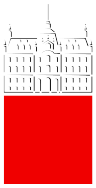
Univerza *v Ljubljani*
Fakulteta za *matematiko in fiziko*



Oddelek za Fiziko

Radialna odvisnost gostote kroglastih kopic

Projekt v sklopu predmeta
Astronomija 2

Študenta:
Simon Bukovšek
Anže Krejan

Predavatelj: prof. dr. Tomaž Zwitter
Asistentka: doc. dr. Dunja Fabjan
Demonstrator: Bojan Dintinjana

Akademsko leto 2022/2023

Povzetek

Pri projektu Radialna odvisnost gostote kroglastih kopic sva merila profile površinske svetlosti kroglastih kopic, na podlagi katerih lahko sklepamo o gostoti kopic. Za meritve sva izbrala kroglaste kopice M3, M53, NGC2419 in NGC4153. Posnela sva jih brez uporabe filtrov s teleskopom SkyWatcher 25 cm, $f = 1200\,\mathrm{mm}$ v sekvencah po 10 posnetkov. S Python programom sva iz slik pridobila krivuljo površinske svetlosti, ki sva jo nato prilegala na Kingov model površinske svetlosti. Pridobljeni parametri r_t, r_c in k za posamezne kopice so prikazani v tabeli 2. Dobljene parametre sva primerjala s tistimi iz literature in ugotovila, da se r_c precej dobro ujema z njimi, medtem ko r_t nekoliko odstopa. Z dobljenimi parametri sva poskusila oceniti število zvezd v kopicah, ki pa se je zaradi veliko predpostavk in približkov bistveno razlikovala od vrednosti iz literature.

Kazalo

1 Uvod **2**
1.1 Kaj so kroglaste kopice? 2
1.2 Kingov model 2

2 Opazovanje **4**

3 Slike **5**

4 Rezultati **5**
4.1 Obdelava podatkov 5
4.2 Izmerjeni parametri 7
4.3 Primerjava z vrednostmi iz literature 10

5 Zaključki **11**

Literatura **11**

1 Uvod

V tej nalogi bomo raziskovali radialno odvisnost gostote zvezd v kroglastih kopicah. Obravnavane bodo štiri kopice: M3, M5, NGC2419 in NGC4153.

1.1 Kaj so kroglaste kopice?

Vesolje ponuja mnogo različnih zvezdnih struktur in zvezdne kopice so iz opazovalnega stališča ena najpomembnejših. Ker je med različnimi strukturami včasih težko potegniti ločnico, tudi definicije ne morejo biti zelo natančne. Enciklopedija astronomije in astrofizike predlaga naslednjo uporabno definicijo: zvezdna kopica je jasna zgostitev nekaj ali več zvezd, ki izstopa glede na okoliško zvezdno ozadje, je navidezno lokalizirana v prostoru in je razpoznavna s pomočjo vidne ali infrardeče fotografije primernega zornega polja [1]. Na prvi pogled se zdi ta definicija precej nenatančna, vendar dobro formalizira dejstvo, da vse, kar zgleda kot kopica, je kopica. Poznamo več tipov zvezdnih kopic: **kroglaste kopice**, **razsute kopice**, **OB asociacije** in druge. V tej nalogi se bomo ukvarjali s kroglastimi kopicami.

Kroglaste kopice karakterizira veliko število vsebovanih zvezd in značilna krogelna simetričnost. Tipično vsebujejo med 10^4 in 10^6 zvezd, kar je približno enako tudi razponu mas v masah Sonca.. V naši Galaksiji so jih našli 183, predvidevajo pa, da jih je skupaj okoli 200, saj nekatere zakriva galaktični disk. Nahajajo se na dveh območjih v Galaksiji (in jih po tem tudi ločimo v dve skupini): v bližini središčne odebelitve, kjer se vrtijo okoli središča Galaksije skupaj z galaktičnim diskom, in v haloju Galaksije, kjer so precej enakomerno in izotropno razporejene do oddaljenosti okoli 35 kpc. Vse kroglaste kopice sestavljajo stare zvezde pretežno iz II populacije. [1, 2]

Opazovali smo naslednje kopice:

- **M3** (α = 13h 43m 17s, $\delta = +38°15'33''$): nahaja se v ozvezdju Lovska psa. Z navidezno magnitudo 6,2 ni vidna s prostim očesom, vendar je ena bolj svetlih na severnem nebu. Ima premer 16,2′ in nosi tudi oznako NGC5272.
- **M53** (α = 13h 14m 4s, $\delta = +18°2'39''$): nahaja se v Berenekinih kodrih, ima navidezno magnitudo 7,6 in premer 9,0′. Ima oznako NGC5024.
- **NGC2419** (α = 07h 39m 42s, $\delta = +38°49'55''$): nahaja se v ozvezdju Risa in ima navidezno magnitudo 10,0 in premer 4,5′. Nosi tudi imeni Intergalactic wanderer ter Caldwell 25.
- **NGC4153** (ali NGC4147) (α = 12h 11m 18s, $\delta = +18°24'46''$): nahaja se v ozvezdju Berenekinih kodrov, ima navidezno magnitudo 10,7 in premer 2,4′. Njeno alternativno ime je Kick the can cluster. [3]

1.2 Kingov model

Zaradi sferične simetričnosti in velikega števila zvezd se lahko kroglaste kopice s precejšno natančnostjo opiše teoretično. Najlažji opis bi bil model izotermnih sfer, vendar bi v tem modelu v središču dosegli singularnost (neskončno gostoto). Če rečemo, da je na r_t rob kopice, bi gostoto zvezd na volumen $f = \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}V}$ lahko opisali z enačbo

$$f(r) = f_0 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_t} \right)^2 , \tag{1}$$

kjer je f_1 nek prost parameter. Kot že omenjeno, ta model ni omejen v središču, zato so potrebni popravki. Za gostoto kopice v bližini središča se iz opazovanj izkaže, da jo zelo dobro opiše

funkcija

$$f(r) = \frac{f_0}{1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2}, \tag{2}$$

kjer je f_0 gostota zvezd v središču kopice, r_c pa radij, na katerem gostota pade na polovico središčne, imenovan polmer jedra (core radius). Ivan King je enačbi (1) in (2) smilseno združil v en model, ki se zdaj imenuje po njemu:

$$f(r) = k\left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{r_c}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2}}\right]^2, \tag{3}$$

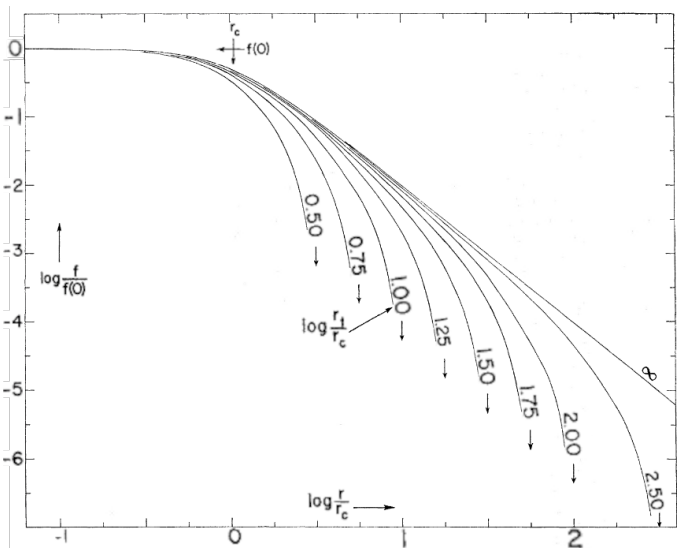
pri čemer je k nek prost parameter, ki je koreliran s sredinsko svetlostjo kopice. Razmerje r_t/r_c nam pove, koliko je svetlost kopice zbrana v središču. Vrednost razmerja r_t/r_c je za tipične kroglaste kopice reda velikosti 30, zato Kingov model le malo odstopa od modela (2), pri čemer je

$$\sqrt{\frac{f_0}{k}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2}}.$$

Vpeljemo lahko tudi Kingov polmer:

$$r_0 = \sqrt{\frac{9\sigma^2}{4\pi G\rho_0}},$$

kjer je σ disperzija hitrosti v kopici in ρ_0 središčna gostota kopice. Izkaže se, da na tem polmeru gostota kopice pade na 0,5013 središčne gostote, zato se pogosto vzame $r_c = r_0$. Prikaz radialnih odvisnosti gostot po Kingovem modelu za različna razmerja r_t/r_c je podan na sliki 1.



Slika 1: Prikaz Kingovih modelov za različna razmerja r_t/r_c na logaritemski skali. [4]

Pri opazovanjih pa nastane ena težava: s fotografijo se lahko izmeri samo projekcijo gostote oziroma svetlosti na ravnino opazovanja. Označimo volumsko gostoto kot prej z $f(r)$ in njeno projekcijo na ravnino z $g(r)$. Ti dve gostoti povezuje zveza

$$g(r) = \int_r^{r_t} \frac{f(R)R\mathrm{d}R}{\sqrt{R^2 - r^2}}.$$

Projekcija Kingovega modela na ravnino je

$$g(r) = \frac{2kr_c}{\sqrt{1+\left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2}}\left[\frac{\arccos(z)}{z} - 2\,\mathrm{arsech}(z) + \sqrt{1-z^2}\right], \tag{4}$$

kjer je

$$z = \sqrt{\frac{1+\left(\frac{r}{r_c}\right)^2}{1+\left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2}}.$$

Če integriramo model (2), potem dobimo nekoliko preprostejšo obliko [4, 1]:

$$g(r) = \frac{k}{1+\left(\frac{r_t}{r_c}\right)^2}(z^{-1}-1)^2.$$

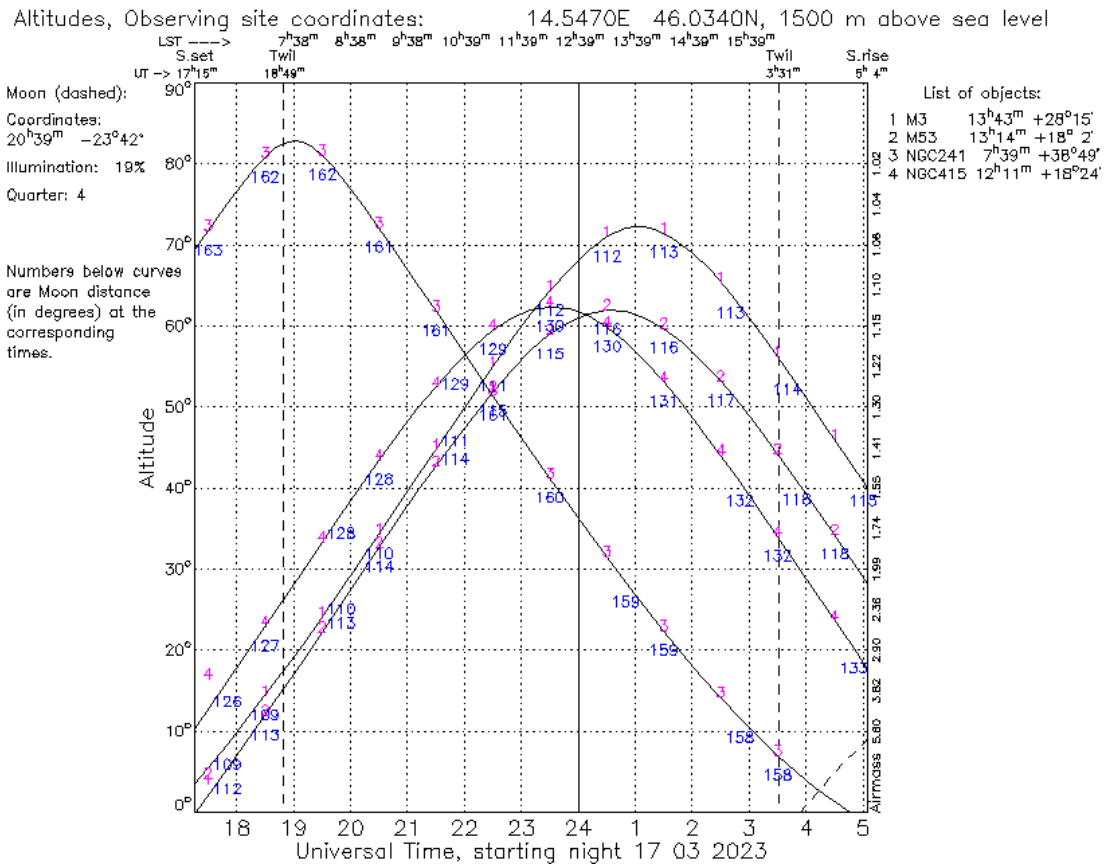
2 Opazovanje

Cilj opazovanja je bil posneti štiri različne kroglaste kopice. Opazovanje je bilo izvedeno 17. marca 2023 na Astronomsko-geofizikalnem observatoriju Golovec. Skozi celoten čas opazovanja je celo nebo prekrivala visoka tanka spremenljiva koprenasta oblačnost, ki je nekoliko oteževala opazovalne pogoje, vendar ni nikoli v celoti zakrila objektov. Zrak na površju je imel okoli 5 °C, vetra ni bilo skoraj nič. Namen je bil opazovati s teleskopom Vega, vendar je bil v času opazovanja na popravilu, zato sva uporabila 25 cm teleskop SkyWatcherv kupoli zunaj observatorija. Na teleskop sva se povezala na daljavo preko povezave RealVNC, najin demonstrator je bil Bojan Dintinjana. Kupolo in teleskop sva nadzirala s pomočjo programov ScopeDome LS in N.I.N.A. (Nighttime Imaging 'N' Astronomy). Teleskop ima premer 25 cm in goriščno razdaljo 1200 mm. Uporabila sva CCD senzor velikosti 3352 px × 2532 px, ki je 16-biten in monokromatski. Med celotnim opazovanjem je imel senzor temperaturo −25 °C. Za opazovanje nisva uporabila nobenega filtra, saj sva želela zajeti čim več svetlobe. Ker sva želela imeti čim bolj razločljivo sliko, sva uporabila binning 1 × 1 (torej brez binninga). Ko se je teleskop premikal med drugo in tretjo opazovano kopico, je sistem avtomatskega sledenja teleskopa prenehal pravilno delovati. Problem je demonstrator odpravil, drugih težav pa med opazovanjem ni bilo. Med približno 19.30 in 21.30 po lokalnem času (UT+1) sva slikala štiri različne kopice: M3, M53, NGC2419 in NGC4153. Luna je bila dovolj daleč stran, da opazovanj ni motila, čeprav ni bil mlaj. V tabeli 1 so podani podatki o opazovanju kopic (ime, koordinate, čas opazovanja, ekspozicija, število slik).

Objekt	Rektascenzija	Deklinacija	Čas zajema	Ekspozicija	Št. posnetkov
NGC 2419	07h 39m 42s	+38°49′55″	19.45.26 - 19.56.20	60 s	10
			20.00.17 - 20.20.07	120 s	10
NGC 4153	12h 11m 18s	+18°24′46″	20.28.42 - 20.48.38	120 s	10
M 3	13h 43m 17s	+38°15′33″	20.59.43 - 21.06.18	30 s	10
M 53	13h 14m 4s	+18°2′39″	21.29.57 - 21.26.21	30 s	10

Tabela 1: Prikaz opravljenih posnetkov med opazovanjem 17. marca 2023 na Astronomskem observatoriju Golovec. Rektascenzija in deklinacija sta merjena glede na JD 2000.0. Začetek in konec opazovanja sta v lokalnem času UT+1.

Po koncu sva posnela še pripadajoče posnetke temnega toka, ravnega polja in dodane napetosti. Na sliki 2 je so prikazane višine vseh štirih objektov na noč opazovanja.



Slika 2: Višine objektov M 3, M 53, NGC 2419 in NGC 4153 na noč opazovanja na Golovcu (geografska širina: 46,034° N, geografska dolžina: 14,547° E). Navpični črtkatni črti predstavljt azaöetek in konec astronomske noöi, poševna črtkana črta pa Luno. Črtkana črta predstavlja Luno. Čas je podan v UT, lokalni čas je bil eno uro več. Vir: [5].

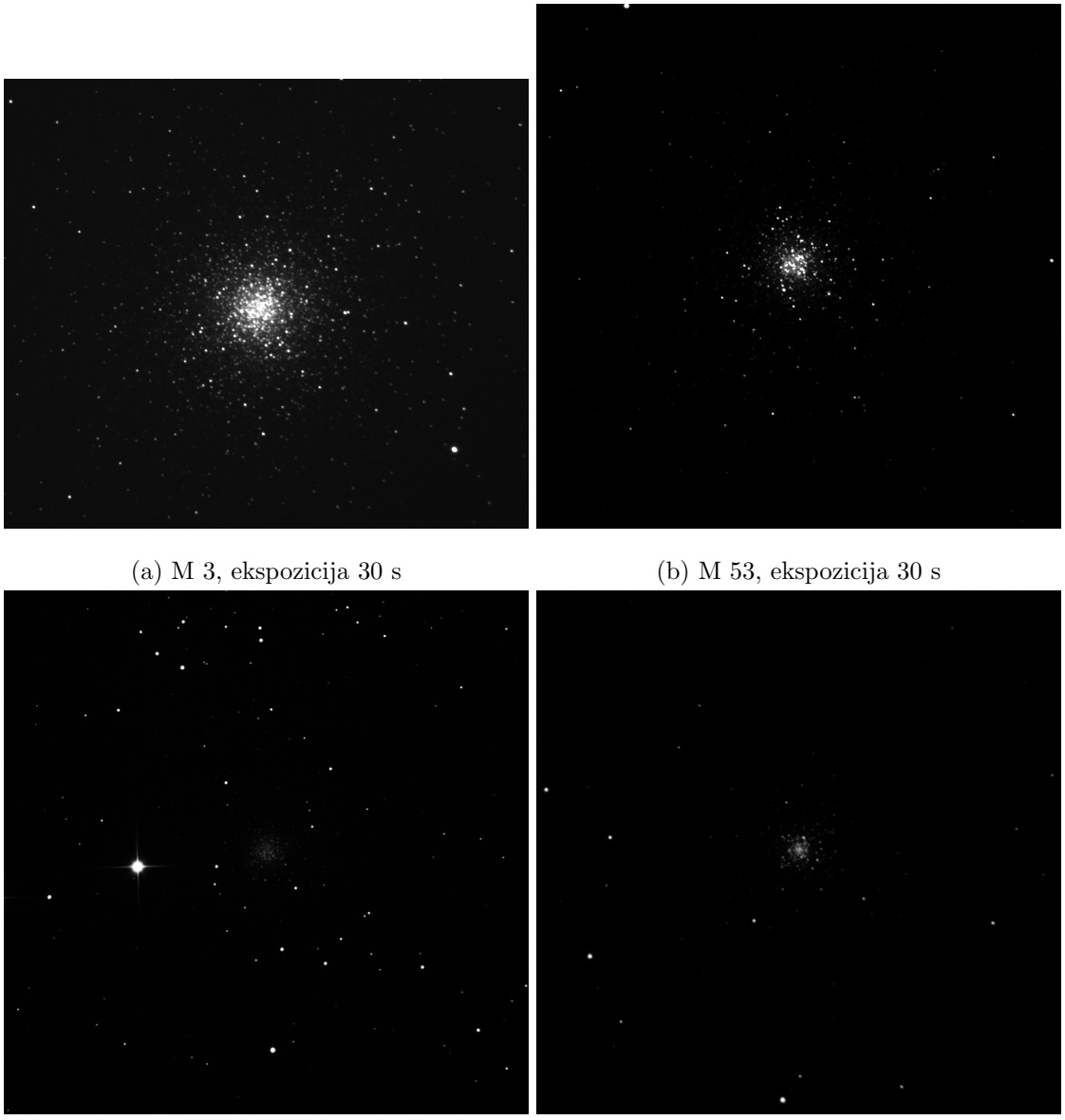
3 Slike

Slike sva najprej sestavila in obdelala v programu ASTAP. Program avtomatsko upošteva slike temnega toka, dodane napetosti in ravega polja ter primerno sestavi slike z različnimi ekspozicijami. Po obdelavi sva dobila štiri glavne slike na podlagi katerih sva računala radialne profile svetlosti. Pomembno je, da se lahko pri sestavljanju slik določene parametre spreminja, zato sva sestavila neodvisno vsak svoje štiri glavne slike, vsak napisala svoj program za analizo in neodvisno dobila vsak po štiri radialne odvisnosti. Na slikah 3 so prikazane slike vseh štirih kopic. Prikazane slike so dodatno obdelane, da je lažje razvidna njihova vsebina, saj se kopic na neobdelanih slikah s prostim očesom skoraj ne vidi.

4 Rezultati

4.1 Obdelava podatkov

Slike sva obdelala s programskim jezikom Python ob pomoči knjižnic `astropy`, `matplotlib`, `scipy` in `numpy`. Najprej sva uvozila `.fits` sliko v obliki `numpy` tabele. Od slike sva odštela ozadje, ki sva ga dobila tako, da sva izračunala povprečno vrednost svetlosti vseh točk temnejših od meje, ki sva jo ocenila kot povprečje nekaterih naključnih temnejših točk na sliki. Nato sva jo obrezala



(a) M 3, ekspozicija 30 s

(b) M 53, ekspozicija 30 s

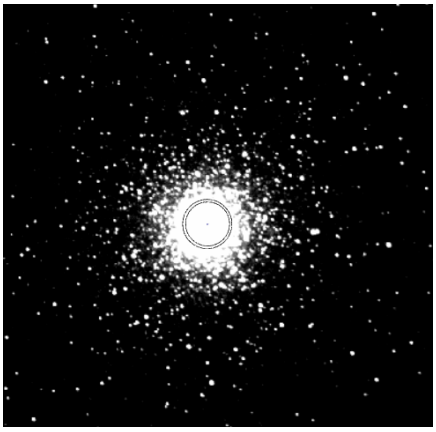
(c) NGC 2419, ekspozicija 60 s

(d) NGC 4153, ekspozicija 60 s

Slika 3: Slike kroglastih kopic z dne 17. marec 2023 med 19.30 in 21.30 po lokalnem času (UT+1) v Astronomsko-geofizikalnem observatoriju Golovec (46,034° N, 14,547° E). Posnete so bile z Newtonovim refraktorjem premera 25 cm in z goriščno razdaljo 1200 mm. Kotne širine vseh slik so enake $15'52''$.

tako, da je ostala na sliki le še kroglasta kopica in nekaj bližnjih zvezd. To sva naredila zato, ker bi lahko svetle zvezde na sliki preveč vplivale na določitev središča kopice, ki sva ga določila kar s formulo za težišče, v kateri sva maso zamenjala s svetlostjo svetlobne točke. Površinsko svetlost v odvisnosti od radija sva določila tako, da sva kopico razdelila na koncentrične krožne kolobarje debeline 1 px s prej določenim središčem, kot je označeno na sliki 4 in izračunala povprečno svetlost svetlobnih točk v njih. Skupaj je bilo kolobarjev okoli 65. Vse zgoraj omenjene korake sva za vse slike odpravila vsak posebej, da sva zmanjšala nivo pristranskosti pri izbiri ozadja, obrezovanju slike in določanju središča. Dobljene profile sva z metodo minimalnih kvadratov prilegala na Kingov model za površinsko svetlost, ki ga opisuje enačba 4 in s tem pridobila

parametre r_t,r_c in k. Pri prileganju sva izpustila prvih nekaj slikovnih točk. To sva naredila, ker center slike ni povsem homogen, kar je povzročilo, da je program pogosto določil težišče svetlosti na nekaj slikovnih točk velikem lokalnem vrhu, ki ni najbolje predstavljal bližnje okolice.



Slika 4: Prikaz krožnega kolobarja za določanje površinske svetlosti.

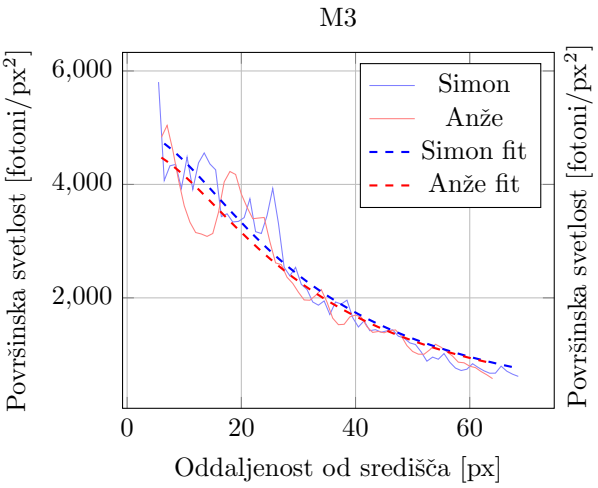
4.2 Izmerjeni parametri

V tabeli 2 so zapisani pridobljeni parametri, njihove aritmetične sredine in napake povprečij.

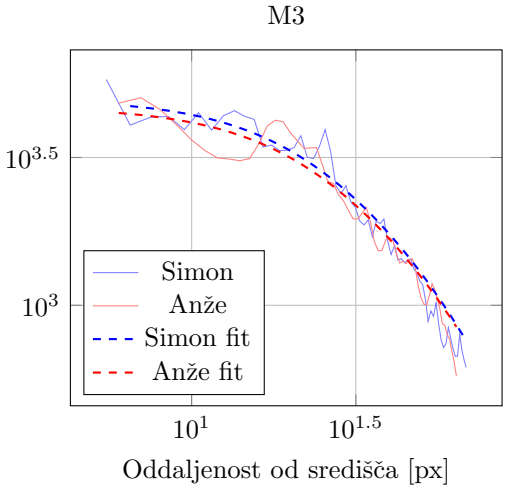
Slika	Količina	Anže	Simon	Povprečje	Napaka
M3	r_c	22,1411	22,4586	22,30	0,17
	r_t	312,5855	281,2115	297	16
	k	193,8320	209,6816	201,8	7,9
M53	r_c	18,6981	21,3891	20,0	1,3
	r_t	212,0329	168,8441	190	22
	k	97,5548	101,8968	99,7	2,2
NGC2419	r_c	17,6904	19,0712	18,39	0,69
	r_t	216,4754	185,9356	201	15
	k	50,1838	56,8467	53,5	3,3
NGC4153	r_c	6,8409	9,2753	8,1	1,2
	r_t	143,8274	153,4756	148,7	4,8
	k	470,7677	320,9376	396	75

Tabela 2: Parametri za vse kroglaste zvezdne kopice za vsakega od članov skupine. V zadnjem stolpcu so aritmetične sredine parametrov s pripadajočimi napakami.

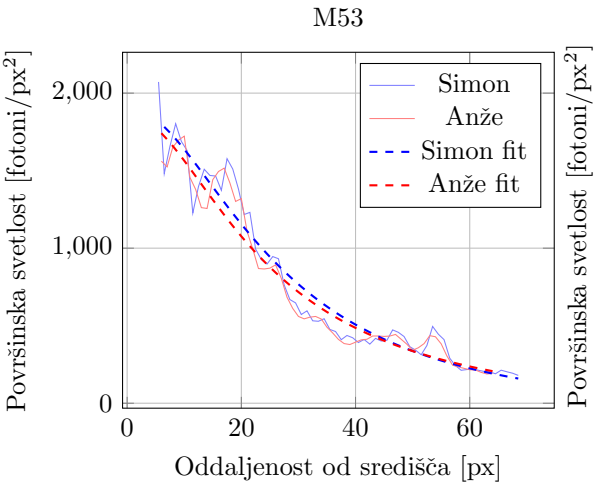
Na grafih 5 so prikazani podatki in njim pripadajoča prileganja tako v linearni kot logaritmični skali. Parametra r_c in r_t sta podana v slikovnih točkah [px], a ker poznamo velikost slikovne točke na CCD detektorju (px = 5400 nm), goriščno razdaljo $f = 1200\,\mathrm{mm}$ in razdalje do kopic, lahko te številke pretvorimo v fizične razdalje sformulo $\frac{\mathrm{px}}{f} = \phi$, kjer ϕ predstavlja kotno velikost ene slikovne točke. Tako lahko s formulo $\theta = \phi r$ izračunamo kotni polmer in središčni radij kroglastih kopic, ki ju označimo s θ_t in θ_c. S parametrom θ_t pa lahko navzdol ocenimo število zvezd v



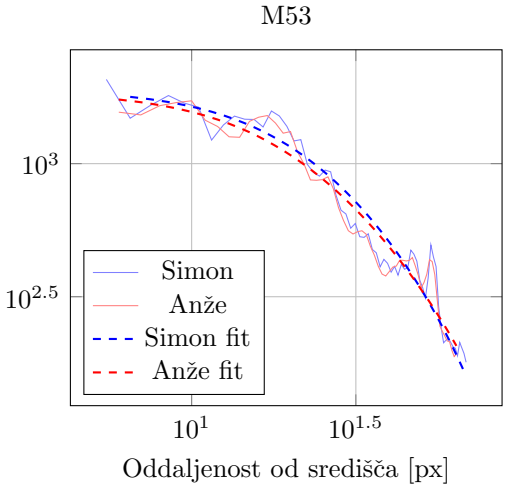
(a) M3 na linearni skali



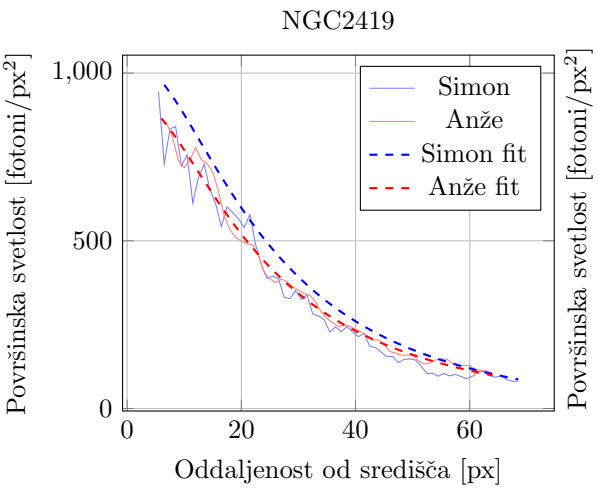
(b) M3 na logaritemski skali



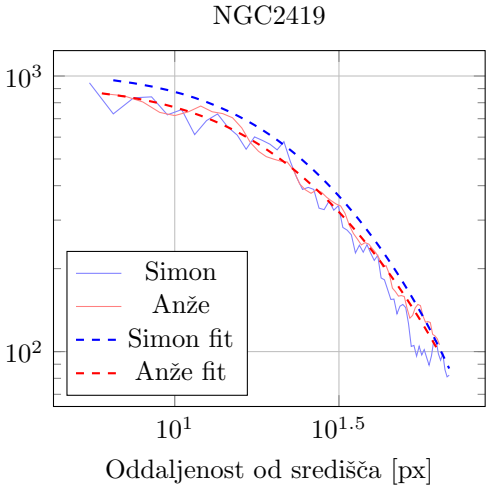
(c) M53 na linearni skali



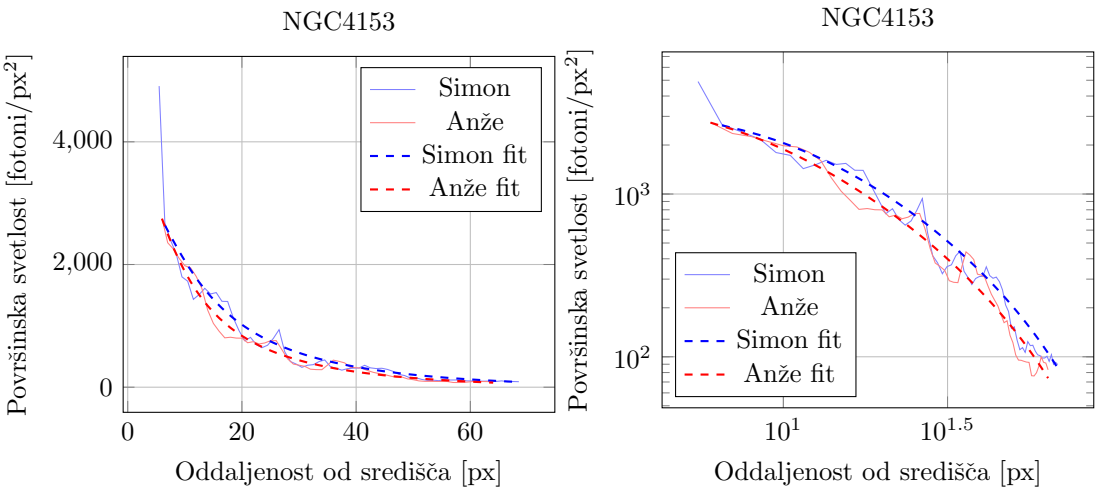
(d) M53 na logaritemski skali



(e) NGC2419 na linearni skali



(f) NGC2419 na logaritemski skali



(g) NGC4153 na linearni skali

(h) NGC4153 na logaritemski skali

Slika 5: Linearni in logaritemski prikaz odvisnosti svetlosti kopic M3, M53, NGC2419 in NGC4153 od polmera. Polna črta z imenom pomeni, da so to podatki, kot jih je dobil ta član skupine, s črtkano črto iste barve pa je projekcija Kingovega modela, ki se najbolj prilega podatkom. Zaradi precejšnje odvisnosti porazdelitve svetlosti od izbire središčne točke se prilegani krivulji pri majhnih oddaljenostih nekoliko razlikujeta.

zvezdni kopici. To lahko dosežemo z uporabo enačbe:

$$r_{\text{lim}} = R_p \left(\frac{M}{3{,}5 M_g} \right)^{\frac{1}{3}}, \tag{5}$$

[4] ki nam poda maso kopice, kjer r_{lim} predstavlja limitni radij kopice zaradi plimskih sil Galaksije, R_p perigalaktikon kopice, M_g pa maso Galaksije. Po predpostavki, da so kroglaste kopice sestavljene iz Soncu podobnih zvezd, lahko iz mase kopice dobimo število zvezd v kopici. r_{lim} je primerljiv s $\theta_t d$, kjer je d oddaljenost kopice; R_p lahko navzdol ocenimo s trenutnimi razdaljami med galaktičnim centrom in kopicami, ki jih lahko najdemo na spletni strani [6]. Ocenjeni perigalaktikoni, dobljeni parametri θ_t, θ_c ter ocene števila zvezd so predstavljeni v tabeli 3.

Objekt	R_p [pc]	θ_t [arcmin]	θ_c [arcmin]	ocenjeno število zvezd
M3	$12\,090 \pm 60$	$4{,}59 \pm 0{,}25$	$0{,}3500 \pm 0{,}0027$	$12\,500 \pm 200$
M53	$19\,000 \pm 160$	$2{,}95 \pm 0{,}34$	$0{,}31 \pm 0{,}02$	3300 ± 80
NGC2419	$95\,900 \pm 2300$	$3{,}11 \pm 0{,}23$	$0{,}280 \pm 0{,}017$	3900 ± 270
NGC4153	$20\,740 \pm 190$	$2{,}30 \pm 0{,}07$	$0{,}12 \pm 0{,}02$	1570 ± 45

Tabela 3: Tabela perigalaktikonov, povprečnih navideznih polmerov, središčnih radijev ter ocenjenega števila zvezd.

Ker pa se dobljene ocene števil zvezd ne ujemajo najbolje s tistimi iz literature, sva jih ocenila še preko števila zaznanih fotonov. Pri tem sva uporabila enačbi:

$$j = \frac{L}{4\pi R^2} = \frac{nE}{St\mu} \tag{6}$$

$$E \approx 2.7 k_b T \tag{7}$$

za gostoto svetlobnega toka in povprečno energijo fotona izsevanega s črnega telesa. Tukaj so L svetlost kopice, R oddaljenost kopice od sonca, n število zaznanih fotonov, E povprečna energija fotona, t ekspozicijski čas, T povprečna površinska temperatura zvezd, ki sva jo ocenila na 5500 K za vse kopice ter μ delež izsevanih fotonov, ki ga senzor zazna. K μ prispevata kvantni izkoristek CCD detektorja, absorbcija in odboj atmosfere. Ker nisva našla točnih podatkov za izkoristek uporabljenega detektorja, sva na podlagi podatkov na spletni strani [7] izkoristek navzgor ocenila na 0.3. Za delež svetlobe prepuščene skozi atmosfero, pa sva na podlagi podatkov o prepuščeni sončni svetlobi na spletni strani [8] vzela 0.51, saj gre za Soncu podobne zvezde. Preko enačb 6 in 7 sva izračunala svetlosti posameznih kopic in s predpostavko, da gre za Soncu podobne zvezde ocenila števila zvezd.

$$N = \frac{4\pi n E R^2}{S t \mu L_\odot} \tag{8}$$

Uporabljeni podatki in dobljene ocene števil zvezd so predstavljeni v tabeli: 5

Objekt	R [pc]	n	ocenjeno število zvezd
M3	$10\,180 \pm 80$	$49\,500\,000 \pm 7000$	$147\,000 \pm 1500$
M53	$18\,500 \pm 80$	$9\,100\,000 \pm 3000$	$89\,000 \pm 900$
NGC2419	$88\,500 \pm 2400$	$4\,200\,000 \pm 2000$	$240\,000 \pm 2400$
NGC4153	$18\,540 \pm 210$	$5\,500\,000 \pm 2400$	$27\,000 \pm 270$

Tabela 4: Tabela oddaljenosti kopic s spletne strani [6], števila zaznanih fotonov in dobljene ocene števil zvezd

4.3 Primerjava z vrednostmi iz literature

V spletnem katalogu podatkov [9] lahko najdemo θ_t in θ_c, na spletni strani [6] pa mase kopic, iz katerih lahko dobimo število zvezd po naših predpostavkah. Ti podatki so prikazani v tabeli 5.

Objekt	θ_t [arcmin]	θ_c [arcmin]	ocenjeno število zvezd
M3	28,72	0,37	409 000
M53	18,37	0,35	502 000
NGC2419	7,50	0,32	780 000
NGC4153	/	/	372 000

Tabela 5: Tabela povprečnih navideznih polmerov, središčnih radijev ter ocenjenega števila zvezd iz literature. Za zadnjo kopico ni podatkov.

Sklepava, da je do napake pri θ_t prišlo zato, ker z uporabljenim teleskopom in ekspozicijskim časom nisva uspela zajeti precejšnjega dela temnejšega roba kopic. Posledično sva zaradi tega dobila tudi veliko manjšo 1. oceno števila zvezd, saj je ta sorazmerna z θ_t^3. Odstopanje med 1. oceno in dejanskim številom zvezd se opazno poveča z oddaljenostjo od središča Galaksije, saj smo takrat najbolj precenili R_p. 2. ocena števila zvezd je sicer boljša še vedno pa je manjša od dejanskega števila zvezd, saj v njej med drugim ni upoštevana ekstinkcija. Opaziti pa je tudi precejšnje ujemanje vrednosti θ_c s primerljivimi vrednostmi iz literature. Sklepava, da je tako zaradi narave tega parametra − razdalja, na kateri je polovica središčne svetlosti, je neodvisna od ekspozicijskega časa ali velikosti teleskopa.

5 Zaključki

Pri tem projektu sva uspešno poslikala štiri kroglaste kopice (M3, M53, NGC2419 in NGC4153) z Newtonovim reflektorjem premera 25 cm. Sekvence slik sva sestavila v programu ASTAP in določila radialni profil svetlosti s pomočjo programskega jezika Python. Zaradi morebitnih pristranskosti pri obdelavi podatkov sva obdelavo naredila vsak zase in neodvisno. Na koncu sva svoje rezultate primerjala, kar je dober način določanja napake izmerjenih parametrov. Kot sva ugotovila, je na končne rezultate najbolj vplivala izbira središčne točke kopice in določitev povprečne svetlosti ozadja. Izračunane podatke (tabela 3) sva primerjala z nekaterimi primerljivimi podatki drugih avtorjev (tabela 5). Ugotovila sva, da se središčni polmeri, ki sva jih izračunala midva, dobro ujemajo s središčnimi polmeri, ki so jih izmerili drugi avtorji. To ujemanje je smiselno, saj je središčni polmer definiran tako, da je neodvisen od količine zbrane svetlobe. Kotne velikosti kopic sva določila bistveno manjše kot drugi avtorji, kar je verjetno posledica, da sva na slikah zbrala premalo svetlobe, da bi lahko temne robne zvezde ločila od ozadja. Prav tako sva slikala v svetlobno onesnaženi okolici, kar pomeni, da je šum ozadja relativno velik. Ti dve omejitvi sta tudi razlog, da sva dobila ocenjeno število zvezd v kopicah bistveno manjše od števila, izračunanega iz mase kopic. Meritve bi lahko izboljšala, tako da bi uporabila večji teleskop, bolj občutljiv senzor v kombinaciji z daljšo ekspozicijo, lahko pa bi posnela slike na lokaciji z manjšim svetlobnim onesnaženjem ali na lepšo noč. Četudi nekatere izračunane količine niso enake kot jih podaja literatura, pa sva ugotovila, da Kingov model dobro opisuje porazdelitev gostote zvezd v kroglastih kopicah.

Literatura

[1] Paul Murdin. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. 1. izd. Institute of Physics, Bristol, 2001. ISBN: 9781003220435. URL: https://sites.astro.caltech.edu/~george/ay20/eaa-starclus.pdf (cit. na str. 2, 4).

[2] Hannu Karttunen in sod., ur. *Fundamental Astronomy*. 6. izd. Springer, 2017. ISBN: 978-3-662-53044-3. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53045-0 (cit. na str. 2).

[3] Fabien Chereau in Guillaume Chereau. *Stellarium Web*. 2023. (Pridobljeno 22. 4. 2023) (cit. na str. 2).

[4] Ivan King. "The structure of star clusters. I. an empirical density law". V: 67 (okt. 1962), str. 471. DOI: 10.1086/108756 (cit. na str. 3, 4, 9).

[5] Peter Sorensen, Marco Arrazo in Méndez Javier. *Object Visibility – STARALT*. 2023. URL: http://catserver.ing.iac.es/staralt/index.php (pridobljeno 21. 4. 2023) (cit. na str. 5).

[6] Holger Baumgardt in sod. *Fundamental parameters of Galactic globular clusters*. 2023. URL: https://people.smp.uq.edu.au/HolgerBaumgardt/globular/ (pridobljeno 24. 4. 2023) (cit. na str. 9, 10).

[7] Michael W. Davidson Kenneth R. Spring. *Concepts in Digital Imaging Technology Quantum Efficiency*. 2016. URL: https://hamamatsu.magnet.fsu.edu/articles/quantumefficiency.html (pridobljeno 24. 4. 2016) (cit. na str. 10).

[8] Heather K. Michon. *Atmospheric Absorption of solar Radiation*. 2023. URL: https://www.climate-policy-watcher.org/global-climate-2/atmospheric-absorption-of-solar-radiation.html (cit. na str. 10).

[9] William E. Harris. *Fundamental parameters of Galactic globular clusters*. 2010. URL: https://physics.mcmaster.ca/~harris/mwgc.dat (pridobljeno 24. 4. 2023) (cit. na str. 10).