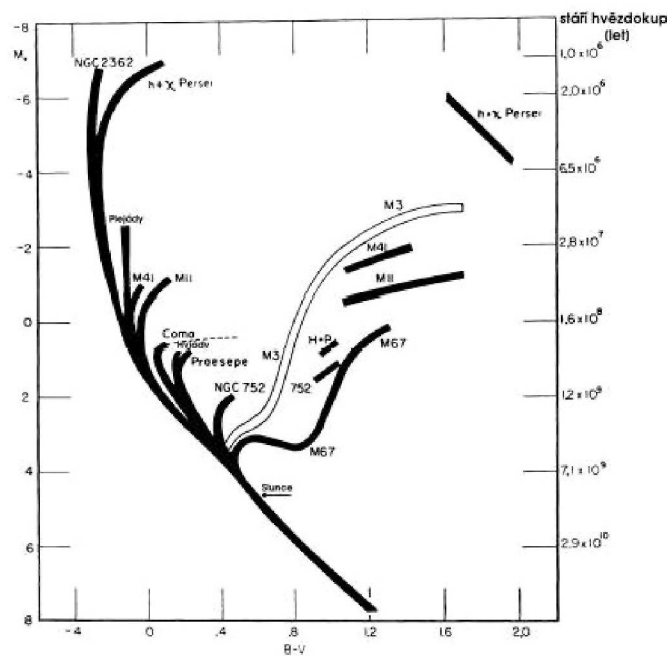
Obrázek 3.2: HR diagram [e3]

V pravém horní části jsou červení obři. Jejich stavba je složitější, neboť ve středu je heliové jádro, v němž probíhá hoření helia. Jádro je obaleno vrstvou, v níž probíhá přeměna vodíku v helium. Nad hlavní posloupností a nad skupinou červených obrů jsou velmi jasní a vzácní veleobři. Jsou to nehmotnější hvězdy s krátkým životem. Před zánikem je jejich stavba značně složitá a v jejich nitru, za vysokých teplot až 3 mld. K, se tvoří nejrůznější chemické prvky. Veleobr skončí jako neutronová hvězda nebo černá díra. V levé spodní části HR diagramu jsou pak bílí trpaslíci. Jsou to chladnoucí

elektronově degenerované hvězdy, jejichž poloměr se při chladnutí prakticky nemění.

3.3 HR diagram otevřených hvězdokup

HR diagram, kde je v závislosti barva-svítilivost, je velmi výhodný pro studium hvězdokup. Jestliže do teoretického diagramu spektrum-svítilivost jsou nanесeny průběhy hlavních posloupností pro hvězdy stejného staří, ale různých hmotností, lze zjistit, že čím je skupina hvězd (hvězdokupa) starší, tím je průběh hlavní posloupnosti zakřivenější směrem k červeným obrům.



Obrázek 3.3: HR diagram některých otevřených hvězdokup, [21]

Hvězdokupy obsahující hvězdy spektrálního typu B jsou mladší než hvězdokupy, jejichž nejjasnější složka na hlavní posloupnosti patří k třídě A. Velmi staré hvězdokupy nemají na hlavní posloupnosti hvězdy vyšší svítivosti než typu F.

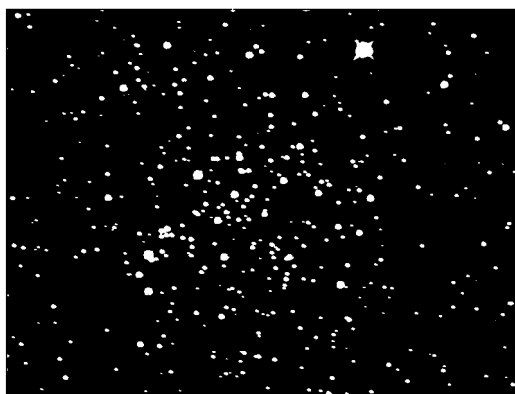
Rozložení hvězd na HR diagramech hvězdokup se od HR diagramů hvězd pole liší - ostřeji definovanými naznačenými posloupnostmi. Můžeme jimi proložit spojitou křivku, i když někdy přerušenu.

Brzy poté co se jednotlivé hvězdy hvězdokupy osamostatní, smrští se a zahřejí se v nitru - v jádrech se vznítí vodíkové reakce, usadí se tak na hlavní posloupnosti nulového stáří. Hvězdy se dále vyvíjejí. Izochronou nazveme místa na HR diagramu spojující hvězdy různé hmotnosti téhož stáří. Z počátku se izochrona přimyká k hlavní posloupnosti nulového stáří, avšak po několika milionech let se ty nejhmotnější hvězdy začnou od hlavní posloupnosti odchylovat, směrem k nižším teplotám a vyšším výkonům. Je to dáno tím, že čím hmotnější hvězda, tím rychleji se vyvíjí. Bod obratu je místo, kde dochází k výraznému ohybu izochrony. Jak čas plyne, bod obratu sestupuje stále níž, k hvězdám s menší hmotností. Poloha bodu obratu tak jednoznačně určuje stáří hvězdokupy. Hvězdy s vyšší hmotností už opustily hlavní posloupnost a přesunuly se do oblasti obrů.

Diagramy různých otevřených hvězdokup se od sebe výrazně liší. Je to důsledek toho, že i stáří těchto hvězdokup je různé v rozmezí několika řádů: od 10^6 do 10^9 let.

3.4 Messier 67

M67 je jednou z nejstarších známých otevřených hvězdokup. Nachází se v souhvězdí Raka. Její vzdálenost je 2700 ly. Podle *Johanna Elerta Bodea*, M67 byla objevena *Johannem Gottfriedem Koehlerem* někdy před rokem 1779, nicméně se zdá, že Koehlerovy nástroje byly tak špatné, že nemohly rozlišit tuto hvězdokupu. *Charles Messier* nezávisle objevil M67 znovu a zkatalogizoval 6. dubna 1780.



Obrázek 3.4: Messier M67, [e2]

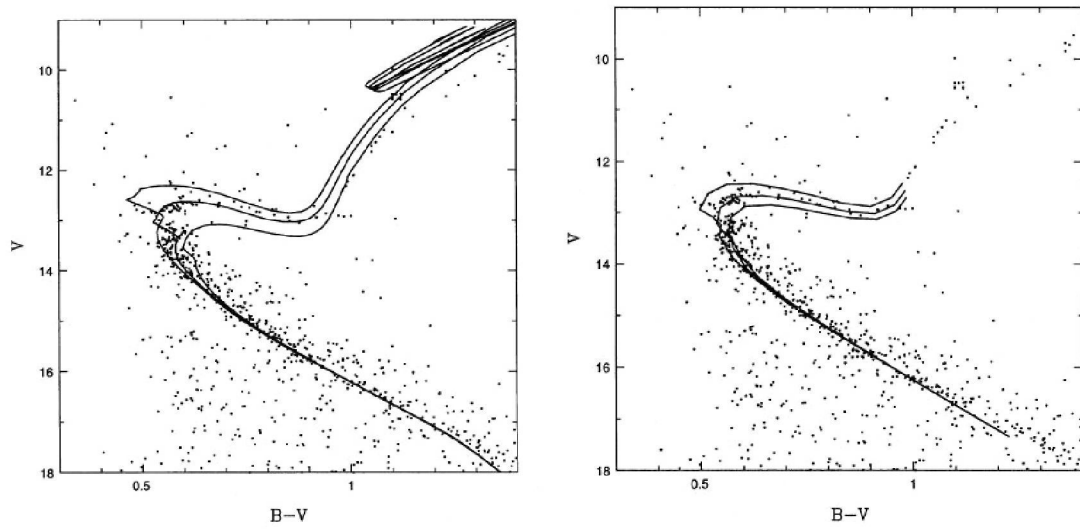
Je uvedena jako nejstarší z Messierových otevřených hvězdokup, její věk byl určen na 3,2 miliard let v Hvězdném katalogu 2000; Mallas a Kreimer (1978) uvedli věk dokonce vyšší, ale pravděpodobně velmi starou, dávno určenou hodnotu 10 miliard let. Nové odhady ukázaly věk 4 miliardy let. To je stále méně než věk naší Sluneční soustavy, ale otevřené hvězdokupy se obvykle rozpadají mnohem rychleji. Bylo vypočítáno, že M67 může existovat jako hvězdokupa po dalších 5 miliard let.

Pouze několik známých otevřených hvězdokup bylo určeno staršími, mezi nimi pravděpodobně *NGC 188* stará okolo 5 miliard let, dlouho uvedená jako nejstarší známá otevřená hvězdokupa a *NGC 6791*, která je stará 7 miliard let (podle Woldemara Götze 1990) a je aktuálně nejstarší známou otevřenou hvězdokupou v naší Mléčné dráze.

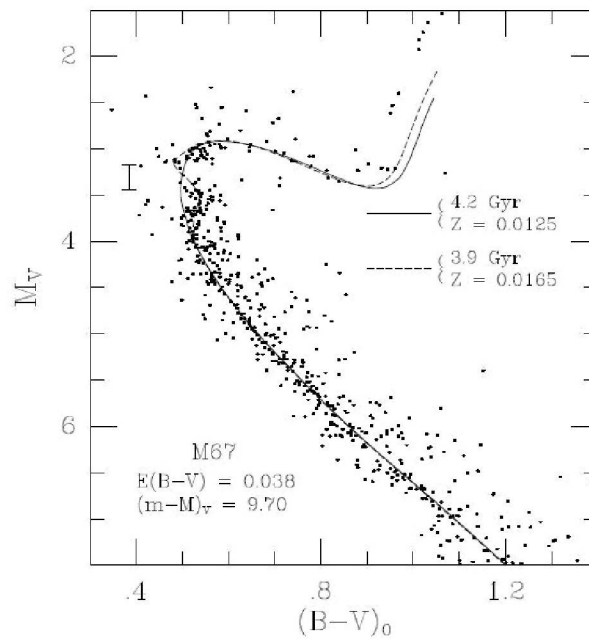
V pozdějším období vývoje otevřená hvězdokupa M67 ukazuje ve svém HR diagramu dobře vyvinuté červené obří větve, zatímco hlavní posloupnost končí horkými modrými hvězdami spektrální třídy A až F. Obsahuje 11 zářivých K typů obrů absolutní magnitudy +0,5 až +1,5 a několik hvězd rozptýlených na horizontální větvi. Nicméně také obsahuje nějaké hvězdy blízké modré hlavní posloupnosti, reprezentanty tzv. *Modrých opozdilců*, nejzářivější z nich jsou spektrální třídy B8 nebo B9 a zdánlivé magnitudy 10, odpovídající svítivosti 50krát větší než Slunce ve vzdálenosti M67. Celkový počet hvězd v M67 je pravděpodobně menší než 500. Podle *Cecilia Payne-Gaposhkina* (1979), M67 obsahuje téměř 200 bílých trpaslíků.

Hvězdy v M67 mají podobné chemické složení jako Slunce, proto je tato kupa cílem pozorování pro studium slunečního typu hvězd. *Mark Giampapa* z National Science Foundation's National Solar Observatory v Tucson, Arizona, pozoroval v M67 více než 10 hvězd připomínající Slunce a zjistil, že většina z nich jsou významně více nebo významně méně aktivní než naše domácí hvězda, 10-15 % z těchto hvězd ukázaly výjimečně klidnou hladinu magnetické aktivity, zatímco 30 % z M67 jsou ve stavu zvýšené aktivity ve srovnání se slunečním maximem.

Na obrázku 3.5 vidíme barevné diagramy s daty získanými Montgomery a kol. (1993) a s teoretickými isochronami od Castellani a kol. (1992) pro stáří M67 s 3, 4 a 6 miliardy let na obrázku vlevo. Bodu obratu, tedy stáří M67, nejlépe odpovídá isochrona mezi 3-4 miliardy let. Stejná data, ale jiné teoretické isochrony jsou na obrázku vpravo. Tyto modely jsou z dílny VandenBerg (1985) s použitým stářím 4, 5 a 6 miliard let. Nejlépe odpovídá isochrona pro stáří 5 miliard let, ale i zde se stále nepatrně odchyluje spodní hlavní posloupnost.



Obrázek 3.5: Barevné diagramy s různými teoretickými isochronami. Vlevo od Castelline et al. (1992), vpravo Vandenberg (1985), [14]



Obrázek 3.6: Barevný diagram M67, [20]

Z nejnovějších studií zmíním práce Balaguer-Núñez a kol. (2007) a Vandenberg a kol. (2007). Obě tyto práce se zabývají CCD fotometrií M67. Z těchto studií vycházejí následující parametry, stáří bylo určeno na $4,2 \pm 0,2$ miliard let, modul vzdálenosti $(m - M) = (9,7 \pm 0,2)$ mag. V práci Balaguer-Núñez a kol. (2007) je také určena hodnota zčervenání pro vybranou oblast (50×50 obloukových minut) a její hodnota je $E(b - y) = (0,03 \pm 0,03)$ mag a metalicita $[Fe/H] = 0,1 \pm 0,14$.

Kapitola 4

CCD fotometrie

CCD (charge couple device) byly sestaveny v roce 1970 Boylem a Smithem v Bellových laboratořích. CCD mají různou možnost využití: paměti, korekční a optické detektory apod.

CCD kamera je tzv. zobrazovací detektor, který zaznamenává obraz vytvořený v ohniskové rovině objektivem dalekohledu. CCD kamery se ovládají prostřednictvím počítače a svá data ukládají přímo na disk počítače.

CCD nahrazuje fotografickou desku, je menší, citlivější a mnohem účinnější v registraci fotonů než klasická fotografie. CCD je schopno zaregistrovat více než 75% dopadajících fotonů, zatímco fotografická emulze pouze 1%. Docílilo se tak zkrácení expoziční doby a také se zvětšil maximální dosah dalekohledů než tomu bylo u klasické fotografie.

4.1 Princip CCD

Na tenké polovodičové desce (např. křemíkové) jsou seřazeny velmi jemné zobrazovací elementy (pixely) citlivé na fotony. Světlo dopadá na povrch křemíkové destičky v podobě fotonů a ukládá se jako náboj v potenciálových jámách. Tyto jámy zabraňují volnému pohybu elektronů tedy i náboje po čipu a dochází tak k jeho kumulování. Každá potenciálová jáma představuje jeden pixel CCD snímače. Velikost pixelů je různá, pohybuje se v rozmezích $7 - 24 \mu m$. Pixely jsou řazeny do několika tisíců řad a několika tisíců sloupců. Některé CCD mají i 4096×4096 pixelů. Jednotlivý pixel má kapacitu až půl milionů elektronů. Do 100 000 elektronů má pixel lineární charakteristiku. Zachycený náboj je nutné po nějaké době odebrat a převést na elektrický signál, jinak by mohlo dojít k přetečení potenciálové jámy. Data jsou zpra-

cována počítačem, mohou být znázorněna na obrazovce jako snímek, nebo graf, nebo přímo analyzována.

Data z CCD kamery se ukládají ve formátu FITS. Jedná se o obrázkový formát, který kromě dat obsahuje i další důležité informace o obrázku, jako například čas pořízení, expoziční dobu aj. Základní verze formátu FITS, která je zároveň i nejpoužívanější verzí, je vybavena dvěma základními složkami:

První složkou je hlavička, ve které je velké množství informací. Mezi důležité údaje o snímku patří především informace o rozměrech daného snímku, což jsou: NAXIS, NAXIS1, NAXIS2, okamžik začátku expozice DATE-OBS, její trvání EXPTIME a filtr, ve kterém byl snímek pořízen FILTER. Druhou složkou jsou DATA, neboli vlastní obrázek. Data následují po hlavičce a jsou uložena jako tabulka, kde se jednotlivá čísla označují jako pixely. Hodnoty pixelů jsou úměrné dopadnutému záření.

4.2 Korekce CCD snímků

CCD snímek, který jsme získali, je vizuálně neatraktivní a je ovlivněný *tepelným šumem a citlivostí na světlo*. Ty mají vliv na fotometrickou kvalitu snímku, můžeme je však odstranit pomocí *korekčních snímků*. Pořizujeme je v průběhu pozorování.

4.2.1 Bias, Dark frame

S rostoucí teplotou narůstá termický šum, který má za následek vznik temného proudu. Tento temný proud lze odstranit získáním temného snímku (dark frame), který se snaží podchytit vliv tepelného šumu. CCD čip je sice chlazen (Peltiérův článek, kapalným dusíkem, suchým ledem apod.), ale odstranit jej nelze. Temný snímek pořizujeme bez světla a o stejné expoziční době jako snímky, které chceme upravit.

Také můžeme pořídit bias, což je temný snímek s nekonečně krátkou expoziční dobou. Bias neukazuje jen jednu hodnotu, ale jakési přednastavení citlivosti jednotlivých pixelů. Samotná korekce na bias a dark frame je prostě odečtení těchto snímků od expozice a pak odečtení navzájem.

4.2.2 Flat field

Flat field se snaží zachytit vliv různé citlivosti pixelů CCD detektoru. Je to snímek rovnoměrně osvětlené pochy, který získáme nejlépe při soumraku. Při použití barevných filtrů je nutné udělat flat field pro každý z nich, jelikož spektrální citlivost pro jednotlivé filtry se liší. Pořízený flat field se opraví o dark frame a bias a zjistí se jeho průměrná hodnota, kterou se snímek normuje na hodnotu kolem jedné. Normování nemá vliv na kvalitu snímku, ale posune úroveň snímku tak, že výsledný snímek má průměrnou úroveň stejnou, jako měl snímek před opravou o flat field, nezmění se tak jeho fotometrický význam.

Kapitola 5

Praktická část

5.1 Pozorování a pozorovací přístroje

Objekt, který byl pozorován, se nachází v souhvězdí Raka, jedná se o otevřenou hvězdokup M67 (NGC 2682), $\alpha = 8^h 50,4^m$; $\delta = +11^\circ 49'$. Bližší údaje o této hvězdokupě se dočtete v podkapitole 3.4.

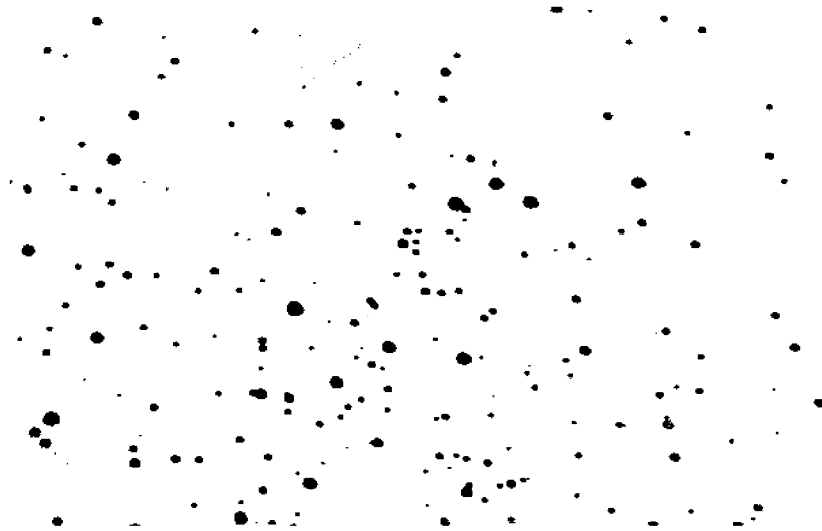
Hvězdokupa byla pozorována na Observatoři Masarykovy univerzity na Kraví hoře v Brně. Pozorování trvalo několik nocí, z důvodu proměnlivého počasí. Pozorovacím přístrojem byl 62 cm zrcadlový reflektor typu Newton. Byla také použita CCD kamera typu SBIG ST-8 Dual CCD Camera s čipem KAF 1600 a s fotometrickými filtry *B*, *V*, *R*, *I*. V každé z těchto nocí bylo pořízeno kolem 25 snímků ve zmíněných filtrech. Pro jednotlivé filtry byly použity tyto expoziční doby: filtry *V*, *R*, *I* 60 s a filtr *B* 100 s.

5.2 Redukce a zpracování měření

Získaná data byla zpracována pomocí programu *Munipack* [7], z něhož jsem postupně získala průměrné hodnoty *dark-frame*, *flat-field* a také instrumentální hvězdné velikosti.

Na získaném CCD snímku obr. 5.1 je méně hvězd, než by bylo možné pozorovat. Hlavním důvodem je světelné znečištění, z toho vyplývá, že slabší hvězdy nejsou vůbec pozorovatelné.

Jelikož se M67 nachází mimo rovinu Mléčné dráhy, není zde mnoho hvězd, které by do této hvězdokupy nepatřily. V článku Sanders (1976) je studovaná otevřená hvězdokupa M67, konkrétně jednotlivé její hvězdy, které



Obrázek 5.1: CCD snímek otevřené hvězdokupy M67 ve fitru V

patří, či nepatří do této hvězdokupy, na základě jejich vlastních pohybů. V příloze této práce je tabulka již okalibrovaných hodnot s chybou a také procentuálním zastoupením. Jak sami můžete vidět je zde opravdu nepatrný počet hvězd, které do této hvězdokupy nepatří. V této tabulce odpovídá číslo, číslu hvězdy na obr. A.1.

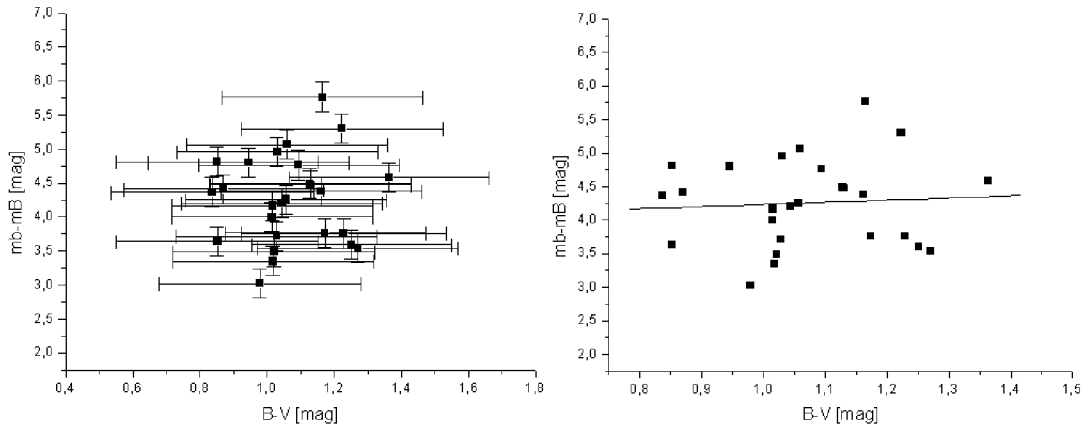
M67 je dobře prozkoumaná hvězdokupa, proto nebylo nutné v průběhu noci pozorovat standardní hvězdy, pomocí kterých se převádí instrumentální hvězdné velikosti na standardní a odstraňuje se vliv atmosférické extinkce. Nejlépe mi posloužil článek Montgomery a kol. (1993), zde se však ukázala dostupná pozorování pouze ve filtrech B , V , I . Pomocí dat získaných z tohoto článku, a dat mnou zpracovaných, jsem udělala barevnou kalibraci. Popis a postup barevné kalibrace je popsán v práci [4] a následně v další práci [8]. Grafy jsou na obr. 5.2, 5.3, 5.4. Z těchto grafů vyšly následující závislosti:

$$\begin{aligned}
 m_B &= m_b + (0,317 \pm 0,314) * (m_b - m_v) + (3,917 \pm 0,214), \\
 m_V &= m_v + (-0,135 \pm 0,231) * (m_v - m_i) + (2,797 \pm 0,208), \\
 m_I &= m_i + (0,001 \pm 0,162) * (m_v - m_i) + (2,208 \pm 0,147),
 \end{aligned}$$

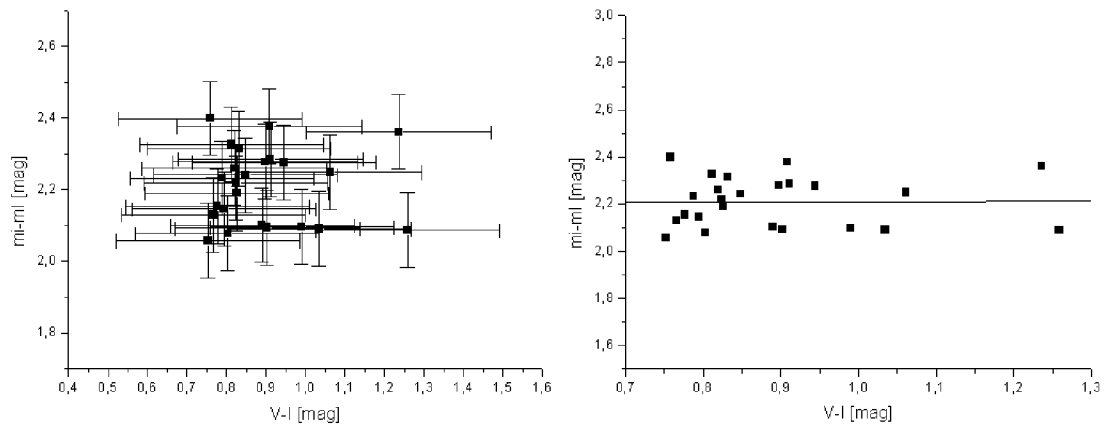
kde m_B, m_V, m_I jsou okalibrované hodnoty, m_b, m_v, m_i hodnoty instrumen-

tální, získané z Munipacku. Z takto okalibrovaných hodnot můžeme sestavit barevné diagramy obr. 5.5 a obr. 5.6.

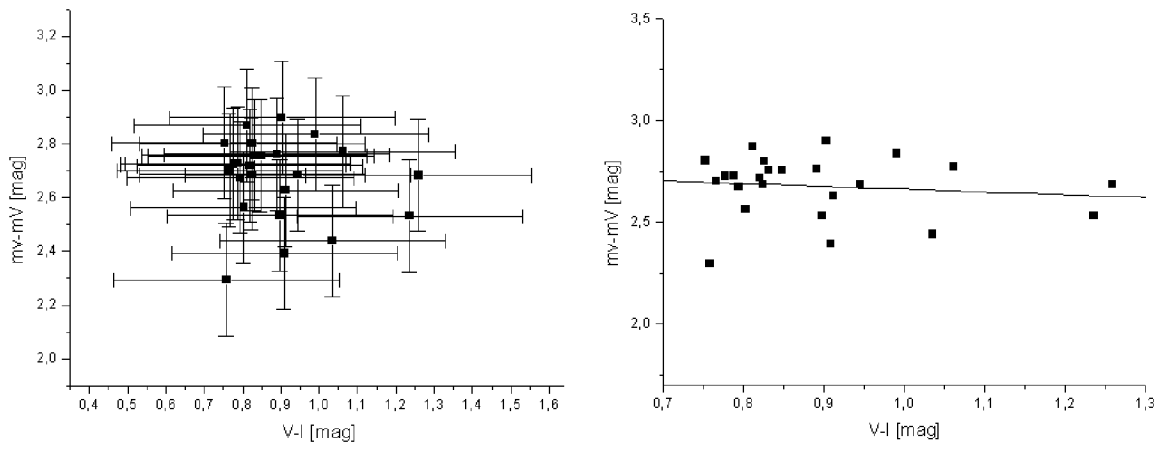
Na těchto diagramech je dobře patrná hlavní posloupnost, která směřuje z pravého dolního rohu šikmo nahoru. Najdeme zde i velmi viditelný odklon od hlavní posloupnosti a větev obrů, z toho lze usoudit, že se jedná o velmi starou otevřenou hvězdokupu.



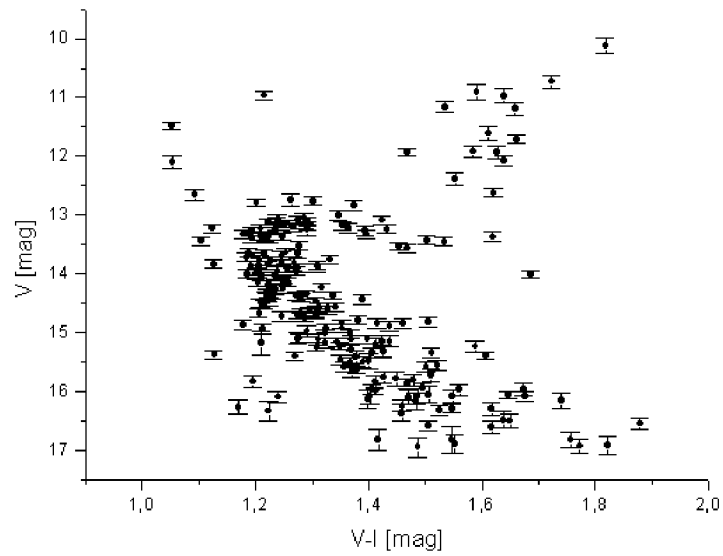
Obrázek 5.2: Barevná kalibrace pro barevný index $B-V$, nalevo s chybou, napravo s linearizací



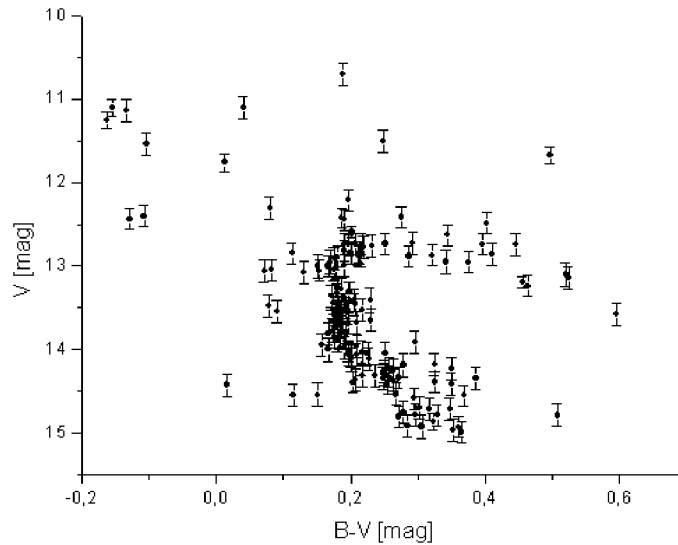
Obrázek 5.3: Barevná kalibrace pro $V-I$, nalevo s chybou, napravo s linearizací



Obrázek 5.4: Barevná kalibrace pro barevný index $V-I$, nalevo s chybou, napravo s linearizací



Obrázek 5.5: HR diagram otevřené hvězdokupy M67 pro barevný index $V-I$ a pozorovanou hvězdnou velikost V



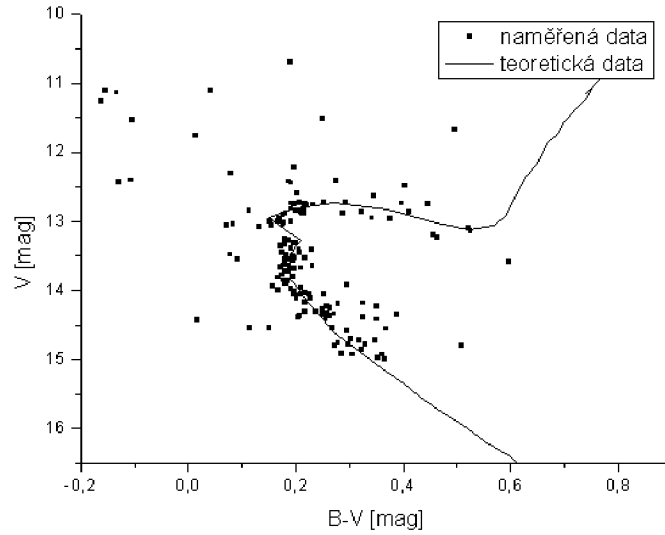
Obrázek 5.6: HR diagram otevřené hvězdokupy M67 pro barevný index $B-V$ a pozorovanou hvězdnou velikost V

5.3 Vzdálenost a stáří hvězdokupy

Pro určení stáří hvězdokupy opět sestrojíme barevný diagram, kde nás nejvíce zajímá bod obratu - místo odklonu od hlavní posloupnosti. Čáry, které schematicky určují rozložení přibližně stejně starých hvězd v diagramu, se nazývají *isochrony*.

Na internetu je řada prací, které se zabývají teoretickými isochronami a zodpoví nám základní otázky. Jedny takovéto modely jsou i v článku Bertelli a kol. (1994). Bylo ale nutné tuto teoretickou isochronu posunout, aby dobře fitovala naměřená data. Tento posun je modul vzdálenosti a pomocí něj z Pogsonovy rovnice zjistíme vzdálenost objektu.

Nejlépe odpovídal model pro $Z = 0,008$, $Y = 0,25$ a stáří $10^{9,6}$ let, tedy 3,98 miliard let.



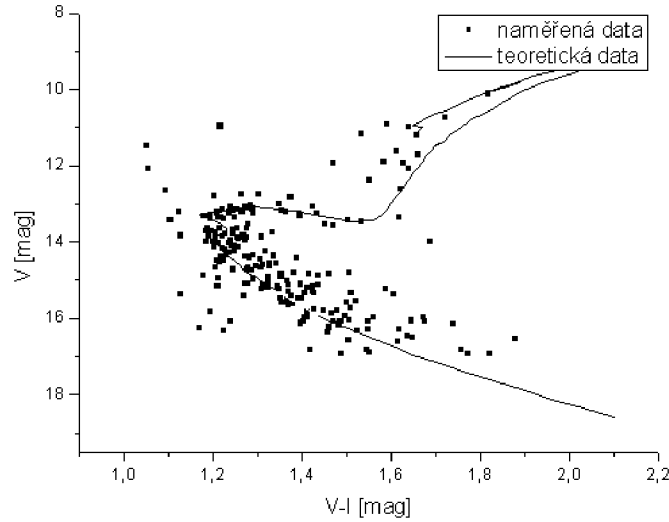
Obrázek 5.7: Barevný diagram M67 pro barevný index $B-V$ s teoretickou isochronou

V grafu na obr. 5.7 bylo nutné posunout teoretický model o 10 mag. V grafu na obr. 5.8 vychází modul vzdálenosti 10,3 mag. Vzdálenost hvězdokupy v parsecích určíme ze vztahu:

$$r = 10^{\frac{V-M+5}{5}},$$

kde modul vzdálenosti dosazujeme v magnitudách. Průměrná hodnota vzdálenosti je pak:

$$r = 1074 \pm 104 \text{ pc.}$$



Obrázek 5.8: Barevný diagram M67 pro barevný index $V-I$ s teoretickou isochronou

5.4 Trojbarevný diagram

Odhad mezihvězdného zčervenání určíme pomocí trojbarevného diagramu. Jde o závislost barevných indexů. Jelikož mám k dispozici pouze filtry B , V , I , trojbarevný diagram v mém případě bude závislost $B-V$ na $V-I$.

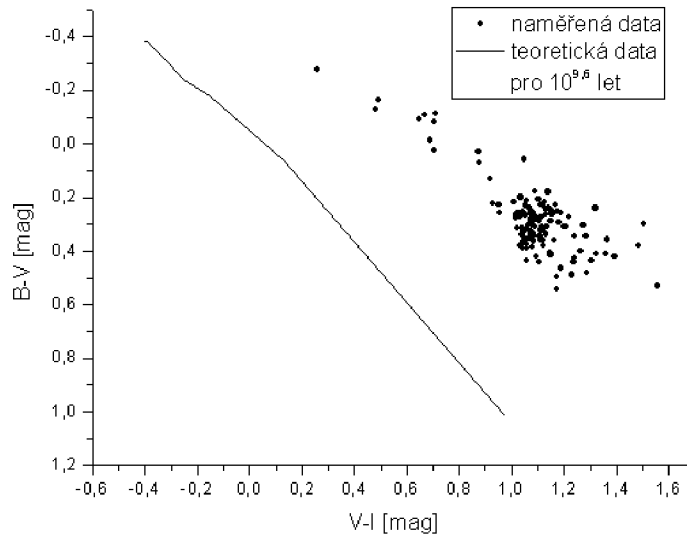
Hodnotu mezihvězdného zčervenání určíme z posunu naměřené hlavní posloupnosti vůči teoretické hlavní poslouposti. Na obr 5.9 je sestrojený trojbarevný diagram pro barevné indexy $B-V$ a $V-I$, kde teoretická závislost je získána z článku Bertelli a kol. (1994).

Rozdíl teoretických a naměřených dat zjistíme pomocí linearizace. Rovnice přímky pro teoretickou závislost je následující:

$$(B - V) = (0,973 \pm 0,055) * (V - I) + (-0,019 \pm 0,005)$$

Lineární závislost naměřených dat pro barevné indexy $B-V$ na $V-I$ je popsána vztahem:

$$(B - V) = (0,627 \pm 0,042) * (V - I) + (-0,398 \pm 0,045)$$



Obrázek 5.9: Trojbarevný diagram otevřené hvězdokupy M67 pro barevné indexy $B-V$ na $V-I$

Směrnice obou přímk se od sebe dosti odlišují. Ze závislosti na obr. 5.9 je patrné, že posun není v celém průběhu konstantní. Nejpravděpodobnější hodnota mezihvězdného zčervenání $E(B-V)$ je:

$$E(B - V) \cong 0,34 \text{ mag.}$$

5.5 Diskuse výsledků

Pomocí sestrojených HR diagramů byla získaná průměrná hodnota modulu vzdálenosti: $V - M_V = (10,15 \pm 0,19)$ mag. Z Pogsonovy rovnice vyšla vzdálenost otevřené hvězdokupy na $r = (1074 \pm 104)$ pc.

Hodnota mezihvězdného zčervenání pro barevný index $B-V$ byla určena z trojbarevného diagramu, její hodnota je pouze přibližná a to 0,34 mag. Oprava o mezihvězdnou extinkci provedena nebyla.

V nejnovějších studiích, např. [1] a [18], je hodnota modulu vzdálenosti určena: $(V - M_V) = 9,7$ mag, což odpovídá vzdálenosti $r = 870$ pc. Hodnota mezihvězdného zčervenání v této práci je: $E(B - V) = 0,038$ mag. Zmíněná

vzdálenost této hvězdokupy se liší od mých výsledků zhruba o 20%. Kdyby byla provedena oprava o mezihvězdnou extinkci, možná by rozdíl nebyl tak velký.

Stáří otevřené hvězdokupy M67 jsem získala díky teoretickým isochronám, které byly publikovány v článku [2]. Nejlépe odpovídala teoretická isichrona s $Z = 0,008$, $Y = 0,25$ a staří $10^{9,6}$ let, tedy 3,98 miliard let. Tato hodnota velice dobře odpovídá nejnovějším hodnotám. VandenBerg a kol. (2007) určili hodnotu stáří na 4 miliardy let. Na barevných diagramech (obr. 5.7 a 5.8) je vidět hlavní posloupnost, která směřuje z pravého dolního rohu šikmo nahoru. Také je zde velmi patrný odklon od hlavní posloupnosti, tedy bod obratu, a větev obrů. Z toho lze usoudit, že se jedná o velmi starou otevřenou hvězdokupu, což výsledky potvrzují.

Kapitola 6

Závěr

Na základě několika fotometrických měření otevřené hvězdokupy M67 byla získána a zpracována data. Z těchto opravených dat byly sestrojeny barevné diagramy pro barevné indexy $B-V$ a $V-I$, pomocí nichž jsem určila stáří, vzdálenost a chemické složení (podíl těžších prvků).

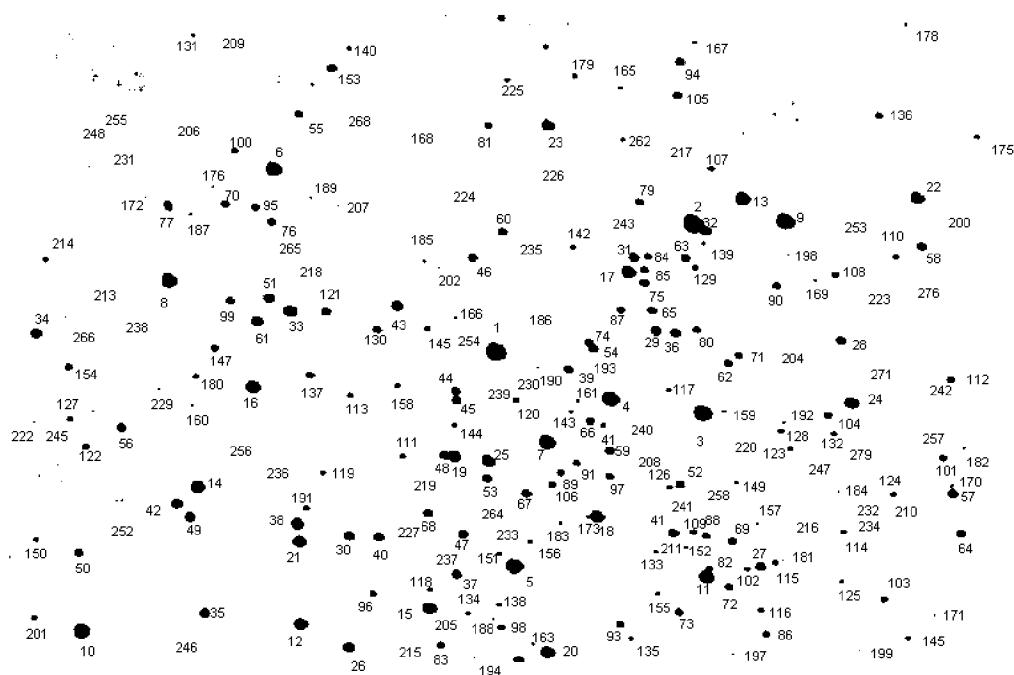
Stáří M67 jsem určila na 3,98 miliard let, což se velmi shoduje s nejnovějšími studiemi. Vzdálenost hvězdokupy je ovšem odlišná, liší se zhruba o 20%, $r = (1074 \pm 104)$ pc.

Mnohem lepší výsledky bychom patrně získali větším a hlavně kvalitnějším počtem CCD snímků v různých filtrech. A také proměřením standardních hvězd.

Dodatek A

Přílohy

A.1 Výsledky CCD fotometrie



Obrázek A.1: CCD snímek M67, označení hvězd odpovídá číslům v tabulce A.1

Popis tabulek A.1, A.2

- číslo - odpovídá označení na obrázku A.1
- B , V , I - pozorované hvězdné velikosti v příslušných filtrech okalibrované do standardního fotometrického systému v jednotkách magnitud
- $\sigma_B, \sigma_V, \sigma_I$ - směrodatné odchylky příslušných filtrů, vypočítané ze zákona šíření chyb
- P - pravděpodobnost příslušnosti hvězdy ke hvězdokupě, převzato [16]. Pokud u hvězdy není pravděpodobnost uvedena, nebyla ve zmíněné práci identifikována.
- $(B-V)$, $(V-I)$ - hodnoty barevných indexů určené z okalibrovaných hvězdných velikostí příslušných filtrů v jednotkách magnitud
- $\sigma_{B-V}, \sigma_{V-I}$ - směrodatné odchylky příslušných barevných indexů, vypočítané ze zákona šíření chyb

Tabulka A.1: Okalibrované CCD výsledky

číslo	B [mag]	σ_B [mag]	V [mag]	σ_V [mag]	I [mag]	σ_I [mag]	P
1	9,980	0,142	9,754	0,140	8,056	0,104	93
2	10,607	0,142	10,341	0,141	8,746	0,104	96
3	10,727	0,142	10,491	0,140	9,038	0,104	79
4	10,799	0,142	10,568	0,140	9,064	0,104	95
5	11,020	0,142	10,784	0,140	9,258	0,104	93
6	10,527	0,142	10,469	0,140	9,420	0,104	94
7	10,907	0,142	10,732	0,140	9,340	0,104	96
8	9,661	0,142	9,938	0,140	9,681	0,104	94
9	10,370	0,142	10,483	0,141	9,771	0,104	94
10	11,463	0,142	11,193	0,140	9,718	0,104	95
11	11,560	0,142	11,304	0,140	9,776	0,104	94
12	10,978	0,142	10,949	0,141	10,076	0,104	92
13	10,691	0,142	10,799	0,140	10,131	0,104	94
14	10,776	0,142	10,857	0,140	10,150	0,104	45
15	11,801	0,142	11,523	0,140	10,030	0,104	95
16	11,783	0,142	11,499	0,140	10,053	0,104	64
17	11,734	0,142	11,493	0,140	10,172	0,104	95
18	10,899	0,142	10,993	0,141	10,347	0,104	96
19	10,713	0,142	10,875	0,140	10,383	0,104	93
20	11,960	0,142	11,662	0,140	10,157	0,104	96
21	11,300	0,142	11,313	0,140	10,624	0,104	91
22	11,083	0,142	11,211	0,141	10,728	0,104	95
23	11,635	0,142	11,566	0,140	10,692	0,104	90
24	12,219	0,143	11,954	0,140	10,542	0,104	0
25	12,502	0,144	12,200	0,140	10,716	0,104	95
26	12,519	0,143	12,279	0,140	11,137	0,104	94
28	12,264	0,143	12,130	0,140	11,213	0,104	95
29	12,466	0,143	12,259	0,140	11,160	0,104	83
30	12,487	0,143	12,286	0,140	11,251	0,104	92
31	12,640	0,143	12,368	0,140	11,148	0,104	89
32	12,615	0,143	12,435	0,140	11,296	0,104	0
33	12,688	0,143	12,460	0,140	11,292	0,104	92
34	12,793	0,143	12,534	0,140	11,344	0,104	93
35	12,941	0,143	12,635	0,140	11,361	0,104	93
36	12,239	0,143	12,213	0,141	11,507	0,104	94
37	12,783	0,143	12,568	0,140	11,443	0,104	94
38	12,836	0,143	12,576	0,141	11,501	0,104	95
39	12,831	0,143	12,604	0,140	11,492	0,104	95
40	12,934	0,143	12,593	0,141	11,518	0,104	0
41	12,876	0,143	12,626	0,141	11,495	0,104	95
42	13,029	0,143	12,719	0,140	11,519	0,104	95
43	12,898	0,143	12,658	0,140	11,531	0,104	93
44	13,133	0,143	12,790	0,140	11,506	0,104	82
45	12,909	0,143	12,657	0,140	11,582	0,104	95
46	12,942	0,143	12,659	0,140	11,570	0,104	95
47	12,851	0,143	12,640	0,140	11,582	0,104	96
48	12,971	0,143	12,708	0,140	11,577	0,104	93
49	13,340	0,144	12,958	0,140	11,475	0,104	94
50	13,148	0,143	12,804	0,140	11,563	0,104	31
51	12,949	0,143	12,691	0,140	11,609	0,104	90
52	13,008	0,143	12,718	0,140	11,613	0,104	95
53	13,066	0,143	12,756	0,140	11,547	0,104	
54	12,966	0,143	12,725	0,140	11,656	0,104	94
55	12,930	0,143	12,720	0,140	11,618	0,104	95
56	13,107	0,143	12,769	0,140	11,638	0,104	94

Pokračování tabulky A.1

číslo	B [mag]	σ_B [mag]	V [mag]	σ_V [mag]	I [mag]	σ_I [mag]	P
57	13,030	0,143	12,743	0,140	11,671	0,104	87
58	12,986	0,143	12,732	0,140	11,690	0,104	84
59	13,402	0,143	12,992	0,140	11,632	0,104	0
60	13,444	0,144	13,024	0,140	11,631	0,104	0
61	12,939	0,143	12,711	0,140	11,759	0,104	84
62	13,036	0,143	12,774	0,140	11,749	0,104	95
63	13,292	0,144	12,867	0,140	11,628	0,104	95
64	13,081	0,143	12,818	0,140	11,802	0,104	85
65	13,128	0,143	12,862	0,141	11,810	0,104	96
66	13,044	0,143	12,828	0,140	11,819	0,104	94
67	13,108	0,143	12,877	0,140	11,825	0,104	91
68	13,125	0,144	12,867	0,140	11,822	0,104	89
69	13,095	0,143	12,883	0,140	11,825	0,104	91
70	13,146	0,143	12,881	0,140	11,855	0,104	97
71	13,522	0,145	13,087	0,140	11,782	0,104	95
72	13,532	0,144	13,123	0,140	11,800	0,104	96
73	13,182	0,143	12,876	0,140	11,794	0,104	96
74	13,146	0,143	12,922	0,140	11,992	0,104	96
75	13,402	0,143	13,124	0,141	12,048	0,104	94
76	13,351	0,143	13,041	0,140	11,925	0,104	63
77	13,492	0,144	13,170	0,140	12,057	0,104	75
78	13,478	0,143	13,159	0,140	12,109	0,104	95
79	13,451	0,144	13,137	0,140	12,116	0,104	85
80	13,470	0,143	13,198	0,140	12,115	0,104	94
81	13,327	0,144	13,149	0,140	12,059	0,104	94
82	13,533	0,153	13,281	0,140	12,106	0,104	94
83	13,478	0,143	13,207	0,140	12,177	0,104	93
84	13,543	0,144	13,221	0,140	12,180	0,104	94
85	14,137	0,147	13,607	0,141	12,050	0,104	95
86	13,638	0,145	13,273	0,140	12,230	0,104	95
87			13,216	0,140	12,200	0,104	71
88	13,630	0,145	13,297	0,140	12,214	0,104	93
89	13,587	0,144	13,282	0,140	12,219	0,104	0
90			13,337	0,140	12,231	0,104	87
91	13,670	0,144	13,383	0,140	12,234	0,104	89
92	13,790	0,145	13,352	0,140	12,295	0,104	79
93	13,679	0,144	13,364	0,140	12,324	0,104	93
94	13,734	0,144	13,414	0,140	12,300	0,104	94
95	13,667	0,144	13,418	0,141	12,269	0,104	95
96	13,575	0,144	13,318	0,140	12,364	0,104	90
97	13,616	0,145	13,356	0,140	12,332	0,104	95
98	13,690	0,144	13,417	0,140	12,322	0,104	52
99	13,719	0,144	13,410	0,140	12,320	0,104	94
100	13,762	0,144	13,416	0,140	12,308	0,104	96
101	13,763	0,146	13,465	0,140	12,390	0,104	90
102	13,821	0,145	13,463	0,140	12,354	0,104	95
103	13,849	0,145	13,460	0,141	12,419	0,104	93
104	13,878	0,144	13,499	0,140	12,464	0,104	92
105	13,865	0,146	13,542	0,140	12,471	0,104	93
106	13,912	0,145	13,542	0,140	12,496	0,104	95
107	13,778	0,144	13,502	0,140	12,485	0,104	96
108	13,983	0,146	13,599	0,140	12,521	0,104	94
110	14,072	0,146	13,653	0,140	12,558	0,104	94
111	13,963	0,145	13,617	0,141	12,533	0,104	94
112	14,123	0,146	13,763	0,140	12,602	0,104	95
113	13,985	0,146	13,646	0,140	12,609	0,104	96

Pokračování tabulky A.1

číslo	B [mag]	σ_B [mag]	V [mag]	σ_V [mag]	I [mag]	σ_I [mag]	P
114	14,067	0,147	13,692	0,140	12,636	0,104	86
115	14,051	0,147	13,697	0,140	12,636	0,104	94
116	14,133	0,146	13,778	0,140	12,704	0,104	94
117	14,113	0,147	13,751	0,140	12,665	0,104	95
118	14,173	0,147	13,864	0,140	12,733	0,104	96
119	14,191	0,146	13,896	0,140	12,716	0,104	94
120	14,234	0,147	13,917	0,140	12,796	0,104	94
121	14,416	0,150	13,975	0,140	12,738	0,104	95
122	14,191	0,146	13,867	0,140	12,800	0,104	92
123	14,161	0,146	13,888	0,140	12,776	0,104	91
124	14,250	0,148	13,889	0,141	12,835	0,104	93
125	14,293	0,148	13,904	0,140	12,847	0,104	92
126	14,396	0,149	13,991	0,140	12,844	0,104	94
129	14,564	0,151	14,100	0,140	12,913	0,104	95
130	14,371	0,147	14,110	0,140	12,956	0,104	96
131	14,597	0,152	14,100	0,140	12,929	0,104	96
132	14,350	0,148	14,023	0,140	12,974	0,104	92
133	14,684	0,171	14,142	0,141	12,971	0,104	89
135	14,561	0,149	14,120	0,140	13,016	0,104	90
136	14,463	0,149	14,153	0,140	13,016	0,104	94
137	14,604	0,154	14,192	0,140	13,044	0,104	87
138			14,203	0,140	13,052	0,104	92
139	14,580	0,148	14,201	0,141	13,082	0,104	94
140	14,741	0,156	14,384	0,140	13,021	0,104	93
141	14,515	0,148	14,169	0,140	13,128	0,104	93
142	14,82	0,163	14,331	0,141	13,101	0,105	92
143			14,216	0,140	13,102	0,104	93
145	14,616	0,151	14,255	0,140	13,134	0,104	92
146			14,393	0,140	13,079	0,104	
147			14,264	0,140	13,136	0,104	
148			14,229	0,140	13,146	0,104	
149	14,786	0,158	14,383	0,140	13,120	0,104	93
150	14,921	0,165	14,439	0,140	13,151	0,104	92
151			14,382	0,140	13,184	0,104	93
153			14,456	0,140	13,257	0,104	87
154			14,461	0,140	13,293	0,104	93
155			14,557	0,141	13,361	0,104	93
156			14,443	0,140	13,395	0,104	94
157			14,546	0,140	13,378	0,104	95
158			14,366	0,140	13,358	0,104	93
159			14,549	0,140	13,336	0,104	89
160			14,696	0,141	13,406	0,105	90
161			14,695	0,140	13,420	0,104	90
162			14,649	0,140	13,403	0,104	94
163			14,653	0,140	13,437	0,104	95
164			14,619	0,140	13,504	0,104	92
165			14,732	0,141	13,470	0,104	91
166			14,610	0,140	13,493	0,104	93
167			14,689	0,140	13,501	0,104	90
168			14,707	0,140	13,540	0,104	51
169			14,486	0,140	13,355	0,104	93
170			14,811	0,140	13,364	0,104	93
171			14,980	0,140	13,506	0,104	96
173			14,770	0,140	13,543	0,104	95
175			14,758	0,140	13,566	0,104	93
176			14,903	0,141	13,536	0,104	95

Pokračování tabulky A.1

číslo	B [mag]	σ_B [mag]	V [mag]	σ_V [mag]	I [mag]	σ_I [mag]	P
177			14,673	0,140	13,628	0,104	93
178			14,860	0,140	13,583	0,104	93
179			14,874	0,141	13,596	0,104	95
180			14,633	0,140	13,483	0,104	94
181			14,767	0,140	13,616	0,104	95
182			14,887	0,141	13,632	0,105	83
183			14,833	0,140	13,618	0,104	89
184			15,070	0,141	13,699	0,104	93
185			15,118	0,141	13,681	0,104	95
187			14,951	0,141	13,728	0,104	73
188			15,038	0,141	13,799	0,104	95
189			14,866	0,141	13,907	0,105	95
190			15,030	0,141	13,780	0,105	96
191			14,917	0,141	13,807	0,104	93
192			15,001	0,141	13,805	0,104	95
194			15,152	0,141	13,794	0,104	91
195			15,132	0,141	13,752	0,104	94
198			15,036	0,141	13,828	0,104	94
199			15,164	0,141	13,937	0,105	95
200			15,292	0,141	13,924	0,105	93
201			15,373	0,141	14,036	0,105	93
202			15,194	0,141	13,974	0,105	89
203			15,312	0,141	14,032	0,104	91
205			15,339	0,141	14,038	0,104	94
206			15,383	0,141	14,118	0,104	95
207			15,295	0,142	14,100	0,105	95
208			15,426	0,141	14,101	0,104	0
209			15,113	0,141	13,915	0,104	93
212			15,505	0,141	14,150	0,105	85
213			15,563	0,142	14,021	0,104	84
214			15,546	0,145	14,122	0,105	6
216			15,690	0,142	14,142	0,105	90
217			15,775	0,144	14,158	0,105	93
218			15,653	0,144	14,139	0,105	94
219			15,510	0,142	14,252	0,105	93
221			15,656	0,142	14,246	0,105	70
222			15,534	0,142	14,272	0,105	95
223			15,661	0,142	14,332	0,105	96
224			15,642	0,142	14,299	0,105	94
225			15,328	0,141	14,303	0,105	95
226			15,621	0,143	14,259	0,105	95
227			15,638	0,142	14,383	0,105	96
230			15,751	0,142	14,365	0,105	94
231			15,729	0,143	14,389	0,105	87
232			15,993	0,146	14,397	0,106	63
233			15,883	0,143	14,397	0,105	94
235			15,862	0,143	14,432	0,105	93
236			15,866	0,146	14,457	0,106	95
238			16,192	0,155	14,426	0,107	0
239			15,885	0,147	14,503	0,107	94
240			15,793	0,144	14,483	0,105	93
241			15,595	0,142	14,524	0,105	93
242			16,055	0,149	14,574	0,107	95
243			15,665	0,145	14,426	0,106	94
245			15,913	0,145	14,604	0,106	93
246			16,067	0,146	14,566	0,105	90

Pokračování tabulky A.1

číslo	B [mag]	σ_B [mag]	V [mag]	σ_V [mag]	I [mag]	σ_I [mag]	P
247			16,088	0,144	14,575	0,105	93
248			15,757	0,143	14,758	0,105	96
249			15,834	0,143	14,776	0,105	96
251			16,181	0,146	14,702	0,105	85
252			16,148	0,146	14,785	0,106	95
253			16,559	0,157	14,848	0,108	90
254			16,446	0,148	14,809	0,106	57
258			16,566	0,168	14,907	0,113	93
260			16,403	0,156	14,991	0,109	94

Tabulka A.2: Barevné indexy hvězd

číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]	číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]
1	0,226	0,200	1,698	0,174	35	0,306	0,200	1,274	0,174
2	0,266	0,200	1,595	0,174	36	0,026	0,200	0,706	0,174
3	0,236	0,200	1,453	0,174	37	0,216	0,200	1,125	0,174
4	0,231	0,200	1,504	0,174	38	0,260	0,200	1,075	0,174
5	0,236	0,200	1,526	0,174	39	0,227	0,200	1,112	0,174
6	0,058	0,200	1,049	0,174	41	0,249	0,200	1,131	0,174
7	0,175	0,200	1,392	0,174	42	0,310	0,200	1,200	0,174
8	-0,278	0,200	0,257	0,174	43	0,240	0,200	1,127	0,174
9	-0,113	0,200	0,712	0,174	44	0,343	0,200	1,284	0,174
10	0,270	0,200	1,475	0,174	45	0,252	0,200	1,075	0,174
11	0,256	0,200	1,528	0,174	46	0,284	0,200	1,089	0,174
12	0,029	0,200	0,873	0,174	47	0,211	0,200	1,058	0,174
13	-0,108	0,200	0,668	0,174	48	0,262	0,200	1,131	0,174
14	-0,081	0,200	0,707	0,174	49	0,382	0,200	1,483	0,174
15	0,278	0,200	1,493	0,174	51	0,258	0,200	1,082	0,174
16	0,285	0,200	1,446	0,174	52	0,290	0,200	1,105	0,174
17	0,241	0,200	1,321	0,174	54	0,241	0,200	1,069	0,174
18	-0,094	0,200	0,646	0,174	55	0,209	0,200	1,102	0,174
19	-0,162	0,200	0,492	0,174	56	0,337	0,200	1,131	0,174
20	0,298	0,200	1,505	0,174	57	0,287	0,200	1,072	0,174
21	-0,013	0,200	0,689	0,174	58	0,254	0,200	1,042	0,174
22	-0,128	0,200	0,483	0,174	61	0,228	0,200	0,952	0,174
23	0,069	0,200	0,874	0,174	62	0,262	0,200	1,025	0,174
25	0,302	0,201	1,484	0,174	63	0,425	0,200	1,239	0,174
26	0,240	0,200	1,142	0,174	64	0,263	0,200	1,016	0,174
28	0,133	0,200	0,917	0,174	65	0,266	0,200	1,052	0,174
29	0,207	0,200	1,099	0,174	66	0,216	0,200	1,009	0,174
30	0,200	0,200	1,035	0,174	67	0,231	0,200	1,052	0,174
31	0,272	0,200	1,220	0,174	68	0,258	0,201	1,045	0,174
33	0,227	0,200	1,168	0,174	69	0,213	0,200	1,058	0,174

Pokračování tabulky A.2

číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]	číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]
70	0,264	0,200	1,026	0,174	126	0,405	0,204	1,147	0,174
71	0,436	0,201	1,305	0,174	127			1,059	0,174
72	0,409	0,201	1,323	0,174	128			1,044	0,175
73	0,306	0,200	1,082	0,174	129	0,464	0,206	1,187	0,175
74	0,224	0,200	0,930	0,174	130	0,262	0,203	1,154	0,174
75	0,278	0,200	1,076	0,174	131	0,497	0,207	1,171	0,175
76	0,310	0,200	1,116	0,174	132	0,327	0,204	1,049	0,175
77	0,322	0,201	1,113	0,174	133	0,542	0,221	1,171	0,175
78	0,318	0,200	1,050	0,174	135	0,441	0,204	1,104	0,174
79	0,314	0,200	1,021	0,174	136	0,310	0,205	1,137	0,175
80	0,272	0,200	1,083	0,174	137	0,413	0,208	1,148	0,175
81	0,178	0,201	1,090	0,174	138			1,151	0,175
82	0,251	0,208	1,175	0,174	139	0,380	0,204	1,119	0,175
83	0,271	0,200	1,030	0,174	140	0,357	0,210	1,363	0,175
84	0,322	0,201	1,041	0,174	141	0,346	0,203	1,041	0,175
85	0,530	0,203	1,557	0,174	142	0,490	0,215	1,230	0,175
86	0,366	0,202	1,043	0,174	143			1,114	0,175
87			1,016	0,174	145	0,361	0,206	1,121	0,175
88	0,333	0,201	1,083	0,174	149	0,402	0,211	1,263	0,175
90			1,106	0,175	150	0,483	0,216	1,288	0,175
91	0,287	0,201	1,149	0,174	151			1,198	0,175
92	0,438	0,201	1,057	0,174	153			1,199	0,175
93	0,315	0,201	1,040	0,174	154			1,168	0,175
94	0,320	0,201	1,114	0,174	155			1,196	0,175
95	0,249	0,201	1,149	0,174	156			1,048	0,175
96	0,257	0,201	0,954	0,174	157			1,168	0,175
97	0,260	0,201	1,024	0,174	158			1,008	0,175
98	0,273	0,201	1,095	0,174	159			1,213	0,175
99	0,309	0,201	1,090	0,174	160			1,290	0,176
100	0,346	0,201	1,108	0,174	161			1,275	0,175
101	0,298	0,202	1,075	0,174	162			1,246	0,175
102	0,358	0,201	1,109	0,174	163			1,216	0,175
103	0,389	0,201	1,041	0,174	164			1,115	0,175
104	0,379	0,201	1,035	0,174	165			1,262	0,175
105	0,323	0,202	1,071	0,174	166			1,117	0,175
106	0,370	0,201	1,046	0,174	167			1,188	0,175
107	0,276	0,201	1,017	0,174	168			1,167	0,175
108	0,384	0,202	1,078	0,174	169			1,131	0,175
110	0,419	0,202	1,095	0,174	170			1,447	0,175
111	0,346	0,201	1,084	0,174	171			1,474	0,175
112	0,359	0,202	1,161	0,174	173			1,227	0,175
113	0,340	0,202	1,037	0,174	175			1,192	0,175
114	0,375	0,203	1,056	0,174	176			1,367	0,175
115	0,354	0,203	1,061	0,174	177			1,045	0,175
116	0,355	0,202	1,074	0,174	178			1,277	0,175
117	0,362	0,203	1,086	0,174	179			1,278	0,175
118	0,309	0,203	1,131	0,174	180			1,150	0,175
119	0,295	0,203	1,180	0,175	181			1,151	0,175
120	0,317	0,203	1,121	0,174	182			1,255	0,176
121	0,441	0,205	1,237	0,175	183			1,215	0,175
122	0,324	0,202	1,067	0,174	184			1,371	0,175
123	0,274	0,202	1,112	0,174	185			1,437	0,176
124	0,361	0,203	1,054	0,174	187			1,223	0,175
125	0,389	0,204	1,057	0,174	188			1,239	0,175

Pokračování tabulky A.2

číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]	číslo	$B - V$ [mag]	σ_{B-V} [mag]	$V - I$ [mag]	σ_{V-I} [mag]
189			0,959	0,176	224			1,343	0,176
190			1,250	0,176	225			1,025	0,176
191			1,110	0,175	226			1,362	0,177
192			1,196	0,175	227			1,255	0,177
194			1,358	0,175	230			1,386	0,177
195			1,380	0,175	231			1,340	0,177
198			1,208	0,175	232			1,596	0,181
199			1,227	0,176	233			1,486	0,178
200			1,368	0,176	235			1,430	0,177
201			1,337	0,176	236			1,409	0,180
202			1,220	0,176	239			1,382	0,181
203			1,280	0,176	240			1,310	0,178
205			1,301	0,176	241			1,071	0,176
206			1,265	0,176	242			1,481	0,184
207			1,195	0,176	243			1,239	0,180
209			1,198	0,175	245			1,309	0,179
212			1,355	0,176	246			1,501	0,180
213			1,542	0,176	247			1,513	0,179
216			1,548	0,177	248			0,999	0,177
217			1,617	0,178	251			1,479	0,180
218			1,514	0,178	252			1,363	0,180
219			1,258	0,176	253			1,711	0,191
221			1,410	0,177	254			1,637	0,182
222			1,262	0,176	258			1,659	0,202
223			1,329	0,177	260			1,412	0,190

Literatura

- [1] Balaguer-Núñez, L., Galadí-Enríquez, D., Jordi, C., *Astron. Astrophys*, 470, 2, 2007
- [2] Bertelli, G., Bressan, A., Chiosi, C., Fagotto, F., Nasi, E., 1994, <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/J/A+AS/106/275>
- [3] Götz, W.: *Die offenen Sternhaufen unserer Galaxies (The open star clusters of our Galaxy)*. Verlag Harri Deutsch, Thun and Frankfurt/Main (Germany), 1990.
- [4] Harmanec, P.: *Základy astronomie a astrofyziky II.*, skripta, Praha, Univerzita Karlova, 2007
- [5] Howell, S. B.: *Handbook of CCD Astronomy*, Cambridge, Univerzity Press, 2006
- [6] Hroch, F.: *Astronomické praktikum*, Brno, 2006.
- [7] Hroch, F.: *Computer Program for CCD photometry*, Proceedings of the 29th Conference on Variable Star Resaerch, Brno, 1998
- [8] Jílková, L.: *Barevná kalibrace fotometrického systému*, Brno, 2006
- [9] Johnson, H.L., Morgan, W.W.: *The Astrophysical Journal* 117, 313, 1953
- [10] Kleczek, J.: *Velká encyklopedie vesmíru*, Praha, ACADEMIA, 2000
- [11] Mallas, J., Kreimer, E.: *The Messier Album*, Sky Publishing, 1978
- [12] Mikulášek, Z., Janík, J.: *Astronomické pozorování*, skripta, Brno, ÚTFA PřF MU

- [13] Mikulášek, Z., Krtička, J.: *Úvod do fyziky hvězd*, skripta, Brno, ÚTFA PřF MU, 2005
- [14] Montgomery, K.A., Marschall, L.A., Janes, K.A., *Astron. J.* 106, 1, 1993
- [15] Pavlousek, J., Hladil, O.: *Přehled astronomie*, Praha, 1990
- [16] Payne-Gaposhkin, C.: *Stars and Clusters*, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1979.
- [17] Sanders, W.,L., *Astron. Astrophys.*, 27, 89-116, 1976
- [18] Strömngren, B., *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 4, 433, 1966
- [19] Štefl, V.: *Úvod do dějin astronomie*, skripta, Brno, UJEP, 1988
- [20] VandenBerg, Don A., Gustafsson, B., Edvardsson, B., Eriksson, K., Ferguson, J., *Astrophys. J.*, 666, 2, 2007
- [21] Vanýsek, V.: *Základy astronomie a astrofyziky*, Praha, ACADEMIA, 1980
- [e1] http://objekty.astro.cz/otevrene_hvezdokupy.html
- [e2] www.seds.org/messier/m/m67.html
- [e3] www.le.ac.uk/ph/fulkes/web/images/hrcolour