

Opazovalni projekt

# Jate galaksij

## *Jata v Devici*

Porazdelitev galaksij po eliptičnosti in naklonskih kotih, relacija  
tip-gostota (*morphology-density relation*)

Urška Jelerčič, Daša Rozmus, Maruška Žerjal

Profesor: prof. dr. Andrej Čadež

Asistent: asist. dr. Andreja Gomboc

Strokovni svetovalec na Astronomskem observatoriju Golovec:  
Bojan Dintinjana

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za matematiko in fiziko  
Oddelek za fiziko

Ljubljana, september 2008

## Naloga

*Izberite si primerno veliko, bližnjo in bogato jato galaksij. Posnemite večje število galaksij (okrog 30), v irafu izmerite njihovo eliptičnost in pozicijski kot glavne osi s taskom psrad. Izmerite porazdelitev eliptičnosti in smeri glavne osi za galaksije v jati. Poskušajte ugotoviti, če so smeri naključno porazdeljene.*

## Povzetek

S teleskopom Cichocki observatorija Črni vrh je bilo posnetih 299 spiralnih in 326 eliptičnih galaksij jate v Devici z namenom, da bi preverili porazdelitev galaksij znotraj jate po naklonskem kotu in eliptičnosti. Teoretična napoved porazdelitve po naklonskem kotu temelji na izotropnosti prostora. Izdelan je bil teoretični model porazdelitve po eliptičnosti. Podatki so obdelani s programom *IRAF*, priložen je opis postopka računanja eliptičnosti in naklonskih kotov znotraj programa. Pokazali smo, da je porazdelitev galaksij po naklonskih kotih enakomerna in zato naključna. Porazdelitev po eliptičnosti se ni pokazala za naključno in je v nasprotju z izdelanim modelom. Kot zanimivost smo pokazali povezavo z relacijama Tully-Fisher oz. Faber-Jackson kot možen vzrok za tak rezultat.

Preverjena je bila relacija tip-gostota (density-morphology relation).

## Abstract

299 spiral and 326 elliptic galaxies of the Virgo Cluster were analysed using Cichocki telescope of observatory Črni vrh in order to investigate the ellipticity distribution and position angles distribution of galaxies within the cluster. Theoretical prediction of position angles distribution is based on isotropy of space. A model of the ellipticity distribution was developed. Data was analysed using *IRAF* program and the procedure is included. We show that the position angles distribution of galaxies is regular and so random sampled. However, the ellipticity distribution was not recognized as such and does not correspond to our model. We propose a Tully-Fisher and Faber-Jackson relation as hypothetical background for our results.

A density-morphology relation was also examined.

### **Zahvala**

Za strokovno pomoč, nasvete in veliko mero potrpljenja se zahvaljujemo Andreji Gomboc, Bojanu Dintinjani, Galu Matijeviču, Anžetu Slo-sarju in Vidu Iršiču.

---

## Kazalo

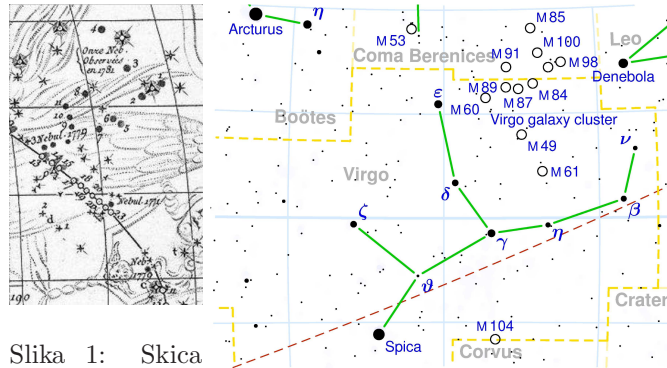
<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>5</b>
1.1	Zgodovinsko ozadje . . . . .	5
1.2	O jati <i>Virgo</i> . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Teoretično ozadje</b>	<b>7</b>
2.1	Model porazdelitve . . . . .	8
2.2	Relaciji Tully-Fisher in Faber-Jackson . . . . .	9
2.3	Relacija tip-gostota . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Opazovanje</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>Obdelava podatkov</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>Rezultati</b>	<b>15</b>
5.1	Porazdelitev galaksij po naklonskem kotu glavne osi . . . . .	15
5.1.1	Spiralne galaksije . . . . .	15
5.1.2	Eliptične galaksije . . . . .	16
5.1.3	Vse galaksije . . . . .	18
5.2	Porazdelitev galaksij po eliptičnosti . . . . .	19
5.2.1	Spiralne galaksije . . . . .	19
5.2.2	Eliptične galaksije . . . . .	20
5.2.3	Primerjava meritev z izdelanim modelom . . . . .	22
5.3	Relacija "tip-gostota" ( <i>morphology-density relation</i> ) . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Zaključek</b>	<b>25</b>

# 1 Uvod

Zaradi svoje bližine in velikosti smo si za opazovanje izbrali jato Virgo. Opazovanja smo opravili konec pomladi, ko je jata vidna na nebu. Ker je bil teleskop na Golovcu na naš opazovalni dan zaseden, smo slikanje opravili s pomočjo observatorija Črni vrh.

## 1.1 Zgodovinsko ozadje

'Jato planetarnih meglic' je v drugi polovici 18.st. opazil in označil Charles Messier. Ozvezdje Device je opisal kot "eno najbogatejših z meglicami, ki naj bi bile videti brez zvezd in le ob lepem vremenu". Skupno je popisal 16 objektov, med katerimi je najbolj znana eliptična galaksija M87. Do pravilne klasifikacije jate in objektov v njem je minilo skoraj 150 let, saj so šele v 20. letih prejšnjega stoletja ugotovili, da jate ne sestavljajo planetarne meglice, ampak večinoma eliptične in spiralne galaksije.



Slika 1: Skica iz Messierjeve zvezdne karte

Slika 2: Lega jate na nebu

## 1.2 O jati Virgo

Osnovni podatki [1]

Oddaljenost:  $\sim 60$  milijonov svetlobnih let ( $\sim 18Mpc$ )

Lega: ozvezdje Device

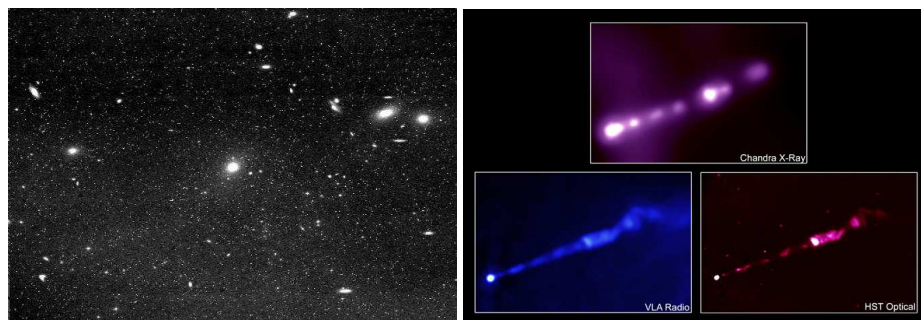
Št. galaksij:  $\sim 2000$  (predstavlja jedro Lokalne Superjate)

Masa:  $\sim 1.2 \cdot 10^{15} M_{\odot}$

Radij:  $\sim 2.2Mpc$ .

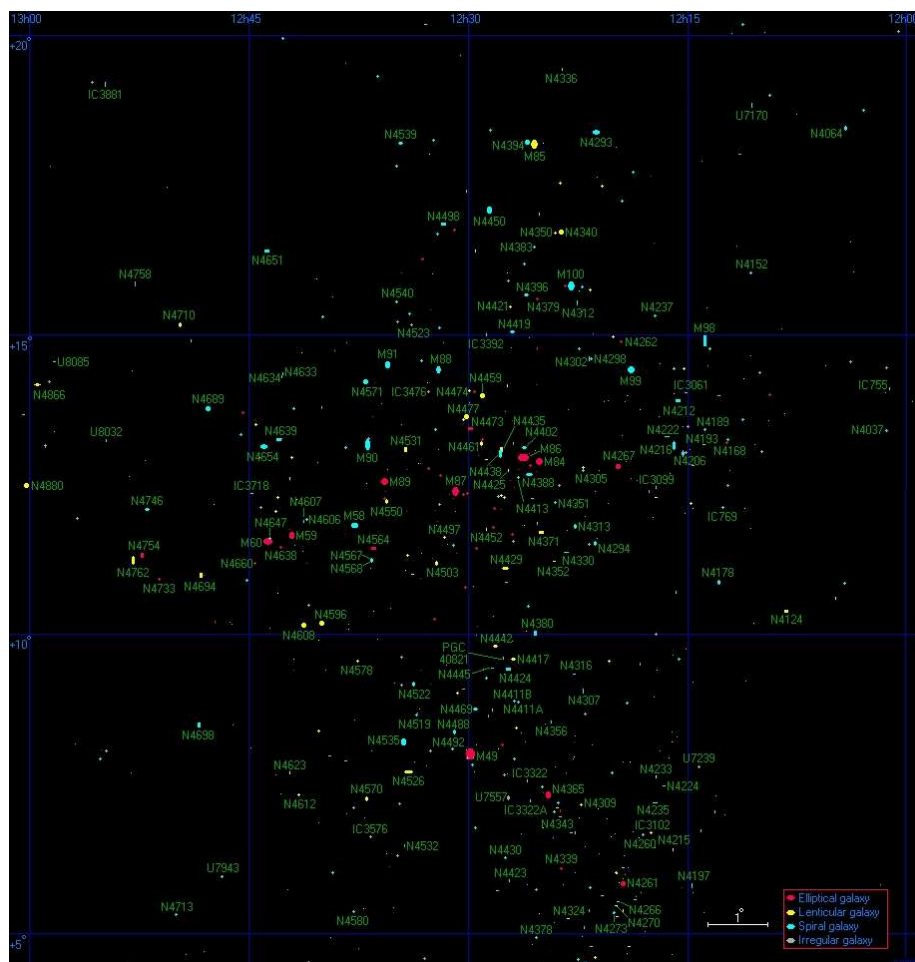
Virgo je primer *neppravilne jate*, za katere je značilno, da nimajo definiranega jedra, vse so približno enako velike, njihove mase pa segajo od  $10^{12}$  do  $10^{14} M_{\odot}$ .

Jato sestavljajo večinoma spiralne in eliptične galaksije, pri čemer velja, da se eliptične nahajajo skoncentrirane v središču, obdajajo pa jih spiralne.



Slika 3: Središče jate

Slika 4: Najsvetlejši član – M87, z aktivnim jedrom, iz katerega izhaja curek delcev

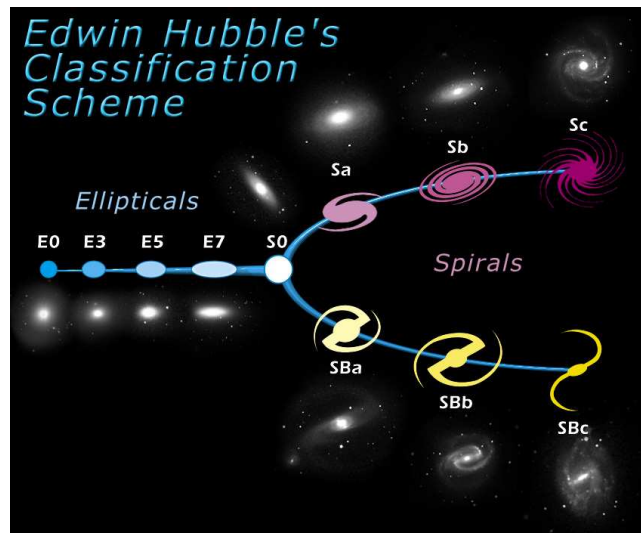


Slika 5: Porazdelitev najsvetlejših galaksij v centru jate – z rdečo so označene eliptične, z modro pa spiralne.

## 2 Teoretično ozadje

Na podlagi dolgoletnih opazovanj je Hubble ugotovil, da oblika galaksij ni povsem naključna. Galaksije je razvrstil v štiri osnovne skupine:

- eliptične galaksije,
- spiralne galaksije,
- spiralne galaksije s prečko,
- nepravilne galaksije.



Slika 6: Hubblova klasifikacijska shema galaksij

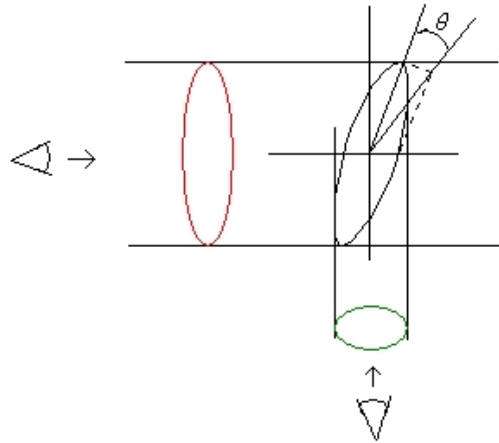
*Eliptične galaksije* imajo obliko rahlo sploščenih elips s površinsko svetlostjo, ki zvezno raste od roba proti središču [2]. Pomembnejši parameter, ki ga lahko določimo temu tipu galaksij, je njihova eliptičnost. Enotne definicije za eliptičnost ni, zato smo se odločili za najpogostejšo:

$$e = \left(1 - \frac{b}{a}\right), \quad (1)$$

kjer sta  $a$  in  $b$  velika in mala polos galaksije. Glede na obliko so jih razvrstili podrobneje na tipe  $En$ , in sicer od  $E0$  do  $E9$ , kjer številka  $n$  meri stopnjo eliptičnosti:

$$n = 10 \left(1 - \frac{b}{a}\right) = 10e. \quad (2)$$

Večja je številka, bolj eliptična je galaksija. To pomeni, da so galaksije z oznako  $E0$  bolj okrogle,  $E9$  pa izrazito eliptične. Tipa  $E8$  in  $E9$  še nikoli nista bila opažena v naravi, saj naj bi bile take galaksije nestabilne [10]. Ker pri eliptičnih galaksijah ni površinskih podrobnosti, s katerimi bi ugotovili njen naklon, opredeljuje njeno eliptičnost zgolj projekcija na smer pogleda in ne njene dejanske dimenzije v lastnem sistemu [4] (Slika 7).



Slika 7: Eliptičnost, ki jo izmerimo, je eliptičnost projekcije galaksije na naše oko.

*Spiralne galaksije* spoznamo po podolgovatih rokavih, ki izhajajo iz svetlega jedra. Rokavi ležijo v tankem ravninskem disku, kjer nastaja večina novih zvezd, medtem ko osrednje območje nima prahu, je rdečkaste barve in odebeljene oblike [2]. Spiralne galaksije so veliko bolj razpršene in se tudi hitreje vrtijo od eliptičnih galaksij [3].

Tako kot eliptične galaksije so tudi spiralne podrobneje razvrstili: *Sa* imajo veliko jedro in tesno ovite rokave, *Sb* imajo manjše jedro in bolj ohlapno ovite rokave, medtem ko imajo *Sc* majhno jedro in razpuščene rokave.

Spiralne galaksije so zaradi svoje razpoznavne oblike in bolj ali manj pravilne strukture dobra vzorčna telesa, saj lahko precej natančno določimo njihove osnovne geometrijske lastnosti. Če ima galaksija eliptičnost blizu 0, to pomeni, da nam kaže obraz (*face on*), če pa ima eliptičnost blizu 1, potem jo vidimo z roba (*edge-on*). Zelo malo opazovanih galaksij ima eliptičnost večjo od 0.8. To ne pomeni, da takih galaksij ni, ampak zgolj, da jih zaradi selekcijskega pravila ne vidimo. Zaradi njihovega položaja glede na smer pogleda so te galaksije temnejše, saj vidimo le njihove diske, ki pogosto vsebujejo tudi veliko prahu.

*Nepravilne galaksije* nimajo nobene izrazite geometrijske oblike in so ponavadi manjše ter temnejše.

## 2.1 Model porazdelitve

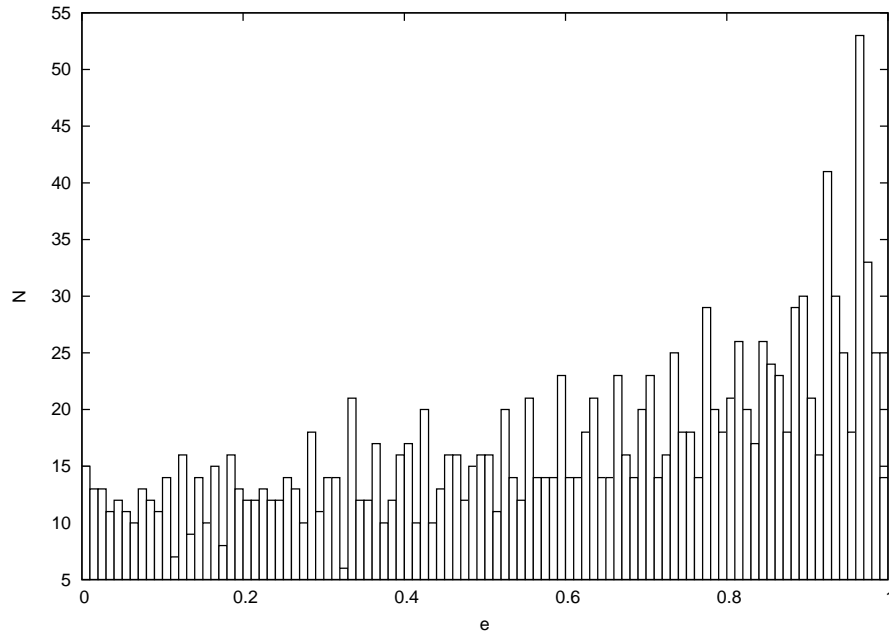
Kozmološke raziskave kažejo, da je vesolje na veliki skali *homogeno* in *izotropno*. Izotropno pomeni, da vesolje izgleda v vseh smereh enako, homogeno pa, da vesolje vidimo kot enotno strukturo brez izrazitosti. Zanimalo nas je, ali se kozmološko načelo pozna tudi znotraj jate galaksij.

Ob predpostavki izotropnosti pričakujemo, da je porazdelitev galaksij po naklonskih kotih enakomerna. Odgovor na vprašanje o porazdelitvi po eliptičnosti pa ni tako samoumeven, saj eliptičnosti na prvi pogled ne moremo povezati s kozmološkim načelom. Pri izdelavi modela oziroma simulacije smo se oprli na predpostavko, da je porazdelitev po naklonskem kotu enakomerna. Predpostavili smo še, da so vse galaksije v resnici okrogle ter da je eliptičnost potemtakem



le posledica različnih naklonskih kotov, pod katerimi jih gledamo. Preizkusili smo dva tipa modelov (v obeh primerih je koordinatni sistem orientiran z  $z$  osjo pravokotno proti opazovalcu):

- **'2D'** Tu smo predpostavili, da se galaksije vrtijo le okrog osi  $x$ , pri čemer daljša polos elipse ostane enaka polmeru kroga, krajša pa je enaka  $r \sin \varphi$ . Eliptičnost izračunamo po enačbi 1.
- **'3D'** Ker je prejšnja predpostavka malce površna, smo pri drugem modelu upoštevali, da lahko različne vrednosti eliptičnosti dobimo pri vrtenju okrog osi  $x$  za kot  $\varphi$  ter vrtenju okrog osi  $y$  za kot  $\theta$ . Pri tem velika polos ostane še vedno enaka  $r$ , mala pa se skrajša. Enačbo, ki napove natančno obnašanje dolžine male polosi, izračunamo na naslednji način: V vektorski obliki zapišemo enačbo kroga ter ga s pomočjo dveh rotacijskih matrik zavrtimo za poljubna kota  $\varphi$  in  $\theta$ . Nato določimo projekcijo dobljenega kroga na izvorno ravnino, pri čemer dobimo enačbo elipse. To enačbo odvajamo po kotu, s čimer iščemo ekstreme - veliko in malo polos.



Slika 8: Histogram, narisan s pomočjo simulacije, kjer smo uporabili enačbe iz '3D' modela

## 2.2 Relaciji Tully-Fisher in Faber-Jackson

Spiralne galaksije z maso  $M$  in radijem  $R$  imajo pri dovolj velikih radijih približno konstantne rotacijske hitrosti  $v$ . Velja

$$M = \frac{v^2 R}{G}.$$

$G$  je gravitacijska konstanta. Če predpostavimo, da je razmerje med maso galaksije in njenim izsevom  $\frac{M}{L} \equiv \frac{1}{C_{ML}}$  enako za vse spiralne galaksije, sledi

$$L = C_{ML} \frac{v^2 R}{G}.$$

Groba ocena, da imajo vse spiralne galaksije v središču enako površinsko svetlost, nam da  $\frac{L}{R^2} \equiv C_{SB}$ . Označimo  $\frac{C_{ML}^2}{C_{SB}} = C$ . Potem je

$$L = \frac{C_{ML}^2 v^4}{C_{SB} G^2} = C v^4. \quad (3)$$

Zadnji izraz  $L \propto v^4$  je poznan kot *relacija Tully-Fisher* [12].

Ob enakih predpostavkah za eliptične galaksije dobimo *relacijo Faber-Jackson* [12]:

$$L \propto \sigma_v^4, \quad (4)$$

kjer je  $\sigma_v$  povprečna disperzija radialnih hitrosti zvezd v galaksiji.

Če je porazdelitev hitrosti zvezd  $v_e$  v eliptični galaksiji izotropna, potem velja [12]:

$$\frac{v_e}{\sigma_v} \approx \sqrt{\frac{e}{1-e}}. \quad (5)$$

### 2.3 Relacija tip-gostota

Ob združitvi manjših eliptičnih in spiralnih galaksij nastanejo večje eliptične galaksije. Ker so interakcije verjetnejše na območjih z večjo gostoto galaksij (center jate), tam prevladujejo eliptične galaksije, z oddaljevanjem od centra jate pa narašča delež spiralnih galaksij ("*relacija tip-gostota*") [9].

## 3 Opazovanje

Pri izbiri galaksij in območja slikanja smo si pomagali s katalogom *Hyperleda* [5], kjer smo na podlagi magnitud izbrali galaksije, primerne za opazovanje, pri čemer smo se osredotočili na središče jate ( $12.3^h \leq \alpha \leq 12.6^h$  in  $10.7^\circ \leq \delta \leq 14.0^\circ$ ).

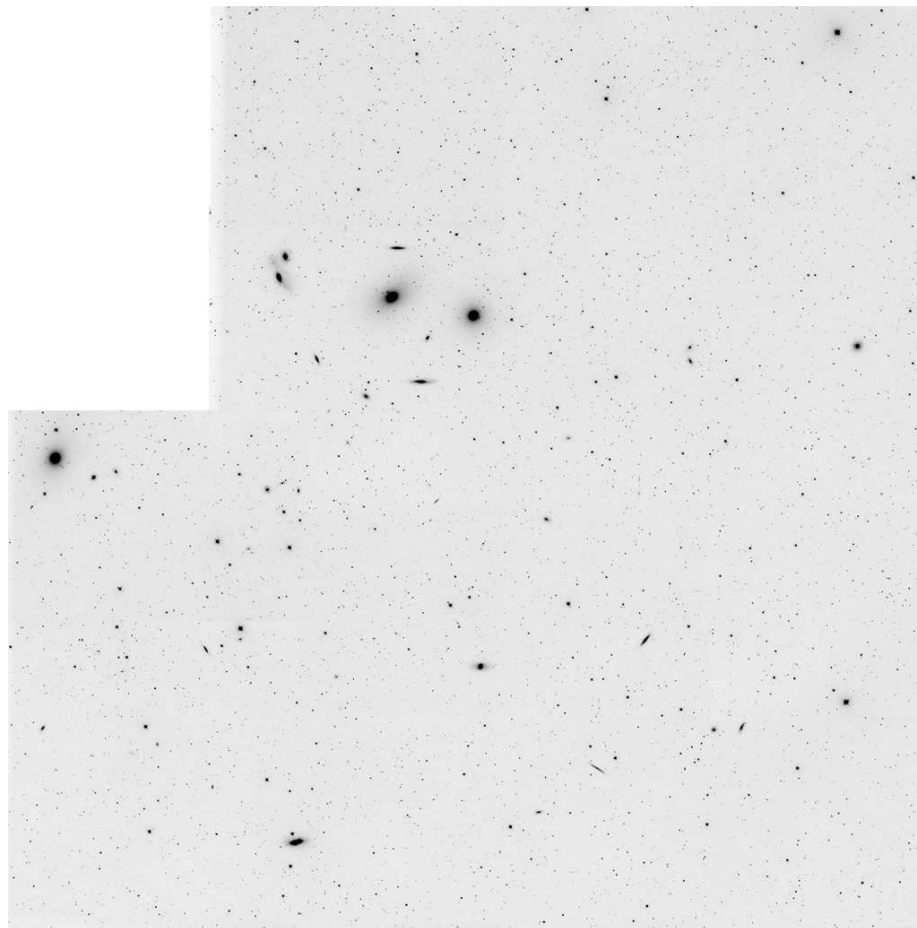
Opazovanja in posnetke smo opravili 7.4.2008 s pomočjo robotskega teleskopa Cichocki na observatoriju Črni Vrh (premer je  $60\text{cm}$ , gorišče je  $\sim 2\text{m}$ ). Posneli smo  $4 \times 4$  polja (vsako polje široko  $42'$ ), ekspozicija posamezne slike  $40.25\text{s}$ , opravili smo štiri ponovitve. Pred snemanjem je bil narejen avtofokus, v času opazovanja je bil seeing  $1.5''$ .

## 4 Obdelava podatkov

Fotografijam galaksij, ki smo jih prejeli, so bile že avtomatsko odštete napake zaradi termičnega šuma in neidealnosti CCD senzorja (t.i. *dark, bias in flat* posnetki). Da bi šum dodatno zmanjšali, smo po 4 fotografije istega polja sešteli v eno sliko s programom *sumimage.sh*.

Fotografije galaksij smo obdelali s programom *IRAF*. Po zahtevah programa smo najprej pretvorili nebesne koordinate iz kataloga v logične:

```
ecl> wcsctran imeslike vhodni_katalog izhodni_katalog world logical
```



Slika 9: Mozaik naših posnetkov, sestavljen iz 14 posameznih slik. Slika, centrirana na *središče jate Virgo*, zajema polje z  $12.3^h \leq \alpha \leq 12.6^h$  in  $10.7^\circ \leq \delta \leq 14.0^\circ$ . Na njej je 326 eliptičnih in 299 spiralnih galaksij iz kataloga *Hyperleda* [5]. Izmed najbolj znanih galaksij so na sliki eliptična galaksija *M87* (na levem robu), na sredini zgoraj pa sta eliptični galaksiji *M86* in *M84*.

Tako smo dobili katalog galaksij s koordinatami v piksljih na sliki. Naklonske kote in eliptičnosti smo izmerili s paketom

`obsutil> psfmeasure,`

ki nam vrne koordinate, magnitudo, FWHM, eliptičnost in naklonski kot objekta.

Eliptičnost je v *IRAF-u* definirana kot

$$e_{IRAF} = \frac{a - b}{a + b}, \quad (6)$$

kjer je  $a$  velika polos in  $b$  mala polos elipse. Ker glavne osi projekcij galaksij na sliki v splošnem niso poravnane z  $x$  in  $y$  osjo koordinatnega sistema, program problem reši s standardno deviacijo.

Parametrizacija za elipso, zarotirano za kot  $\varphi$  glede na abscisno os, je

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} a \cos t \\ b \sin t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \cos t \\ b \sin t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \cos \varphi \cos t - b \sin \varphi \sin t \\ a \sin \varphi \cos t + b \cos \varphi \sin t \end{bmatrix},$$

kjer je  $R$  rotacijska matrika,  $t \in [0, 2\pi]$ . Z  $x$  in  $y$  označimo oddaljenosti od centra galaksije. Standardni deviaciji  $\sigma_x^2$  v  $x$  smeri in  $\sigma_y^2$  v  $y$  smeri sta:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 = \overline{x^2} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} x^2 dt = \frac{1}{2} (a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi) \\ \sigma_y^2 = \overline{y^2} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} y^2 dt = \frac{1}{2} (a^2 \sin^2 \varphi + b^2 \cos^2 \varphi), \end{aligned}$$

mešani moment pa

$$\sigma_{xy}^2 = \overline{xy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} xy dt = \frac{1}{4} (a^2 - b^2) \sin 2\varphi.$$

Naj bo

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \cos 2\varphi \\ M_2 &= \frac{2\sigma_{xy}^2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \frac{a^2 - b^2}{a^2 + b^2} \sin 2\varphi. \end{aligned}$$

Izračunamo eliptičnost

$$\begin{aligned} M_1^2 + M_2^2 &= \frac{(a^2 - b^2)^2}{(a^2 + b^2)^2} \\ e_{IRAF} &= \sqrt{M_1^2 + M_2^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

in naklonski kot galaksije

$$\begin{aligned} \frac{M_2}{M_1} &= \tan 2\varphi \\ \varphi &= \frac{1}{2} \arctan \frac{M_2}{M_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Program pri računanju upošteva utež jakosti svetlobnega toka. Standardno deviacijo z utežjo izračuna tako, da po pikslah sešteva produkt jakosti svetlobnega toka in kvadrata odmika piksla od centra galaksije. Vsota teče znotraj posameznih *isophot*, ki so v našem primeru krogi s središčem v centru galaksije. Na koncu vsoto še normira:

$$\begin{aligned}\sigma_x^2 &= \frac{\sum(I - B)x^2}{\sum(I - B)} \\ \sigma_y^2 &= \frac{\sum(I - B)y^2}{\sum(I - B)} \\ \sigma_{xy}^2 &= \frac{\sum(I - B)xy}{\sum(I - B)},\end{aligned}$$

kjer je  $I$  svetlost pixla in  $B$  svetlost ozadja. Naklonski kot  $\varphi$  je merjen od  $x$  osi v pozitivni smeri, rezultat pa je podan v kotnih stopinjah [6].

Naša definicija eliptičnosti je  $e = (1 - \frac{b}{a})$  (Enačba 1),  $IRAF$  pa nam poda  $e_{IRAF} = \frac{a-b}{a+b}$  (Enačba 6). Izraz preuredimo:

$$\begin{aligned}e_{IRAF} &= \frac{a - b}{a + b} = \frac{1 - \frac{b}{a}}{1 + \frac{b}{a}} \\ \frac{b}{a} &= \frac{1 - e_{IRAF}}{1 + e_{IRAF}}.\end{aligned}$$

Sledi:

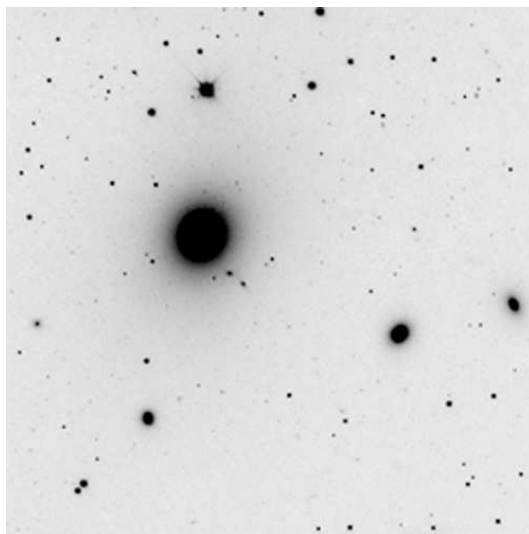
$$e = \frac{2e_{IRAF}}{1 + e_{IRAF}}. \quad (9)$$

Slike smo analizirali s *psfmeasure* z naslednjimi parametri:

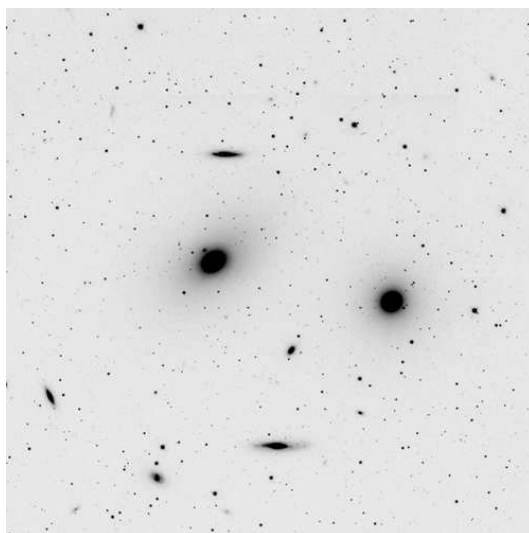
radius = 15 - radij kroga (v pikslah), znotraj katerega seštevamo iterati = 3 - število iteracij za dani radij,

ostali parametri pa so bili že prednastavljeni. Obdelava je potekala avtomatsko, za tri najsvetlejšje eliptične galaksije (*M87*, *M86 in M84*) pa smo meritve opravili tudi ročno (Slika 10 in 11).

Število spiralnih galaksij, ki smo jih uporabili za izračun, je  $N_s = 299$ , število eliptičnih galaksij  $N_e = 326$ , število vseh galaksij pa je  $N_{tot} = N_s + N_e = 625$ .



Slika 10: Eliptična galaksija *M87*:  $\varphi = 71^\circ$ ,  $e_{IRAF} = 0.03$ ,  $e = 0.6$ , tip: *E1*. V literaturi [8] je označena kot tip *E0* oz. *E1*.



Slika 11: *Levo*: eliptična galaksija *M86*:  $\varphi = 29^\circ$ ,  $e_{IRAF} = 0.11$ ,  $e = 2.0$ , tip: *E2*. V literaturi [8]: tip *E3* oz. *S0*. *Desno*: eliptična galaksija *M84*:  $\varphi = 34^\circ$ ,  $e_{IRAF} = 0.09$ ,  $e = 1.7$ , tip: *E2*. V literaturi [8]: tip *E1* oz. *S0*.

## 5 Rezultati

Na podlagi podatkov iz *IRAF-a* smo rezultate prikazali v obliki histograma, pri čemer smo posebej obravnavali spiralne in eliptične galaksije ter skupne podatke. Zanimalo nas je, kateri porazdelitvi naše eksperimentalne meritve ustrezajo, pri čemer smo pričakovali enakomerno porazdelitev pri porazdelitvi po naklonskem kotu in neenakomerno porazdelitev po eliptičnosti z ozirom na naš model. Pokazati smo torej hoteli, da je porazdelitev po kotu naključna, medtem ko tista po eliptičnosti ni.

Za potrditev hipoteze smo uporabili *Pearsonov  $\chi^2$  test*:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(N_i - \bar{N})^2}{\sigma^2}, \quad (10)$$

kjer je  $k$  število intervalov,  $N_i$  število meritev znotraj intervala,  $\bar{N}$  izmerjeno povprečno število meritev znotraj intervala,  $\sigma$  pa standardna deviacija. Vpeljemo indeks  $I$ :

$$I = \frac{\chi^2}{DOF \cdot k}. \quad (11)$$

Če je  $I \sim 1$  (pri čemer je *DOF* (degree of freedom) število prostih parametrov hipotetične porazdelitve), potem naša hipoteza v okviru napake velja. Pri vsaki porazdelitvi smo si narisali še potek funkcije  $I(\bar{N})$  ter poiskali njen minimum (oz. optimalno vrednost povprečja), s čimer smo tudi eksperimentalno preverili napako meritev.

Število intervalov za porazdelitev po naklonskem kotu glavne osi je  $k = 180$ , pri porazdelitvi po eliptičnosti pa  $k = 100$ .

### 5.1 Porazdelitev galaksij po naklonskem kotu glavne osi

Pri obdelavi smo kot  $0^\circ$  izpustili, ker je program *IRAF* galaksije z majhnim *FWHM* (točkaste) označil kot okrogle (tip S0), kar je popačilo podatke.

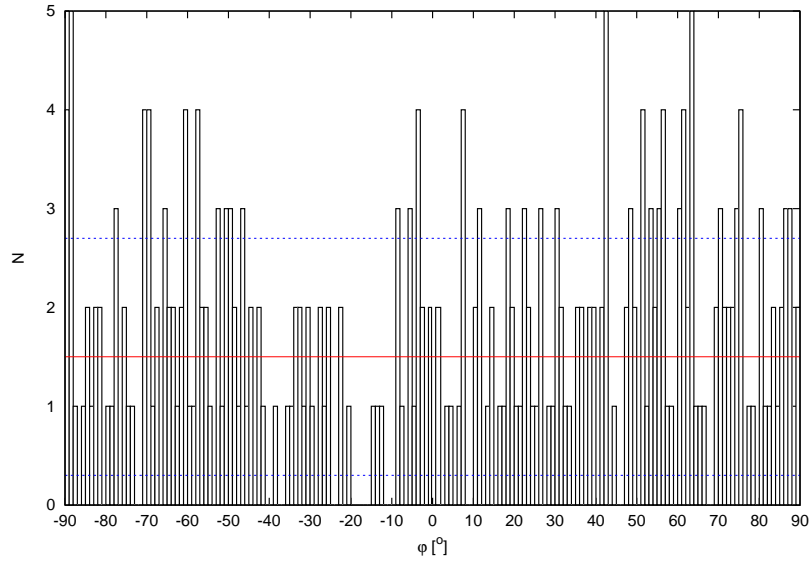
#### 5.1.1 Spiralne galaksije

Hipoteza: enakomerna porazdelitev:

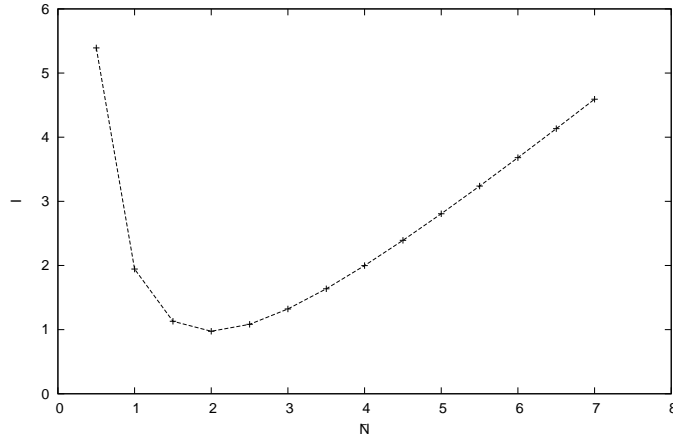
$$\bar{N} = 1.5 \pm 1.2$$

$$I = 1.13$$

Porazdelitev je enakomerna, rezultat pa se v okviru napake ujema s pričakovano vrednostjo. Na podlagi grafa (Slika 13) vidimo, da je optimalno povprečje  $\bar{N}_{opt} = 2.0$ , kar se od izmerjenega  $\bar{N} = 1.5 \pm 1.2$  razlikuje za 25%.



Slika 12: Število *spiralnih galaksij*  $N$  v danem intervalu v odvisnosti od naklonskega kota  $\varphi$ . Rdeča črta prikazuje povprečno število galaksij na interval  $\bar{N} = 1.5$ , modri črti pa napako  $\bar{N} \pm \Delta\bar{N}$ ,  $\Delta\bar{N} = 1.2$ .



Slika 13: Indeks  $I$  v odvisnosti od povprečnega števila meritev na interval  $\bar{N}$  za porazdelitev *spiralnih galaksij* po naklonskem kotu. Optimalna vrednost je pri  $\bar{N}_{opt} = 2.0$ .

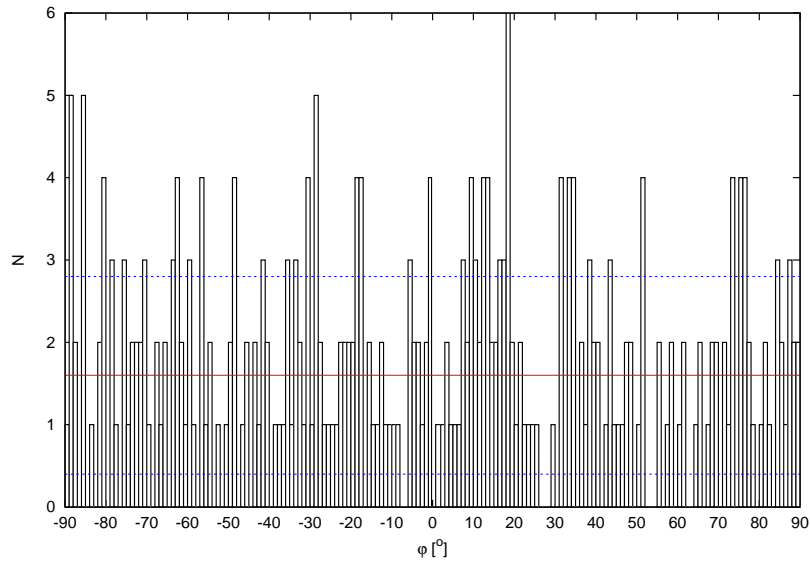
### 5.1.2 Eliptične galaksije

Hipoteza: enakomerna porazdelitev:

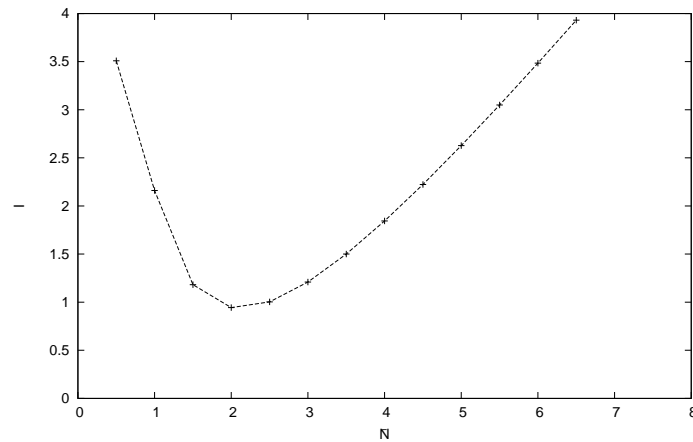
$$\bar{N} = 1.6 \pm 1.2$$

$$I = 1.07$$





Slika 14: Število *eliptičnih galaksij*  $N$  v danem intervalu v odvisnosti od naklonskega kota  $\varphi$ . Rdeča črta prikazuje povprečno število galaksij na interval  $\bar{N} = 1.6$ , modri črti pa napako  $\bar{N} \pm \Delta\bar{N}$ ,  $\Delta\bar{N} = 1.2$ .



Slika 15: Indeks  $I$  v odvisnosti od povprečnega števila meritev na interval  $\bar{N}$  za porazdelitev *eliptičnih galaksij* po naklonskem kotu. Minimum je pri  $\bar{N}_{opt} = 2$ .

Porazdelitev je enakomerna, eksperimentalna vrednost povprečja  $\bar{N} = 1.6 \pm 1.2$  se za 20% razlikuje od optimalne ( $\bar{N}_{opt} = 2$ ) in je še vedno v okviru napake.

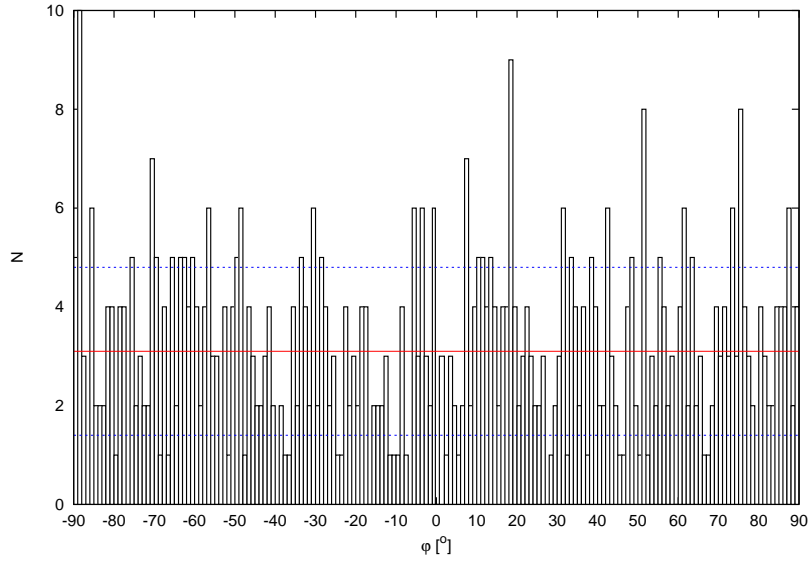
### 5.1.3 Vse galaksije

Hipoteza: enakomerna porazdelitev:

$$\bar{N} = 3.1 \pm 1.7$$

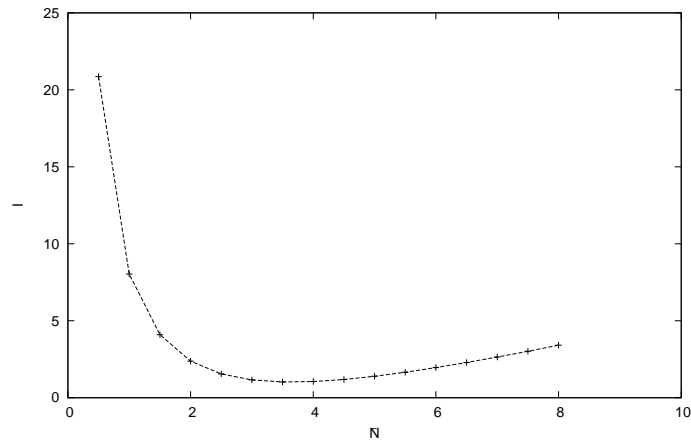
$$I = 1.02$$

Ker sta obe delni porazdelitvi enakomerni, ni razloga zakaj skupna ne bi bila.



Slika 16: Število *vseh galaksij*  $N$  v danem intervalu v odvisnosti od naklonskega kota  $\varphi$ . Rdeča črta prikazuje povprečno število galaksij na interval  $\bar{N} = 3.1$ , modri črti pa napako  $\bar{N} \pm \Delta\bar{N}$ ,  $\Delta\bar{N} = 1.7$ .

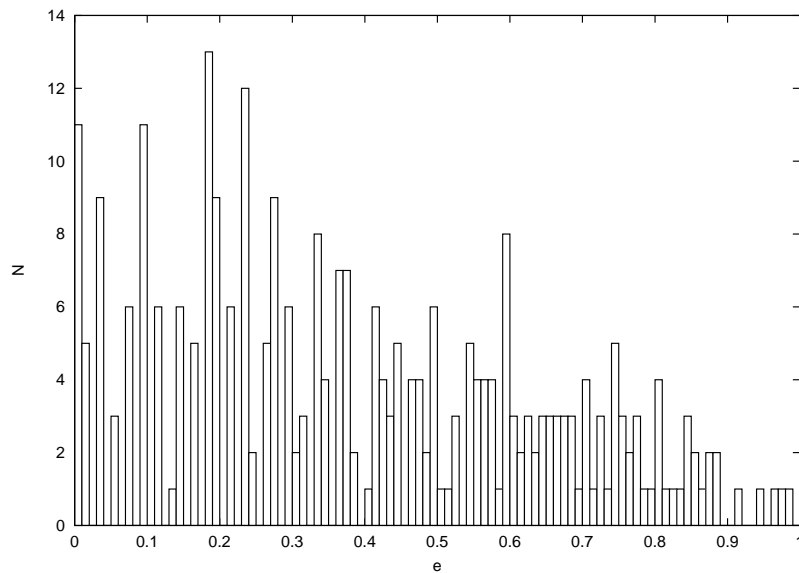
Rezultat se tudi tokrat z optimalnim ( $\bar{N}_{opt} = 3.6$ ) ujema v okviru ocenjene napake, razlikujeta se za 14%. Glede na naše rezultate torej lahko trdimo, da je porazdelitev po naklonskem kotu naključna. Hipotezo bi lahko natančneje preverili še z variiranjem intervala  $k$ .



Slika 17: Indeks  $I$  v odvisnosti od povprečnega števila meritev na interval  $\bar{N}$  za porazdelitev *vseh galaksij* po naklonskem kotu. Optimalna vrednost je  $\bar{N}_{opt} = 3.6$ .

## 5.2 Porazdelitev galaksij po eliptičnosti

### 5.2.1 Spiralne galaksije

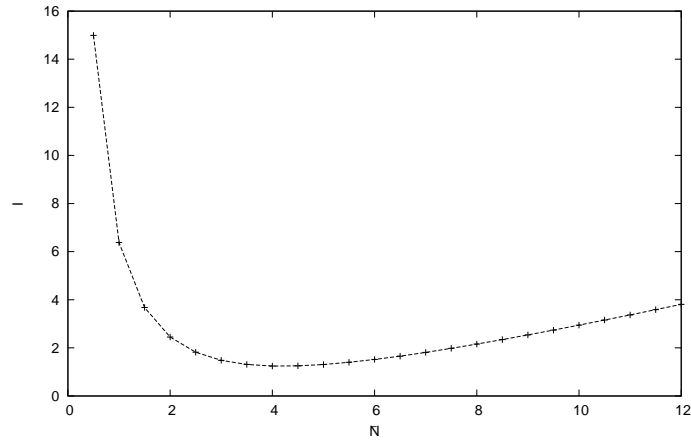


Slika 18: Število *spiralnih galaksij*  $N$  v danem intervalu v odvisnosti od eliptičnosti  $e$ . Zaradi selekcijskega pravila ima malo galaksij eliptičnost večjo od 0.8.

Hipoteza: enakomerna porazdelitev:

$$\bar{N} = 2.9 \pm 1.7$$

$$I = 1.5$$

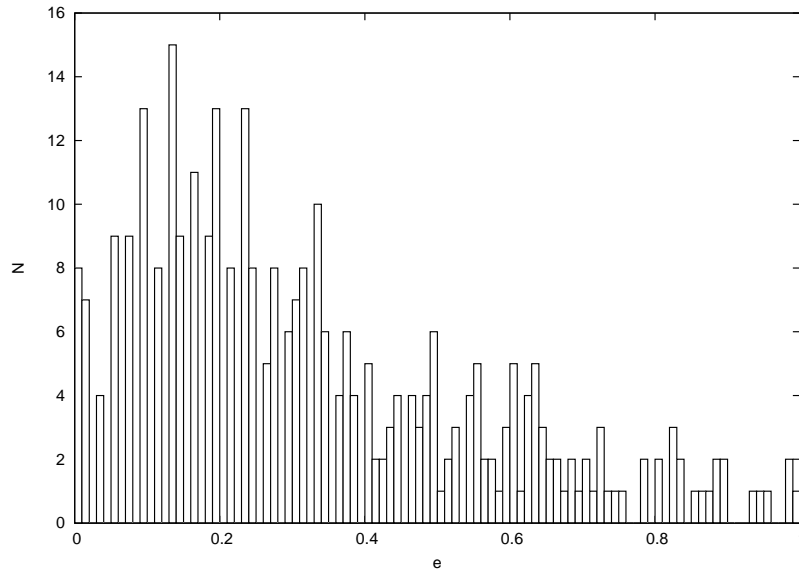


Slika 19: Indeks  $I$  v odvisnosti od povprečnega števila meritev na interval  $\bar{N}$  za porazdelitev *spiralnih galaksij* po eliptičnosti.  $\bar{N}_{opt} = 4.0$ .

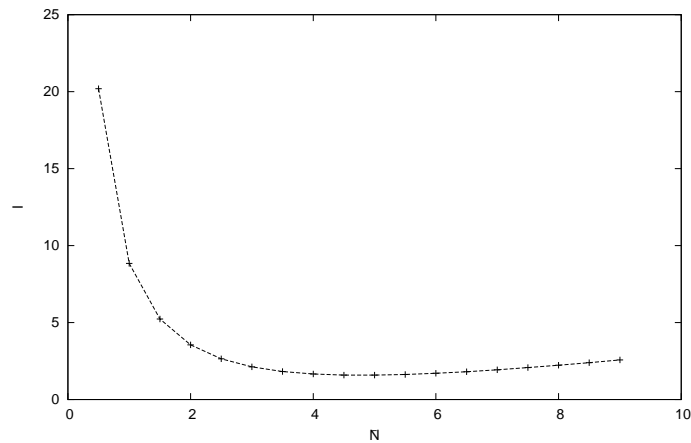
Histogram že na prvi pogled ne deluje enakomerno, kar potrdimo tudi s  $\chi^2$  testom (napaka je kar 30%). Z gotovostjo lahko trdimo, da porazdelitev spiralnih galaksij po eliptičnosti ni naključna.

### 5.2.2 Eliptične galaksije

Na podlagi rezultatov za spiralne galaksije sklepamo, da tudi eliptične niso porazdeljene enakomerno, kar potrdimo s  $\chi^2$  testom ( $I = 2.0$ , napaka je 33%). Tudi ta razporeditev ni naključna.

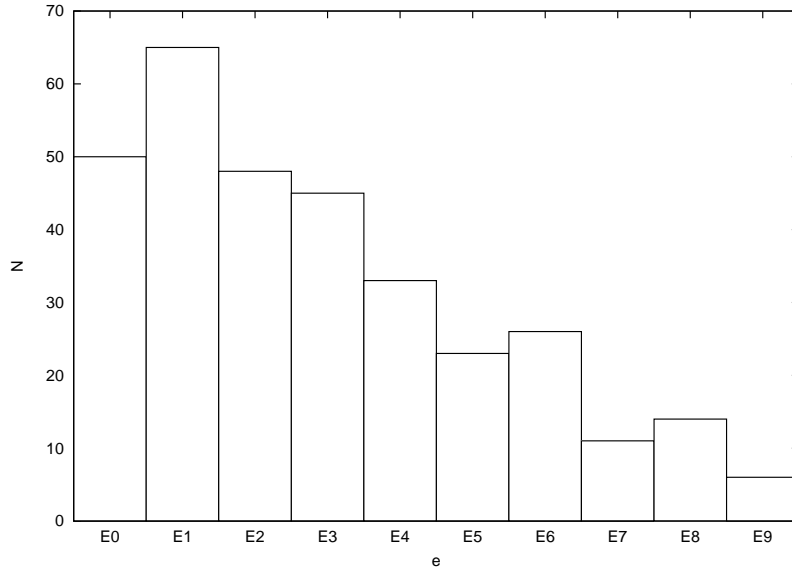


Slika 20: Število *eliptičnih galaksij*  $N$  v danem intervalu v odvisnosti od eliptičnosti  $e$ .



Slika 21: Indeks  $I$  v odvisnosti od povprečnega števila meritev na interval  $\bar{N}$  za porazdelitev *eliptičnih galaksij* po eliptičnosti.  $\bar{N}_{opt} = 4.8$ .

Poleg porazdelitve galaksij po eliptičnosti smo informativno izdelali še histogram porazdelitve galaksij po tipu. Test  $\chi^2$  zaradi premalo intervalov ni mogoč, vendar na grafu 22 jasno vidimo, da porazdelitev ni enakomerna. S tem grafom tudi potrdimo, da izbira intervala  $k$  ne vpliva bistveno na obliko grafa.



Slika 22: Porazdelitev *eliptičnih* galaksij po tipu  $En$  ni enakomerna. Tipa  $E8$  in  $E9$  v naravi ne obstajata [10], vendar so naši rezultati obremenjeni z napakami.

### 5.2.3 Primerjava meritev z izdelanim modelom

'2D' model se je že v začetku izkazal za zelo pomankljivega, saj je napovedal dve singularnosti in izmerke zunaj definicijskega območja. Zaradi navedenih razlogov smo ga zavrgli in natančneje obdelali '3D' model. Tudi slednji se ni izkazal za ustreznega, saj očitno kaže približno zrcaljeno sliko izmerkov. Ker eksperimentalnim rezultatom zaupamo bolj kot teoretičnim napovedim, smo prisiljeni ovreči oba modela, saj smo očitno dejansko stanje v vesolju preveč poenostavili.

Precej večje ujemanje z izmerki pa dobimo, če upoštevamo relaciji Tully-Fisher oz. Faber-Jackson. Relaciji nam podajata zvezi  $L \propto v^4$  oz.  $L \propto \sigma_v^4$ . Ker  $v$  in  $\sigma_v$  ne poznamo, uporabimo ustrezne spremenljivke. Pišemo:

$$L = kV^4. \quad (12)$$

Naj bo  $m = m' - 2.5 \log_{10} \frac{j_1}{j_2}$  magnituda galaksije. Če upoštevamo zgornjo enačbo in vsoto neznanih količin v enačbi za  $m$  označimo z  $a$ , dobimo

$$V = 10^{0.1(m-a)}. \quad (13)$$

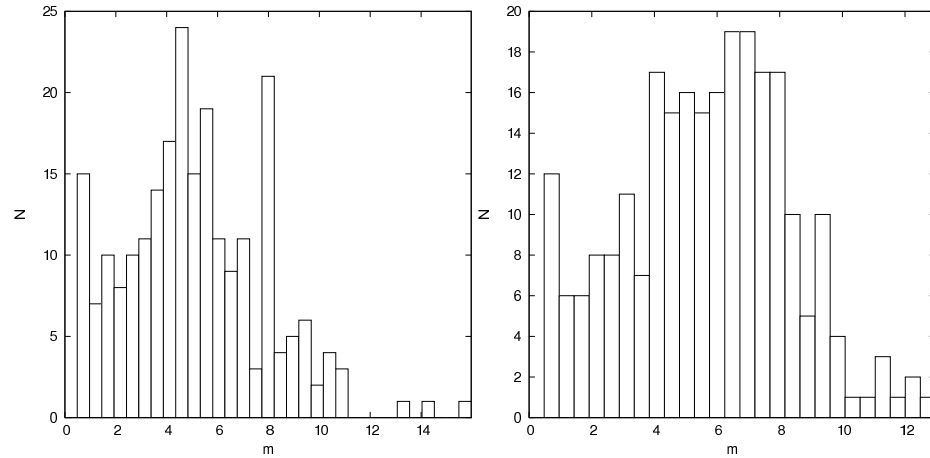
Vse galaksije so članice jate, oddaljenost jate pa je mnogo večja kot razdalja med njimi. Zato privzamemo, da so vse galaksije na približno enaki oddaljenosti od nas. V zvezi  $\frac{v_e}{\sigma_v} \approx \sqrt{\frac{e}{1-e}}$  (enačba 5) prav tako ne poznamo  $\frac{v_e}{\sigma_v}$ , zato to označimo z  $bV$ , kjer je  $b$  primerna konstanta. Tako sledi

$$\sqrt{\frac{e}{1-e}} = \frac{1}{b} 10^{0.1(m-a)} \quad (14)$$

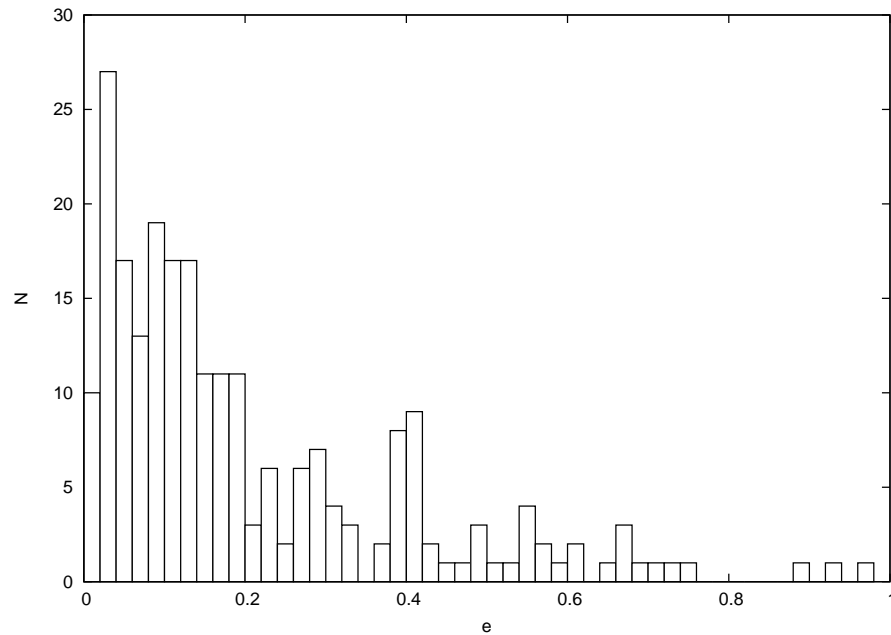
in

$$e = \frac{1}{\frac{1}{b^2} 10^{-0.2(m-a)} + 1}. \quad (15)$$

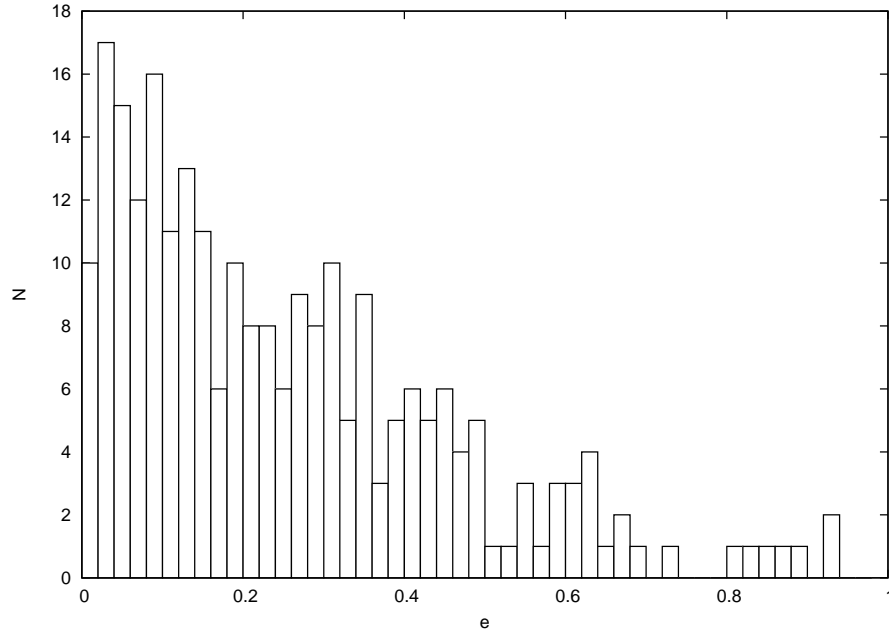
V enačbo smo vstavili magnitude galaksij, izmerjene v *IRAF-u*. Primerna izbira konstant  $a$  in  $b$  nam da porazdelitve, podobne našim meritvam, vendar primerjava parametrov z realnimi ocenami zanje ni mogoča zaradi preveč neznanih količin. Tako naše grafe podajamo le kot zanimivost.



Slika 23: Porazdelitev galaksij po magnitudah za spiralne (*levo*) in eliptične galaksije (*desno*). Magnitude so instrumentalne in niso umerjene.



Slika 24: Porazdelitev *spiralnih galaksij* po eliptičnosti, izračunani po enačbi 15.  $a = 8.3$ ,  $b = 0.94$ .



Slika 25: Porazdelitev *eliptičnih galaksij* po eliptičnosti, izračunani po enačbi 15.  $a = 8.3$ ,  $b = 0.88$ .

### 5.3 Relacija "tip-gostota" (*morphology-density relation*)

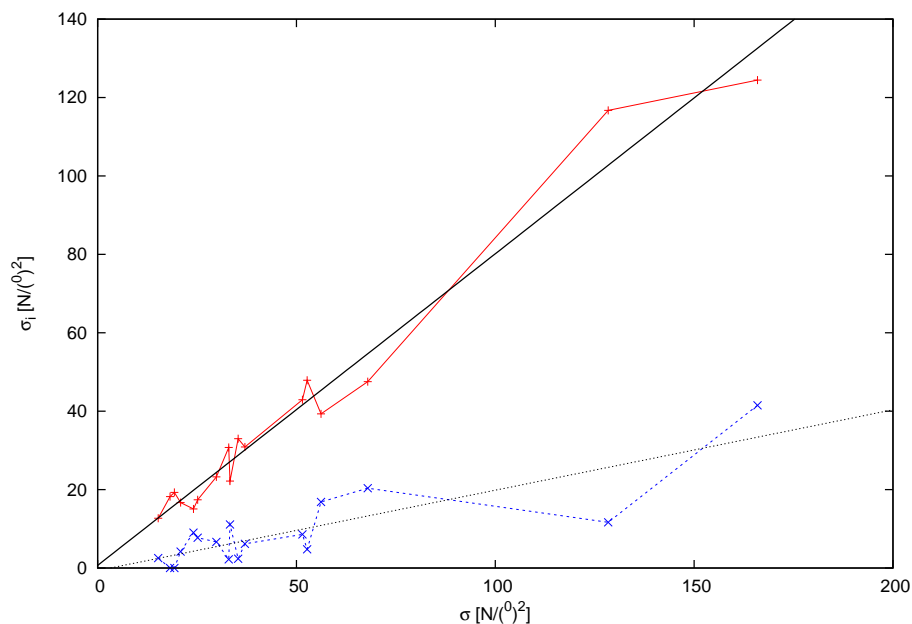
Izračunali smo površinsko gostoto  $\sigma(r)$  eliptičnih in spiralnih galaksij skupaj v jati

$$\sigma(r) = \frac{N_r}{\pi[(r + \Delta r)^2 - r^2]}, \quad (16)$$

kjer je  $r$  oddaljenost od centra jate,  $N_r$  pa število vseh galaksij znotraj kolobarja z radijema  $r, r + \Delta r$ . Zaradi simetrije smo računali le z galaksijami znotraj kroga s središčem v centru jate in z radijem  $R = 1.2^\circ$ .

Na grafu 26 opazimo, da je delna gostota eliptičnih galaksij večja od delne gostote spiralnih galaksij (razmerje naklonskih koeficientov prilagojenih premic je  $\sim 4$ ). Napake na grafu niso narisane, ker gre le za oceno, vendar lahko rečemo, da relacija tip-gostota drži.





Slika 26: Delna gostota eliptičnih galaksij (rdeča črta) in delna gostota spiralnih galaksij (modra črta) v odvisnosti od gostote jate  $\sigma$ . Gostota eliptičnih galaksij je  $\sim 4\times$  večja od gostote spiralnih galaksij.

## 6 Zaključek

V projektu smo prišli do pomembnih rezultatov, in sicer da je porazdelitev po naklonskem kotu glavne osi naključna ter da porazdelitev po eliptičnosti ni. Rezultati porazdelitve po naklonskem kotu kažejo, da je porazdelitev spiralnih in eliptičnih galaksij enakomerna z velikimi napakami ter odkloni od optimalne vrednosti, vendar je to posledica velike "raztreščenosti" podatkov. Pričakovano enakomerno porazdelitev nam je potrdil predvsem test  $\chi^2$ , saj je bil indeks  $I$  enak 1 v okviru nekaj %. Povprečne vrednosti pri porazdelitvi po eliptičnosti odstopajo od optimalnih  $\sim 30\%$ , torej porazdelitev ni enakomerna. Meritve se ne ujemajo z našim teoretičnim modelom. Kot zanimivost podajamo še hipotetično povezavo z relacijama Tully-Fisher in Faber-Jackson, pri čemer pa bi za potrditev potrebovali več podatkov.

Preverili smo relacijo tip-gostota in po naših ocenah sklepamo, da drži.

V nadaljevanju bi lahko razširili vzorec galaksij, da bi dobili natančnejše podatke, izmerili bi še porazdelitve v drugih jatah galaksij ter nato primerjali rezultate. Bolj podrobno bi lahko raziskali relacijo tip-gostota.

## Literatura

- [1] Virgo Cluster ([http://en.wikipedia.org/wiki/Virgo\\_Cluster](http://en.wikipedia.org/wiki/Virgo_Cluster)). 20.8.2008
- [2] Zwitter T. Pot skozi vesolje. Modrijan, Ljubljana 2002
- [3] Gomboc A. O galaksijah, Spika 1994
- [4] Rigutti M. Astronomija. 1996
- [5] Hyperleda I., G. Paturel, C. Petit, Ph. Prugniel, G. Theureau, J. Rousseau, M. Brouty, P. Dubois, L. Cambrésy. 2003
- [6] IRAF Help page for the psfmeasure task or topic (<http://iraf.noao.edu/scripts/irafhelp?psfmeasure>). 15.8.2008
- [7] Sparke L.S. and Gallagher III J.S. Galaxies in the Universe: An Introduction. Second Edition. Cambridge University Press, 2007
- [8] Students for the Exploration and Development of Space (<http://seds.org/>). 9.7.2008
- [9] Phillips, S. The Structure & Evolution of Galaxies. John Wiley & Sons Ltd, England 2005
- [10] Jones M.H., Lambourne R.J.A. An Introduction to Galaxies nad Cosmology. The Open University, Cambridge University Press. 2004
- [11] Simbad Astronomical Database (<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/simbasic?Ident=virgo+cluster&submit=SIMBAD+search>). 20.7.2008
- [12] Carroll B. W., D. A. Ostlie. An Introduction to Modern Astrophysics. Second Edition. Pearson Education Inc., Addison-Wesley, 2007