

MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PLOŠNÁ FOTOMETRIE KULOVÝCH  
HVĚZDOKUP

VENDULA HLOBILOVÁ

BRNO 2008

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovala samostatně, za použití zdrojů uvedených v seznamu literatury a podle pokynů vedoucího práce F. Hrocha.

.....  
Vendula Hlobilová  
V Brně dne 23. května 2008

Za trpělivou a obětavou pomoc děkuji vedoucímu bakalářské práce Filipu Hrochovi

## **Anotace**

Bakalářská práce se zabývá plošnou fotometrií kulových hvězdokup. První kapitola seznamuje s hvězdokupami, jejich rozdělením a dále podrobněji rozebírá kulové hvězdokupy. V druhé kapitole je nastíněna problematika fotometrie a jejích metod včetně plošné fotometrie a zabývá se známými profily radiálního rozložení jasů. Třetí kapitola přibližuje pozorované kulové hvězdokupy, na které jsou v poslední kapitole aplikovány tyto profily.

## **Anotation**

This bachelor thesis deals with the surface photometry of globular clusters. The first part introduces clusters, their classifications and presents globular cluster in more details. In the second part, it describes photometry and its methods including the surface photometry and deals with known laws of radial distribution brightness. The third part give an approach on observing of globular clusters, which are applied by the laws in the last part.

# Obsah

Úvod .....	6
1 Hvězdokupy .....	7
1.1. Kruhové mlhoviny .....	7
1.2. Rozdělení hvězdokup .....	7
1.2.1. Hvězdné asociace .....	8
1.2.2. Otevřené hvězdokupy .....	8
1.3. Kulové hvězdokupy .....	9
1.3.1. Stařešinové vesmíru .....	10
1.3.2. U nás v Galaxii .....	10
1.3.3. V blízkém sousedství .....	11
1.3.4. Chemické složení .....	12
1.3.5. Pohyb hvězdokupy .....	12
2 Astronomická fotometrie .....	14
2.1. Fotometrie v kolébce .....	14
2.1.1. Pogsonova rovnice .....	14
2.1.2. Hvězdná velikost .....	15
2.2. Fotometrické veličiny .....	16
2.2.1. Jas .....	16
2.3. Fotometrické metody .....	17
2.3.1. Aperturní fotometrie .....	17
2.3.2. Profilová fotometrie .....	18
2.4. Plošná fotometrie .....	18
2.4.1. Plummerův model .....	18
2.4.2. Hubbleův zákon .....	19
2.4.3. de Vaucouleursův zákon .....	19
3 Pozorování kulových hvězdokup .....	20
3.1. Vybrané objekty .....	20
3.2. M 13 .....	20
3.3. M 15 .....	21
3.4. M 3 .....	22
3.5. M 5 .....	23
4 Modely radiálních profilů kulových hvězdokup .....	25
4.1. Zpracování snímků .....	25
4.1.1. Dark frame a flat field .....	25
4.1.2. Munipack .....	25
4.2. Určení profilů ze snímků .....	26
4.3. Radiální profily pozorovaných objektů .....	27
4.3.1. Parametry .....	31
Závěr .....	33
Literatura .....	34

# Úvod

Kulové hvězdokupy lze pozorovat pouhým okem, pokud jsou k tomu vhodné povětrnostní podmínky nebo pokud má pozorovatel štěstí. Avšak pravou podstatu těchto mlžných kotoučků okem vypořadovat nelze. To je hlavní důvod proč se o těchto objektech dozvídáme až v 17. století.

O téměř dvě stě let později, tedy v 19. století, se začala rozvíjet jedna ze základních astronomických disciplín, fotometrie. Byť první krůčky začala dělat již v dobách Hipparcha. Postupem času vznikaly nové a nové fotometrické metody za účelem podání co nejpřesnější fotometrické informace různých vesmírných objektů. A tak počátkem 20. století přišla v historickém vývoji na řadu plošná fotometrie.

Plošná fotometrie je nesmírně důležitá pro astronomy zabývající se galaktickou astronomií. Je mnohdy jediným způsobem, jak se o těchto vesmírných drobečkách dozvědět něco bližšího. Tato práce má ovšem za cíl provést plošnou fotometrii kulových hvězdokup, což jsou pro tuto disciplínu méně obvyklé objekty.

# Kapitola 1

## Hvězdokupy

### 1.1. Kruhové mlhoviny

Před vynálezem dalekohledu<sup>1</sup> bylo prakticky nemožné pozorovat hvězdokupy, natož rozeznat jejich pravou podstatu. Tyto objekty byly proto po dlouhá staletí považovány za mlhoviny. První doložené pozorování kulové hvězdokupy provedl německý amatérský astronom Johann Abraham Ihle (1627 – 1696) roku 1665. Při pozorování Saturnu v souhvězdí Střelce objevil mlžný objekt, který mylně považoval za mlhovinu, dnes známou jako kulová hvězdokupa M 22. Tento objev byl následován jižní Omegou Centauri (NGC 5139), kterou v roce 1677 během svého pobytu na ostrově sv. Helena objevil Edmond Halley (1656 – 1742). Počet nově objevených kulových hvězdokup nadále rostl. Za zmínku stojí objev jedné z nejznámějších kulových hvězdokup a to M 13, kterou roku 1714 objevil také Edmond Halley v souhvězdí Herkula.

Messierův katalog (1781) obsahoval již 29 kulových hvězdokup, sám Charles Messier (1730 – 1817) jich objevil 20. Ovšem stále neodhalil jejich podstatu a označoval je jako *kruhové mlhoviny*. Velkým objevitelem kulových hvězdokup byl také Friedrich Wilhelm (William) Herschel (1738 – 1822), který objevil 37 nových hvězdokup, čímž zvýšil počet známých hvězdokup na 70. Zároveň byl prvním astronomem, který tyto objekty nazýval kulové hvězdokupy. Tento výraz také použil ve svém druhém katalogu Catalog of Deep Sky objects (1789).

Z počátku byly všechny kulové hvězdokupy přisuzovány Galaxii. Až později se ukázalo že některé hvězdokupy náleží i do jiných galaxií. Typickým představitelem je hvězdokupa M 54 objevená Charlesem Messierem roku 1778. Ovšem až v roce 1994 se zjistilo, že je součástí trpasličí galaxie SagDEG (Sagittarius Dwarf Elliptical Galaxy), nově objeveného satelitu naší Galaxie.

Během let vzrostl počet známých kulových hvězdokup naší Galaxie až na 149. Z nich je 103 zařazeno v NGC katalogu (New General Catalogue), 28 je v Messierově katalogu<sup>2</sup> a 3 jsou v katalogu IC (Index Catalogue) sestaveným John Louis Emil Drezérem (1852 – 1926).

### 1.2. Rozdělení hvězdokup

Hvězdokupy jsou soustavy hvězd zaujímající určitý objem, které mají společný původ a řadu vlastností, např. původní chemické složení nebo společný pohyb prostorem. Dělíme je do tří základních skupin na **kulové hvězdokupy**, **otevřené hvězdokupy** a **hvězdné asociace**. Jednotlivé typy hvězdokup se od sebe liší nejen stářím, počtem hvězd, ale především svým vzhledem.

---

<sup>1</sup> Vynález prvního dalekohledu se přičítá Galileo Galileovi (1564 – 1642), který ho sestrojil roku 1610. I přes malý zorný úhel a mizivou rozlišovací schopnost, byl Galileo schopný se svým dalekohledem pozorovat krátery na Měsíci, sluneční skvrny nebo Saturnův prstenec.

<sup>2</sup> Messierův katalog obsahuje také mimogalaktickou kulovou hvězdokupu M 54.

### 1.2.1. Hvězdné asociace

Hvězdné asociace jsou nevýrazná seskupení hvězd, které dosahují jen malý počet členů. Průměr hvězdné asociace je několik set parseků. V důsledku jejich malé hustoty se působením vnějších sil poměrně rychle rozpadají (během 10–20 milionů roků). Tyto objekty jsou natolik nenápadné, že je lze rozeznat jen díky společnému vlastnímu pohybu. Stáří se odhaduje na pouhých několik milionů let. Hvězdné asociace byly objeveny Viktorem Ambarcumjanem (1908 – 1996), který tak dokázal, že hvězdy vznikají i v současné době.

Hvězdné asociace se nadále dělí:

- **Asociace typu OB:** jde o mladé hvězdy spektrální třídy O až B2, vyznačující se velkou hmotností a svítivostí. V Galaxii jich můžeme nalézt asi sto. Jedním z nejznámějších představitelů jsou hvězdy ze souhvězdí Orion.
- **Asociace typu T:** jde o málo hmotné hvězdy obklopené prachoplynnou mlhovinou, která pohlcuje část záření hvězd. Tyto asociace vyzařují především v infračerveném oboru spektra. V Galaxii jich je více než tisíc.

### 1.2.2. Otevřené hvězdokupy

Otevřené hvězdokupy obsahují desítky až tisíce hvězd. Jedná se o hvězdy poměrně mladé (stáří v průměru  $10^7$ – $10^8$  let), patřící do hvězd populace I<sup>3</sup>. Otevřené hvězdokupy nacházíme v centrální rovině Galaxie nebo v její blízkosti (proto se tyto hvězdokupy označují také jako *galaktické hvězdokupy*) a zpravidla zaujímají plochu o průměru několika parseků. Na rozdíl od kulových hvězdokup se v otevřených hvězdokupách (především v mladších systémech) běžně vyskytuje mezihvězdný prach a plyn. Některé hvězdokupy jsou dokonce obklopeny prachem. Ten rozptyluje záření okolních hvězd a jeví se jako reflexní mlhovina.

Jako skupina mají otevřené hvězdokupy malou životnost. Jen ty nejbohatší hvězdokupy dosáhnou stáří  $10^9$  let, ostatní méně početné skupiny se dožijí jen několika milionů let. K takovému úbytku hvězd dochází nejen kvůli vypařování<sup>4</sup>, ale také v důsledku srážek s mezihvězdnými mračny či působením slapových interakcí s Galaxií.

Otevřené hvězdokupy se často zařazují podle jednoduchého schématu, které hrubě popisuje bohatost, koncentraci a rozsah jasnosti hvězd. Jedním z typů otevřených hvězdokup jsou **pohybové hvězdokupy**. Jde o hvězdokupu ve velmi pokročilém stadiu rozpadu, která se pohybuje v prostoru stejným směrem a stejnou rychlostí směřující k úběžníku (tzv. vertex hvězdokupy).

V současné době známe okolo tisíce otevřených hvězdokup. Je to samozřejmě jen zlomek odhadovaného množství v Galaxii, který činí patnáct tisíc otevřených hvězdokup. Mezi nejznámější zástupce otevřených hvězdokup řadíme Plejády (M 45), Hyjády<sup>5</sup>,  $\chi$  a h (NGC 884 a NGC 869).

---

<sup>3</sup> Hvězda populace I je poměrně mladá, obsahující větší množství kovů, jaké obvykle nacházíme ve spirálních ramenech galaxií. K tomuto typu hvězd patří i Slunce.

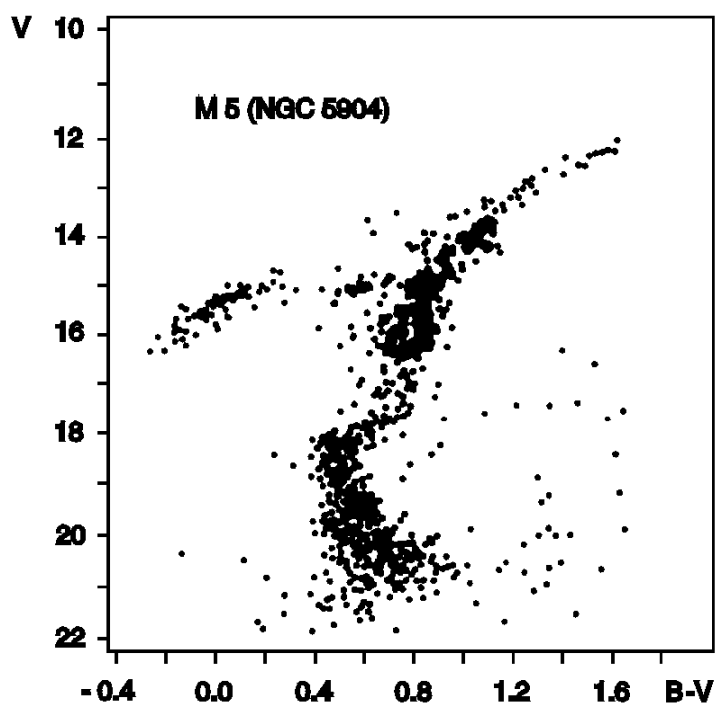
<sup>4</sup> Vypařování hvězdokup – jev úbytku hvězd, kdy hvězda (zpravidla málo hmotná) získá únikovou rychlost při vzájemném přiblížení s jinými hvězdami.

<sup>5</sup> Hyjády – pohybová hvězdokupa v souhvězdí Býka.



### 1.3. Kulové hvězdokupy

Kulové hvězdokupy jsou sférické objekty obsahující statisíce až miliony hvězd, které náleží k hvězdné populaci II<sup>6</sup>. Většina kulových hvězdokup vznikla pravděpodobně ve stejné době jako jejich mateřské galaxie, jde tedy o jedny z nejstarších objektů vesmíru vůbec. Tuto domněnku potvrzuje také H-R (Hertzsprungův – Russellův) diagram pro kulové hvězdokupy (nebo jeho varianta v podobě barevného diagramu), na kterém je patrná krátká hlavní posloupnost a nápadné větve obrů a veleobrů. Na obrázku 1.1 je typický příklad barevného diagramu kulové hvězdokupy. V tomto případě jde o M 5 (NGC 5904).



Obrázek 1.1: Zobrazení závislosti mezi vizuální magnitudou (V) a barevným indexem (B-V) pro jednotlivé hvězdy kulové hvězdokupy M 5 [7]

Kulové hvězdokupy obsahují často proměnné hvězdy, především hvězdy typu RR Lyrae. Jde o krátkoperiodické cefeidy spadající do spektrální třídy A a F. Tyto hvězdy kdysi nesly označení *proměnné hvězdokupy*, díky jejich četnému výskytu právě ve hvězdokupách. Mezi obyvatele kulových hvězdokup řadíme i bílé trpaslíky a v mnohem menším zastoupení i neutronové hvězdy. Vzácně zde objevíme i planetární mlhovinu.

---

<sup>6</sup> Hvězda populace II je stará hvězda, obsahující menší koncentraci kovů ve srovnání s hvězdami populace I. Tyto hvězdy, k nimž patří hvězdy a podtrpaslíci RR Lyrae, existují v galaktickém halu naší Galaxie, zvláště v kulových hvězdokupách a také v jádrech spirálních galaxií.

### 1.3.1. Stařešinové vesmíru

Otázka stáří kulových hvězdokup je mnohem důležitější, než se na první pohled může zdát. Tento problém nedal spát mnohým kosmologům. Faktem je, že vesmír musel vzniknout dříve než veškeré objekty v něm a proto je zcela logické, že vesmír nemůže být mladší než nejstarší kulová hvězdokupa<sup>7</sup>. O stáří vesmíru se již našťestí nemusí spekulovat. Jedno z nejpřesnějších měření stáří vesmíru pochází ze sondy WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) ([13]), která byla vypuštěna 30. června 2001 a jejímž cílem bylo pořídit přesnější mapu fluktuací reliktního záření. Díky tomu dnes víme (výsledky byly zveřejněny 11.2. 2003), že vesmír je starý  $(13,7 \pm 0,2)$  miliard let.

Základní metodou určení stáří kulové hvězdokupy je sledování úbytku hvězd z hlavní posloupnosti. Tento jev můžeme pozorovat na barevném diagramu (viz Obrázek 1.1). Samozřejmý je také předpoklad, že všechny hvězdy příslušné hvězdokupy jsou ve stejné vzdálenosti vzhledem k Zemi. Z těchto dat jsme schopni určit absolutní hvězdnou velikost  $M_v$ . Z modelu hvězdné atmosféry určíme bolometrickou hvězdnou velikost a efektivní teplotu. Pokud tyto hodnoty srovnáme s modely hvězd dostaneme kýžené stáří hvězdokupy.

### 1.3.2. U nás v Galaxii

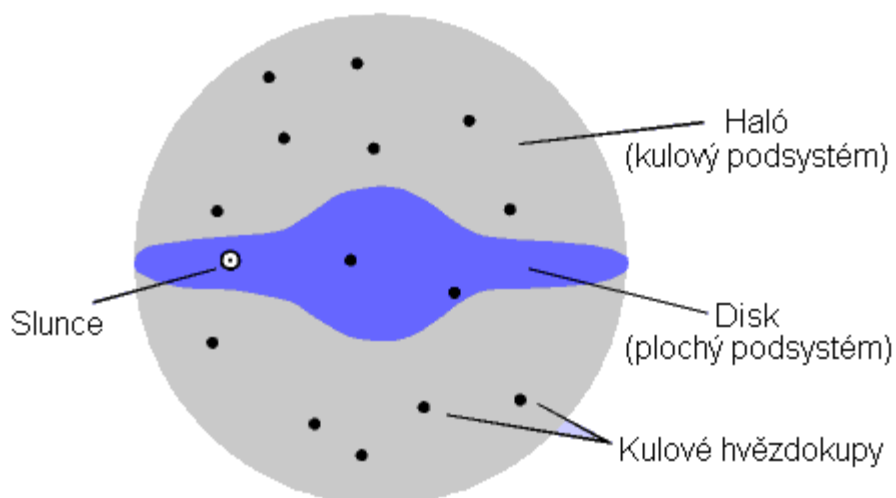
V naší Galaxii známe již 149 kulových hvězdokup. Zdá se ale, že tento počet není konečný a mohl by se zvýšit až na dvojnásobek, o objekty ukryté na místech, kam díky rovině Galaxie nedohlédneme. Podíváme-li se na rozložení kulových hvězdokup z hlediska souhvězdí, zjistíme, že drtivá většina kulových hvězdokup se nachází v okolí Střelce. Podle sčítání z roku 2002 se jich ve Střelci nachází 33, v Hadonoši 25 a ve Štíru 19. Tyto tři souhvězdí obsahují více než polovinu (52%) všech kulových hvězdokup Galaxie.

Předpokládejme, že oblohu rozdělíme na dvě poloviny tak, že středem jedné z nich bude souhvězdí Střelce. V této části oblohy pak nalezneme více než 90% všech známých kulových hvězdokup. Druhá polovina oblohy by se mohla pyšnit jen třinácti exempláři. Proto je pozorování kulových hvězdokup v zimních měsících tak komplikované, problém je v nalezení vhodného objektu. Chceme-li ale přesto v zimě pozorovat, tak jednou z možných hvězdokup je M 79 v souhvězdí Zajíce.

Z galaktického hlediska kulové hvězdokupy tvoří tzv. galaktické haló. Toto haló je zhruba kulového tvaru a je vysoce koncentrováno ke galaktickému středu. Dosahuje ale do vzdálenosti několika set tisíc parseků, tedy mnohem více než rozměry galaktického disku.

---

<sup>7</sup> Jednou z nejstarších kulových hvězdokup je zřejmě M 5 v souhvězdí Hada. Její stáří se odhaduje až na 13 miliard let.



Obrázek 1.2: Poloha kulových hvězdokup v Galaxii [6]

### 1.3.3. V blízkém sousedství

Kulové hvězdokupy nejsou výhradním vlastnictvím jen naší Galaxie. Objekty tohoto typu jsou rozesety snad po celém vesmíru a svou přítomností častují nejednu galaxii z našeho sousedství. Otázkou je, nakolik si jsou však kulové hvězdokupy různých galaxií podobné.

Jednou z nejbližších spirálních galaxií je M 31 v Andromedě, stejně tak jako v Galaxii i zde jsou kulové hvězdokupy velmi staré. To ale nemusí platit pro všechny galaxie. Ze spektroskopických výzkumů vyplývá, že další galaxie jako například Velké a Malé Magellanovo mračno, stejně jako galaxie Trojúhelník M 33 obsahují výrazně mladší kulové hvězdokupy. Tyto galaxie také obsahují extrémně rozsáhlé difúzní mlhoviny s hmotností řádově kulových hvězdokup, jsou to kandidáti pro budoucí mladé hvězdokupy, v současné době ve stádiu tvoření (zejména mlhovina Tarantule NGC 2070 ve Velkém Magellanově mračnu a NGC 604 v M 33). Více než sto mladých kulových hvězdokup bylo v poslední době detekováno v M 82, nepravidelné galaxii za Místní skupinou<sup>8</sup>.

Jen malá hrstka mimogalaktických hvězdokup je v dosahu větších amatérských dalekohledů. Nejvhodnějším objektem k takovému pozorování je galaxie v Andromedě. V roce 1932 identifikoval Edwin Hubble (1889 – 1953) v M 31 kandidáty na kulové hvězdokupy a na základě jejich fyzického sousedství jich osm přidružil k M 110.

<sup>8</sup> Místní skupina galaxií, jejíž součástí je i naše Galaxie, obsahuje okolo třiceti galaxií. Této skupině dominují dvě spirální galaxie a to M 31 v Andromedě a Galaxie. Dalšími významnými členy Místní skupiny jsou spirální galaxie M 33 v Trojúhelníku a Magellanova oblaka. Drtivá většina galaxií tvořících Místní skupinu jsou trpasličí eliptické galaxie s průměrem do 40 tisíc ly.

Galaxie	Kulová hvězdokupa	Hvězdná velikost [mag]
M 31	G1	13,7
M 110	G73	15,0
M 33	C39	15,9
WLM	WLM 1	16,1
NGC 185	Hodge 5	16,7
NGC 2403	F46	17,9

Tabulka 1.1: Nejjasnější kulové hvězdokupy blízkých galaxií

#### 1.3.4. Chemické složení

Hvězdy kulových hvězdokup mají velice podobné původní chemické složení. Avšak toto složení se mění v důsledku vývoje hvězd, který záleží na hmotě hvězdy. Nynější chemické složení můžeme snadno zjistit z barevného diagramu hvězdokupy.

Spektroskopické výzkumy kulových hvězdokup ukazují, že obsahují mnohem méně těžkých prvků než hvězdy, jež se vytvářely v disku Galaxie. Kulové hvězdokupy jsou považovány za velmi staré a skládají se z hvězd populace II, které se vytvořily z prvotního materiálu, jež se nacházel v mladé Galaxii v době jejich formování. Hvězdy v disku naopak procházejí mnoha cykly zrodu hvězd a supernov, které zvyšují koncentraci těžkých prvků v mračnec tvorbě hvězd.

#### 1.3.5. Pohyb hvězdokupy

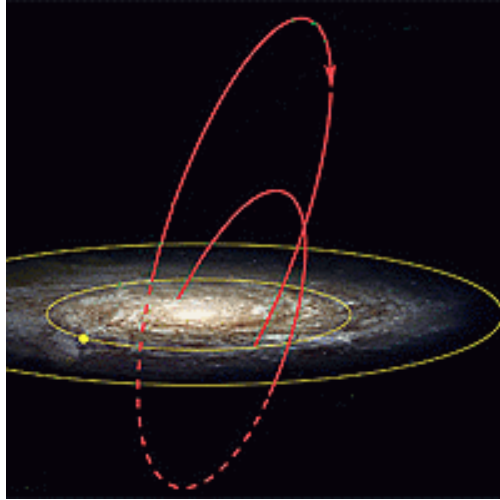
Tak jako vše ve vesmíru, jsou i kulové hvězdokupy stále v pohybu. Jednotlivé hvězdy náležící hvězdokupě vykonávají velice složitý pohyb, ale i přesto obíhají kolem hmotného středu kupy. Ne však po eliptické dráze, jak jsme tomu zvyklí u sluneční soustavy. Hvězdy jsou často přímo vtáhnuty do nejhustšího místa kulové hvězdokupy, tedy do jejího středu nebo obíhají po velice složité trajektorii. Typická vzdálenost jednotlivých hvězd se v blízkosti centra pohybuje kolem jednoho světelného roku, což je příliš velký prostor pro časté srážky, ale dostatečný pro vytvoření hvězdného systému, nejčastěji dvojhvězdy<sup>9</sup>.

Kulové hvězdokupy se řadí ke stabilním objektům známého vesmíru, avšak i zde dochází k úbytku hvězd. Na vině je zde vypařování hvězdokupy (viz 1.2.2.). Pravda, jde sice o jev velice pomalý<sup>10</sup> avšak stálý. K úbytku hvězd dochází ale také vlivem vývoje hvězd a jejich následnému zániku. K tvorbě nových členů zde ale není dostatek mezihvězdného materiálu.

Měření radiálních rychlostí ukázalo, že většina kulových hvězdokup se pohybuje po vysoce excentrických, často neuzavřených, eliptických drahách. Na rozdíl od otevřených hvězdokup, které se pohybují v rovině Galaxie.

<sup>9</sup> Řada z nich je tvořena obyčejnou, Slunci podobnou hvězdou obíhající kolem bílého trpaslíka či neutronové hvězdy

<sup>10</sup> Vypařování kulových hvězdokup je mnohonásobně pomalejší a zanedbatelnější než je tomu u hvězdokup otevřených.



Obrázek 1.3: Srovnání pohybu Slunce (žluté), resp. otevřené hvězdokupy, která obíhá v rovině Galaxie, a anonymní kulové hvězdokupy (oranžová), která se naopak pohybuje po komplikované neuzavřené křivce a může se tak dostat až do hala Galaxie [11]

V této kapitole byla použita následující literatura: [1], [6], [7], [11], [12], [15].

## Kapitola 2

# Astronomická fotometrie

### 2.1. Fotometrie v kolébce

Toho, že hvězdy se od sebe liší svou jasností, si lidé všimli již v dávné minulosti. A netrvalo dlouho než došlo k prvním pokusům o klasifikaci hvězd na základě jejich jasnosti. Prvním průkopníkem tohoto odvětví byl před více než dvěma tisíciletími řecký astronom Hipparchos (190 – 125 př. n. l.). Jeho práci ovšem známe až z *Almagestu* Claudia Ptolemaia (85 – 165). V tomto katalogu se dělí hvězdy dle jasnosti do šesti tříd neboli velikostí (latinsky magnitudo). Nejjasnější hvězdy jsou v první třídě a nejslabší v třídě šesté.

Během 19. století vzrostl zájem o přesné určení jasnosti hvězd a dělení na šest tříd přestalo postačovat. Bylo nutné zavést exaktní dělení. Tohoto úkolu se zhostil astronom britského původu Norman Robert Pogson (1829 – 1891), když vytvořil matematický předpis pro obecnou jednotku jasnosti (magnituda). Tato jednotka vychází z Weber-Fechnerova psychofyzického zákona<sup>11</sup> ([10]), který říká, že mění-li se fyzikální podněty působící na naše smysly řadou geometrickou, vnímáme jejich změnu řadou aritmetickou.

#### 2.1.1. Pogsonova rovnice

Podíváme-li se na Weber-Fechnerův psychofyzický zákon čistě z astronomického pohledu, můžeme určit geometrickou řadu fotometricky měřených intenzit hvězd jednotlivých hvězdných velikostí

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_2}{I_3} = \frac{I_3}{I_4} = \frac{I_4}{I_5} = \frac{I_5}{I_6} = q, \quad (2.1)$$

kde  $\{q\}$  je konstanta neboli kvocient této řady. Hodnota kvocientu byla určena v mezích (2,3 – 3,4). Bylo nutné určit přesnou hodnotu této konstanty tak, aby se řada s tímto kvocientem příliš nelišila od přirozené geometrické řady. Roku 1856 navrhl Norman Robert Pogson  $q = 2,512\dots$ <sup>12</sup>, což je hodnota náležící do požadovaného intervalu a její logaritmus je roven 0,400. Díky tomuto jednotnému kvocientu můžeme zmíněnou geometrickou řadu psát v tomto tvaru:

$$I_m = I_n q^{n-m} \quad (2.2)$$

což je Pogsonova rovnice. Ovšem mnohem častěji se používá ve tvaru:

---

<sup>11</sup> Logaritmicke závislost mezi velikostí podnětu (fyzikální příčiny) a velikostí fyziologického vjemu objevil německý fyziolog Ernst Heinrich Weber (1795 – 1878). Později ji zdůvodnil zakladatel psychofyziky, němec Gustav Theodor Fechner (1801 – 1887).

<sup>12</sup> Přesná hodnota je  $q = 10^{0,4}$ .

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log \frac{I_1}{I_2}. \quad (2.3)$$

Z této rovnice lze snadno zjistit rozdíl hvězdných velikostí dvou hvězd  $m_1, m_2$ , přičemž  $I_1$  a  $I_2$  jsou intenzity záření příslušných hvězd.

Pomocí Pogsonovy rovnice bylo původních šest hvězdných velikostí rozšířeno o hvězdy viditelné dalekohledem a také o hvězdy jasnější než první velikosti (zavedly se velikosti záporné). Nejslabší dosud zjištěné hvězdy mají zdánlivou hvězdnou velikost  $m$  asi 28 mag. Pro lepší představu zdánlivá hvězdná velikost Slunce je asi  $m = -26,7$  mag..

### 2.1.2. Hvězdná velikost

Hvězdná velikost charakterizuje jasnost hvězdy nebo jiného kosmického objektu a nesouvisí s jejich skutečnou velikostí. Můžeme ji snadno zjistit z Pogsonovy rovnice (viz 2.1.1). Jednotkou hvězdné velikosti je magnituda. Hvězdná velikost se používá zdánlivá a absolutní.

#### Zdánlivá hvězdná velikost

Zdánlivá hvězdná velikost  $m$  označuje míru jasnosti hvězdy jak se nám jeví na obloze. Respektive vyjadřuje jasnost hvězdy v logaritmické míře. Pro výpočet zdánlivé hvězdné velikosti slouží Pogsonova rovnice (viz (2.3)).

Zdánlivé hvězdné velikosti můžeme také rozdělit podle metody jejich měření:

- **Vizuální ( $m_v$ ):** odpovídá celkové intenzitě vlnových délek na něž je oko citlivé (maximum u  $\lambda = 555$  nm). Měření intenzity se provádí pouhým okem, popřípadě za použití dalekohledu.
- **Fotografická ( $m_{pg}$ ):** odpovídá citlivosti fotografických desek, které se využívají v astronomii (maximum u  $\lambda = 430$  nm). První pokus o tuto metodu je připisán dvojici francouzských fyziků Jean Bernard Léon Foucaultovi (1819 – 1868) a Armand Hippolyte Louis Fizeaumu (1819 – 1896). Roku 1844 srovnávali touto metodou Slunce s elektrickým obloukem.
- **Fotovizuální ( $m_{pv}$ ):** jde o spojení vizuální a fotografické metody, kdy se používají fotografické desky, které jsou nejcitlivější pro  $\lambda = 543$  nm.
- **Fotoelektrická ( $m_{pe}$ ):** pro stanovení se využívá fotočlánek nebo fotonásobič. Vztahuje se na různé části spektra podle citlivosti fotočlátku. Tato metoda svého času znamenala velký pokrok v astrofyzice.
- **Radiometrická ( $m_{rad}$ ):** pro jejich stanovení se využívá termočlánek nebo radiometr. Tato metoda se zabývá radiovou částí spektra.
- **Bolometrická ( $m_{bol}$ ):** vztahují se na celkovou energii v celém rozsahu spektra hvězdy.

#### Absolutní hvězdná velikost

Chceme-li zjistit skutečnou míru jasnosti hvězdy, tedy její absolutní hvězdnou velikost  $M$ , je nutné znát její zdánlivou hvězdnou velikost, ale také její vzdálenost. Zdánlivou hvězdnou velikost přepočteme na vzdálenost  $r_0 = 10$  pc což odpovídá paralaxe  $\pi = 0,1$ <sup>13</sup>. Intenzita ubývá se čtvercem vzdálenosti, platí tedy:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{r_0^2}{r^2}, \quad (2.4)$$

<sup>13</sup> Velikost volené paralaxy navrhl holandský astronom Jacobus Cornelius Kapteyn (1851 – 1922).

kde  $I_0$  je intenzita jakou by hvězda měla ve vzdálenosti  $r_0$ .  $I$  je intenzita zkoumané hvězdy a  $r$  je její vzdálenost. Dosazením do Pogsonovy rovnice a následným upravením dostáváme vztah pro absolutní hvězdnou velikost:

$$M = m + 5 - 5 \log r. \quad (2.5)$$

Absolutní hvězdné velikosti dělíme stejným způsobem jako zdánlivé hvězdné velikosti.

## 2.2. Fotometrické veličiny

Fotometrie, jak už bylo řečeno (viz 2.1), se zabývá světelnými vjemy viditelné oblasti spektra. Respektive fotometrie definuje veličiny charakterizující působení světelného záření na lidské oko. Tyto veličiny, stejně tak jako jednotky k nim příslušné, se souhrnně nazývají fotometrické. Jsou definovány podle citlivosti lidského oka a jsou tudíž závislé na barevném složení zkoumaného záření, přesněji řečeno na jeho vlnové délce  $\lambda$  (lidské oko je nejcitlivější na žlutozelené světlo o vlnové délce  $\lambda = 555$  nm).

Mezi fotometrické veličiny řadíme **světelný tok**  $\Phi$  [lm], **svítivost**  $I$  [cd] a **osvětlení**  $E$  [lx]. Jde o veličiny převážně fyzikální. V astronomii se mnohem častěji setkáváme s veličinami **jas**  $I$  [ $\text{cd m}^{-2}$ ] a **zářivý výkon**  $L$  [W].

Neopomenutelnou veličinou je také **světelný tok ve filtru**  $F_x$ , kdy za  $x$  dosadíme příslušný filtr. V tabulce 2.1 je přehled jednotlivých filtrů.

filtr	$\lambda$ [nm]
U	365
B	440
V	550
R	700

Tabulka 2.1: Přehled barevných filtrů

Pro výpočet světelného toku z intenzity ve filtru R pro bodový zdroj lze využít tohoto vztahu:

$$F_R = \int I(\lambda) R(\lambda) d\lambda d\Omega. \quad (2.6)$$

### 2.2.1. Jas

Jas je veličina, na kterou bezprostředně reaguje zrakový orgán. V astronomii se využívá především k definici jasnosti plošných zdrojů jako jsou galaxie nebo mlhoviny.

Jas má fyzikální jednotku kandela na metr čtvereční [ $\text{cd m}^{-2}$ ]. Astronomové ale místo názorného názvu jas (z anglického slova luminance) používají anglické označení surface brightness, neboli česky plošná jasnost. Myslí se tím jasnost připadající na prostorový úhel, nikoli plochou. Hodnoty jasu se pak vyjadřují prostřednictvím hvězdné velikosti prostorového úhlu zvolené velikosti (zpravidla jedna čtvereční vteřina). Hvězdná velikost čtvereční vteřiny oblohy je ovšem relativní veličina, zatímco jas má fyzikální rozměr.

V dnešní astronomii se ale jasností i jasem jen někdy rozumí veličina, která závisí na lidském pocitu. Častěji jde o veličiny definované prostřednictvím jiné křivky citlivosti, než je citlivost lidského zraku. Hovoří se pak například o R-jasnosti nebo V-jasnosti, a k nim lze přiřadit příslušné obdoby jasu.



Pro větší názornost jsou v tabulce 2.2 uvedeny hodnoty jasu pro několik vybraných objektů.

Objekt	Jas [ $\text{cd m}^{-2}$ ]
Povrch Slunce	1 650 000 000
Slunná pláž	15 000
Zářivka 40 W	5 000
Bílý papír (osvětlen 400 lx)	50
Černý papír (osvětlen 400 lx)	3

Tabulka 2.2: Hodnoty jasu vybraných objektů

## 2.3. Fotometrické metody

V astronomii je fotometrie velice cenným pomocníkem. Pokud chce astronom znát hvězdnou velikost objektu sahne právě po fotometrii. Na přelomu 20. a 21. století nastal v astronomické fotometrii poměrně zásadní zlom a to díky CCD (Charge-Coupled Device) kamerám. CCD čip byl sice vyroben již dříve<sup>14</sup>, nicméně počátkem tohoto století se stal natolik dostupným, že vytlačil jak vizuální tak i fotoelektrickou fotometrii.

Existuje několik metod jak z CCD snímku získat hvězdnou velikost daného objektu. Nejčastěji se využívá fotometrie **aperturní** a **profilová**. Hlavním kritériem výběru kterou metodu použít je hustota hvězdného pole na snímku. Jedná-li se o osamocené objekty, pak se používá aperturní fotometrie. Pro hustší hvězdná pole, jakými jsou např. hvězdokupy, kde se hvězdy vzájemně překrývají, je vhodnější použít profilovou fotometrii.

### 2.3.1. Aperturní fotometrie

Aperturní fotometrie je založena na sečtení veškerého světla od hvězdy zaznamenaného v jednotlivých pixelech snímku ve zvolené clonce (z latinského apertura). Clonka bývá zpravidla kruhová. Základním krokem této metody je především vymezení velikosti apertury a odečtení všech rušivých dodatečných zdrojů světla.

Nejprve si vyhledáme pixel s největší intenzitou a sečteme hodnoty pixelů v jeho okolí uzavřené clonkou o dané velikosti. Od tohoto součtu odečteme hodnotu pozadí  $B$ , kterou získáme průměrem hodnot většího množství pixelů, přičemž tyto pixely nesmí náležet k žádné hvězdě.

Hledanou instrumentální hvězdnou velikost  $m$  pak získáme z Pogsonovy rovnice

$$m = m_0 - 2,5 \log \sum_{ij} (I_{ij} - B), \quad (2.7)$$

kde  $m_0$  charakterizuje pozorovanou soustavu a škálu hvězdných velikostí,  $I_{ij}$  je intenzita pixelů daných souřadnicovými indexy  $i$  a  $j$ . Ze vztahu vyplývá, že suma intenzit opravených o pozadí vyjadřuje tok záření danou aperturou, respektive že

$$F = \sum_{ij} (I_{ij} - B). \quad (2.8)$$

<sup>14</sup> CCD čip poprvé vyrobili kanadský fyzik Willard S. Boyle (1924 – ) a americký fyzik Georgie E. Smith (1930 – ) v Bellových laboratořích v roce 1969. Od 70. let se kamery s CCD čipem používají v astronomických dalekohledech.

### 2.3.2. Profilová fotometrie

Profilová fotometrie, stejně jako fotometrie aperturní, přináší informaci o hvězdné velikosti objektů. Profilová fotometrie využívá PSF (point spread function) respektive snaží se vystihnout tvar obrazu bodového zdroje<sup>15</sup> na snímku. Na základě znalosti tohoto tvaru lze odhadnout celkový tok energie záření, díky čemuž snadno získáme hledanou hvězdnou velikost (za použití Pogsonovy rovnice).

Touto funkci aproximujeme obrazy hvězd na snímku a pak spočítáme signál pod plochou, jde vlastně o objemový integrál z PSF z něhož získáme celkový tok energie  $F$ :

$$F = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_0 \text{PSF}(i - x_0, j - y_0) dx dy, \quad (2.9)$$

kde  $F_0$  je parametr úměrný celkovému signálu,  $x_0, y_0$  jsou parametry udávající těžiště,  $i$  a  $j$  jsou souřadnicové indexy jednotlivých pixelů. Díky tomuto integrálu získáváme vztah pro celkový tok energie pro případ Gaussova profilu<sup>16</sup>:

$$F = 2\pi G_0 \sigma^2. \quad (2.10)$$

## 2.4. Plošná fotometrie

Specifickou fotometrickou metodou v astronomii je plošná fotometrie, díky níž získáváme přehled o rozložení jasu<sup>17</sup> plošných objektů, nejčastěji galaxií (tato metoda lze ovšem aplikovat i na kulové hvězdokupy). Ve 20. století vzniklo několik modelových průběhů rozložení jasu. V této práci je použit **Plummerův model**, **Hubbleův zákon** a **de Vaucouleursův zákon** ([2]).

### 2.4.1. Plummerův model

Plummerův model byl poprvé použit roku 1911 H.C. Plummerem (1875 – 1946). Plummer ho odvodil na základě modelu pro kulové hvězdokupy za účelem aproximace právě profilu pozorovaných kulových hvězdokup. Tento model popisuje hustotu počtu hvězd vztahem:

$$\rho = \left(1 + \frac{R^2}{a^2}\right)^{-5/2}, \quad (2.11)$$

kde  $a$  je tzv. Plummerův poloměr, respektive jde o parametr určující míru hustoty.

---

<sup>15</sup> Hvězdy sice nejsou bodové zdroje světla, ale díky jejich velké vzdálenosti je lze takto aproximovat.

<sup>16</sup> Gaussův profil:

$$G = G_0 e^{-\frac{(i-x_0)^2 + (j-y_0)^2}{2\sigma^2}}.$$

<sup>17</sup> Jedná se pouze o dvojdimenzionální problematiku, tudíž plošná fotometrie nepodává informaci o prostorovém rozložení jasu.

Plummerův model vyjadřuje prostorové rozložení počtu hvězd. Chceme-li jej aplikovat na snímek hvězdokupy musíme jej promítnout do roviny pozorovací aparatury. Vzhledem k tomu, že kulové hvězdokupy jsou kruhově symetrické objekty, lze promítnutí provést podle vzorce ([2]):

$$I(R) = 2 \int_R^{\infty} \frac{j(r)rdr}{\sqrt{r^2 - R^2}} \quad (2.12)$$

Po promítnutí dostane Plummerův model tuto podobu:

$$I(R) = \frac{2}{3} j_0 \frac{a^5}{(a^2 + R^2)^2}, \quad (2.13)$$

kde  $j_0$  a  $a$  jsou hledané parametry tohoto modelu.

#### 2.4.2. Hubbleův zákon

Hubbleův zákon byl sice zaveden roku 1913 J.H. Reynoldsem (1874 – 1949), ale byl popularizován až v roce 1930 americkým astronomem Edwinem P. Hubblem (1889 – 1953), po kterém dostal i své jméno. Jde o empirický zákon, který má tuto podobu:

$$I(R) = \frac{I_0}{(1 + R/r_0)^2}, \quad (2.14)$$

kde  $I_0$  je hodnota intenzity v centru objektu a  $r_0$  je vnitřní poloměr části objektu v němž se dá intenzita aproximovat jako konstantní.

Hubbleův zákon je předepsán pro plošnou fotometrii galaxií. V této práci bude porovnáno, jak se modelová situace plošného rozložení jasu galaxií liší od kulových hvězdokup.

#### 2.4.3. de Vaucouleursův zákon

Francouzský astronom Gérard Henri de Vaucouleurs (1918 – 1995) navrhl model<sup>18</sup> profilu plošné jasnosti eliptických galaxií jako:

$$\ln I(R) = \ln I_e + 7,67 \left[ 1 - \left( \frac{R}{R_e} \right)^{1/4} \right], \quad (2.15)$$

kde  $R_e$  je poloměr oblasti s polovinou celkové intenzity objektu, tedy s intenzitou  $I_e$ . Stejně tak jako Hubbleův zákon i de Vaucouleursův zákon je empirický.

V této kapitole byla použita následující literatura: [2], [3], [5], [8], [14].

---

<sup>18</sup> Tento model je často nazýván jako čtvrtinový zákon.

## Kapitola 3

# Pozorování kulových hvězdokup

### 3.1. Vybrané objekty

V této práci se zabývám plošnou fotometrií hned několika kulových hvězdokup. Všechny použité snímky byly pořízeny v Brně na Observatoři Masarykovy Univerzity (MUO)<sup>19</sup> na Kraví hoře v letech 2006 – 2007. Díky rozsáhlé rekonstrukci kopule této observatoře (7.2007 – 3.2008) bylo pozorování značně ztíženo. Z tohoto důvodu jediná sada snímků pořízena přímo mnou je kulové hvězdokupy M 13. Zbylé sady snímků (M 15, M 5 a M 3) byly získány z archivu MonteBoo.([10])

Snímky byly pořízeny hlavním přístrojem univerzitní observatoře, jímž je 62cm zrcadlový dalekohled. V Newtonově ohnisku je umístěna kamera ST-8 s filtry. Dalekohled má ohniskovou vzdálenost 2,78 m. Na paralaktické montáži se kromě zrcadlového dalekohledu nachází ještě 15cm refraktor s ohniskovou vzdáleností 2,25 m.

V následující tabulce je shrnutí pozorovaných objektů použitých v této práci:

Hvězdokupa	počátek pozorování [UT]	expoziční [s]	filtr	počet snímků	pozorovatel
M 13	18.06.2007, 21:22:40	60	R	100	V. Hlobilová
M 15	17.10.2006, 18:09:16	30	R+V	30+30	F.Hroch
M 3	07.04.2006, 18:15:29	120	V	165	T.Henych
M 5	13.06.2006, 20:17:38	90	R+V	19+20	F.Hroch

Tabulka 3.1: Pozorované objekty

### 3.2. M 13

M 13 je nejnápadnější, nejznámější a také, dle Sira Johna Fredericka Williama Herschela (1792 – 1871), nejkrásnější kulovou hvězdokupou. Za dobrých povětrnostních podmínek je viditelná pouhým okem (v horším případě a pro detailnější pohled je třeba užít alespoň triedru) v souhvězdí Herkula. Hvězdokupu M 13 objevil Edmond Halley v roce 1714, který si jí všiml právě díky vhodným podmínkám k pozorování nejstarším astronomickým nástrojem, tedy okem. Charles Messier ji do svého katalogu zahrnul 1. června 1764. V NGC nese pořadové číslo 6205.

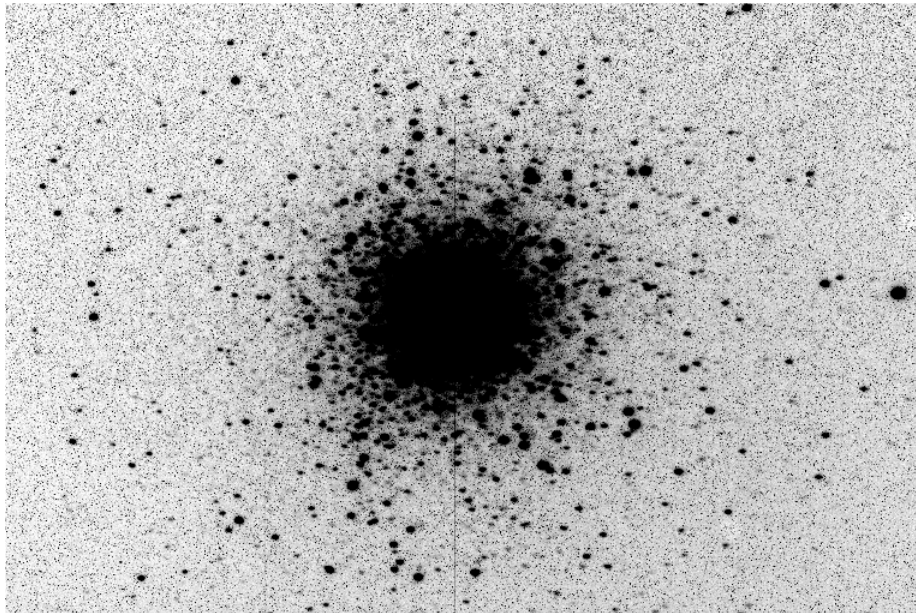
M 13 je domovem pro zhruba tři sta tisíc hvězd, rozprostírá se na ploše o velikosti větší než 150 ly (její úhlový průměr činí 23') a je od nás vzdálená 25 tisíc ly. Stáří této kulové hvězdokupy se odhaduje na 12 miliard let, což je úctyhodný věk. Hvězdná velikost tohoto kolosálního objektu činí 5,8 mag. V blízkosti centra této hvězdokupy je koncentrace hvězd až pětsetkrát vyšší než v jejím okolí. Je rovněž zajímavé, že M 13 obsahuje jednu mladou modrou hvězdu – Barnard 29 spektrálního typu B2. Pravděpodobně se jedná o zachycenou hvězdu z okolí.

<sup>19</sup> Tato observatoř je známější pod lidovým názvem MonteBoo.

### **Vlastní pozorování:**

Kulovou hvězdokupu M 13 jsem společně s F. Hrochem pozorovala 18. června 2007. Na počátku pozorování byl nepříjemný problém s rozostřením dalekohledu způsobeným patrně výkyvy teplot. I přes více než půl hodinové ostření dalekohledu se nepodařilo vše optimálně nastavit a proto jsou snímky mírně neostře.

Během pozorování se podařilo získat sto snímků (včetně dark field snímků) ve filtru R. Expoziční doba byla 60 s, binning 2x2 a snímek má velikost 765x510 pixelů. Celková délka expozice byla asi 6 000 s.



Obrázek 3.1: Kulová hvězdokupa M 13 (NGC 6205)

### **3.3. M 15**

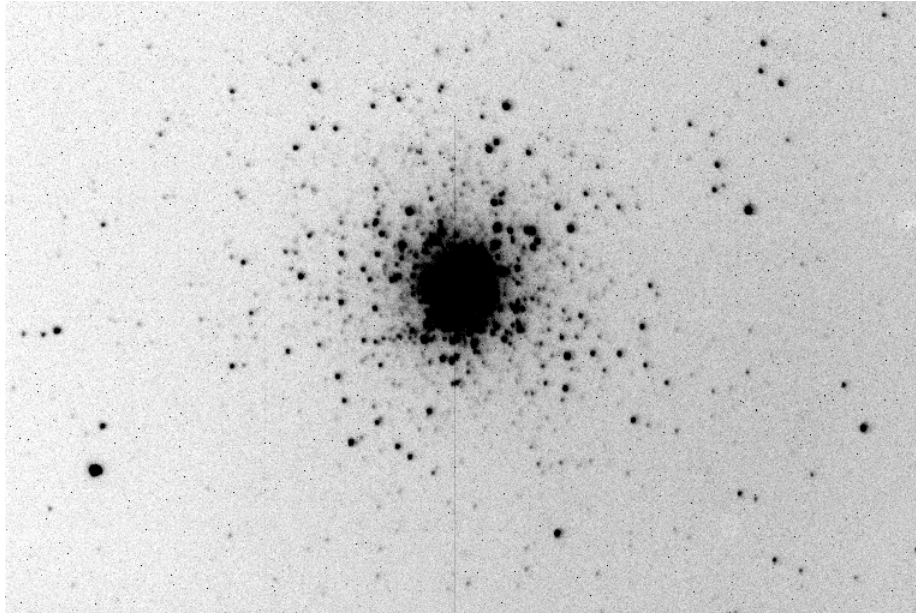
V souhvězdí Pegasa se nachází M 15, kulová hvězdokupa s jednou z nejvyšších hustot hvězd v Galaxii. Tato hvězdokupa s více jak sto tisíci hvězdami je pozůstatkem z ranných let Galaxie a pokračuje v obíhání kolem jejího centra. Podobně jako ostatní kulové hvězdokupy i M 15 tvoří hvězdy neopomenutelného stáří, v tomto konkrétním případě jde o 12 miliard let.

M 15 je pozoruhodná tím, že je snadno viditelná pouhým třiedrem a její střed je jednou z nejhustších známých koncentrací hvězd, který obsahuje vysoký přebytek neobvyklých proměnných hvězd (jedná se o více než sto exemplářů) a pulzarů. M 15 leží asi 35 tisíc ly daleko a pyšní se hvězdnou velikostí rovnou 6,2 mag. Nedávné důkazy naznačují, že ve středu M 15 může sídlit masivní černá díra a poblíž jádra byly odhaleny dvě neutronové hvězdy.

Na rozdíl od většiny kulových hvězdokup, M 15 obsahuje planetární mlhovinu, která je katalogizovaná jako Kuestner 648 a jeví se jako kruhovitý narůžovělý oblak. Pokud bychom hledali M 15 v New General Catalogue, pak ji nalezneme pod číslem 7078.

### Vlastní pozorování:

Snímky kulové hvězdokupy M 15 použité v této práci napozoroval 17. října 2006 Filip Hroch. Společně s těmito snímky vznikly i snímky jiných objektů, což je patrně důvod proč při expozičním čase 30 s vzniklo jen třicet snímků ve filtru R a třicet snímků ve filtru V. Snímek má velikost 756x510 pixelů, binning je 2x2, celková délka expozice byla asi 900 s pro filtr R i V.



Obrázek 3.2: Kulová hvězdokupa M 15 (NGC 7078)

### 3.4. M 3

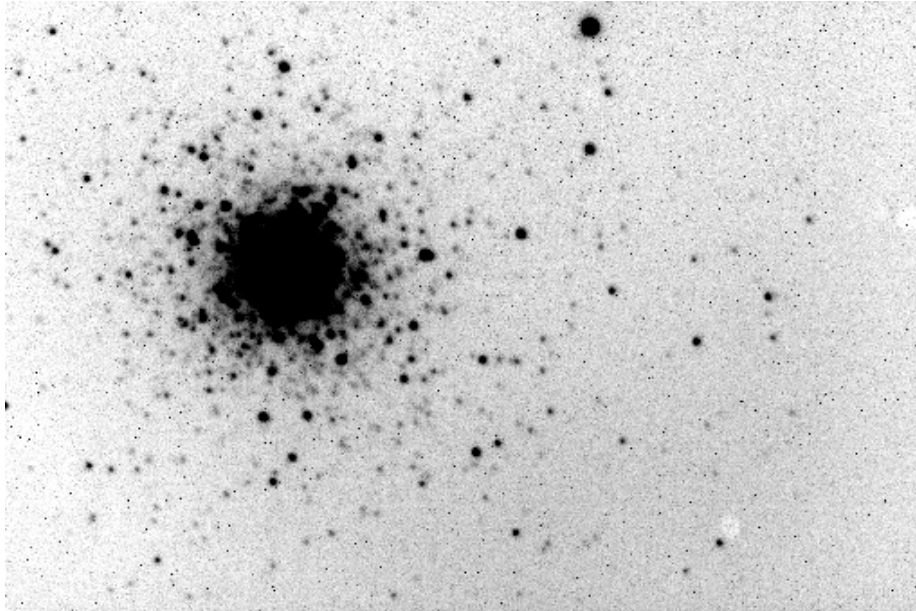
M 3 je kulová hvězdokupa obsahující přibližně půl milionu hvězd. Se vzdáleností 34 tisíc ly je mnohem dál než je střed Galaxie. Pozorovaná hvězdná velikost je i při této vzdálenosti 6,2 mag, což odpovídá jasnosti třista tisíc Sluncí. M 3 je tedy možné za dobrých podmínek spatřit pouhým okem. Pokud bychom ji chtěli pozorovat, musíme nastavit dalekohled do souhvězdí Honící psi. Pozorovaná hvězdná velikost nejjasnější hvězdy této hvězdokupy je 12,7 mag. V roce 1954 americký astronom Allan Rex Sandage (1926 – ) napočítal v této hvězdokupě 44 500 hvězd s hvězdnou velikostí větší než 22,5 mag a to pouze v poloměru osmi úhlových minut.

M 3 obsahuje velké množství proměnných hvězd. Bylo jich nalezeno 212 se 186 různými periodami, což je víc než v kterékoliv jiné hvězdokupě v Galaxii. Přibližně 170 těchto hvězd je typu RR Lyrae. Charles Messier byl prvním objevitelem této hvězdokupy. Do svého katalogu ji zapsal 3. května 1764. Tento objev pravděpodobně způsobil, že Charles Messier začal systematicky hledat objekty podobné tomuto. Ještě též rok nalezl M 4 až M 40. V NGC ji lze najít pod číslem 5272.

M 3 obsahuje relativně velké množství tzv. modrých opozdilců (Blue Stragglers). Jde o hvězdy, které vypadají příliš mladě. Mnohem mlaději než by se předpokládalo na základě ostatních hvězd. Poprvé je objevil Alan Sandage v roce 1953.

**Vlastní pozorování:**

Snímky kulové hvězdokupy M 3 použité v této práci napozoroval 7. dubna 2006 Tomáš Henych. Snímky jsou ve filtru V a při expozičním čase 120 s vzniklo sto šedesát pět snímků. Snímek má velikost 510x340 pixelů, binning je 3x3. Celková délka expozice byla asi 19 800 s.



Obrázek 3.3: Kulová hvězdokupa M 3 (NGC 5272)

### 3.5. M 5

Objeviteli objektu, který dnes nese označení M 5 jsou Gottfried Kirch (1639 – 1710) a jeho žena Maria Margarete Winkelmann Kirch (1670 – 1720). Tento objev učinili 5. května 1702 při pozorování neznámé komety. Charles Messier tuto kulovou hvězdokupu nezávisle objevil až 23. května 1764, tedy o celých 62 let později. Identifikoval ji však jako mlhovinu, která neobsahuje žádné hvězdy. Teprve William Herschel v roce 1791 určil, že se jedná o hvězdokupu. Tenkrát napočítal 200 hvězd.

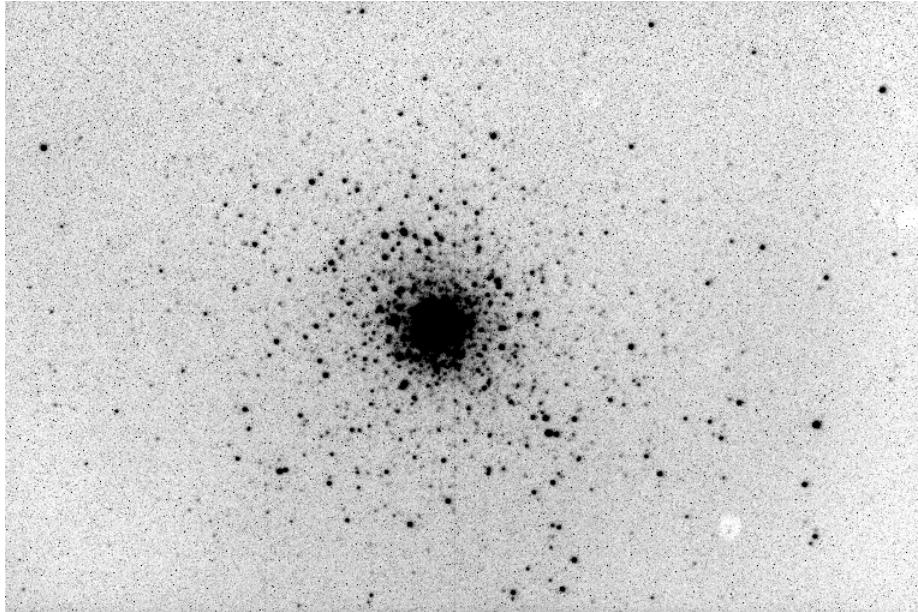
M 5 je zřejmě jedna z nejstarších kulových hvězdokup. Její stáří se odhaduje na 13 miliard let. S průměrem 126 ly se řadí mezi větší kulové hvězdokupy. Při vzdálenosti 24 500 ly tento průměr odpovídá 17,4 úhlovým minutám. Vzdaluje se od nás rychlostí  $50 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ . V kulové hvězdokupě M 5 je známo 105 proměnných hvězd. První z nich zaznamenal Andrew Ainslee Common (1841 – 1903) v roce 1890, šlo o proměnnou hvězdu typu RR Lyrae s krátkou periodou.

Za velice dobrých podmínek je možné M 5 zahlédnout pouhým okem v souhvězdí Hada. V katalogu NGC ji najdeme na pozici 5904.

**Vlastní pozorování:**

Snímky kulové hvězdokupy M 5 použité v této práci napozoroval 13. června 2006 opět Filip Hroch. Snímky jsou ve filtru R a V a při expozičním čase 90 s vzniklo dvacet snímků

ve filtru V a devatenáct ve filtru R, tedy celkem třicet devět. Snímek má velikost 756x510 pixelů, binning je 2x2, celková délka expozice byla asi 1 710 s pro filtr R a 1 800 s pro filtr V.



Obrázek 3.4: Kulová hvězdokupa M 5 (NGC 5904)



## Kapitola 4

# Modely radiálních profilů kulových hvězdokup

### 4.1. Zpracování snímků

K tomu aby bylo možné provést plošnou fotometrii nestačí jen příslušný objekt zachytit na CCD. Neméně důležité je i pozdější zpracování snímků. Snímky pořízené CCD kamerou se ukládají v obrazovém formátu FITS (Flexible Image Transport System). Takovýto soubor neobsahuje jen holá data, která jsou uložena do matice, ale také další užitečné údaje o snímku jako např. expoziční doba, filtr nebo čas pořízení. Surové snímky nejsou vhodné k okamžitému zpracování, ale musí se nejdřív opravit o přístrojové efekty. Obvykle se snímky korigují o tzv. dark frame a flat field.

#### 4.1.1. Dark frame a flat field

**Dark frame** neboli temný snímek zobrazuje mapu tepelného šumu. Ten závisí na expoziční době a na teplotě čipu (pro omezení vlivu tepelného šumu na snímek se často CCD čipy chladí). Dark frame se pořizuje zpravidla před vlastním pozorováním se stejnou expoziční dobou, s jakou budou pořízeny snímky kýženého objektu. Během pořizování dark frame snímků musí být objektiv dalekohledu zakrytý.

Další alternativou temného snímku je *bias*, což je dark frame s nekonečně krátkou expoziční dobou, respektive s tak krátkou, jakou nám aparatura dovolí. Bias je vhodné použít u snímků s obecně krátkou dobou expozice.

**Flat field** mapuje citlivost jednotlivých pixelů na světlo, včetně stínů (např. prach na čipu). Flat fieldy se získávají krátkou expozicí světlé oblohy při soumraku nebo u menších dalekohledů postačí nasvícený bílý papír. K těmto snímkům je také nutné poříditi příslušné temné snímky.

#### 4.1.2. Munipack

Vhodným softwarem pro provedení korekce snímků o již zmíněný dark frame a flat field je programovací balík Munipack ([4]). Přesněji řečeno jde o soubor utilit vzniklý na Masarykově Univerzitě v Brně, každá z utilit řeší jeden konkrétní problém. Tento software nejen že snímky koriguje, ale také provede pozdější zpracování.

Při úpravě snímku o dark frame postupujeme tak, že z několika jednotlivých temných snímků získáme prostým aritmetickým průměrem pouze jeden, tzv. *meandark*. Tento průměrný temný snímek jednoduše odečteme od snímků s objektem. V Munipacku se jedná o proceduru *darkbat*.

Flat field je také verzí aritmetického průměru ovšem doplněnou o přepočítávání na stejnou úroveň pozadí. Díky obecně kratší expoziční době je nutné vyrobit pro flat fieldy jejich vlastní meandark a pomocí darkbatu tyto snímky opravit. Průměrný opravený flat field pak získáme pomocí příkazu *aflat*. Průměrným flat fieldem poté podělíme snímky objektu (opravené

o dark frame) za pomoci funkce *flatbat*. Tímto končí korekce snímků a následuje samotné zpracování.

Jednoduchým příkazem *muniphot* se provede celá řada operací jejímž výsledkem je aperturní fotometrie, tj. určení magnitud a polohy jednotlivých hvězd. Běžnou praxí je, že jednotlivé snímky jsou vůči sobě posunuté, proto je nutné pomocí utility *munimatch* snímky vzájemně ztotožnit. Smyslem všech předchozích operací je získat fotometrii hlubokého snímku. Tohoto cíle dosáhneme, pokud snímky složíme pomocí *kombine*. Na tomto hlubokém snímku provedeme opět fotometrii abychom získali souřadnice hvězd a jejich hvězdnou velikost.

Na obrázcích 3.1 – 3.4 jsou snímky kulových hvězdokup použité v této práci. Snímky byly zpracovány výše uvedeným postupem.

## 4.2. Určení profilů ze snímků

Není pochyb, že kulové hvězdokupy jsou prostorové objekty. Máme-li však snímek kulové hvězdokupy, jedná se o pozorovatelný průmět ze třetí dimenze do dimenze druhé a je tedy nutné objekt chápat v rovinných souřadnicích. Snímky FITS používají kartézské souřadnice (x,y). Kulovou hvězdokupu lze aproximovat jako kulově symetrický objekt a proto se nabízí převod na souřadnice polární (r,φ) se středem v centru hvězdokupy. Radiální souřadnice libovolného bodu na snímku v x,y hvězdokupy potom bude dána převodním vztahem:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (4.1)$$

kde  $r$  je v pixelech. Pro převod na úhlové vteřiny platí, že  $1\text{pixel} = 1,37''$ <sup>20</sup>.

Rozdělíme-li si kulovou hvězdokupu na mezikruží (prstence) o rozdílu mezi vnitřním a vnějším poloměrem  $\Delta r$ <sup>21</sup>, pak obsah plochy mezikruží je:

$$S = \int_{r_{n-1}}^{r_n} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \rho^2 d\rho d\varphi. \quad (4.2)$$

Integrujeme přes celé  $\varphi$ , tedy od  $\varphi_1 = 0$  do  $\varphi_2 = 2\pi$ , meze  $r$  jsou určeny poloměry  $r_n$  a  $r_{n-1}$ .

V takto rozdělené hvězdokupě určíme počty hvězd v jednotlivých mezikružích a určíme celkovou hvězdnou velikost z intenzit pomocí Pogsonovy rovnice (2.3). Sestrojíme-li graf závislosti počtu hvězd, respektive hvězdné velikosti, na daném poloměru, získáme informaci o plošném rozložení hvězd v kulové hvězdokupě<sup>22</sup> a o hvězdné velikosti vztažené na danou plochu. Jinými slovy získáme radiální profil kulové hvězdokupy  $n(R)$  a  $I(R)$ .

<sup>20</sup> Tento převod platí pro binning 2x2. Při binningu 3x3 (jak je tomu u snímků M 3) platí převodní vztah  $1\text{pixel} = 2,05''$ . Oba vztahy dostaneme z přesné astrometrie snímku.

<sup>21</sup>  $\Delta r = r_n - r_{n-1}$

<sup>22</sup> Obecně se očekává nejvyšší koncentrace hvězd v centru hvězdokupy.

### 4.3. Radiální profily pozorovaných objektů

Profil (viz 4.2.) byl sestaven pro každou napozorovanou kulovou hvězdokupu. Následně na něj byly v programu Origin naitovány modely z kapitoly 2, přesněji Plummerův model (2.13), Hubbleův zákon (2.14) a de Vaucouleursův zákon (2.15).

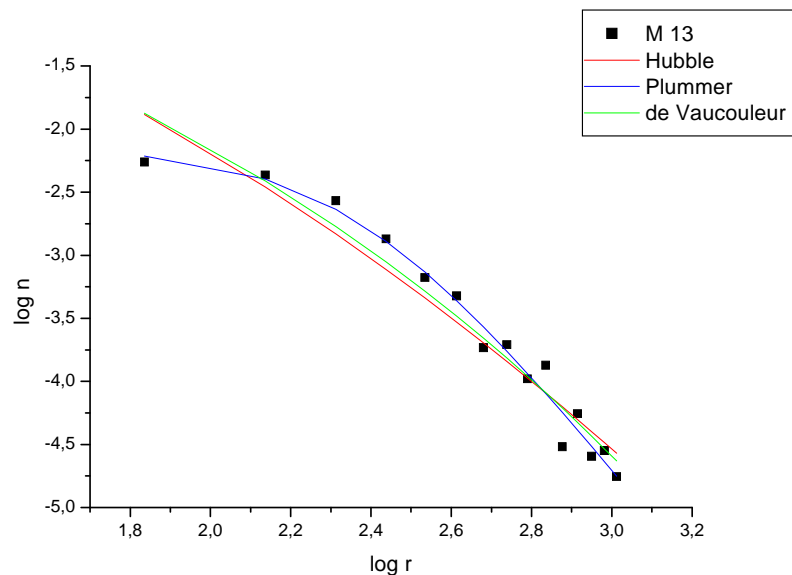
V následující tabulce je uveden seznam vnějších poloměrů jednotlivých mezikruží všech kulových hvězdokup.

objekt	n	$r_1$ [arcsec]	$r_n$ [arcsec]	$\Delta r$
M 13	15	68,5	1027,5	68,5
M 15	8	34,3	274,0	34,5
M 3	10	153,7	563,75	41,0
M 5	15	68,5	1027,5	68,5

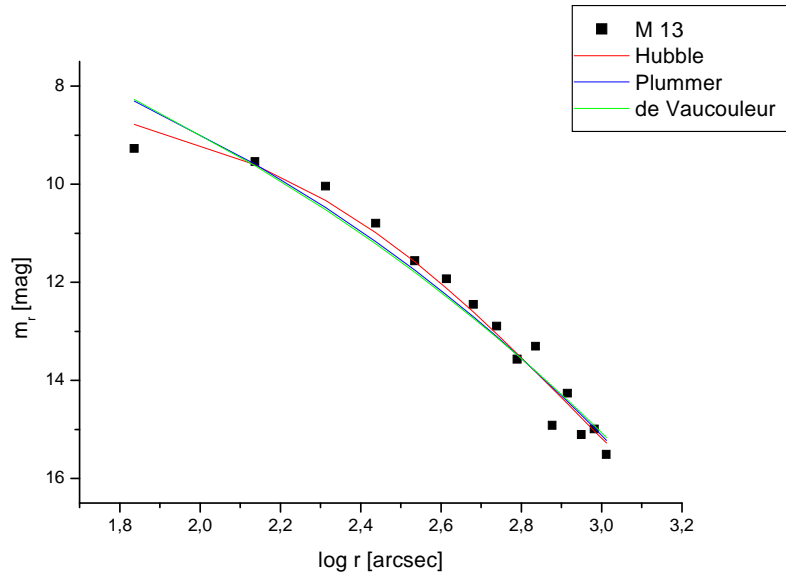
Tabulka 4.1: Seznam vnějších poloměrů mezikruží. V tabulce hodnota n udává počet mezikruží,  $r_1$  vnější poloměr prvního z nich,  $r_n$  vnější poloměr posledního a  $\Delta r$  udává poloměr jednotlivých mezikruží

Výsledné profily včetně příslušných fitů jsou na obrázcích 4.1 – 4.8. Na vodorovné ose všech grafů jsou vyneseny vnější poloměry mezikruží, na něž jsou hvězdokupy rozděleny. Na svislé ose profilů počtu hvězd jsou vyneseny počty hvězd na pixel. Na svislé ose profilů hvězdných velikostí jsou vyneseny relativní hvězdné velikosti

#### M 13

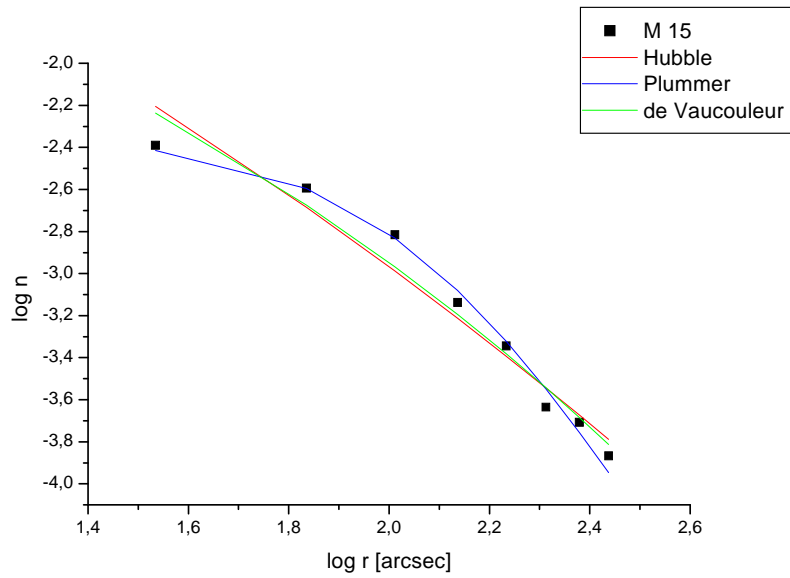


Obrázek 4.1: Profil kulové hvězdokupy M 13 s naitovanými modely

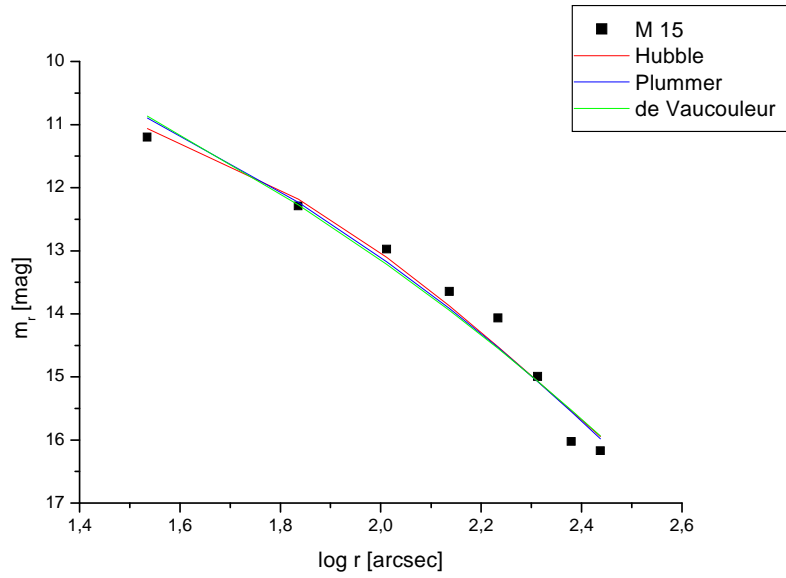


Obrázek 4.2: Profil kulové hvězdokupy M 13 s naitovanými modely

## M 15

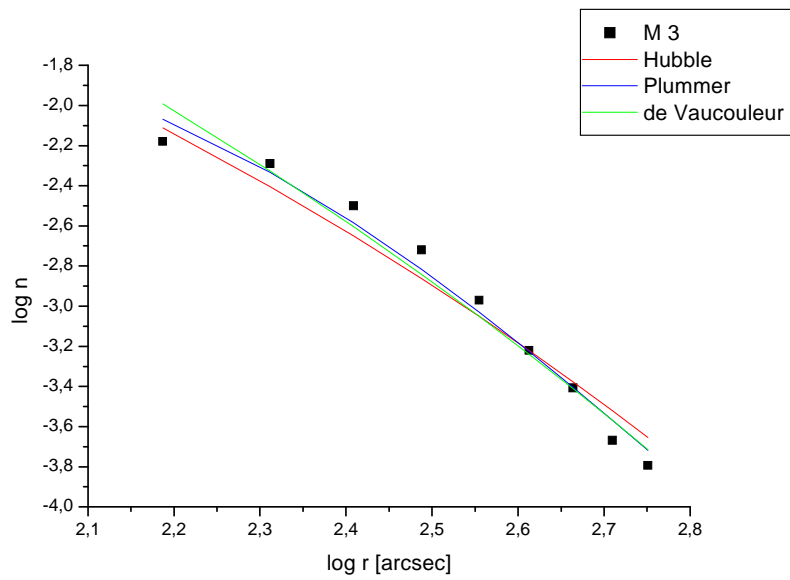


Obrázek 4.3: Profil kulové hvězdokupy M 15 s naitovanými modely

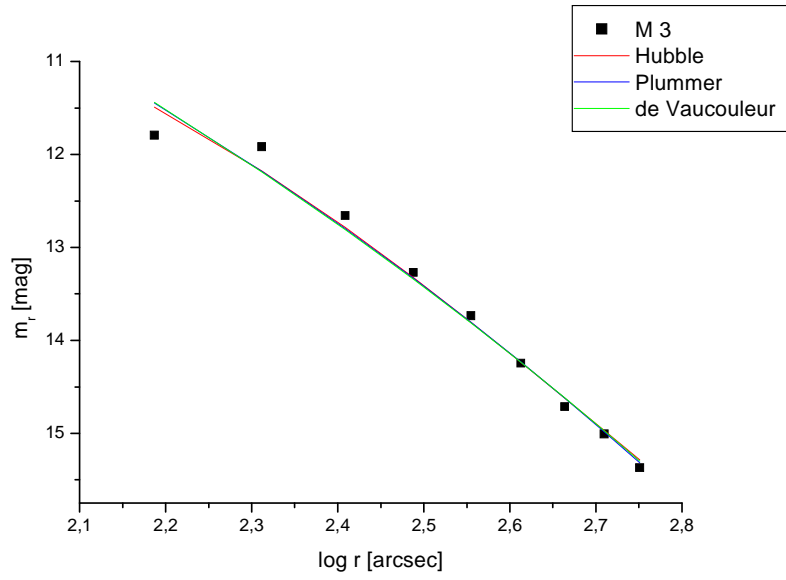


Obrázek 4.4: Profil kulové hvězdokupy M 15 s naitovanými modely

### M 3

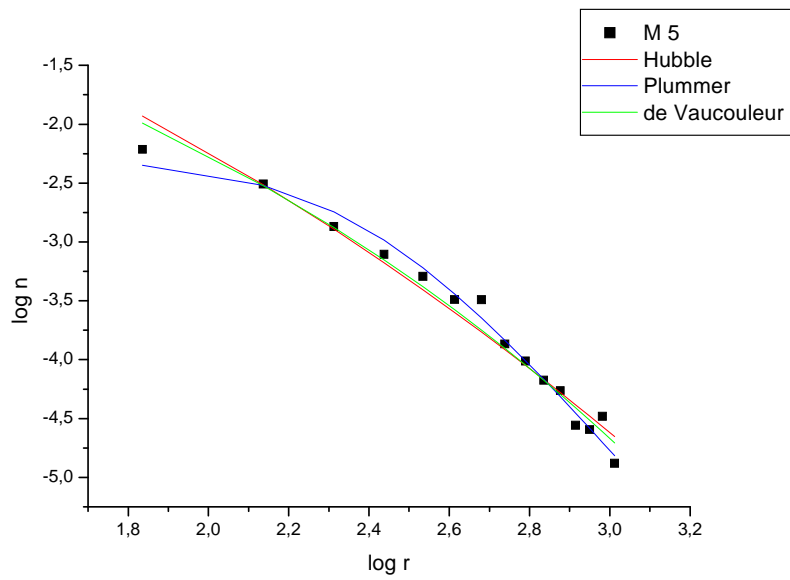


Obrázek 4.5: Profil kulové hvězdokupy M 3 s naitovanými modely

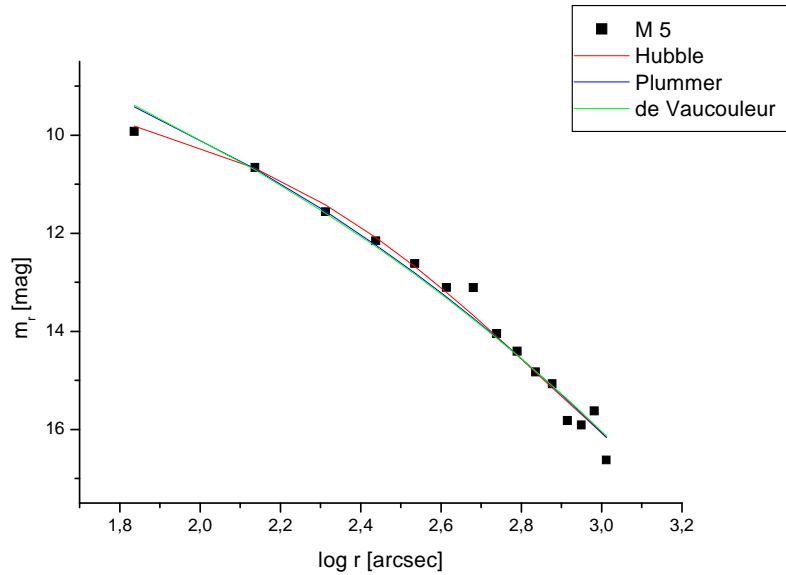


Obrázek 4.6: Profil kulové hvězdokupy M 3 s naitovanými modely

## M 5



Obrázek 4.7: Profil kulové hvězdokupy M 5 s naitovanými modely



Obrázek 4.8: Profil kulové hvězdokupy M 5 s naitovanými modely

#### 4.3.1. Parametry

Po naitování radiálních profilů kulových hvězdokup jednotlivými modely (viz 2.4) byly zjištěny hodnoty příslušných parametrů a odhady jejich nejistot. Veškeré parametry, včetně odhadů nejistot, jsou pro jednotlivé zákony uvedeny v tabulkách 4.2 – 4.4.

Hubble	profil počtů hvězd				profil hvězdné velikosti			
	objekty	$I_0$	$\pm \delta I_0$	$r_0$	$\pm \delta r_0$	$I_0$	$\pm \delta I_0$	$r_0$
M 13	48,69	30,28	0,59	0,38	12,14	0,28	1703,39	10,28
M 15	2,04	0,60	1,37	0,33	10,32	0,39	1459,94	41,89
M 3	2,69	1,37	1,02	0,37	11,21	0,32	1039,62	63,57
M 5	37,34	20,71	0,29	0,16	11,16	0,22	1458,21	67,84

Tabulka 4.2: Přehled hodnot parametrů (včetně nejistot  $\delta$ ) při fitování radiálního profilu kulových hvězdokup Hubbleovým zákonem (2.14)

Plummer	profil počtů hvězd				profil hvězdné velikosti			
	objekty	$j_0$	$\pm \delta j_0$	$a$	$\pm \delta a$	$j_0$	$\pm \delta j_0$	$a$
M 13	0,61	0,02	171,32	10,15	0,81	0,03	3,57	0,17
M 15	0,89	0,01	86,73	3,05	0,48	0,02	3,82	0,19
M 3	0,26	0,01	168,74	8,34	0,68	0,03	3,61	0,13
M 5	0,49	0,01	176,62	10,12	0,72	0,04	3,87	0,12

Tabulka 4.3: Přehled hodnot parametrů (včetně nejistot  $\delta$ ) při fitování radiálního profilu kulových hvězdokup Plummerovým modelem (2.13)

de Vaucouleur	profil počtů hvězd				profil hvězdné velikosti			
	objekty	$I_e$	$\pm \delta I_e$	$R_e$	$\pm \delta R_e$	$I_e$	$\pm \delta I_e$	$R_e$
M 13	0,44	0,09	93,37	21,19	3,25e15	5,47e14	3,28	0,82
M 15	0,55	0,08	107,91	22,78	1,74e13	3,42e12	1,38	0,24
M 3	0,28	0,05	46,64	10,52	1,99e15	2,29e14	1,84	0,35
M 5	0,32	0,05	99,12	13,33	1,75e14	2,20e13	3,58	0,62

Tabulka 4.4: Přehled hodnot parametrů (včetně nejistot  $\delta$ ) při fitování radiálního profilu kulových hvězdokup de Vaucouleurovým zákonem (2.15)

Z tabulek 4.1 - 4.3 je zřejmé, že Plummerův model vystihuje oba radiální profily kulových hvězdokup. Hubbleův zákon vystihuje stejně dobře radiální profil hvězdných velikostí, avšak radiální profil počtu hvězd kulových hvězdokup vykresluje velice nepřesně. Naproti tomu lze de Vaucouleurovým zákonem fitovat oba druhy radiálních profilů, ovšem s menší přesností než pomocí Plummerova modelu. V následujících tabulkách 4.5 a 4.6 jsou procentuální výčty nejistot jednotlivých modelů.

Počet hvězd	Hubble		Plummer		de Vaucouleur		
	objekty	$\delta I_0$ [%]	$\delta r_0$ [%]	$\delta j_0$ [%]	$\delta a$ [%]	$\delta I_e$ [%]	$\delta R_e$ [%]
M 13		62,2	64,4	3,2	5,9	20,4	22,6
M 15		29,4	24,4	1,2	3,5	14,5	21,1
M 3		50,9	36,6	3,8	4,9	17,8	23,5
M 5		55,4	55,1	2,0	5,7	15,6	13,4

Tabulka 4.5: Výčet nejistot v procentech pro fitování modelů na radiální profil počtu hvězd

Hvězdná velikost	Hubble		Plummer		de Vaucouleur		
	objekty	$\delta I_0$ [%]	$\delta j_0$ [%]	$\delta a$ [%]	$\delta R_e$ [%]	$\delta I_e$ [%]	$\delta R_e$ [%]
M 13		2,3	0,6	3,7	4,5	16,8	25,0
M 15		3,8	2,6	4,1	4,9	19,6	17,4
M 3		2,8	6,1	4,4	3,6	11,5	19,0
M 5		1,9	4,6	5,5	3,1	12,5	17,3

Tabulka 4.6: Výčet nejistot v procentech pro fitování modelů na radiální profil hvězdných velikostí



# Závěr

Smyslem plošné fotometrie je sestrojít radiální profil nebodového vesmírného objektu. V této práci byly sestrojeny dva druhy radiálních profilů pro všechny hvězdokupy a to podle počtu hvězd a hvězdné velikosti. Vzájemná zdánlivá podoba obou profilů byla zcela náhodná. Na každý tento profil byly podle odstavce 2.4 aplikovány modely – Plummerův model, Hubbleův zákon a de Vaucouleursův zákon

Aplikací Plummerova modelu, který je určen přímo kulovým hvězdokupám, bylo potvrzeno jeho primární zaměření právě na tyto objekty. Na radiálním profilu obou druhů měl Plummerův model nejistotu v průměru do 5 %.

Hubbleův zákon, stejně tak i de Vaucouleursův zákon, je primárně zaměřen na plošnou fotometrii galaxií. Avšak jak bylo ukázáno, průměrná nejistota aplikace na radiální profil hvězdných velikostí kulových hvězdokup byla necelých 5 %. Proto lze tento zákon používat i u kulových hvězdokup, ovšem jen na radiální profil hvězdných velikostí. Pro rozložení počtu hvězd v kulových hvězdokupách tento model selhává, průměrná nejistota aplikace dosahovala 50 %.

Posledním aplikovaným zákonem byl de Vaucouleursův zákon, který s jistou aproximací vystihuje oba druhy radiálních profilů kulových hvězdokup. Nevykazuje však takovou přesnost jako Plummerův model nebo Hubbleův zákon pro radiální rozložení hvězdných velikostí. Průměrná nejistota aplikace de Vaucouleursova zákona byla, pro oba typy profilů, do 20 %.

Závěrem lze říci, že nejpřesnější plošná fotometrii kulových hvězdokup byla provedena pomocí Plummerova modelu. Jisté přiblížení profilů, ovšem s menší přesností, vykazoval i de Vaucouleursův zákon. Naproti tomu úspěšnost aplikace Hubbleova zákona na radiální profil kulové hvězdokupy byla jen poloviční.

# Literatura

- [1] Ashman, K. M., Zepf, S. E. : *Globular cluster systems*. Cambridge University Press, 1998
- [2] Binney, J., Merrifield, M. : *Galactic astronomy*. Princeton University Press, 1998
- [3] Hacar, B. : *Úvod do obecné astronomie*. Praha, 1963
- [4] Hroch, F. : *Astronomické praktikum*. Brno, 2006
- [5] Široký, J., Široká, M. : *Základy astronomie v příkladech*. Praha, 1966
- [6] <http://www.aldebaran.cz>
- [7] <http://www.astro.pef.zcu.cz>
- [8] <http://astro.sci.muni.cz>
- [9] <http://fyzika.jreichl.com>
- [10] <http://monteboo.sci.muni.cz>
- [11] <http://navod.hvezdarna.cz>
- [12] <http://www.ian.cz>
- [13] <http://map.gsfc.nasa.gov>
- [14] <http://physics.mff.cuni.cz>
- [15] <http://www.seds.org>