



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Master rad

Ispitivanje osetljivosti morfoloških parametara na različite faze interakcije galaksija

Mentor:

dr Nikola Jovančević

Student:

Nataša Pavlov

Novi Sad, oktobar 2022.

Ogromnu zahvalnost tokom čitavih studija dugujem prof. dr Tijani Prodanović na podršci i podsticaju za napretkom, na divnoj saradnji i korisnim komentarima. Ovom prilikom takođe želim da se zahvalim kolegama sa Katedre za astronomiju u Beogradu. Najvažnije, neizmerno se zahvaljujem porodici i prijateljima, a posebno dragim ljudima iz čitaonice.

“Equipped with his five senses, man explores the universe around him and calls the adventure Science.” - E. Hubble 1948.

Sadržaj

1 Uvod	1
2 Galaksije	2
2.1 Tipovi galaksija i Hablova morfologija	3
2.2 Galaksije duž EM spektra	6
2.3 Modeli evolucije galaksija	7
2.4 Udaljene galaksije	8
2.5 Sudari galaksija	10
2.5.1 Faze sudara	12
2.6 Fotometrija galaksija	13
2.6.1 Granice galaksije	14
2.6.2 Raspodela svetlosti u galaksiji	14
2.6.3 Rejljev kriterijum	16
3 Morfološki parametri	18
3.1 Parametri	18
3.1.1 Pikseli, granice i centri	18
3.1.2 Koncentracija C	18
3.1.3 Asimetrija A	19
3.1.4 Grudvičastost S	21
3.1.5 Džini koeficijent G	22

3.1.6	Moment M_{20}	25
3.2	Morfološki parametri galaksija - posmatranja i dosadašnji radovi	28
3.2.1	Vrednosti parametara za različite Hablove tipove	28
3.2.2	Korelacije parametara	32
3.3	Statmorph programski kod	43
4	Ispitivanje parametara modela galaksija u interakciji	45
4.1	Modeli pojedinačnih galaksija	45
4.2	Modeli galaksija u interakciji	47
4.2.1	Model <i>face-on</i> galaksija u interakciji	47
4.2.2	Model <i>edge-on</i> galaksija u interakciji	52
4.2.3	Model galaksija promenljive eliptičnosti u interakciji	57
4.2.4	Nove kombinacije parametara	63
5	Diskusija	66
6	Zaključak	68
Dodatak		69
Kod		69
Literatura		74
Biografija		75

1 Uvod

Tema ovog rada je deo aktuelne oblasti istraživanja galaksija u interakciji za koje se smatra da u značajnoj meri utiču na oblikovanje i razvoj, kako samih oblika galaksija, tako i uopšteno čitave materije od koje su sačinjene. Interakcije, koje predstavljaju uopštenje svih procesa od perturbacija galaktičke materije do sudara galaksija, mogu za svaki pojedinačni slučaj biti specifične jer zavise od mnogo parametara. Zbog toga se danas posvećuje mnogo vremena obradi posmatračkih podataka i simulacija ovih procesa kako bi se stekao uvid u neka pitanja: kako nastaju uređene galaktičke strukture poput spiralnih i eliptičnih galaksija; kako se menja izgled i struktura galaksija tokom i nakon interakcija; šta je dalja soubina ovakvih sistema; i napisletku i najvažnije: da li postoji neki rigorozan način na osnovu kojeg mogu da se razdvoje i klasifikuju galaksije koje jesu i one koje nisu u interakciji? Odgovore na ova pitanja mogu da pruže posmatranja na velikim rastojanjima, vrlo rano u svemiru. Međutim, pored toga što postoji tehnološki izazov pri posmatranju dalekih galaksija, ovi objekti izgledaju dosta drugačije od današnjih uređenih galaksija. Stoga se ovaj rad posvećuje jednoj od metoda pokušaja klasifikacije i distinkcije interagujućih od normalnih galaksija.

U prvom poglavlju ([Galaksije](#)) su izložene glavni tipovi galaksija, njihova klasifikacija, karakteristike i evolutivni tok sa fokusom na njihove međusobne interakcije. Uz to, date su i definicije u vezi fotometrije pojedinačnih galaksija. U drugom poglavlju ([Morfološki parametri](#)) su opisani morfološki parametri i njihove definicije. Potom će biti dat pregleda rada na temu klasifikacije i ispitivanja galaksija u parametraskom prostoru morfoloških parametara i međusobne korelacije morfoloških parametara za skupove galaksija iz posmatranja ili simulacija. Na kraju će biti opisan programski kod koji je razvijen u svrhu računanja ovih parametara. U trećem poglavlju ([Ispitivanje parametara modela galaksija u interakciji](#)) će biti izloženi različiti modeli sudarajućih galaksija za koje će odrediti morfološki parametri nakon čega će biti prikazani rezultati i njihova analiza.

U radu su, po potrebi, korišćeni termini iz engleskog jezika, u odustvu adekvatnih i zvučnih prevoda na srpski jezik. Takođe su, radi lakšeg snalaženja, podebljani termini koji će biti važni za ispitivanje modela galaksija.

2 Galaksije

Godine 1920. aktivno se vodila debata poznatija kao Velika debata oko toga šta predstavljaju izvesni rasprostrti i mutni spiralni objekti koji se vide na različitim lokacijama na noćnom nebu; deo naučnika je tvrdio da su to tipične magline poput oblaka gasa, dok je ostatak zastupao ideju o dalekim „ostrvskim univerzumima” tj. zasebnim galaksijama. Ova misterija biva konačno rešena 1923. godine kada je američki astronom Edvin Habl (eng. *Edwin Hubble (1889 - 1953)*) uspešno odredio rastojanje do objekta M31 na osnovu jednog tipa promenljivih zvezda, Cefeida. Procenjeno rastojanje je iznosilo 285kpc¹, za koje se ispostavilo da je mnogo veće od rastojanja dotad poznatih objekata na oko 10kpc. Sama činjenica postojanja drugih galaksija je idejno i teorijski proširila granice univerzuma, podstičući značajni naučni napredak u XX veku. Danas, skoro 100 godina nakon otkrića, se u vezi galaksija i dalje postavlja važna pitanja iz vangalaktičke astronomije, a sama oblast je nosilac aktuelnih istraživanja.



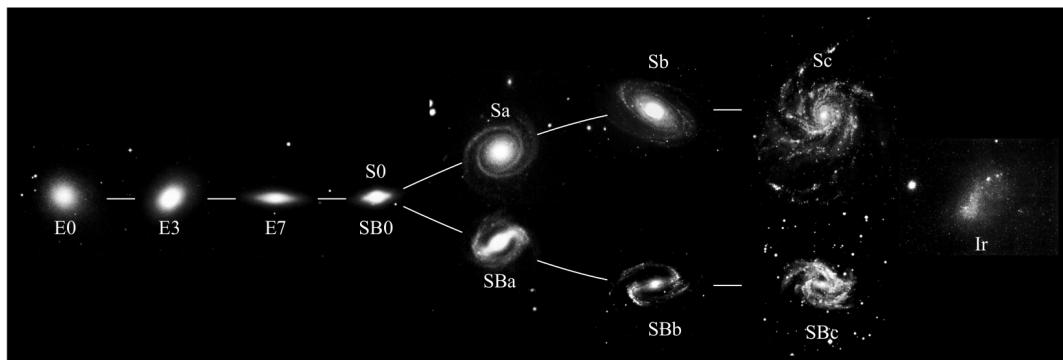
Slika 2.1: Edvin Habl.

¹Izraženo u tipičnim jedinicama u astronomiji, parsecima. Konverzija u svetlosne godine i kilometre je sledeća: $1\text{pc} = 3,26$ svetlosnih godina $= 3,086 \times 10^{13}\text{km}$.

2.1 Tipovi galaksija i Hablova morfologija

Od prvog otkrića posmatrane su i zabeležene mnoge galaksije za koje se ispostavilo da imaju dosta raznovrsan izgled. Galaksije se u opštem slučaju sastoje od centralnog ovala i haloa koje su strukturno i dinamički različite komponente. Dodatno, galaksije mogu imati prečage, spiralne grane i razne druge distiktne manje strukture. Upravo zbog njihove raznolikosti nametnula se prirodna potreba da se klasifikuju na određeni način. Prva takva značajna klasifikacija na osnovu izgleda galaksija je nastala 1926. godine kada je Hабl predložio da se one podele u tri osnovne grupe:

- eliptične (eng. *Elliptical*) - **E**;
- spiralne (eng. *Spiral*) - **S** i;
- nepravilne (eng. *Irregular*) - **Ir** ili **Irr**;



Slika 2.2: Habrova viljuška - klasifikacija osnovnih tipova galaksija na osnovu izgleda i orientacije u prostoru. Slika preuzeta iz [Carroll and Ostlie \(2014\)](#).

pri čemu se spiralne dalje dele na normalne spiralne (S) i spiralne sa prečkom (SB). Eliptične i spiralne galaksije su najčešće aranžirane u obliku niza ili nalik zvučnoj viljušci, prikazane na slici 2.2, te se ova klasifikacija često naziva i Hablov niz ili, popularnije, Habrova viljuška. Sa slike se vidi da između E, S i SB tipova postoji i prelazni tip sočivastih (eng. *lenticular*) galaksija koje odlikuje odsustvo spiralnih grana i prisustvo diska, a mogu biti bez prečke (S0) ili sa njom (SB0). Na osnovu rasporeda galaksija u nizu, Hабl je pretpostavio izvesni evolutivni tok i zaključio da ide u smeru od eliptičnih ka spiralnim galaksijama, te je

prve nazvao ranijim (eng. *early-type*), a druge kasnijim tipovima (eng. *late-type*). Iako se kasnije ispostavila pogrešna, takva terminologija se održala i često se koristi u literaturi.

Na ovom mestu je zgodno istaći jednu stvar - da su galaksije trodimenzionalni objekti i kao takvi mogu zauzeti različitu orijentaciju u odnosu na posmatrača, odnosno nagibni ugao ili inklinaciju. Samim tim, jedna ista galaksija za različite posmatrače može imati drugačiju projekciju na nebesku sferu, te je neophodno i ove razlike kvantifikovati u klasifikaciji. Na osnovu ovoga, galaksije, pre svega diskolike, se ugrubo dele na:

1. one sa malim nagibnim uglom, tzv. ***face-on galaksije***, kod kojih su jasno vidljive spiralne grane, a najčešće su kružnog ili eliptičnog oblika;
2. one sa velikim nagibnim uglom, tzv. ***edge-on galaksije***, kod kojih se vidi sama ivica galaksije i eventualno se ističe centralni oval kao zasebno ispučenje, a najčešće su trakastog oblika.

Kako bi se ova karakteristika kvantifikovala na neki način, Hабl je u sklopu eliptičnih galaksija uveo dodatnu podelu po **eliptičnosti** ili spljoštenosti (eng. *ellipticity/flattening*):

$$\epsilon = 1 - \frac{b}{a}; \quad (2.1)$$

gde su a i b velika i mala poluosa prividne² elipse. Tada se Hablov tip eliptične galaksije označava umnoškom od 10ϵ , gde bi se prividno sferne eliptične galaksije označavale sa E0, a one najspljoštenije sa E7 (eliptične galaksije veće spljoštenosti od 0,7 nisu uočene). Dakle, broj oznake raste sa spljoštenošću.

Spiralne galaksije, sa druge strane, su podeljene na normalne: Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, i spiralne sa prečkom: SBa, SBab, SBb, SBbc, SBc. One sa najvećim odnosom luminoznosti centralnog ovala prema luminoznosti diska L_{oval}/L_{disk} , najgušće namotanim spiralnim granama i najviše glatkom raspodelom zvezda u disku su Sa, odnosno SBa tip. Kako nabrojane karakteristike prelaze u manji odnos L_{oval}/L_{disk} , labavije namotane spiralne

²Ovde se reč prividna odnosi na projekciju trodimenzione galaksije na dvodimenzionu površ nebesku sferu.

grane i sve primetnije strukture u disku poput grudvica zvezda i gasa, tako se stiže do Sc, odnosno SBc tipa.

Nepravilne galaksije (Ir na slici 2.2) su izdvojene iz Hablove viljuške zbog vidno različitih izgleda i nepravilne strukture. Prvobitno je Habl nepravilne galaksije klasifikovao na IrrI, koje su posedovale barem neku naznaku organizovane strukture, i na IrrII kao najhaotičniji tip galaksija. Kasnije su uvedene mnogobrojne dopune i izmene ovakve podele, od kojih je najznačajnija de Vakulerova (fr. *Gérard Henri de Vaucouleurs* (1918 – 1995)) podela IrrI tipova u smeru opadajućeg stepena organizovanih struktura na Sd (SBd), Sm (SBm) i Im, pri čemu se slovo m odnosi na Magelanov tip, čiji su predstavnici Veliki Magelanov oblak (SBm) i Mali Magelanov oblak (Im). Ovi tipovi se klasikuju u najkasnije Hablove tipove čiju populaciju pretežno čine patuljaste spiralne galaksije. Takođe, de Vakuler je predložio da se normalne preimenuju iz S u SA i uveo prelazni SAB tip koji imaju dosta slabije izraženu prečku u odnosu na SB.

Dakle, konačan osnovni niz klasifikacije galaksija od ranijih ka kasnijim tipovima bi bio:

- E0, E1, E2, … , E7, S0, Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd, Sd, Sm, Im, Ir,

duž normalnog tipa spiralnih galaksija, odnosno:

- E0, E1, E2, … , E7, SBO, SBa, SBab, SBb, SBbc, SBc, SBcd, SBd, SBm, Im, Ir,

duž spiralnih sa prečkom.

Malo detaljnija klasifikacija se može uočiti kod spiralnih, gde se dodatno uvodi i klasa luminoznosti od I do V (I, II, III, IV, V). Ozaka I odgovara galaksijama velike sopstvene luminoznosti, a V najmanje luminoznim. Pored toga što su luminoznije klase masivnije, one imaju i jasnije definisane spiralne grane i obratno. Isto tako, spiralne grane mogu da se protežu do samog centra galaksije, pri čemu onda dobijaju oznaku (s), a može istovremeno posedovati unutrašnji (r) ili spoljašnji R prsten. Na primer, naša galaksija je SBbcI-II, što znači da je jedna od sjajnijih spiralnih galaksija sa prečkom, tipične veličine centralnog ovala i izraženijih spiralnih grana. Detaljniji opis struktura u galaksijama se može naći u radu [Buta \(2011\)](#).

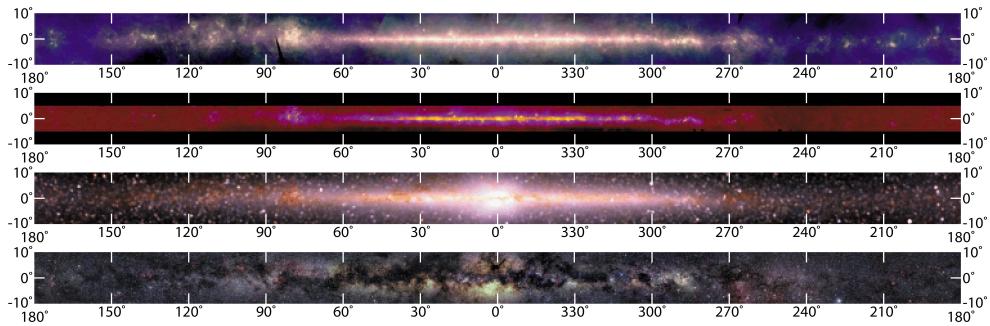
Pored navedenog, postoji potencijal za definisanjem mnoštva drugih detalja, uvodeći dodatne oznake. Uz to, galaksije se mogu razlikovati i po masi, luminoznosti, smeru rotacije, disperziji brzina zvezda, itd., odakle sledi da sama klasifikacija na osnovu vizuelnih odlika govori u ograničenoj meri o njihovim fizičkim karakteristikama. Hablova klasifikacija i njene dopune, iako vrlo značajna skripta za grubu, laku i brzu podelu galaksija, nas tek uvodi u pitanje o dinamici unutrašnje strukture galaksije, a i uopšteno o njihovoj pojedinačnoj i međusobnoj evoluciji.

2.2 Galaksije duž EM spektra

Galaksije se mogu posmatrati u različitim domenima elektromagnetskog (EM) zračenja, od radio do gama domena, pri čemu je za svaki domen karakterističan određeni mehanizam stvaranja svetlosti, te će galaksije u različitim domenima izgledati dosta drugačije. Na osnovu toga se može zaključiti nešto o sadržaju i procesima koji se odvijaju unutar galaksija. Glavne činioce galaktičke strukture obuhvataju zvezde, oblaci gasa i prašina. Stoga će se ovde istaći domeni u kojima su oni prevashodno vidljivi, a to su optički i infracrveni (IC), prikazani na slici 2.3. Svaki od domena mapira različite komponente galaksije:

- infracrveni (3000 - 25000 GHz) - termalna emisija prašine, zvezdorodnih regiona u oblacima galasa i molekula;
- bliski infracrveni (86000 - 240000 GHz) - relativno hladne zvezde tipa M i K;
- optički ($\sim 460000\text{GHz}$) - zvezde svih tipova, oblaci gasa malih gustoća, uz jaku apsorpciju plave svetlosti na prašini.

Neretko se pri posmatranju galaksija i drugih objekata koristi terminologija posmatranja u određenom filteru. Naime, svaki optički teleskop ima svoj skup karakterističnih filtera koji propuštaju određeni (širi ili uži) opseg svetlosti oko neke specifične talasne dužine. Primera radi, ukoliko se posmatra opseg oko crvene boje na oko 650nm, najčešće se kaže da se posmatranja vrše u R , r ili G_{RP} filteru. Nazivi za filtere i njihove širine zavise od teleskopa kojim se posmatra i u svim dostupnim bazama podataka su definisani zasebno, od kojih su poznatije *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) sa skupom (u , g , r , i , z) filtera i *Gaia* sa skupom (G_{BP} , G , G_{RP}) filtera.



Slika 2.3: Mape Mlečnog puta u galaktičkim koordinatama prikazane u različitim domenima zračenja, i to redom odozgo na dole: daleki IC domen, srednji IC domen, bliski IC domen i optički domen. Slika preuzeta sa [NASA \(2018\)](#).

2.3 Modeli evolucije galaksija

Danas je jasno da evolutivni tok galaksija nije tako jednostavan i postoje dve vodeće teorije o formiranju galaksija:

1. model kolapsa (eng. *top-down*);
2. hijerarhijski model (eng. *bottom-up*).

Model kolapsa (ELS model), razvijen od strane Egena, Lajden-Bela i Sendidža (eng. *Olin J. Eggen* (1919–1998), *Donald Lynden-Bell* (1935 - 2018), *Allan R. Sandage* (1926 - 2010)) u radu [Eggen et al. \(1962\)](#), bazira se na postojanju proto-galaktičkog oblaka koji brzim kolapsom formira galaksiju. Sam proto-galaktički oblak sadrži određen moment impulsa, te se usled smanjenja radijusa formira disk, a očekivano je i da će objekti biti slične starosti i imati isti pravac revolucije u galaksiji. Međutim, ispostavlja se da određena zbijena jata u halou imaju retrogradna kretanja i da su značajno mlada od ostalih zbijenih jata. Pored toga, starosti zvezda u disku se razlikuju toliko da procenjeni brz kolaps ne bi bio ostvariv.

Manjkavosti modela kolapsa našle su odgovor u hijerarhijskom modelu koji su predložili Sirl i Zin (eng. *Leonard Searle* (1930 - 2010), *Robert Zinn* (1946 -)) 1978. godine u radu [Searle and Zinn \(1978\)](#) zastupa ideju plimskih interakcija, sudara i, eventualno, konačnog spajanja galaksija. U sklopu ovog modela, galaksije evoluiraju zasebno, sve dok ne budu gravitaciono vezane u sistem sa nekom drugom galaksijom. Tada postoji različiti procesi koji deformišu oba objekta, poput plimskih procesa i

dinamičkog trenja. Primera radi, uzmimo da je manja patuljasta galaksija (eng. *Dwarf Galaxy*) u čijem se centru nalazi zbijeno jato zahvaćena većom čime će prva biti ogoljena od gasa koji je okružuje i postaje samo zbijeno jato. Ovim se objašnjava i današnja raspodela zbijenih jata oko galaksija i njihova različita starost u odnosu na druge komponente matične galaksije koja je posledica pređašnje nezavisne evolucije i zahvata manjih galaksija. Na malo većim skalama gde se nalaze skupovi galaksija, posmatranjima je ustanovljeno da u centrima gustih galaktičkih jata dominiraju pre svega džinovske eliptične galaksije (eng. *Giant Ellipticals*), dok se spiralne pretežno viđaju u manje naseljenim galaktičkim jatima. To ukazuje na činjenicu da su se džinovske eliptične galaksije u jatima formirale vrlo verovatno spajanjem spiralnih, kako su sudari verovatniji u ovakim sistemima. Dakle, evolutivni trend koji se nameće jeste da su raniji Hablovi tipovi nastali spajanjem kasnijih, kontraintuitivno ustanovljenoj terminologiji.

Jasno je da svi navedeni procesi igraju značajnu ulogu u evoluciji galaksija s obzirom da se menjaju i sastav i morfologija. U principu, moguće je i vrlo verovatno da oba ova modela učestvuju u formiranju galaksija u manjoj ili većoj meri, što dodatno komplikuje razlučivanje problema nastanka galaksija. Danas je to jedna od aktivnih i zastupljenijih oblasti istraživanja.

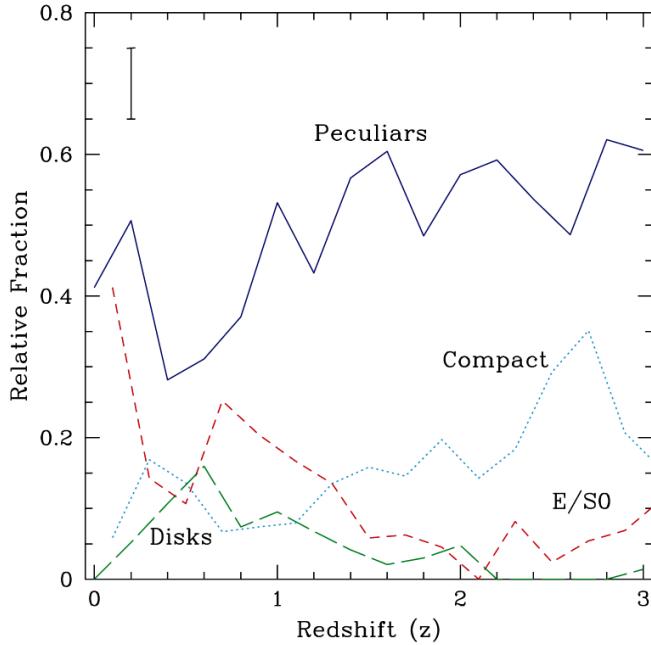
2.4 Udaljene galaksije

Posmatranjem galaksija na sve većim rastojanjima se one, zapravo, istovremeno posmatraju u evolutivnoj prošlosti zbog ograničene brzine svetlosti. Terminologija koja se češće upotrebljava od rastojanja za udaljene galaksije jeste crveni pomak z . Crveni pomak predstavlja povećanje talasne dužine kao posledicu udaljavanja objekta od posmatrača, a definiše se kao:

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{lab}}}{\lambda_{\text{lab}}}, \quad (2.2)$$

gde λ_{obs} i λ_{lab} predstavljaju posmatranju i laboratorijsku talasnu dužinu, respektivno. Crveni pomak galaksija je prevashodno kosmološkog tipa i posledica je širenja svemira, stoga je pomak uvek u smeru porasta talasne dužine (osim u slučaju bliskih galaksija gde je pomak Doplerovskog tipa,

poput Andromede, koja se kreće prema Mlečnom putu i poseduje plavi pomak).

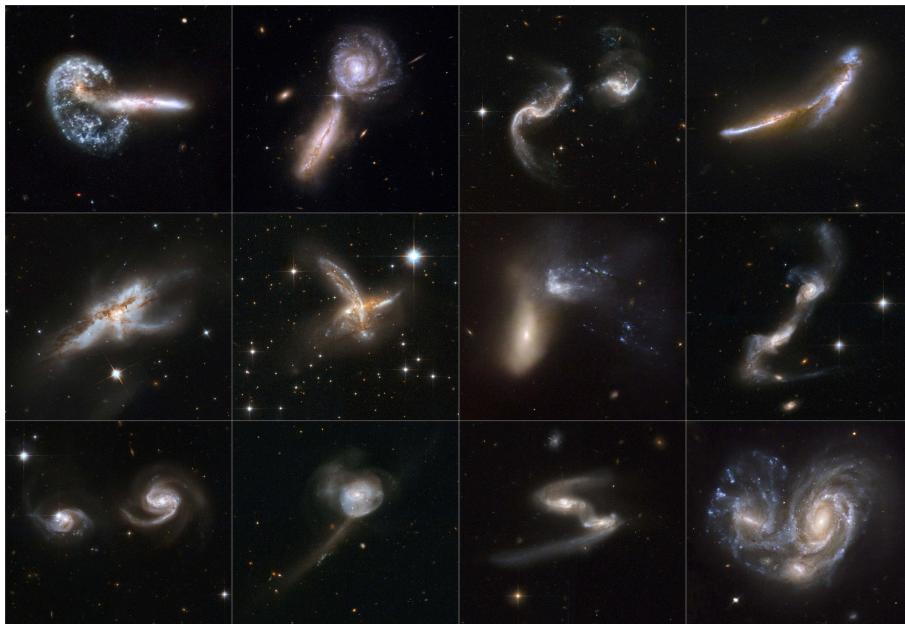


Slika 2.4: Relativni udeo (eng. *Relative Fraction*) tipova galaksija u odnosu na crveni pomak z , među kojima su diskolike, eliptične sa sočivatim, kompaktne i galaksije specifičnog izgleda. Slika je preuzeta iz rada [Conselice et al. \(2008\)](#).

Ispostavlja se da galaksije na većim crvenim pomacima ($z \geq 0,1$) imaju značajno različit izgled od lokalnih galaksija. Na slici 2.4 dat je udeo ukupnog broja galaksija u odnosu na z za različite tipove galaksija: diskolike (eng. *disks*), eliptične ili sočivaste (E/S0), kompaktne (eng. *compact*) koje su slične eliptičnim, s tim da se razlikuju po tome što nemaju opadajuću raspodelu sjaja oko sebe i galaksije specifičnog izgleda (eng. *peculiar*) koje ne poseduju uređenu strukturu, perturbovane su izvesnim interakcijama i poseduju značajni broj regiona u kojima se formiraju zvezde. Vidi se da u bliskom okruženju značajnu ulogu imaju diskolike i eliptične, za koje se zna iz ranih posmatranja. Međutim, porastom z njihova brojnost opada, a najveći udeo poseduju kompaktne i specifične galaksije u ranoj fazi evolucije kada nemaju formiran oval i/ili disk i da se nalaze u izvesnoj interakciji. Uz to, specifične galaksije, kojima su obuvaćene nepravilne, su relativno podjednako zastupljene na različitim z . Odavde je jasno da sudari i interakcije imaju značajnu ulogu pri formiranju galaksija, kako danas, tako i ranije, a posebno na crvenim

pomacima $2 < z < 3$.

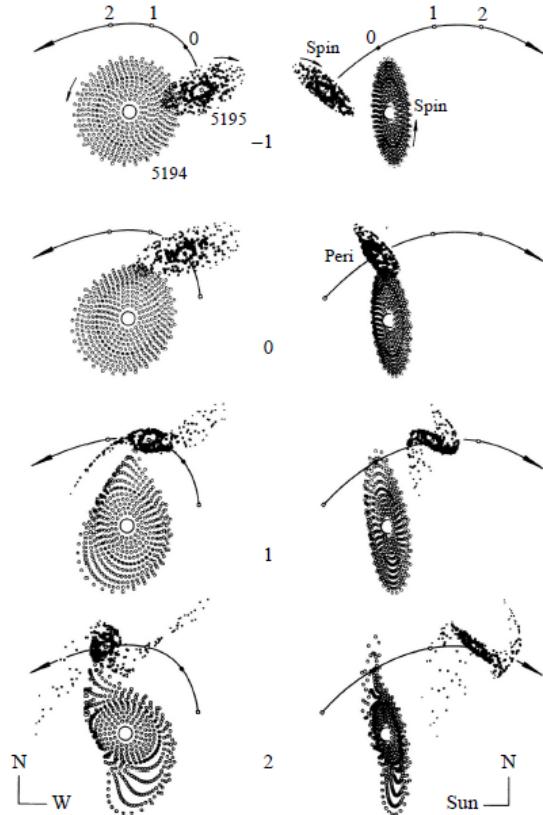
2.5 Sudari galaksija



Slika 2.5: Različiti primeri galaksija u interakciji.

Sa slike 2.4 se može videti da su galaksije specifičnog oblika podjednako zastupljene danas i ranije u svemiru. Sa jedne strane, veliki broj galaksija se danas nalazi u sklopu grupe ili jata galaksija gde su međusobno gravitaciono vezane i imaju veću zastupljenost nego u ostatku svemira. Na taj način, galaksije imaju priliku da interaguju jedna sa drugom. Sa druge strane, galaksije rano u svemiru su u procesu formiranja, pri čemu je moguće da se i dalje sažimaju iz proto-galaktičkog oblaka, ali i da zahvataju okolni materijal i manje već formirane objekte, kao što je opisano u modelima evolucije galaksija. Ovde će fokus biti na same interakcije i sudare galaksija. Tip interakcije će umnogome zavisiti od nekoliko glavnih faktora: udaljenosti galaksija pri najbližem kontaktu, relativnih dimenzijsa galaksija učesnica, Hablovog tipa, smera rotacije i njihovih relativnih brzina. Uz to, različite komponente galaksije poseduju drugačije karakteristike i reaguju na različite načine tokom sudara: zvezde se ne sudaraju, dok se gas rasipa i inicira se formiranje zvezda. Ovi procesi kasnije utiču na formiranje raznih struktura unutar i oko galaksije: novonastali regioni formiranja zvezda, distorzija diska i spirala, repovi ili prstenovi izbačenog

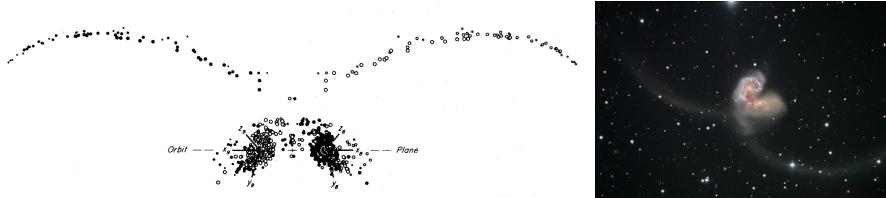
materijala kao posledica plimskih uticaja, rasut neutralni vodonični gas (HI) na velikim udaljenostima, dupla galaktička jezgra, itd. koji se mogu primetiti na slici 2.5.



Slika 2.6: Simulacija interakcije galaksija M51 i NGC5195. Slika preuzeta iz rada [Toomre and Toomre \(1972\)](#).

Način na koji se odigravaju galaktičke interakcije, uz to što je prilično kompleksan zbog mnogih parametara koji utiču, događa se tokom dosta dugog perioda za ovozemaljske pojmove vremena zbog čega je nemoguće imati punu sliku dinamičke evolucije galaksija. U tu svrhu osmišljeni su modeli interakcija čiji se ishodi upoređuju sa postojećim posmatranim (naizgled) statičkim galaksijama. Prve numeričke modele problema N tela uradili su braća Alar i Juri Tumr (eng. *Alan and Juri Toomre*) u radu [Toomre and Toomre \(1972\)](#) koristeći se drugim Njutnovim zakonom, pri čemu su zvezde osećale samo centralno privlačenje ka jezgru galaksije. Ovim su uspeli da objasne izgled galaksija M51 i NGC 5195 koje povezuje zvezdani most i galaksija NGC 4038 i NGC 4039 poznatije kao galaksija „Antena“ (eng. *Antennae Galaxy*), prikazane na slikama 2.6

i 2.7, respektivno. Moderne simulacije, pored gravitacionih privlačenja individualnih zvezda, uključuju i efekte tamne materije i gasa.



Slika 2.7: Rezultati simulacije sudara NGC 4038 i NGC 4039 galaksije (levo) i fotografija istih galaksija (desno). Slika simulacije preuzeta iz rada [Toomre and Toomre \(1972\)](#).

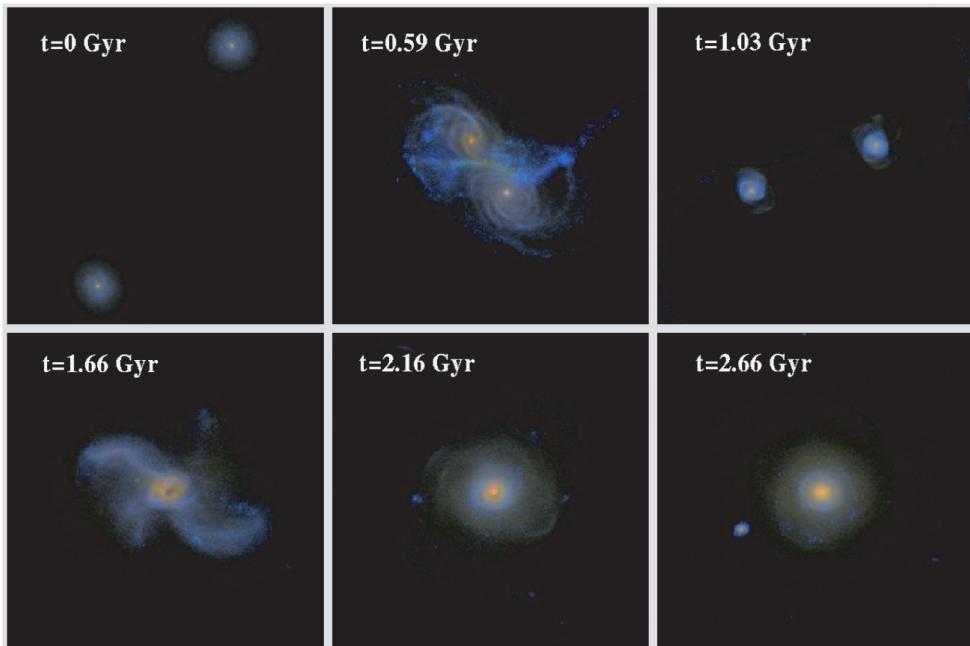
2.5.1 Faze sudara

Interakcije se dešavaju tokom dugog vremenskog perioda reda veličite milijardu godina. Tipični sudari traju između jedne i tri milijarde godina (1 - 3 Gyr)³ i odvijaju se u fazama koje se mogu podeliti u 7 distinktnih faza, prateći radeve [Toomre and Toomre \(1972\)](#) i [Donevski and Prodanović \(2015\)](#):

1. Sistem razdvojenih galaksija koje nisu u interakciji (eng. *Non-merger*);
2. Nesudarajući sistem koji je stupio u interakciju vidno razdvojenih galaksija i bez plimskih repova (eng. *Pre-merger*);
3. Rana faza sudara gde su galaksije međusobno razlučive (eng. *Early Ongoing merger*);
4. Glavna faza sudara u kojoj se galaksije dovoljno približe da postanu međusobno nerazlučive (eng. *Ongoing merger*);
5. Kasna faza sudara kod koje je vidljiva jedna galaksija sa dva jezgra i plimskim repom (eng. *Late Ongoing merger*);
6. Faza nakon sudara koja obuhvata galaksiju sa jednim nepravilnim jezgrom i izražajnim plimskim repom (eng. *Post-merger*);
7. Ostatak sudara gde konačno preostaje jedna galaksija sa jedinstvenim jezgrom i slabim plimskim repom (eng. *Merger remnant*).

³Često se umesto milijarde godina koristi jedinica $\text{Gyr} = 10^9 \text{ yr}$, gde yr predstavlja godinu.

Svaka od navedenih faza traje u proseku oko od 0,1Gyr do 0,5Gyr, a primer simuliranog sudara dve spiralne galaksije jednakih masa data je na slici 2.8. Jasno je da vremenske skale ove razmere onemogućavaju posmatranje sudarajućih galaksija kroz sve njihove faze, te se zbog toga koriste pomenute simulacije. Međutim, simulacije svakako treba uporediti sa posmatranjima, kao što su to prethodno učinili braća Tumr. Stoga je važno pravilno identifikovati u kojoj od datih faza se nalazi galaksija i da li se zapravo radi o normalnoj galaksiji ili o galaksiji u interakciji. Ovaj problem je relativno lako rešiti za galaksije u bliskom okruženju, međutim, za udaljenje galaksije i dalje ne postoji rigorozan način distinkcije između faze br. 4 i kasnijih faza. Upravo ovaj problem je glavna motivacija ovog rada.



Slika 2.8: Simulacija sudara dve spiralne galaksije po fazama 2-7 vreme određene faza mereno od početka stupanja u interakciju. Slika preuzeta iz rada [Lotz, Jonsson, Cox and Primack \(2008\)](#).

2.6 Fotometrija galaksija

Jasno je da su galaksije rasprostrti objekti na nebu i da se ne mogu aproksimirati tačkastim objektima pri posmatranju kao zvezde. Zbog toga je potrebno je navesti neke fizičke veličine i definicije kojima se opisuju ovi sistemi. Na ovom mestu je dobro napomenuti da se sve galaksije po-

smatraju trenutno, odnosno da su skale značajnih dinamičkih promena mnogo duže od vremena posmatranja.

2.6.1 Granice galaksije

Dosad se pod Hablovom morfološkom klasifikacijom preciznije podrazumeva vizuelno razvrstavanje galaksija po raspodeli svetlosti, odnosno po raspodeli zvezda, gasa i prašine u njima, te se na taj način razlikuju različiti tipovi. Za većinu galaksija se uviđa da raspodela svetlosti postepeno opada od centra ka periferiji galaksije. Samim tim, značajno je kako će se definisati sama „granica“ galaksije.

Jedan od najjednostavnijih načina jeste da se definiše određena magnituda kao granica čime se dobija granična izofota. Drugi jeste definisanje **efektivnog radiusa** r_e u čijoj površini kružnice je sadržano $1/2$ integralne svetlosti galaksije. Međutim, ove definicije, iako su prihvatljive za lokalni set galaksija, imaju nezaobilaznu manu kod posmatranja daljih galaksija jer zavise od rastojanja, a samim tim opada magnituda i smanjuje se prividna veličina objekta. Samim tim, galaksija će prividno biti manje sjajna ukoliko se nalazi na većem rastojanju, te će i njena izofota biti manja, a slično će i r_e biti manji. Godine 1976. Vahe Petrosjan (eng. *Vahe Petrosian (1938 –)*) predložio je definiciju radiusa kojom će se definisati granice galaksije: rastojanje na kojem je intenzitet integralne svetlosti jednak srednjem intenzitetu svetlosti do tog rastojanja, pri čemu se ovaj odnos skalira određenim brojem, najčešće $\eta = 0, 2$:

$$I(r_p) = \eta \frac{1}{r_p^2 \pi} \left(\int_0^{r_p} 2\pi I(r) r dr \right), \quad (2.3)$$

gde je $I(r)$ funkcija intenziteta svetlosti u zavisnosti od rastojanja od centra galaksije r , $I(r_p)$ intenzitet svetlosti na rastojanju Petrozijanovog radiusa r_p .

2.6.2 Raspodela svetlosti u galaksiji

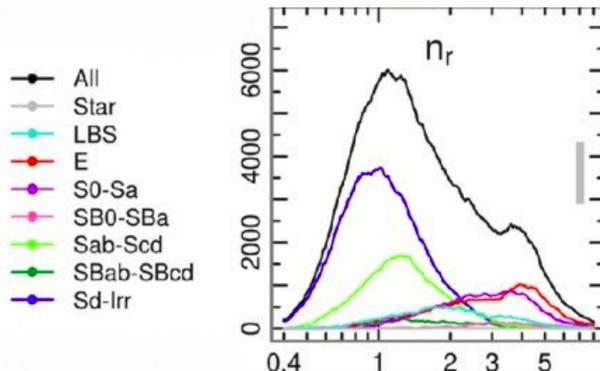
Pored definisane granice, neophodno je opisati i celokupnu raspodelu sjaja galaksije od centra ka periferiji. Jasno je da je ovaj problem malo

složeniji zbog raznovrsnog izgleda posmatranih galaksija. Hablova klasifikacija zahteva vizuelnu inspekciju svake pojedinačne galaksije, što je vremenom sa sve većim količinama podataka postajalo zahtevnije za realizaciju. Iz ovih razloga i u cilju opšte definicije raspodele koriste se druge metode za opisivanje distribucije svetlosti u galaksiji.

Jedan od načina je fitovanjem matematičkim modelom (funkcijom) uz određene slobodne parametre. U tu svrhu, najčešće se sreće i koristi **Sersikov profil** (špa. *José Luis Sérsic* (1933 – 1993)) prvi put definisan u radu [Sérsic \(1963\)](#) koji opisuje raspodelu površinskog sjaja galaksije $\mu(r)$ u zavisnosti od rastojanja od centra galaksije r , a definisan je na sledeći način:

$$\mu(r) = \mu_e + 8,3268 \left[\left(\frac{r}{r_e} \right)^n - 1 \right], \quad (2.4)$$

gde je μ_e površinski sjaj galaksije na rastojanju efektivnog radijusa r_e , a n Sersikov indeks. Veličine μ_e , r_e i n su slobodni parametri kojima je omogućeno da se dobije najbolji fit za posmatrani površinski sjaj.



Slika 2.9: Raspodela broja galaksija iz skupa galaksija posmatrani GAMA⁴ pregledom neba po Sersic indeksima za različite Hablove tipove, a posmatrane su i slučajno uzorkovane зvezде (eng. *Star*) i plave male sferoidne galaksije (eng. *Little Blue Spheroids* - LBS) као издвојена категорија неправилних. Slika preuzeta iz rada [Kelvin et al. \(2014\)](#).

На слици 2.9 је приказана је бројност различити Habloviх типова галаксија у односу на вредности Sersikovог индекса добијених за скуп галаксија

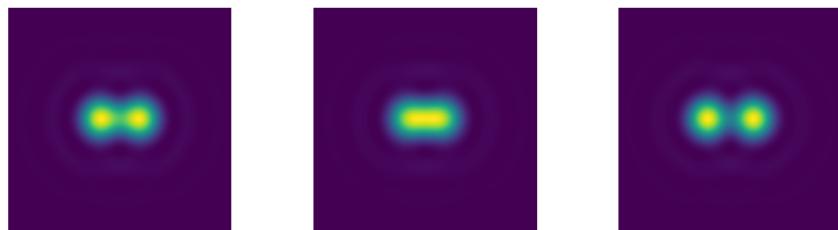
⁴(eng. *Galaxy And Mass Assembly*)

iz rada [Kelvin et al. \(2014\)](#). Vidi se da je kod ranijih Hабlovih tipova, E/S0/Sa, dominantan oval, te ћe oni mahom posedovati veće vrednosti Sersic indeksa ($n \gtrsim 2$), dok ћe za diskolike galaksije, Sb/Sc/Sd/Irr biti manji ($n \approx 1$). Ovakvi modeli su zgodni za prvi konkretniji opis raspodele svetlosti u galaksiji fitovanjem parametara tako da se najbolje slažu sa posmatranjima. Međutim, zbog složenije unutrašnje strukture galaksija ovakav pristup je ograničen, a u posebnim prilikama, kod nepravilnih galaksija, čak i značajno komplikovan.

2.6.3 Rejljev kriterijum

Ukoliko se posmatraju dve galaksije koje su dovoljno bliske jedna drugoj, postavlja se pitanje: U kojem slučaju smo u mogućnosti da ustanovimo da su to dva zasebna objekta, a kada ih vidimo kao jednu celinu?

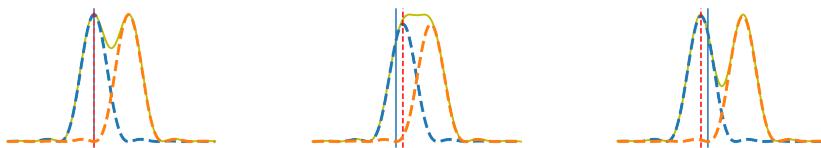
Rejljev kriterijum (eng. *John William Strutt (1842-1919)*) definiše minimalno (projektovano) rastojanje između dva posmatrana objekta kako bi oni bili razlučeni kao dva zasebna izvora svetlosti. Radi ilustracije kriterijuma, posmatrajmo jednostavni slučaj dva tačkasta izvora čija svetlost prolazi kroz kružnu aperturu teleskopa i formira difrakcione likove. Tada se dobijaju raspodele prikazane na slici [2.10](#) koju čini izražajni centralni krug i koncentrični prstenovi dosta slabiji po intenzitetu.



Slika 2.10: Difrakcioni likovi tačkastih svetlosnih izvora na različitim projektovanim rastojanjima. S leva na desno: granični slučaj razlučivosti (leva slika), nerazlučivi likovi (središnja slika) i jasno razlučivi likovi (desna slika).

Pomenute raspodele su dvodimenzione, a radi jednostavnosti uzmimo raspodelu središnjeg horizontalnog preseka koji prolazi kroz maksimume sjaja ova dva difrakciona lika, čime se dobijaju raspodele kao na slici [2.11](#). Ovde je od interesa centralni region, poznatiji kao Erijev disk (eng. *Airy disk; George Biddell Airy (1801-1892)*) koji predstavlja raspodelu

svetlosti od centra difrakcionog lika (maksimuma) do prvog minimima. Rejlijev kriterijum nalaže da će dva tačkasta izvora biti razlučena ukoliko je minimum prvog lika na jednakom ili većem rastojanju od položaja maksimuma drugog lika. U svim ostalim sličajevima, likovi nisu razlučivi. Drugim rečima, da bi objekti bili razlučivi, rastojanje između njihovih maksimuma treba da je veće ili jednako od širine linije između prvih nula (eng. *Beam Width First Nulls* - BWFN). Pored BWFN, širina linije se može definisati i preko pune širine na polovini maksimuma (eng. *Full Width Half Maximum* - FWHM) što je praktičnije za raspodele kod kojih se ne javljaju nule.



Slika 2.11: Raspodela sjaja difrakcionih likova tačkastih svetlosnih izvora na različitim projektovanim rastojanjima (isprikidana plava i narandžasta linija). Vertikalne prave predstavljaju maksimum levog Erijevog diska (isprikidana crvena prava) i minimum desnog Erijevog diska (puna plava prava).

3 Morfološki parametri

3.1 Parametri

Način sistematičnog opisa morfologije galaksija koji će se koristiti u ovom radu jeste pristup koji ne zahteva slobodne parametre i modele za fitovanje, već obuhvata skup parametara koji se izračunavaju direktno iz same raspodele svetlosti u galaksiji i dobijaju se u vidu izvesnih skalarnih vrednosti. Ovakva analiza može da se sproveđe za sve tipove galaksija, čak i nepravilne, ne uklanjujući složenosti u strukturi koje poseduju. Nadalje će biti detaljnije opisani ovi parametri, a biće definisani tako da prate kod koji će biti korišćen za obradu podataka.

3.1.1 Pikseli, granice i centri

Pre navođenja samih parametara biće skrenuta pažnja na određene detalje pri izračunavanju istih. Pri posmatranju galaksija, snimci se snimaju CCD kamerama i samim tim se dobija digitalni zapis posmatranja čije su osnovne jedinice pikseli (px), a odbroji na kamери se pretvaraju brojčane vrednosti intenziteta piksela. Samim tim, nadalje će se sami podaci posmatrati u tom kontekstu. Jednom kada imamo sam snimak galaksije, neophodno je razdvojiti samu galaksiju od pozadine i to na osnovu gore definisanog Pertozijanovog radiusa. Na taj način se dobija oblast u kojoj se nalazi sama galaksija i u okviru koje će se računati parametri, a naziva se segmentaciona mapa. Potom je važna stavka odrediti (u nekim slučajevima netrivijalni) centar galaksije koji se za određene parametre drugačije definiše i biće navedeni zasebno.

3.1.2 Koncentracija C

Parametar koncentracije (eng. *Concentration*) C je mera količine svetlosti koja se nalazi u centru galaksije. Drugim rečima, koncentracija predstavlja odnos intenziteta svetlosti sadržan u spoljašnjoj kružnoj aperturi i intenziteta svetlosti sadržan u unutrašnjoj kružnoj aperturi, a definiše se na sledeći način:

$$C = 5 \log_{10} \frac{r_{80}}{r_{20}} \quad (3.1)$$

gde r_{80} predstavlja radijus kruga čija površina obuhvata 80% ukupne svetlosti galaksije, dok se r_{20} odnosi na radijus kruga koji obuhvata 20% ukupne svetlosti galaksije. Pod ukupnom svetlosti galaksije se podrazumeva sva svetlost koja upada u $1,5 r_p$ od galaktičkog centra. Za koncentraciju se centar definiše tako da asimetrija (poglavlje 3.1.3) bude minimalana.



Slika 3.1: Grafički prikaz načina računanja parametra C . Slika preuzeta iz rada [Conselice \(2003\)](#)

Kvalitativno se parametar koncentracije prožima i kroz Hablovu klasiifikaciju: eliptične galaksije poseduju karakteristične sferoidne⁵ raspodele imaju najveću koncentraciju koja opada ka kasnijim Hablovim tipovima. Vrednosti za parametar C se nalaze grubo između 2 i 5, uz to da većina eliptičnih i uopšteno sferoidnih sistema ima vrednosti $C > 4$, dok su za diskolike galaksije vrednosti $4 < C < 3$. Najmanje koncentracije imaju galaksije kod kojih nije izražena značajna centralna struktura, poput nepravilnih.

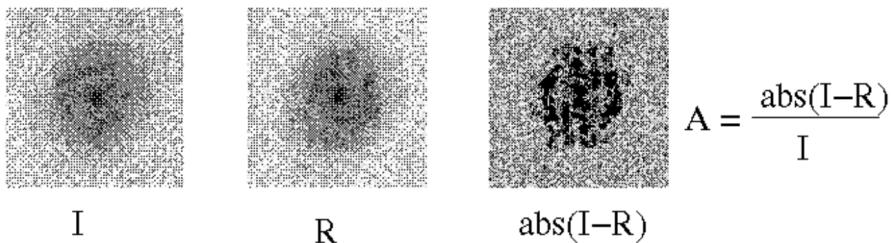
3.1.3 Asimetrija A

Asimetrija (eng. *Asymmetry*) A govori o meri rotacione simetrije galaksije, a dobija se tako što se originalna slika rotira za 180° i potom se ona oduzme od originalne. Intenziteti piksela tako dobijene slike se sumiraju po apsolutnoj vrednosti i upoređuju sa ukupnim intenzitetom originalne slike. Dodatno se indeks koriguje oduzimajući pozadinski intenzitet. Asimetrija se definiše na sledeći način:

⁵Iako je raspodela tehnički elipsoidna, ovaj termin se češće koristi u naučnoj literaturi i zajednici za opis struktura poput centralnog ovala, te će se i ovde usvojiti kao uobičajen izraz.

$$A = \frac{\sum_{x,y} |I(x,y) - I_{180}(x,y)|}{\sum_{x,y} |I(x,y)|} - B_{180}, \quad (3.2)$$

gde su $I(x, y)$ intenzitet svetlosti na koordinatama piksela (x, y) , $I_{180}(x, y)$ intenzitet svetlosti na koordinatama piskela (x, y) kada se originalna galaksija rotira za 180° , a B_{180} usrednjena asimetrija pozadine. Kao i koncentracija, asimetrija se sumira za sve piksele koji se nalaze u radijusu od $1,5r_p$ od centra galaksije, a sam centar se dobija minimizacijom vrednosti A . Iz definicije je jasno da važi $0 \leq A \leq 1$, gde 0 predstavlja potpunu simetriju, a 1 potpunu asimetriju.



Slika 3.2: Grafički prikaz načina računanja parametra A . U navedenoj relaciji I predstavlja originalnu sliku, a R originalnu sliku zarotiranu za 180° .

Slika preuzeta iz rada [Conselice \(2003\)](#)

Objekti sa glatkom eliptičnom raspodelom poput ranijih Hablovih tipova imaju veliki stepen rotacione simetrije, samim tim i manju vrednost A . Galaksije kod kojih su izražene spiralne grane su manje simetrične i imaju malo veću vrednost A , dok nepravilne galaksije i one u interakciji tipično imaju veliku vrednost A .

Očigledno je da ovaj indeks meri strukturu koje uzrokuju asimetričnu raspodelu u galaksiji poput regiona u kojima se formiraju zvezde, razne pojave koje su vezane za interakciju, kao i linije prašine za galakije koje su okrenute bočno duž vizure. Tipično galaksije koje su bile u interakciji mogu imati značajne vrednosti asimetrije. Takođe, asimetrija je u izvesnoj meri korelisana sa $B - V$ indeksom boje, što bi se moglo povezati sa starosti zvezda u galaksiji. Utvrđeno je i da vrednost asimetrije prevashodno zavisi od raspodele zvezda u galaksiji na većim skalamama uzrokovane opštim poremećajima u vidu interakcija, dok regioni formiranja zvezda utiču do na $\approx 30\%$ pri računanju ove vrednosti.

3.1.4 Grudvičastost S

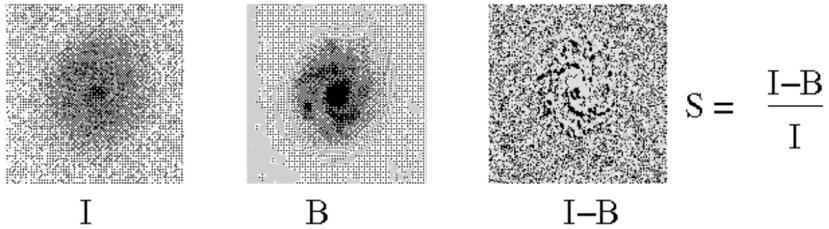
Pored integralne raspodele svetlosti u galaksiji koju odlikuju koncentracija i asimetrije galaksije, neophodno je opisati i razne manje strukture unutar raspodele koje potiču od gušće naseljenih regiona (npr. kompaktna zvezdana jata ili oblacima gasa). To se postiže upravo uvođenjem indeksa grudvičastosti⁶ S (eng. *clumpiness*) koji predstavlja odnos svetlosti manjih pomenutih manjih struktura i ukupne svetlosti galaksije. Procedura kojom se vrednost S dobija je sledeća: prvo se originalnoj slici smanji rezolucija u cilju otklanjanja sitnih galaktičkih struktura što se postiže uz pomoć filtera širine σ . Filter u datom pikselu uzima srednju vrednost intenziteta koju obuhvata svojom površinom, a zatim tom istom pikselu dodeljuje tu usrednjenu vrednost. Tako dobijena slika se potom oduzme od originalne pri čemu se dobija mapa reziduala u vidu prostorno malih struktura. Intenziteti sa rezidualne mape se sumiraju i normiraju na ukupni intenzitet originalne slike galaksije što predstavlja indeks S . Za diskretnе piksele slike galaksije se koristi izraz:

$$S = 10 \sum_{x,y=1,1}^{N,N} \frac{(I(x,y) - I^\sigma(x,y)) - B(x,y)}{I(x,y)} \quad (3.3)$$

gde je N ukupni broj piksela galaksije, $I(x,y)$ intenzitet svetlosti na koordinatama piksela (x,y) , $I^\sigma(x,y)$ intenzitet u (x,y) nakon smanjenja rezolucije filterom širine σ , a $B(x,y)$ intenziteti pozadinskih piksela za površinu veličine galaksije. Sumiranje se vrši u $1,5r_p$, a centar je onaj dobijen minimizacijom A . Širina filtera je $0,25r_p$, pri čemu se izuzima region iste ove širine u centru zbog toga što su centralni regioni većine galaksija vrlo sjajni i sadrže druge nezvezdane komponente.

Eliptične galaksije, zbog svoje glatke raspodele svetlosti, najčešće imaju vrlo male vrednosti S , bliske 0. Suprotno, spiralne galaksije, a posebno nepravilne, koje imaju često imaju razne manje strukture tipično imaju veće vrednosti S . Jasno je odavde da će S biti u korelaciji sa regionima nedavnog formiranja zvezda, što je i uviđeno.

⁶Često se može sresti i drugi termin za grudvičastost, glatkost (eng. *smoothness*).



Slika 3.3: Grafički prikaz načina računanja parametra S . U navedenoj relaciji I predstavlja originalnu sliku, a B sliku koja se dobija nakon „peglanja” originalne slike filterom širine $\sigma = 0,3 \times r_p(\eta = 0,2)$. Slika preuzeta iz rada [Conselice \(2003\)](#).

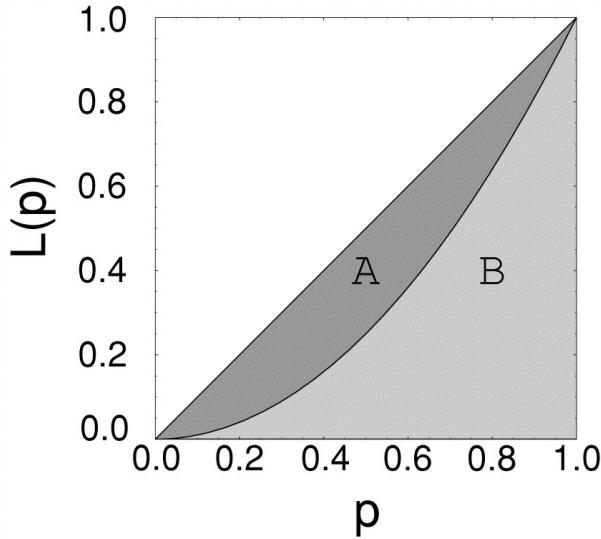
3.1.5 Džini koeficijent G

Jedna od uobičajenih mera statističke disperzije u nekoj populaciji je ste Džini koeficijent (eng. *Gini coefficient*), a često se sreće u ekonomiji u sklopu razmatranja neravnosmernosti raspodele bogatstva stanovništva. U slučaju galaksija, Džini koeficijent G će poslužiti za određivanje raspodele intenziteta svetlosi po pikselima. Raspodela piksela se može prikazati kao zavisnost kumulativnog intenziteta od kumulativnog procenta piksela i na taj način se dobija kriva poznatija kao Lorencova kriva čija je definicija:

$$L(p) = \frac{1}{\bar{X}} \int_0^p F^{-1}(u) du \quad (3.4)$$

gde p predstavlja procenat piksela najmanjeg intenziteta, a $F(u)$ je funkcija kumulativne raspodele, dok je \bar{X} srednja vrednost intenziteta svih piksela. U cilju lakšeg poimanja Lorencove krive, navode se dve ekstremne vrednosti:

- 1) kriva potpune jednakosti prikazuje raspodelu koja odgovara kada svaki piksel poseduje jednak intenzitet;
- 2) kriva potpune nejednakosti prikazuje kada jedan piksel poseduje sav intenzitet, a ostali ne poseduju intenzitet svetslosti.



Slika 3.4: Grafik zavisnosti Lorencove krive $L(p)$ od udela ukupnog broja piksela p . Kriva iznad površine A predstavlja krivu potpune jednakosti, a kriva između površina A i B predstavlja Lorencovu krivu izvesne posmatrane galaksije. Džini koeficijent se u ovom slučaju dobija kao odnos $A/(A+B)$.

Slika preuzeta iz rada [Abraham et al. \(2003\)](#).

Shodno prethodno definisanom, Džini koeficijent se definiše kao kočnici površine između krive potpune jednakosti i Lorencove krive i celokupne površine ispod krive potpune jednakosti, kao što je prikazano i na slici 3.4. Samim tim, G se kreće između vrednosti 0 i 1, gde veća vrednost G ukazuje na veću neravnomernost u raspodeli i obratno.

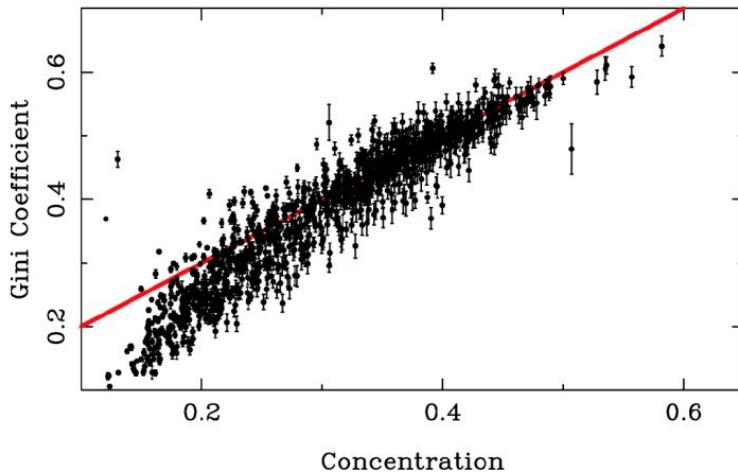
Kako su pikseli diskretni, definicija za G se mora prilagoditi za diskretne vrednosti, a jedan od efikasnih načina jeste da se pre svega pikseli poređaju u opadajućem nizu čime se dobija sledeća definicija:

$$G = \frac{1}{|\bar{X}|n(n-1)} \sum_i^n (2i - n - 1) |X_i| \quad (3.5)$$

gde je \bar{X} već pomenuta srednja vrednost intenziteta svih piksela, X_i je intenzitet pojedinačnog i -tog pikslea, a n ukupan broj piksela galaksije. Apsolutne vrednosti se uzimaju zato što neki pikseli mogu imati negativne vrednosti kada se koriguju za intenzitet pozadinske svetlosti.

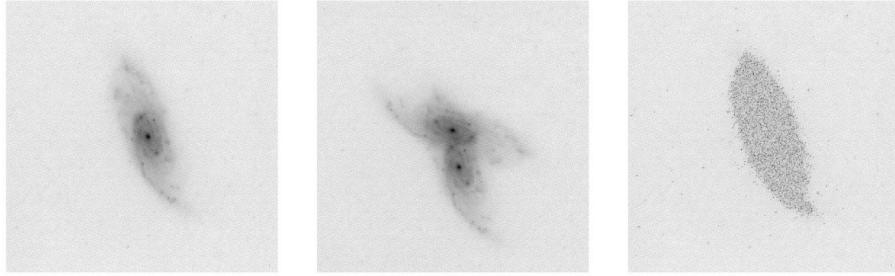
Iz definicije je jasno da je G dosta osetljiv na raspodelu intenziteta piksela, te je važno da je definicija granice galaksije konzistentna i da se ne

menja od galaksije do galaksije (rezolucije, odnosa signala prema šumu, itd.). U suprotnom, obuhvatanjem pozadinskih piksela se G sistematski povećava, a izuzimanjem piksela galaksije se sistematski smanjuje. U tu svrhu se koristi već definisani Petrozijanov radijus u okviru kojeg će se obuhvatati pikseli galaksije, s tim da se ovog puta računa kao velika poluosa elipse jer elipsa bolje opisuje raspodelu svetlosti galaksije.



Slika 3.5: Korelacija G i C za uzorak SDSS galaksija različitih morfologija u g filteru. Crvena linija predstavlja linearni fit sa jediničnim nagibom. Slika preuzeta iz rada [Abraham et al. \(2003\)](#)

Džini koeficijent je u korelaciji sa koncentracijom i povećava se se za izraženije centralne komponente galaksije što se može videti na slici 3.5. Ovo proizilazi iz prostog razloga što galaksije sa većim C sadrže dosta intenziteta u malom broju centralnih piskela. Međutim, G se značajno razlikuje od C po tome što ne zavisi od celokupnog izgleda raspodele svetlosti, već se računa za pojedinačne piksale koji ne moraju nužno biti centralni. Na slici 3.6 je dat primer 3 sistema sa istim vrednostima G , a različitim vrednostima C . Samim tim se mogu razlikovati galaksije sa malim vrednostima C i G čija je celokupna raspodela svetlosti ujednačena od onih sa malim vrednostima C i velikim vrednostima G čiji se intenzivni pikseli ne nalaze u centru.



Slika 3.6: Sistemi jednakih G vrednosti, a različitih vrednosti C . Levo se nalazi NGC 2715 galaksija snimana u R filteru, u sredini je slika nastala umnožavanjem i superponiranjem iste galaksije, a desno je prikazana ista galaksija modifikovana, umnožena i sabrana sa samom sobom. U sva tri slučaja, vrednosti za G ostaju ugrubo iste, dok se koncentracija značajno menja. Slika preuzeta iz rada [Abraham et al. \(2003\)](#)

3.1.6 Moment M_{20}

Prethodno je definisan indeks C koji vrednuje meru skoncentrisanosti svetlosti galaksije, potom je uveden i G u cilju vrednovanja regionala koji su intenzivni, a ne nalaze se nužno u centru. Međutim, kod ovih indeksa nije uzet u obzir njihov položaj u galaksiji, a to će se upravo pokazati značajno kod momenta drugog reda za 20% ukupnog intenziteta galaksije M_{20} .

Pre svega, definiše se ukupni moment drugog reda M_{tot} tako što se intenzitet i -tog piksela galaksije f_i pomnoži sa kvadratom rastojanja tog istog piksela od centra galaksije i potom sumira za svih n piksela galaksije.

$$M_{\text{tot}} = \sum_i^n f_i[(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2] \quad (3.6)$$

gde su x_i i y_i koordinate i -tog piksela, a x_c i y_c koordinate centra galaksije. Centar se u ovom slučaju definiše preko minimalne vrednosti M_{tot} .

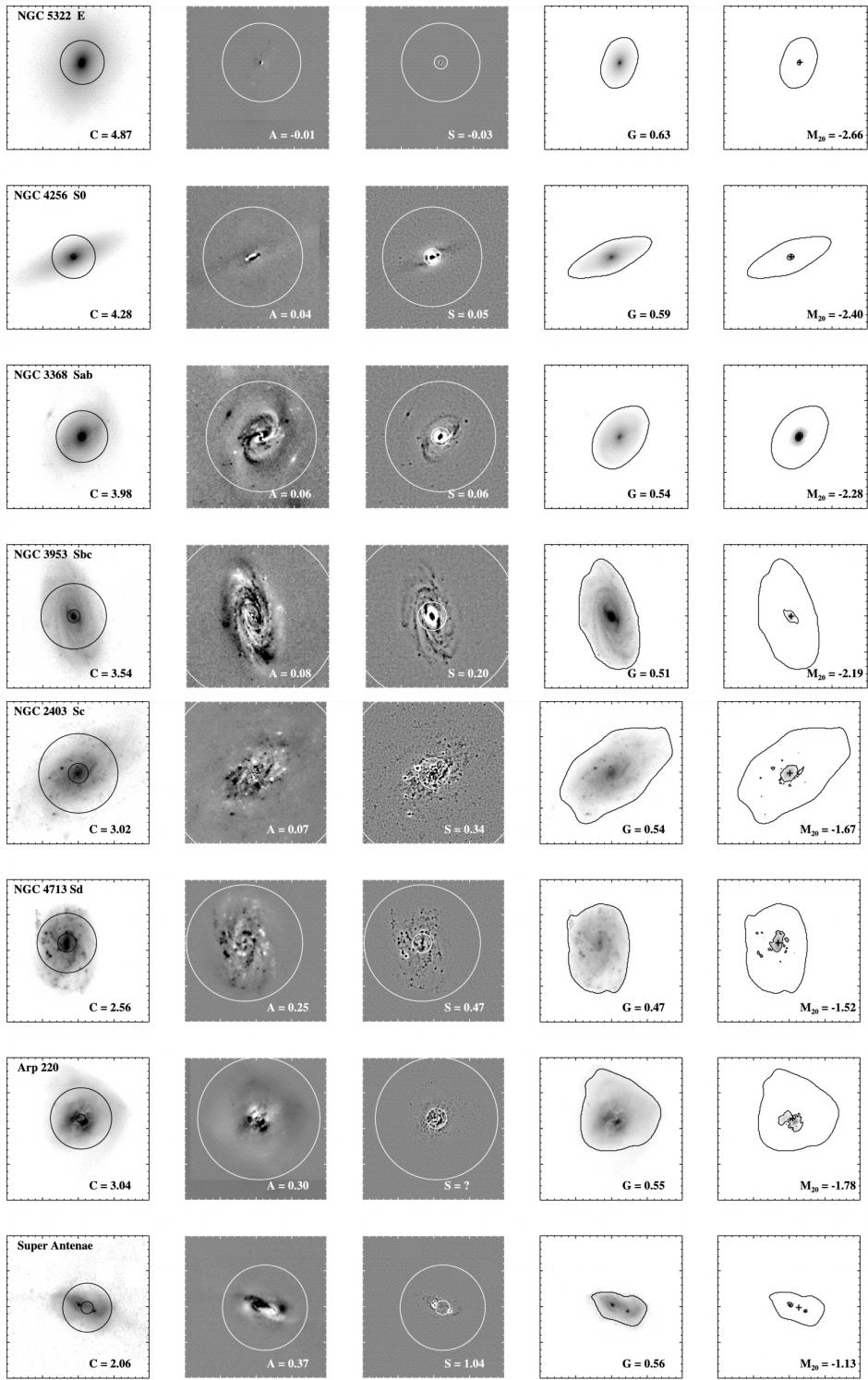
Moment drugog reda za 20% ukupnog intenziteta galaksije M_{20} se dobija prvo ređajući piksele u opadajućem nizu po intenzitetima u granicama galaksije definisanim preko r_p . Zatim se sumiraju redom najintenzivniji pikseli umnoženi za rastojanje od centra dok suma ne dostigne

vrednost od 20% ukupnog galaktičkog intenziteta f_{tot} . Na kraju se ova suma normalizuje sa ukupnim momentom drugog reda kako bi se otklonila zavisnost od ukupnog intenziteta galaksije i njene veličine. Formalno se to može zapisati kao:

$$M_{20} = \log_{10} \left(\frac{\sum_i M_i}{M_{tot}} \right) \quad (3.7)$$

gde je $M_i = f_i r_i$ moment pojedinačnog i -tog piksela iz skupa najintenzivnijih, a koji zadovoljavaju uslov $\sum_i f_i < 0,2f_{tot}$. Udeo od 20% se ispostavio kao najbolji kako bi se sa jedne strane (manje vrednosti) izbegli problemi sa malim prostornim rezolucijama galaksija, a sa druge (veće vrednosti) problemi sa lošim statističkim razvrstavanjem galaksija.

Kao što je i nagovešteno ranije, M_{20} dobro mapira prostornu raspodelu struktura poput svetlih jezgara, prečki, spiralnih grana i zvezdanih jata. Indeks M_{20} se od C razlikuje po tome što je otežan za prostornu raspodelu svetlih struktura galaksije (zavisnost od kvadrata rastojanja r^2), po tome što se ne meri pomoću kružne/eliptične aperture i po tome što je centar galaksije slobodan parametar (onako kako je definisan za M_{20}). Stoga je M_{20} značajno osetljiviji pri detekciji interagujućih galaksija poput višestrukih jezgara.



Slika 3.7: Grafički prikaz način računanja svih parametara za primere različitih tipova galaksija i njihove vrednosti. Konture oko galaksija predstavljaju ivice segmentacione mape. Slika je preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#)

3.2 Morfološki parametri galaksija - posmatranja i dosadašnji radovi

Većina radova koja se koristi C , A , S , G i M_{20} parametrima izučava set galaksija iz posmatranja ili simulacijama, a najčešće obuhvataju bliske normalne galaksije (eliptične, spiralne i nepravilne), zvezdorodne (eng. *starburst*) i galaksije u sudarima koje zrače vrlo intenzivno u IC domenu (eng. *Ultra Luminous Infra-Red Galaxies* - ULIRG). Nadalje će biti prikazani rezultati više različitih radova u cilju prikazivanja zasebnih vrednosti parametara i načina na koji su te vrednosti vezane za Hablove tipove. Uz to, biće navedena međusobna zavisnost parametara i koji od ovih parametara mogu biti indikatori sudara.

3.2.1 Vrednosti parametara za različite Hablove tipove

U tabeli 1 su izdvojeni primeri pojedinačnih galaksija sa vrednostima njihovih morfoloških parametara iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#). Odatle se vidi da galaksijama od ranijih ka kasnijim Hablovim tipovima opadaju vrednosti C , G i M_{20} , a rastu vrednosti A i S .

Tabela 1: Primeri galaksija iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#) poređani u sledećem redosledu: normalne bliske galaksije od ranijih preko kasnijih tipova (NGC katalog) do patuljastih spiralnih i nepravilnih (UGC katalog), i galaksije na velikim crvenim pomacima (IRAS katalog). Date su slike galaksija sa leve strane i odgovarajući podaci sa desne. Fotografije su dobijene pomoću [Aladin](#) programa koristeći podatke SDSS DR9 izgleda neba u boji, sve su centrirane i date u vidnom polju FoV: $9, 163' \times 9, 163'$.

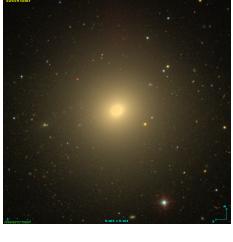
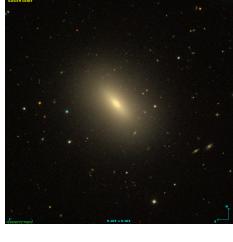
slika galaksije	ime galaksije, Hablov tip, vrednosti C , A , S , G i M_{20} parametara	slika galaksije	ime galaksije, Hablov tip, vrednosti C , A , S , G i M_{20} parametara
	NGC4374 E1 $C = 4.57$ $A = -0.05$ $S = -0.05$ $G = 0.60$ $M_{20} = -2.46$		NGC3377 E6 $C = 4.99$ $A = -0.02$ $S = -0.01$ $G = 0.64$ $M_{20} = -2.67$

Tabela 2: - Nastavak Tabele 1.

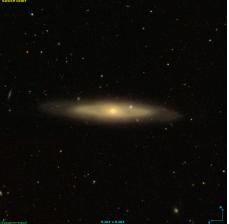
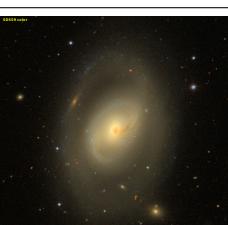
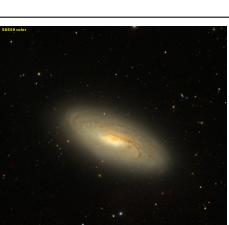
	NGC4866 Sa $C = 4.53$ $A = -0.04$ $S = 0.07$ $G = 0.51$ $M_{20} = -2.44$		NGC4754 Sa $C = 4.99$ $A = -0.01$ $S = 0.00$ $G = 0.63$ $M_{20} = -2.60$
	NGC5701 PR-SBa $C = 4.42$ $A = 0.03$ $S = 0.08$ $G = 0.59$ $M_{20} = -2.26$		NGC5377 SBa-Sa $C = 4.91$ $A = 0.00$ $S = -0.02$ $G = 0.57$ $M_{20} = -2.53$
	NGC4526 S0-3-6 $C = 4.28$ $A = 0.04$ $S = 0.05$ $G = 0.59$ $M_{20} = -2.40$		NGC3368 Sab-s-II $C = 3.98$ $A = 0.06$ $S = 0.06$ $G = 0.54$ $M_{20} = -2.28$
	NGC5005 Sb-s-II $C = 4.11$ $A = 0.11$ $S = 0.24$ $G = 0.55$ $M_{20} = -2.37$		NGC4548 SBb sr $C = 3.71$ $A = -0.00$ $S = 0.05$ $G = 0.56$ $M_{20} = -2.32$
	NGC4501 Sbc-s-II $C = 3.34$ $A = 0.13$ $S = 0.25$ $G = 0.49$ $M_{20} = -1.98$		NGC3953 SBbc-r-I-II $C = 3.54$ $A = 0.08$ $S = 0.20$ $G = 0.51$ $M_{20} = -2.19$

Tabela 3: - Nastavak Tabele 1.

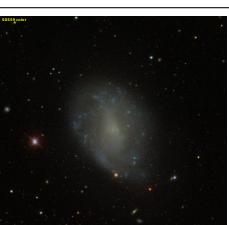
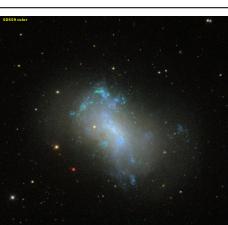
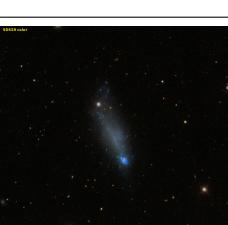
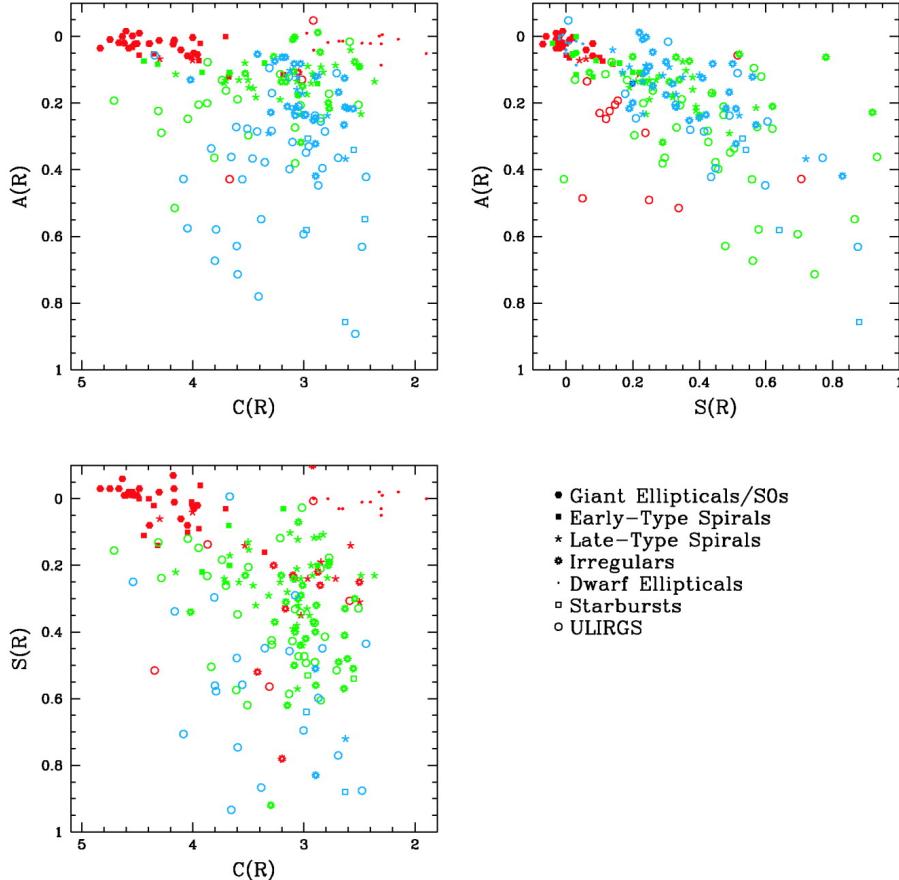
	NGC3198 Sc-s-I-II $C = 3.0$ $A = 0.03$ $S = 0.35$ $G = 0.56$ $M_{20} = -1.57$		NGC4254 Sc-s-I3 $C = 3.3$ $A = 0.29$ $S = 0.48$ $G = 0.51$ $M_{20} = -1.78$
	NGC5669 SBc-s-II $C = 3.1$ $A = 0.12$ $S = 0.31$ $G = 0.50$ $M_{20} = -1.87$		NGC2976 SdIII-IV $C = 2.6$ $A = 0.08$ $S = 0.33$ $G = 0.48$ $M_{20} = -1.29$
	NGC4242 SBdIII $C = 2.5$ $A = -0.20$ $S = 0.19$ $G = 0.49$ $M_{20} = -1.66$		NGC4449 SmIV $C = 3.2$ $A = 0.21$ $S = 0.39$ $G = 0.50$ $M_{20} = -1.56$
	NGC4498 SAB-s-d $C = 3.0$ $A = 0.05$ $S = 0.34$ $G = 0.52$ $M_{20} = -1.56$		NGC4861 SBmIII $C = 2.9$ $A = -0.03$ $S = 0.23$ $G = 0.48$ $M_{20} = -1.51$
	NGC5204 SdIV $C = 3.3$ $A = 0.24$ $S = 0.14$ $G = 0.55$ $M_{20} = -1.46$		NGC5585 Sd-s-IV $C = 3.2$ $A = 0.20$ $S = 0.15$ $G = 0.49$ $M_{20} = -1.94$

Tabela 4: - Nastavak
Tabele 1.

	NGC4713 SAB-rs-d $C = 2.56$ $A = 0.25$ $S = 0.59$ $G = 0.47$ $M_{20} = -1.45$		UGC09219 Im $C = 2.78$ $A = 0.36$ $S = 0.57$ $G = 0.50$ $M_{20} = -1.53$
	UGCa009 IB-s-m $C = 2.69$ $A = 0.01$ $S = 0.34$ $G = 0.49$ $M_{20} = -1.30$		UGC01104 Im $C = 3.18$ $A = 0.20$ $S = 0.36$ $G = 0.50$ $M_{20} = -1.69$
	UGC00685 SAm $C = 2.81$ $A = 0.18$ $S = 0.39$ $G = 0.52$ $M_{20} = -1.47$		GC00891 SABm $C = 2.90$ $A = 0.06$ $S = 0.38$ $G = 0.49$ $M_{20} = -1.56$
	IRAS17208-0014 $C = 2.97$ $A = 0.31$ $S = 0.61$ $G = 0.51$ $M_{20} = -1.64$		IRAS13428+5608 $C = 3.21$ $A = 0.21$ $S = 0.49$ $G = 0.54$ $M_{20} = -1.72$
	IRAS15250+3609a $C = 3.51$ $A = 0.44$ $S = 0.64$ $G = 0.56$ $M_{20} = -1.62$		IRAS09320+6134 $C = 4.09$ $A = 0.15$ $S = 0.29$ $G = 0.56$ $M_{20} = -1.83$

3.2.2 Korelacije parametara



Slika 3.8: Parametarski 3D prostor CAS predstavljen na 2D graficima, a treći parametar je prikazan pomoću boje. Na gornjem levom dijagramu je data zavisnost $C-A$, pri čemu su galaksije sa $S < 0, 1$ predstavljene crvenom bojom, $0, 1 < S < 0, 35$ zelenom bojom i za $S > 0, 35$ plavom bojom. Gornji desni grafik je zavisnost $A-S$, gde je $C > 4$ dato u crvenoj, $3 < C < 4$ u zelenoj, a $C < 3$ u plavoj boji. Analogno za donji levi $C-S$ grafik važi da je $A < 0, 1$ crvene, $0, 1 < S < 0, 35$ zelene, a $A > 0, 35$ plave boje. Uz to, data je i legenda Hablovih tipova koji su korišćeni, uz dodatak zvezdorodnih galaksija i ULIRG-a. Slika preuzeta iz rada [Conselice \(2003\)](#)

Efikasnost izdvajanja određenog Hablovog tipa galaksija se može testirati posmatrajući parametarski prostor datih morfoloških parametara. Najpre je to učinjeno u radu [Conselice \(2003\)](#), gde su se posmatrali C , A i S i njihove međusobne zavisnosti za skup bliskih galaksija. Na slici 3.8 dati su rezultati rada za galaksije posmatrane u crvenom R filteru. Najbolje grupisanje se može videti kod eliptičnih galaksija koje pose-

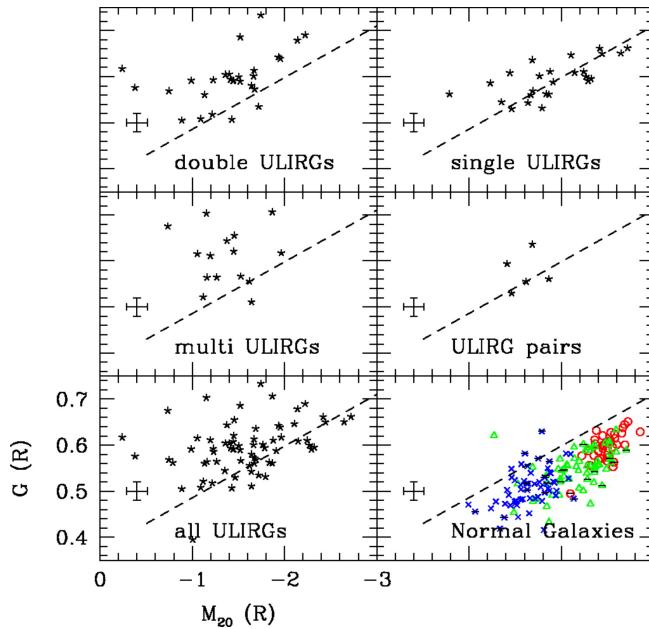
duju visoke vrednosti C (srednja vrednost je $\bar{C} = 4,4 \pm 0,3$), a male vrednosti A ($\bar{A} = 0,02 \pm 0,02$) i S ($\bar{S} = 0,00 \pm 0,04$) zbog male unutrašnje strukture (regiona formiranja zvezda) i značajno koncentrisane raspodele sjaja. Raniji spiralni Hablovi tipovi (Sa i Sb) poseduju veće vrednosti A ($\bar{A} = 0,07 \pm 0,04$) i S ($\bar{S} = 0,08 \pm 0,08$) i manje vrednosti C ($\bar{C} = 3,9 \pm 0,5$), dok kasniji spiralni tipovi imaju još veće vrednosti A ($\bar{A} = 0,15 \pm 0,06$) i S ($\bar{S} = 0,29 \pm 0,13$) i još manje vrednosti C ($\bar{C} = 3,1 \pm 0,4$). Ponašanje ovih vrednosti je očekivano jer brojnost regionala formiranja zvezda raste od ranijih ka kasnijim Hablovim tipovima, a koncentrisanost raspodele opada zbog značajnijeg momenta impulsa sistema. Uz to, same greške tj. standardne devijacije pomenutih srednjih vrednosti govore o tome koliko je neki parametar uniforman na osnovu čega se može odrediti koji parametar je pouzdaniji marker za interakcije.

Rad [Lotz et al. \(2004\)](#) se nadograđuje na pređašnji, povećanjem skupa galaksija i proširivanjem skupa parametara, uvodeći G i M_{20} . Rezultati parametarskog prostora $C - A - S - G - M_{20}$ su prikazani na slikama:

- $G - M_{20}$ na slici [3.9](#);
- $C - M_{20}$ na slici [3.10](#);
- $C - G$ na slici [3.11](#);
- $C - A$ na slici [3.12](#);
- $G - A$ na slici [3.13](#);
- $S - C$ na slici [3.14](#);
- $S - G$ na slici [3.15](#);
- $M_{20} - A$ na slici [3.16](#);
- i $S - M_{20}$ na slici [3.17](#).

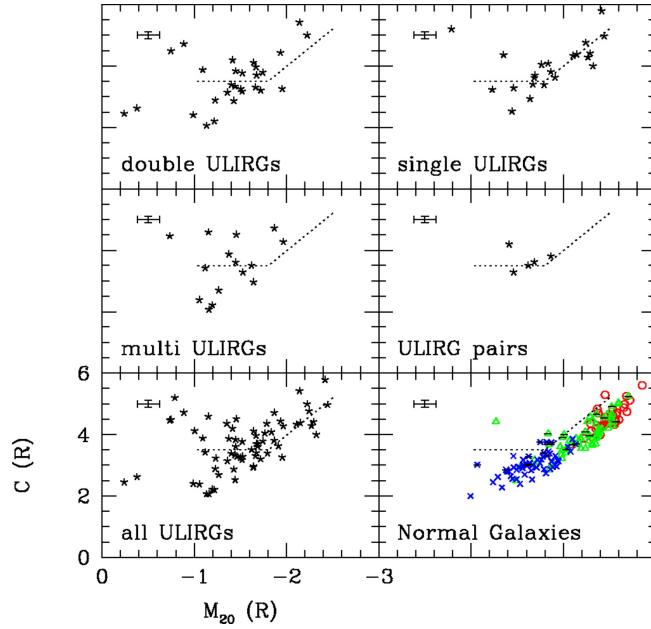
Na svakoj od njih su upoređeni rezultati dobijeni za normalne galaksije (za koje se smatra da nisu u aktivnoj interakciji) i za ULIRG za koje je karakteristična trenutna ili skorašnja interakcija, a ona se ogleda u većim vrednostima asimetrije, višestrukim jezgrima i plimskim repovima (eng. *tidal tails*). ULIRG su podeljene dalje na parove galaksija koje su vidno razdvojene i one sa jednim, dva ili više vidljivih jezgara. Najbolje razdvajanje normalnih galaksija i ULIRG se primećuje kod zavisnosti $G - M_{20}$, gde ULIRG imaju primetno veće vrednosti oba parametra (G zbog svetlih i kompaktnih jezgara i M_{20} sjajnih plimskih repova), s tim da ova zavisnost slabije identificuje ULIRG sa jednim jezgrom. Dobro razdvajanje se javlja i kod zavisnosti $G - A$ i $G - S$, dok se kod ostalih uviđa značajno preklapanje oba tipa. Zanimljivo je i to da G značajno veće u odnosu na C kod ULIRG sa dva ili više jezgra u odnosu na normalne galaksije. Takođe, kombinacija parametra M_{20} sa C , A i S nije efektivna za

razlikovanje normalnih galaksija i ULIRG. Što se tiče razdvajanje tipova ULIRG, najmanje odstupanje od normalnih pokazuju parovi galaksija, dok one sa jednim jezgrom, iako slične parovima, mogu imati veće vrednosti G i C . ULIRG sa duplim i višestrukim jezgrima pokazuju značajno veće M_{20} i A vrednosti u odnosu na one sa jednim jezgrom.

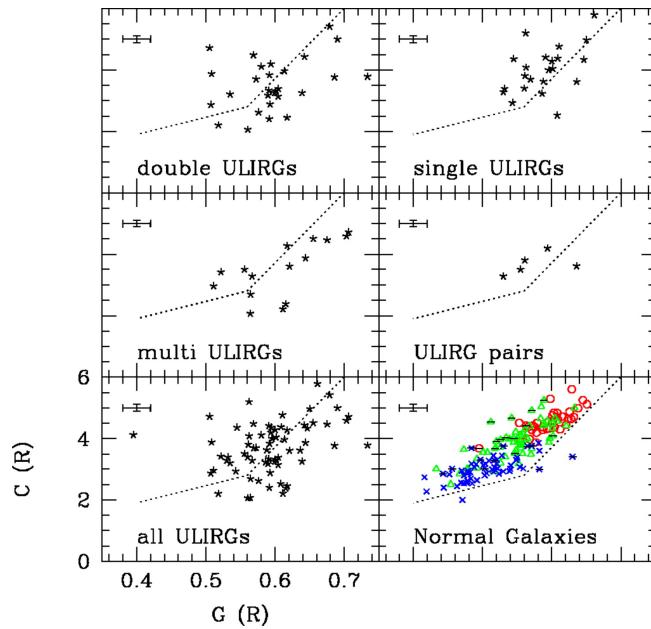


Slika 3.9: Zavisnost $G - M_{20}$ za normalne galaksije (u boji) i različite tipove ULIRG (crne zvezdice). Isprekidana linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Različiti Hablovi tipovi su prikazani na sledeći način: crveni krugovi su E/S0 tipovi, zeleni trouglovi su Sa-Sbc tipovi, plavi krstići su Sc-Sdm tipovi, a ukoliko je simbol precrtao horizontalnom linijom u pitanju je *edge-on* spiralna galaksija. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).

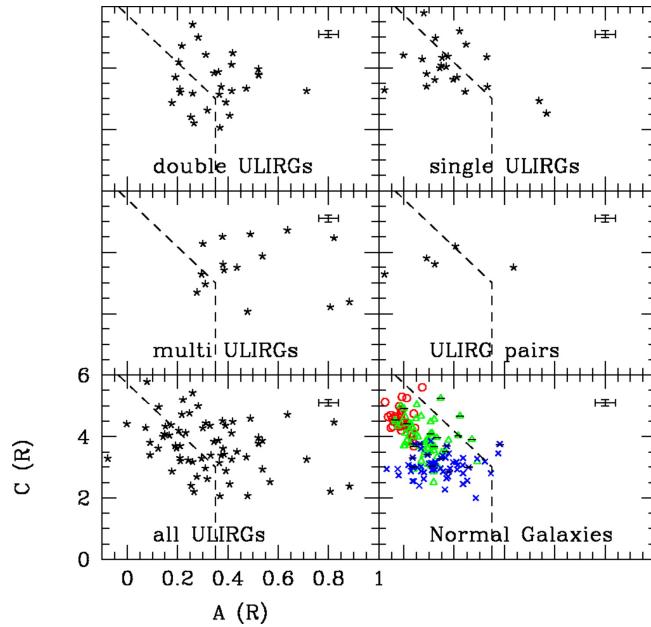
Dakle, normalne galaksije se mogu naći u uskom opsegu $G - M_{20} - C$ prostora, uz to da raniji Hablovi tipovi i oni sa velikim centralnim ovalom imaju veće vrednosti G i C , a niže vrednosti M_{20} . U suprotnom smeru se protežu kasniji Hablovi tipovi, karakteristični po rasplinutoj raspodeli površinskog sjaja, spiralnim granama i zvezdanim jatima. Dešava se da poneka normalna galaksija, najčešće *edge-on* tipa, zađe u oblast interagujućih. Sa druge strane, ULIRG pokazuju značajno rasipanje u oblasti galaksija u interakciji, ali mahom prelaze i u oblast normalnih.



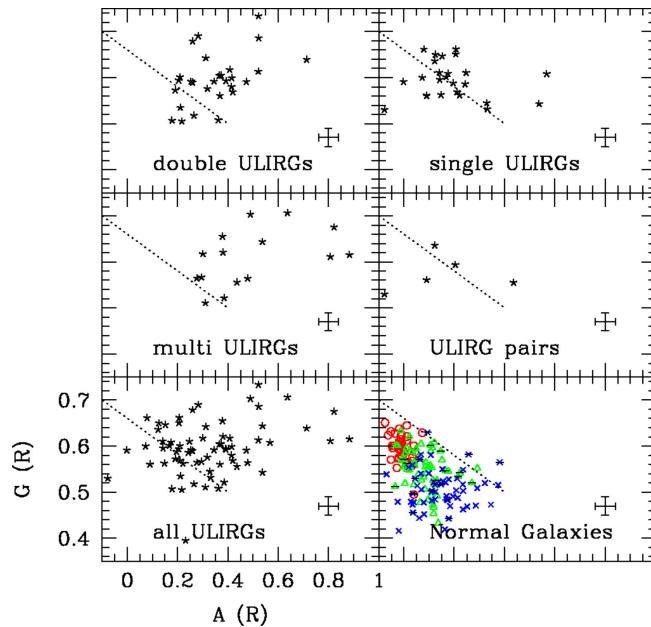
Slika 3.10: Zavisnost $C - M_{20}$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Tačkasta linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



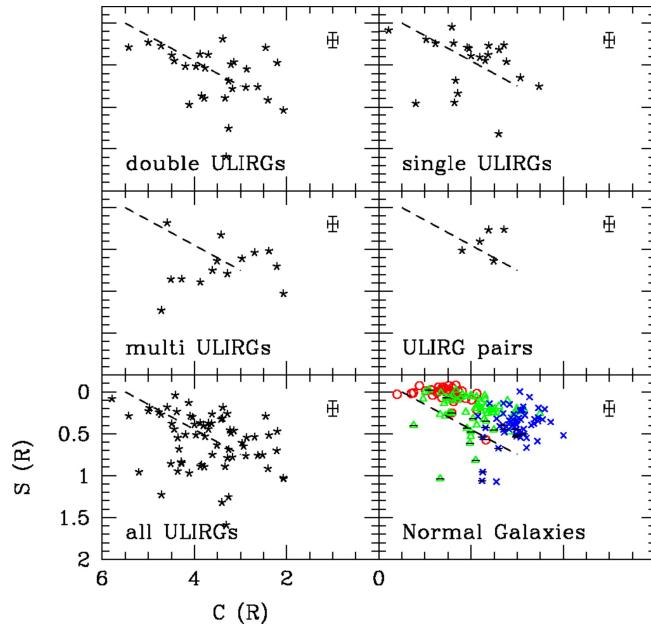
Slika 3.11: Zavisnost $C - G$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Tačkasta linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



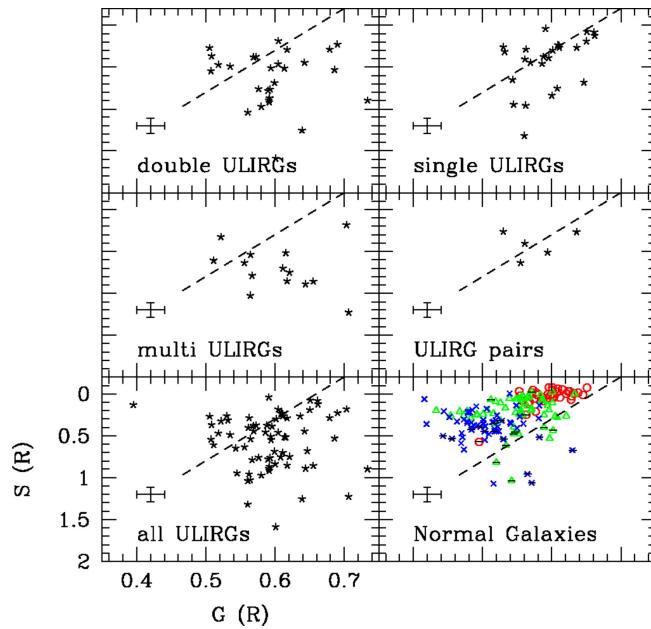
Slika 3.12: Zavisnost $C - A$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Isprekidana linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



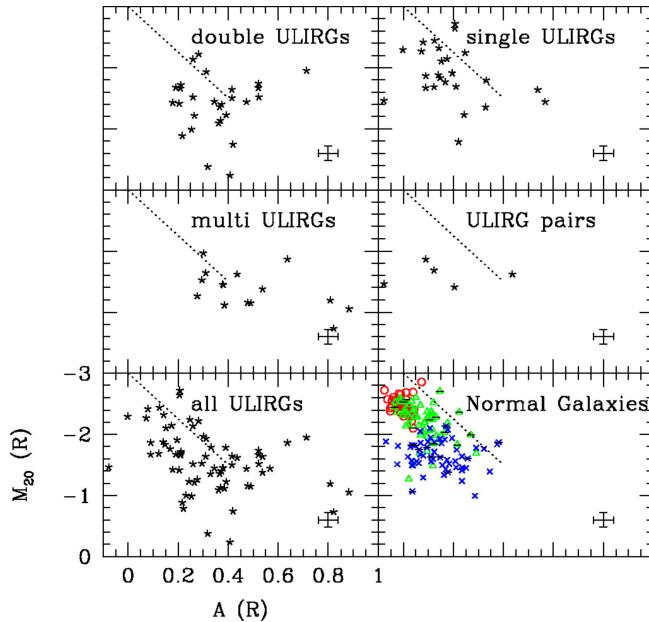
Slika 3.13: Zavisnost $G - A$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Tačkasta linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



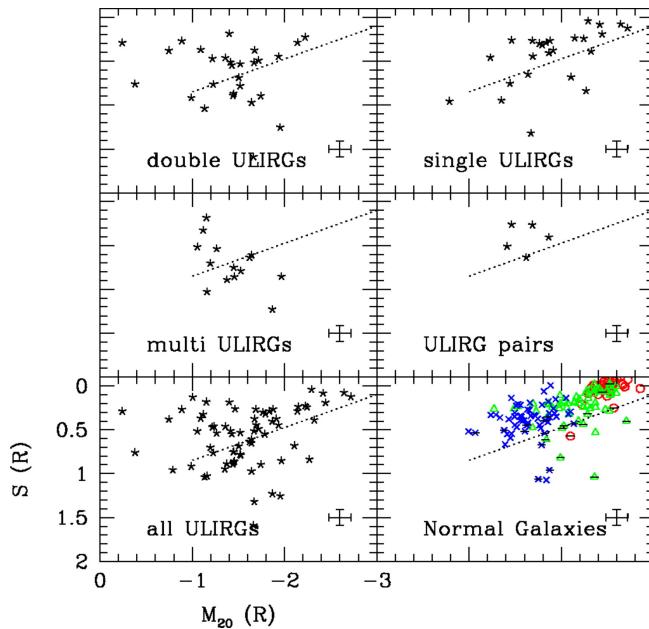
Slika 3.14: Zavisnost $S - C$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Isprekidana linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



Slika 3.15: Zavisnost $S - G$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Isprekidana linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



Slika 3.16: Zavisnost $M_{20} - A$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Tačkasta linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).



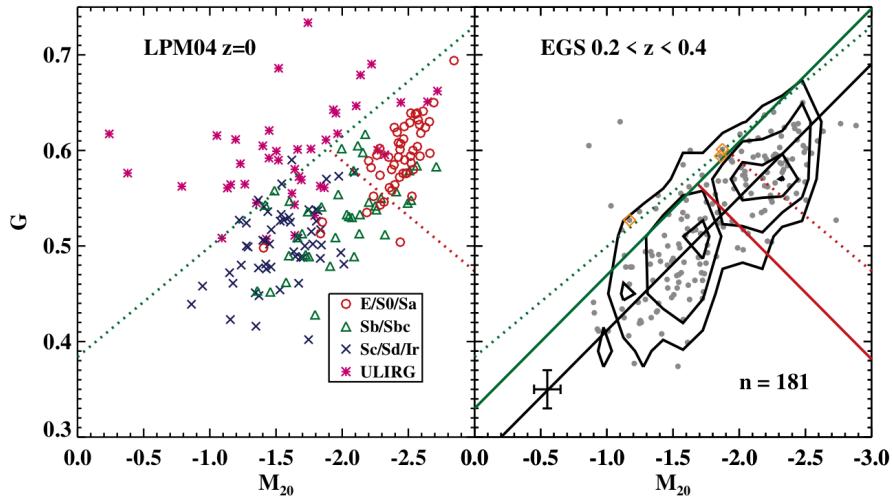
Slika 3.17: Zavisnost $S - M_{20}$ za normalne galaksije i različite tipove ULIRG. Isprekidana linija odvaja normalne galaksije od ULIRG. Svi simboli su isti kao na slici 3.9. Slika preuzeta iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#).

Uzimajući u obzir rezultate [Lotz et al. \(2004\)](#), u jednom od narednih radova [Lotz et al. \(2008\)](#) identifikovane su oblasti koje pretežno izdvajaju različite tipove galaksija u $G - M_{20}$ prostoru koristeći podatke iz različitih posmatranja (za detalje pogledati tabele date u radu [Lotz et al. \(2004\)](#)). Linija koja razdvaja ULIRG i normalne galaksije je:

$$G = -0,115 M_{20} + 0,384; \quad (3.8)$$

dok se za razdvajanje ranije Hablove populacije E/S0/Sa od kasnijih Sb/Sc koristi relacija:

$$G = 0,89 M_{20} + 0,74. \quad (3.9)$$



Slika 3.18: Zavisnost $G - M_{20}$ za lokalni skup galaksija iz rada [Lotz et al. \(2004\)](#) (levo) sa pravom koja razdvaja galaksije u interakciji od normalnih data jednačinom 3.8 (tačkasta zelena prava) i pravom koja razdvaja ranije E/S0/Sa od kasnijih Sb/Sc/Ir Hablovih tipova data jednačinom 3.9 (tačkasta crvena prava). Zavisnost $G - M_{20}$ za skup galaksija na crvenim pomacima $0,2 < z < 0,4$ iz rada [Lotz et al. \(2008\)](#) (desno) sa pravom koja razdvaja galaksije u interakciji od normalnih data jednačinom 3.10 (puna zelena prava) i pravom koja razdvaja ranije E/S0/Sa od kasnijih Sb/Sc/Ir Hablovih tipova data jednačinom 3.11 (puna crvena prava), a prikazane su i prave razdvajanja za lokalni skup galaksija. Slika preuzeta iz rada ([Lotz et al. 2008](#)).

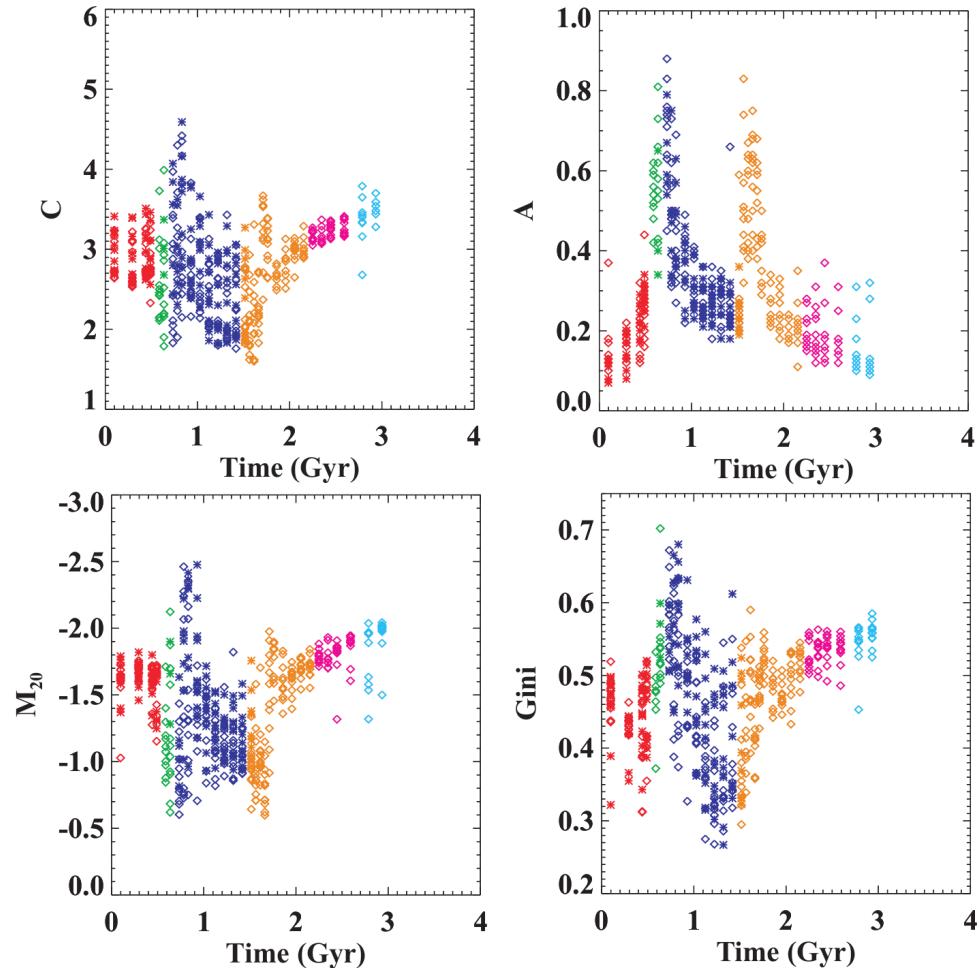
Date linije razdvajanja u prostoru se odnose na lokalne galaksije na malim rastojanjima, odnosno malim crvenim pomacima. Koristeći podatke sa Hablovog Dubokog Polja (eng. *Hubble Deep Field*) ustanovljeno je da galaksijama na crvenim pomacima $0,2 < z < 0,4$ bolje odgovaraju sledeće razdvoje linije:

$$G = -0,14 M_{20} + 0,33; \quad (3.10)$$

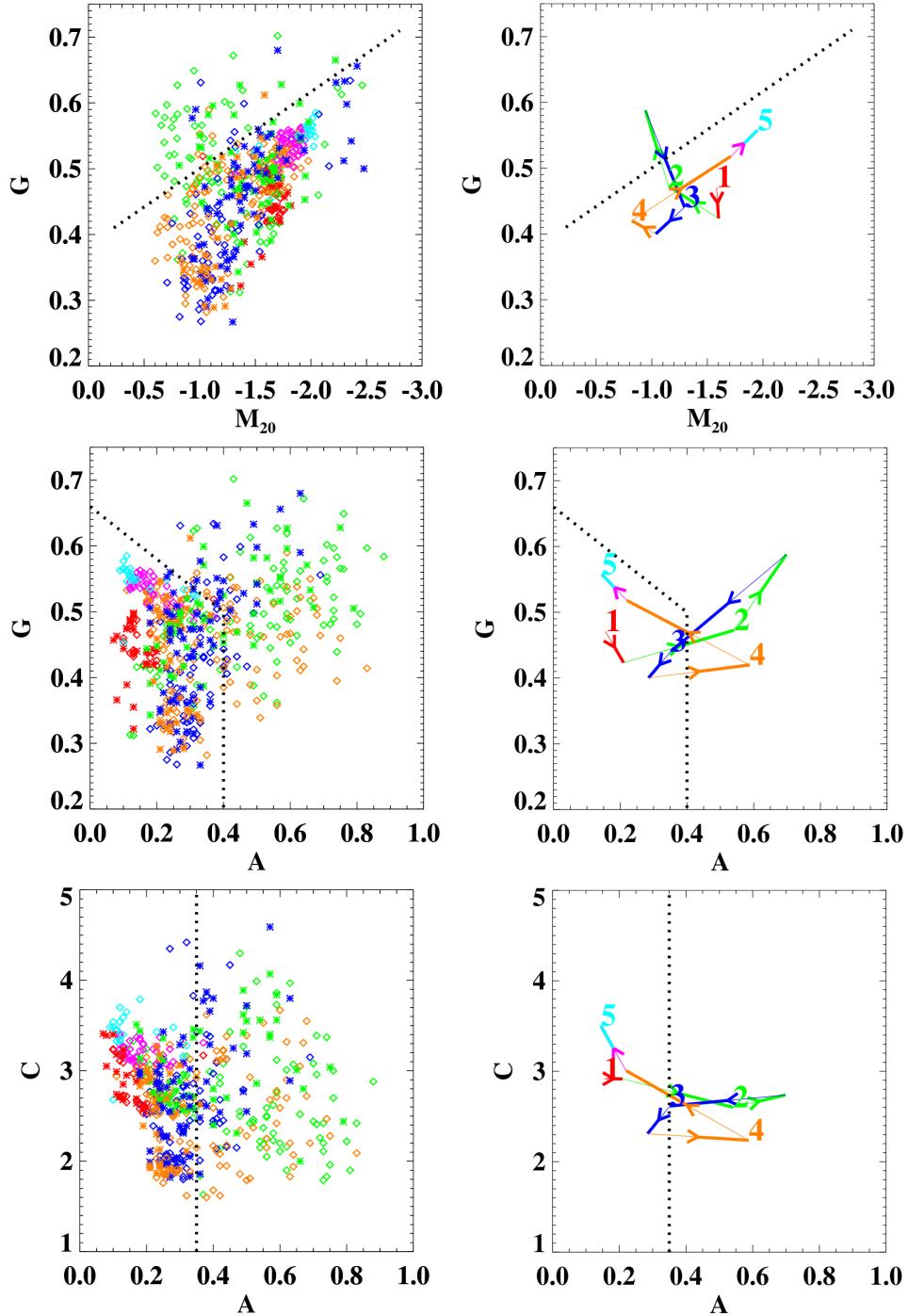
za razdvajanje normalnih i ULIRG, dok za ranije Hablove populacije E/S0/Sa od kasnijih Sb/Sc važi:

$$G = 0,14 M_{20} + 0,8. \quad (3.11)$$

Nakon utvrđenih empirijskih relacija za razdvajanje, u radu [Lotz, Jonsson, Cox and Primack \(2008\)](#) su simulirani sudari sistema sa dve spiralne galaksije sa ciljem da se ispitaju ponašanja parametara u različitim fazama sudara (faze definisane u poglavlju [Faze sudara](#)). Ovde su parametri su zasebno računati za obe galaksije do faze njihovog spajanja (do faze 5 narandžasta boja), a nakon toga se parametri računaju pojedinačni ostatak nakon interakcije. Rezultati su usrednjeni u odnosu na ugao posmatranja i prikazani na slici [3.19](#). Odavde je utvrđeno da postoji značajna promena parametara u fazama 3 (zelena boja) i 5 (narandžasta boja), a u istim fazama se uočava i značajni rast stope formiranja zvezda. Na slici [3.20](#) su za posmatranu simulaciju prikazane zavisnosti parametara $G - M_{20}$, $G - A$ i $C - A$ i njihovi evolutivni putevi kroz navedene parametarske prostore tokom svih faza sudara. Parametri mahom nastanjuju oblasti normalnih galaksija, osim u krajnjoj fazi 3 i na početku faze 4 za sve zavisnosti i tokom faze 5 za $G - A$ i $C - A$ zavisnosti za faze definisane u poglavlju [2.5.1](#) (na pomenutoj slici ovo odgovara putevima: kraj puta 2 i početak puta 3 i delu puta 4). Dakle, u fazama kada raspodele sjaja galaksija prelaze iz vidno razdvojenih u perturbovanu celinu sa dva jezgra, dolazi do naglih promena parametara koja je oslikana prelaskom u oblast interagujućih galaksija. U slučaju dve zasebne neiteragujuće galaksije i ostatka sudara, ovi parametri se nalaze u prostoru normalnih galaksija.



Slika 3.19: Ponašanje parametara C , A , M_{20} i G tokom čitave interakcije i svih faza sudara u zavisnosti od vremena. Različitim bojama su prikazane faze 2-7 navedene u poglavljju 2.5.1, i to redom: crvenom, zelenom, tamno plavom, narandžastom, ružičastom i svetlo plavom. Simboli dijamanta predstavljaju jednu od galaksija pre interakcije i ostatak formiran nakon sudara i spajanja, a krstići predstavljaju drugu galaksiju pre spajanja. Slika preuzeta iz rada [Lotz, Jonsson, Cox and Primack \(2008\)](#).

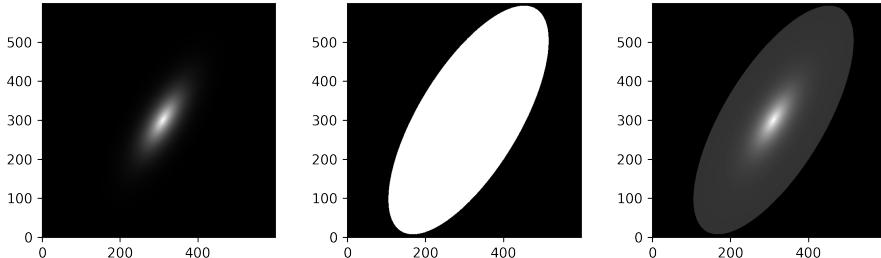


Slika 3.20: Zavisnosti parametara $G - M_{20}$, $G - A$ i $C - A$ (desna kolona odozgo na dole) i evolutivni putevi kroz navedene parametarske prostore (leva kolona odozgo na dole) tokom svih faza sudara. Boje i simboli su isti kao i na slici 3.19. Tačkaste linije dele normalne galaksije od interagujućih, a preuzete su iz već pomenutog rada [Lotz et al. \(2004\)](#). Slika preuzeta iz rada [Lotz, Jonsson, Cox and Primack \(2008\)](#).

3.3 Statmorph programski kod

Većina astrofizičkih analiza u današnjem vremenu zahteva kompjutersku obradu, pa tako i ispitivanje morfoloških parametara. U tu svrhu razvijen je Python3 kod pod nazivom **statmorph** koji je kao programski paket povezan sa **astropy**, a služi za dijagnostikovanje neparametarske morfologije slike galaksija i fitovanje 2D Sérsic profila. Kao ulazne parametre dobija sliku galaksije i njenu segmentacionu mapu, a kao izlaz daje, između ostalog, parametare C , A , S , G , M_{20} i parametre fitovanog Sersikovog profila (a , r_e , n , (x_0, y_0) , ϵ i θ). Detalji o paketu i primer implementacije koda se mogu naći na zvaničnoj web stranici [statmorph](#)-a.

Ovde će biti izdvojen jedan primer rada koda na proizvoljnom modelu galaksije. Najpre se kreira model galaksije sa raspodelom površinskog sjaja u vidu Sersik profila u vidnom polju $600\text{px} \times 600\text{px}$, gde su ulazne vrednosti: amplituda $a = 1$, efektivni radijus $r_e = 80\text{px}$, Sersikov indeks $n = 0,86$, koordinate centra raspodele ($x_0 = 310\text{px}$, $y_0 = 300\text{px}$), eliptičnost $\epsilon = 0,61$ i nagibni ugao $\theta = 67^\circ$. Potom je sačinjena segmentaciona mapa koja predstavlja isečak slike u kojem je detektovana galaksija. Kod ove dve stavke, originalnu sliku i segmentacionu mapu, koristi kao ulazne podatke za određivanje morfoloških parametara, a obe su prikazane na slici 3.21.



Slika 3.21: S leva na desno: originalna slika modela galaksije, odgovarajuća segmentaciona mapa i kombinacija originalne slike sa segmentacionom mapom.

Uz samo računanje parametara, kod automatski fituje galaksiju u segmentacionoj mapi jedinstvenim Sersikovim profilom (smatra da se u segmentacionoj mapi nalazi jedna galaksija), a parametar fita daje kao izlazni podatak. Sa primerom datim na slici, trivijalno se dobijaju vrednosti koje su bile ulazni parametri ($a = 1$, $r_e = 80\text{px}$, $n = 0,86$, $x_0 = 310\text{px}$, $y_0 = 300\text{px}$, $\epsilon = 0,61$ i $\theta = 67^\circ$). Međutim, ako bi se fitovali neki složeniji

sistemi koji na samom početku nisu bili čisti Sersik profili, dobila bi se najpribližnija Sersik raspodela tog sistema, odnosno dobio bi se **fitovani Sersikov profil**.

4 Ispitivanje parametara modela galaksija u interakciji

Ideja ovog rada jeste da se posmatraju različiti jednostavni modeli galaksija u interakciji i da se pomoću njih odrede morfološki parametri koji bi se potom uporedili sa dosadašnjim radovima u cilju identifikacije parametarske kombinacije koja je najosetljivija na interakcije. Detaljnije, prvo će se posmatrati **modeli pojedinačnih galaksija** za različite eliptičnosti ϵ . Drugi skup modela će se fokusirati na dva modela galaksije koji će se međusobno upoređivati:

1. **model sudarajućih galaksija** - model dve jednakе galaksije koje su dovoljno bliske i nerazlučive kao pojedinačne (smatraju se jednom galaksijom i imaju jednu segmentacionu mapu);
2. **model fitovane galaksije** - fitovani Sersik profil modela sudarajućih galaksija.

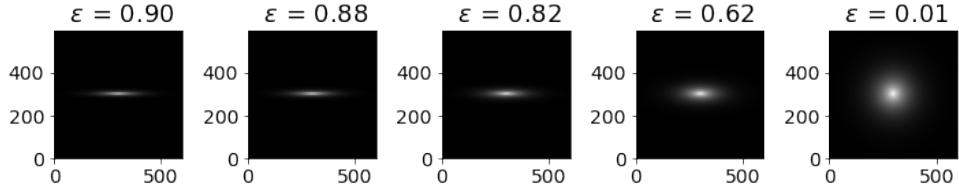
Tačnije, upoređivaće se slučajevi dve sudarajuće galaksije sa dva nerazlučena centra i Sersik fit tog sistema koji oslikava normalnu galaksiju sa jednim centrom tako da joj je raspodela sjaja najpribližnija sistemu sudarajućih galaksija. Svi modeli će nadalje biti prikazani na vidnom polju veličine $600\text{px} \times 600\text{px}$ i koristiti Sersikov profil raspodele površinskog sjaja. Način implementacije nabrojanih modela u kodu su date u Dodatku.

4.1 Modeli pojedinačnih galaksija

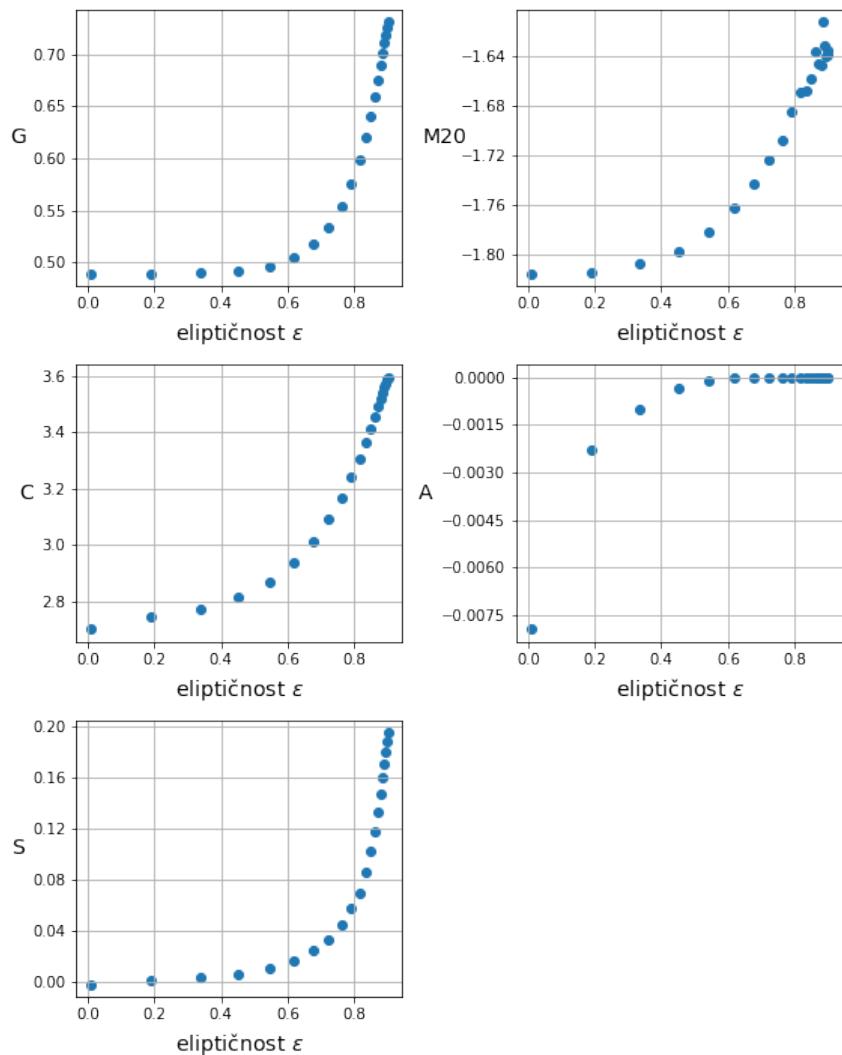
U prvom delu, kao što je navedeno, biće određeni morfološki parametri pojedinačnih galaksija za različite vrednosti eliptičnosti kako bi ispitali kako se oni menjaju prelaskom sa *face-on* na *edge-on* tipove galaksija. Preciznije, fiksirane vrednosti parametra za Sersikov model pojedinačne galaksije su sledeći: amplituda $a = 1$, efektivni radijus $r_e = 100\text{px}$, Sersikov indeks $n = 1$ i nagibni ugao $\theta = 0$, dok se eliptičnosti kreću logaritamski od 0,9 do 0,01. Na slici 4.1 je na vidnom polju prikazano 5 od 21 slučaja za određene vrednosti eliptičnosti. Za sve modele su određeni morfološki parametri, a rezultati su prikazani na slici 4.2 u odnosu na ulazne eliptičnosti ϵ .

Rezultati pokazuju da svi parametri rastu za galaksije sa sve većom eliptičnošću, što se i očekivalo: G raste zbog toga što neravnomernost u

raspodeli uslovljena odustvom raspodele svetlosti oko galaksije za *edge-on* galaksije. Iz sličnih razloga rastu i ostali parametri.



Slika 4.1: Izgled modela pojedinačnih galaksija u vidnom polju za različite eliptičnosti ϵ .



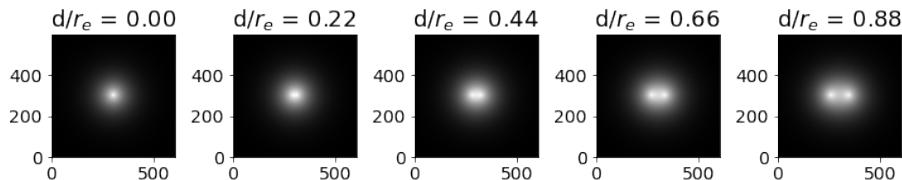
Slika 4.2: Morfološki parametri G , M_{20} , C , A i S u zavisnosti od eliptičnosti ϵ .

4.2 Modeli galaksija u interakciji

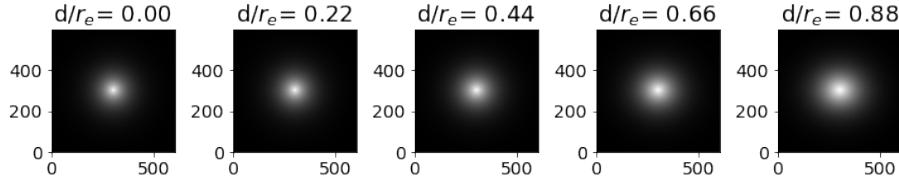
Za model galaksija u interakciji ćemo posmatrati model sudsarajućih galaksija koji obuhvata dve jednake galaksije od kojih svaka ima Sersikovu raspodelu površinskog sjaja, a nalaze se na bliskom rastojanju tako da nisu razlučive kao pojedinačne galaksije. Odavde sledi da će ovakav sistem sadržati dva sjajna centralna jezgra. Takav sistem će potom biti modelovan jednim Sersikovim profilom, čime se dobija samo jedno izraženo centralno jezgro, odnosno model fitovane galaksije. Za oba ova modela će biti određeni morfološki parametri i upoređeni. Modeli će se razlikovati po eliptičnosti pojedinačnih galaksija koje čine sudsarajući model, a u okviru svake vrednosti eliptičnosti će se menjati rastojanje između galaksija u sudsarajućem modelu. Fiksirani parametri za obe galaksije u sudsarajućem modelu su: amplituda $a = 1$, efektivni radijus $r_e = 100\text{px}$, Sersikov indeks $n = 1$ i nagibni ugao $\theta = 0$. Rastojanja obe galaksije su definisana od centra i imaju istu diskretnu vrednost do granice nerazlučivosti kada je njihovo međusobno rastojanje $d_{cr} = 83\text{px}$. Vrednosti međusobnog rastojanja centara galaksija d se kreću od 0px do 44px sa korakom od $2,2\text{px}$. Konačni morfološki parametri će biti prikazani u zavisnosti od odnosa d i efektivnog radijusa pojedinačne ($r_e = 100\text{px}$), a potom i njihove međusobne zavisnosti.

4.2.1 Model *face-on* galaksija u interakciji

Prvi primer modela u interakciji će predstavljati opisanu grupaciju za *face-on* galaksije, gde je fiksirana eliptičnost $\epsilon = 0$, odnosno galaksije imaju kružnu raspodelu površinskog sjaja. Na slici 4.3 prikazano je 5 od 21 generisana modela dve galaksije, a na slici 4.4 su odgovarajuće fitovane galaksije.



Slika 4.3: Izgled sudsarajućih modela galaksija u vidnom polju za $\epsilon = 0$. Sve vrednosti do $d/r_e \leq 0,83$ su nerazlučive po Rejlijevom kriterijumu.

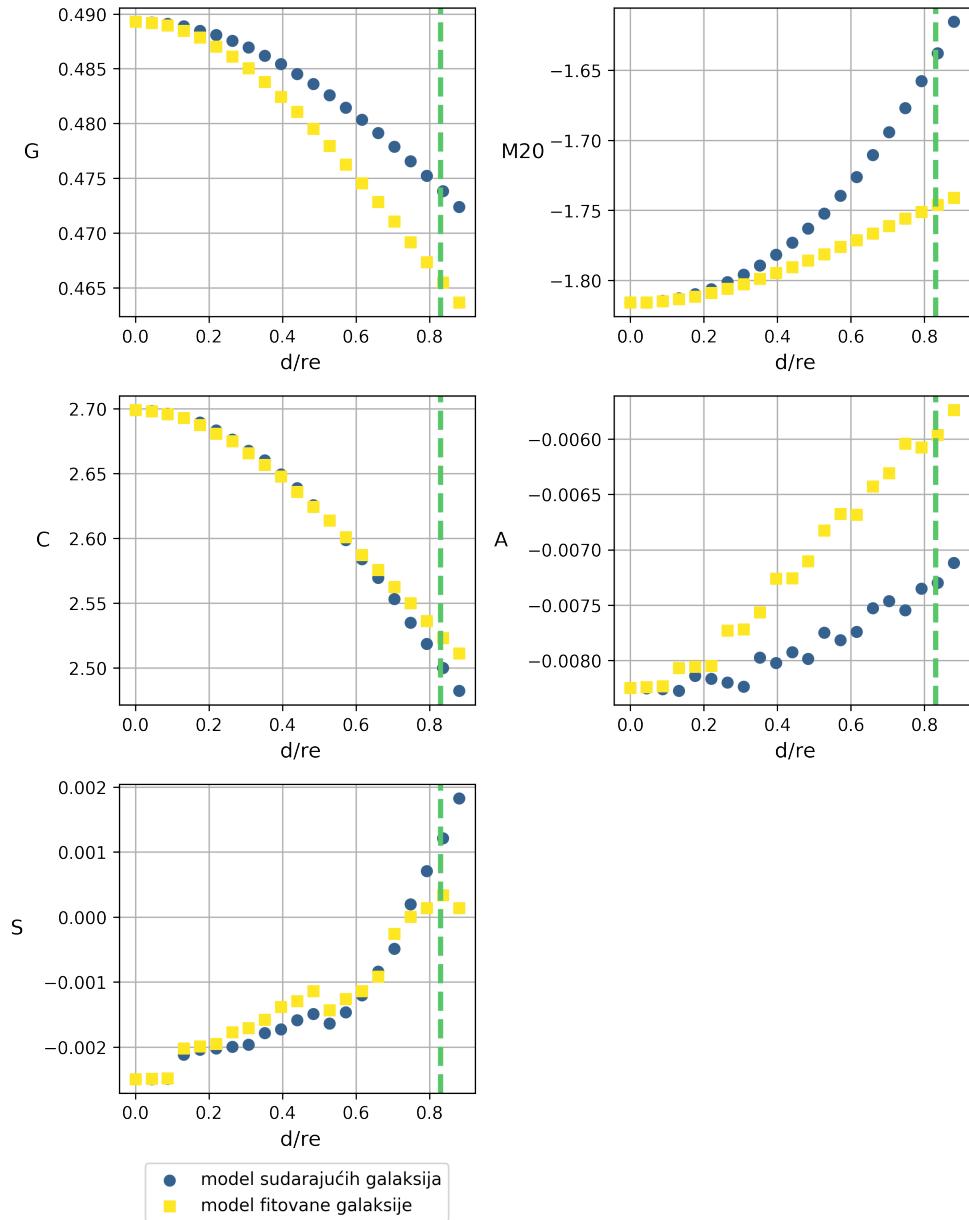


Slika 4.4: Izgled korespondentnih fitovanih modela sudarajućih galaksija u vidnom polju za $\epsilon = 0$.

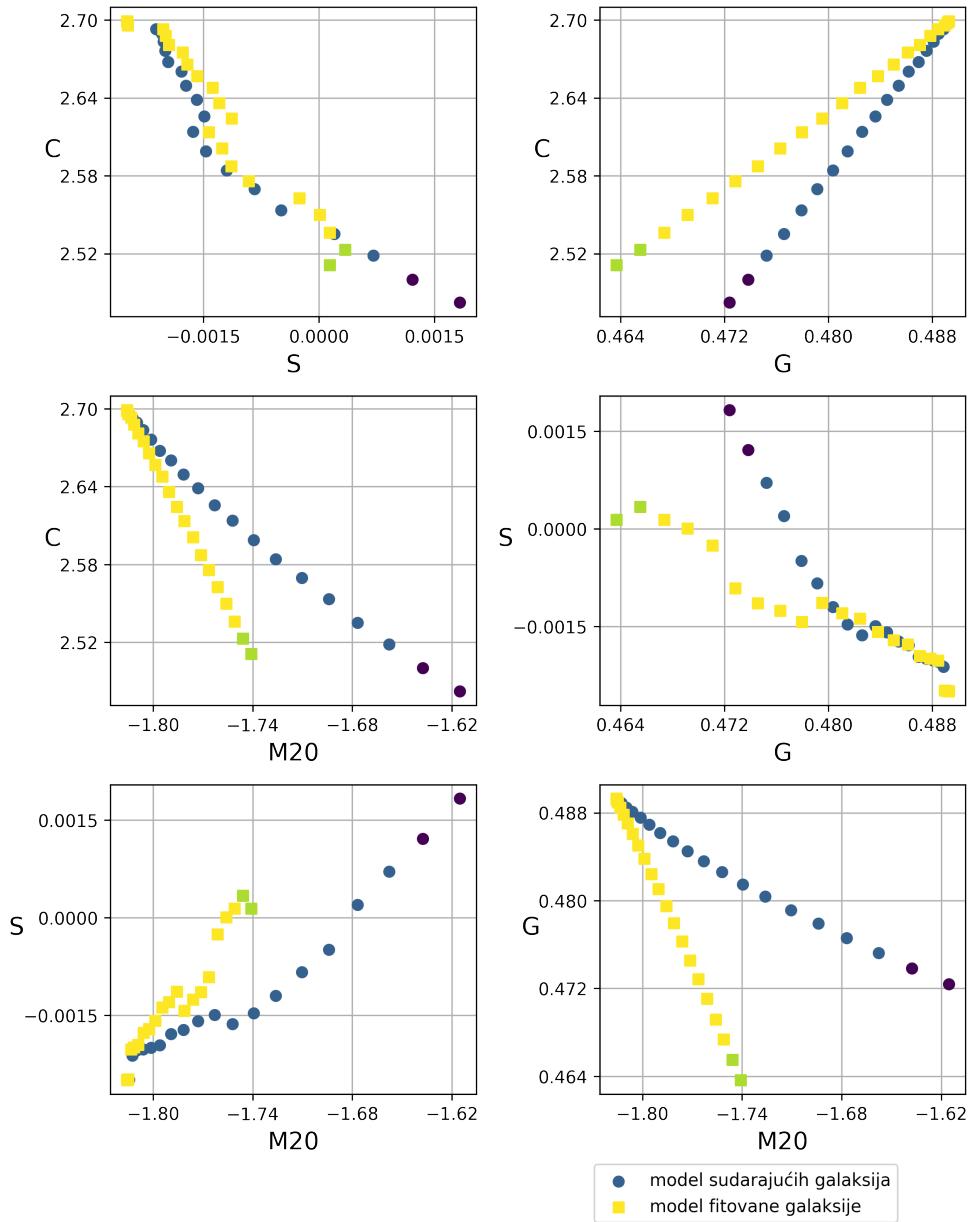
Nakon računanja morfoloških parametara, dobijaju se zavisnosti svakog od parametra u zavisnosti od odnosa količnika međusobnog rastojanja centara kod prvog modela sa efektivnim radijusom pojedinačne galaksije d/r_e prikazane na slici 4.5. Parametri G i C opadaju sa d/r_e jer površinski sjaj postaje ravnomerniji u svojoj raspodeli zbog razdvajanja centara kod sudarajućeg modela, odnosno širenja raspodele kod fitovanog modela. Sa druge strane, parametri A i S slabo rastu sa d/r_e kao posledica izmena u raspodeli galaksije: dva centra kod modela sudarajućih i izduženosti kod fitovanog modela. Specijalno, M_{20} značajno raste, posebno kod sudarajućeg modela, zbog izdvajanja distinktnih centara koji su pritom oteženi za rastojanje od centra. Sudarajući model se od fitovanog modela najviše razlikuje kod parametara M_{20} i G .

Na slikama 4.6 i 4.7 date su međusobne zavisnosti morfoloških parametara. Distinktno razdvajanje modela se može primetiti na $G - M_{20}$, $C - G$ i $C - M_{20}$, a nešto manje na $S - G$ i $S - M_{20}$ zavisnostima, s tim da su promene u vrednosti S male u odnosu na ostale parametre. U $C - S$ prostoru ovi modeli nisu razdvojivi. Takođe, asimetrija naizgled značajno odstupa, ali su promene vrednosti dosta male kao i kod S .

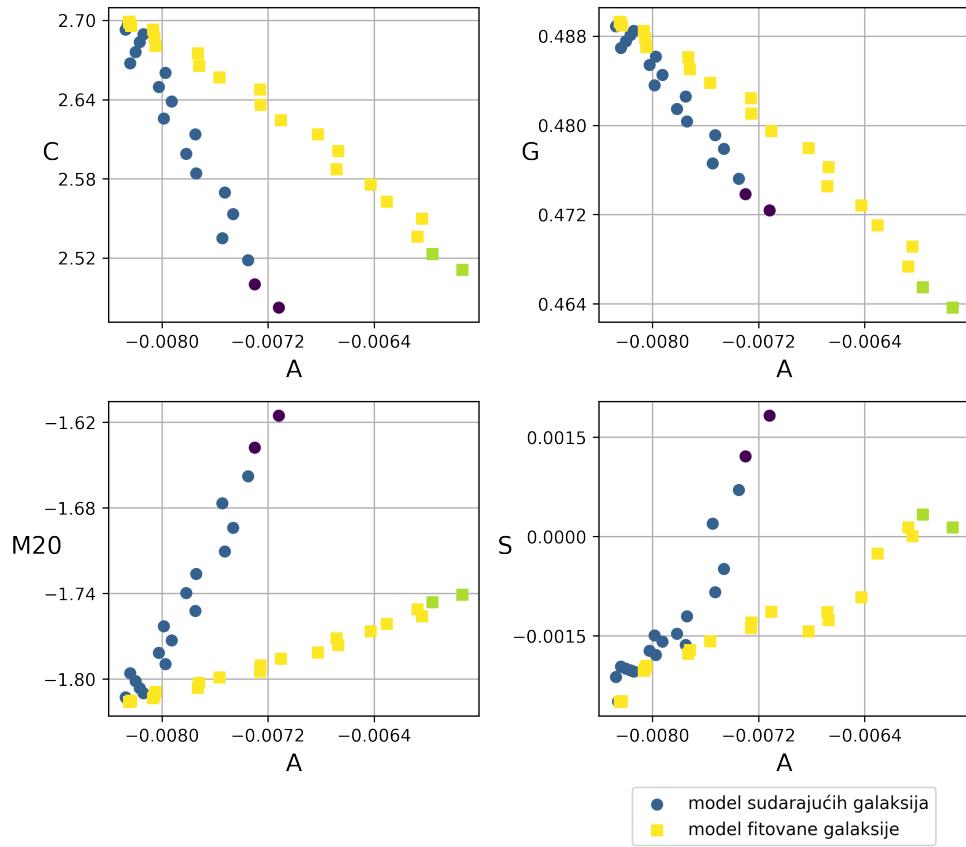
Na slici 4.8 je zasebno prikazana zavisnost $G - M_{20}$ oba modela zajedno sa linijama definisanim jednačinama 3.8 i 3.9, a prikazane su odgovarajuće oblasti. Oba modela jasno pripadaju oblasti normalnih galaksija zbog relativno manjih vrednosti G . Napomenimo da je za ove modele uzet Sersikov indeks $n = 1$ koji mahom pripada diskolikim galaksijama, stoga je i jasno da modeli pripadaju oblasti Sb/Sc/Irr. Glavna razlika između sudarajućeg modela i modela fitovane galaksije je u tome da sudarajući modeli naseljavaju veći opseg vrednosti M_{20} , od -1,6 do -1,8, a da im se pritom G ne menja drastično, dok se fitovani modeli koji predstavljaju prave normalne galaksije nalaze u manjem opsegu M_{20} .



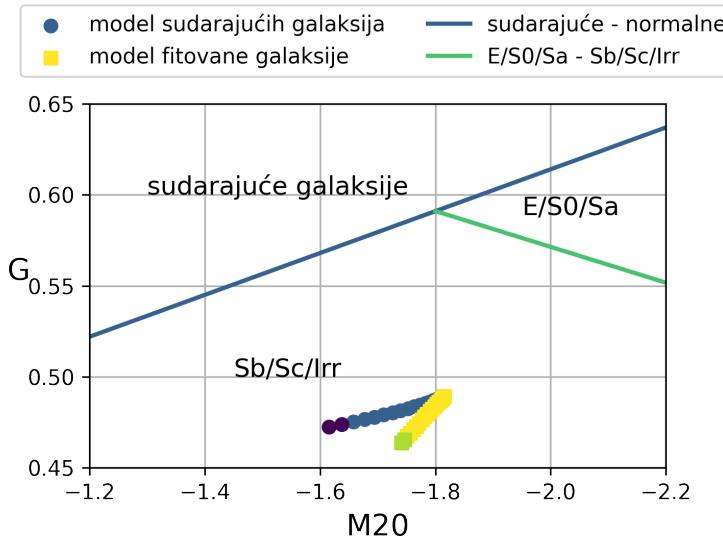
Slika 4.5: Zavisnosti morfoloških parametara G , M_{20} , C , A i S od odnosa d/r_e za model sudarajućih (žuta) i fitovanih (plava) galaksija. Isprekidana zelena linija predstavlja granicu nerazlučivosti na osnovu Rejlijevog kriterijuma.



Slika 4.6: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - S$, $C - G$, $C - M_{20}$, $S - G$, $S - M_{20}$ i $G - M_{20}$, za model sudsarajućih galaksija (plava) i fitovane modele (žuta). Modeli sudsarajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom.



Slika 4.7: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - A$, $G - A$, $M_{20} - A$ i $S - A$, za model sudađajućih galaksija (plava) i fitovane modele (žuta). Modeli sudađajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom.

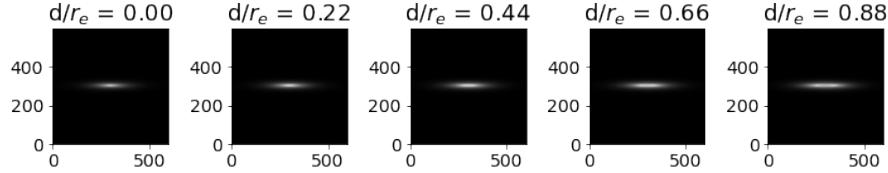


Slika 4.8: Zavisnost morfoloških parametara $G - M_{20}$ za model sudarajućih galaksija (plave tačke) i fitovane modele (žute tačke). Modeli sudarajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom. Prikazane su i linije koje razdvajaju različite oblasti: sudarajuće galaksije od normalnih (plava linija) i rane Hablove tipove od kasnijih (zeleni liniji).

4.2.2 Model *edge-on* galaksija u interakciji

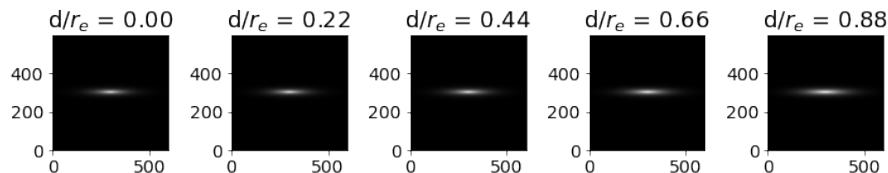
Drugi model će se odnositi na diskolike *edge-on* galaksije eliptičnosti $\epsilon = 0, 85$. Na slici 4.9 prikazano je 5 od 21 generisana modela dve galaksije, a na slici 4.10 su odgovarajuće fitovane galaksije. Nakon računanja morfoloških parametara, dobijaju se zavisnosti svakog od parametra u zavisnosti od odnosa d/r_e prikazane na slici 4.11. U ovom slučaju se uviđa povećanje vrednosti parametara G , M_{20} i S sa d/r_e , dok C opada. Ova kombinacija G i C ukazuje na to da neravnomernost među pikselima raste, dok je ista količina svetlosti obuhvaćena pri računanju C , te je jasno da je raspodela više ušiljena. Ovo je razumno obzirom da su u pitanju modeli velike eliptičnosti. Kako su ovi sistemi praktično simetrični, jasno je da će parametar A imati izuzetno male vrednosti reda 10^{-6} . U poređenju sa *face-on* modelima, vrednosti G , M_{20} , C i S su značajno veće kod *edge-on* modela, što je ponovo uslovljeno nedostatkom u raspodeli površinskog sjaja kod *edge-on* modela. Ono što je posebno interesantno jeste da modeli fitovanih galaksija mogu da naseljavaju prostor parametra M_{20} samo na manjim vrednostima, do na oko -1,6 za razliku od

sudarajućeg modela koji raste čak do $-1,3$ i to u nerazlučenoj zoni.



Slika 4.9: Izgled sudarajućih modela galaksija u vidnom polju za $\epsilon = 0,85$.

Sve vrednosti do $d/r_3 \leq 0,83$ su nerazlučive po Rejljevom kriterijumu.

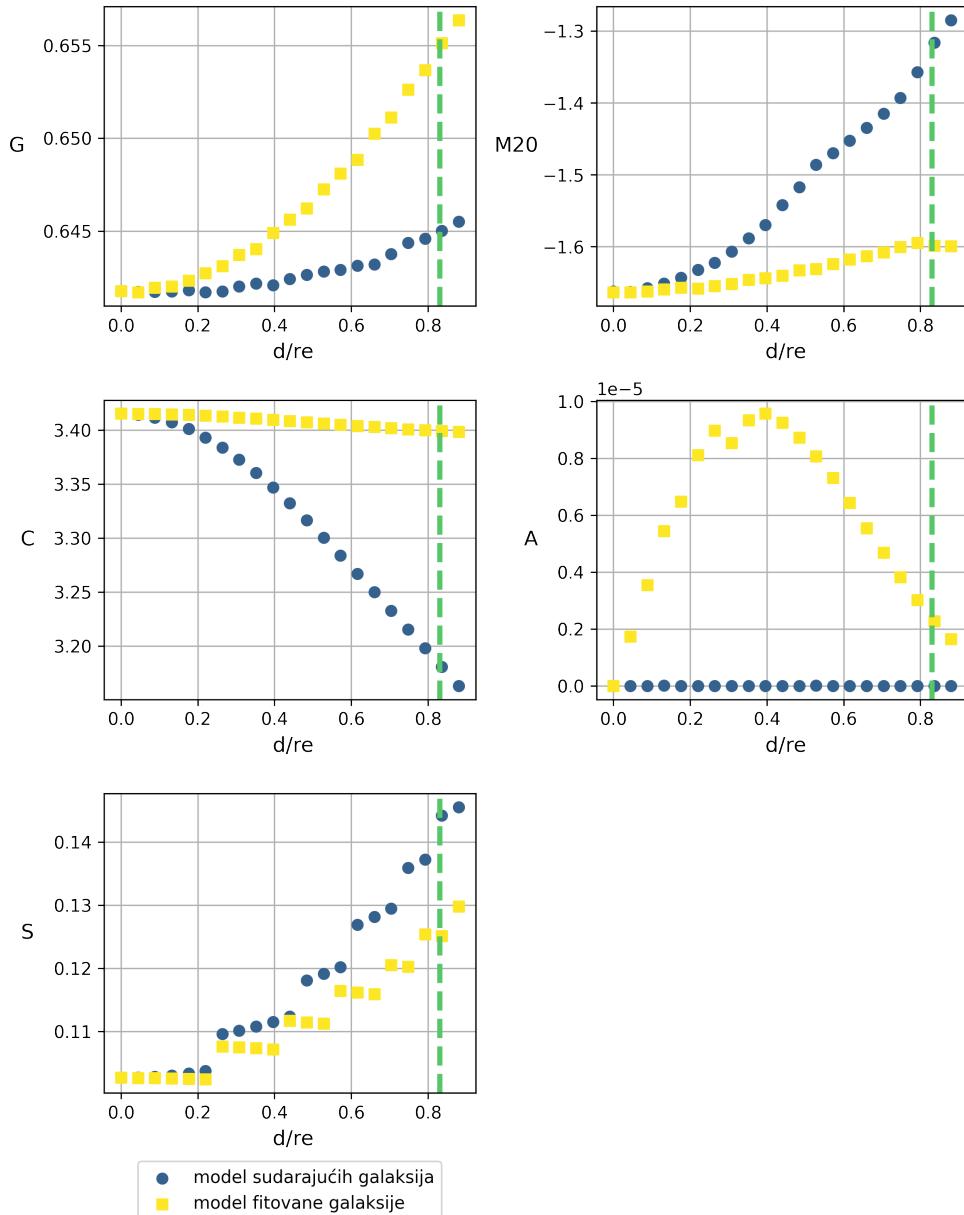


Slika 4.10: Izgled korespondentnih fitovanih modela galaksija u vidnom polju za $\epsilon = 0,85$.

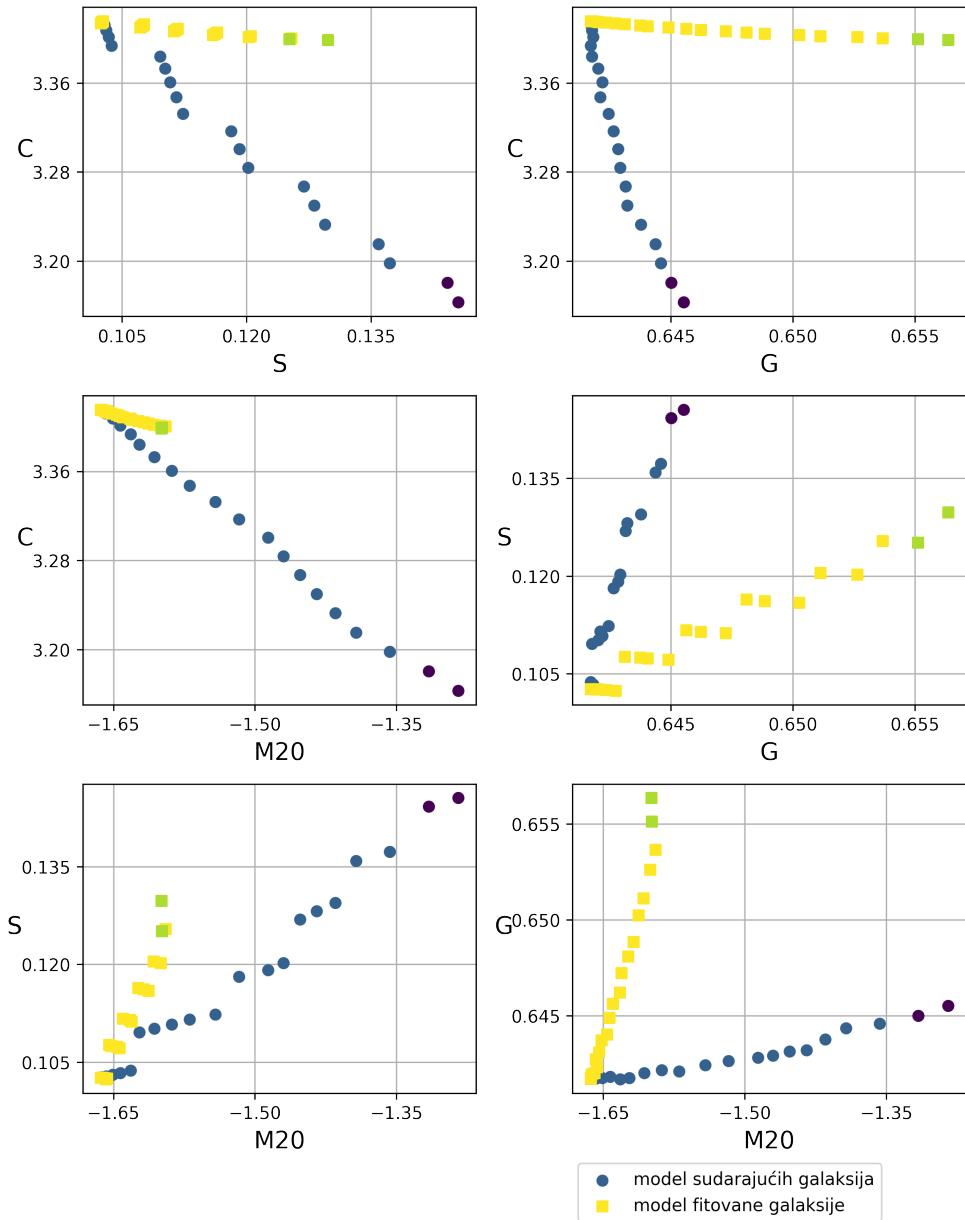
Na slikama 4.12 i 4.13 prikazane su međusobne zavisnosti morfološkim parametara. Uzimajući u obzir prethodno razmatranje u pogledu različitih vrednosti samih parametara, u poređenju sa *face-on* modelima, ponašanje zavisnosti $S - M_{20}$ je gotovo isto, dok se kod zavisnosti $C - S$ i $C - M_{20}$ razlikuju ponašanja fitovanih modela. Ako se vratimo na razmatranje *edge-on* slučaja samog za sebe, zavisnosti $G - M_{20}$, $C - G$ i $S - G$ distinktno razdvajaju sudarajući i fitovan model, dok se na zavisnostima $C - M_{20}$ i $S - M_{20}$ sudarajući model može izdvojiti samo po tome što obuhvata veći opseg vrednosti M_{20} u odnosu na fitovani model. Parametar G , iako ima primetno različite vrednosti za ova dva modela, razlika u vrednosti je reda veličine 0,01, što je dosta malo u odnosu na greške ustanovljene u dosadašnjim radovima. Asimetrija je u ovom slučaju vrlo mala, reda veličine 10^{-5} , i bliska nuli, pa samim tim ne daje važne rezultate.

Na kraju, ponovo je data zavisnost $G - M_{20}$ oba modela zajedno sa linijama definisanim jednačinama 3.8 i 3.9 i odgovarajućim oblastima. Sada oba modela upadaju u oblast sudarajućih galaksija, odnosno ULIRG oblasti. Uz to, model sudarajućih galaksija ponovo zauzima širi opseg vrednosti M_{20} , sa porastom ka vrednosti za udaljenije dvostrukе centre. Poređenjem sa slikom 3.9 iz rada Lotz et al. (2004), jasno se vidi da ovu oblast okupiraju upravo ULIRG sa dva jezgra, a isto tako se vidi i

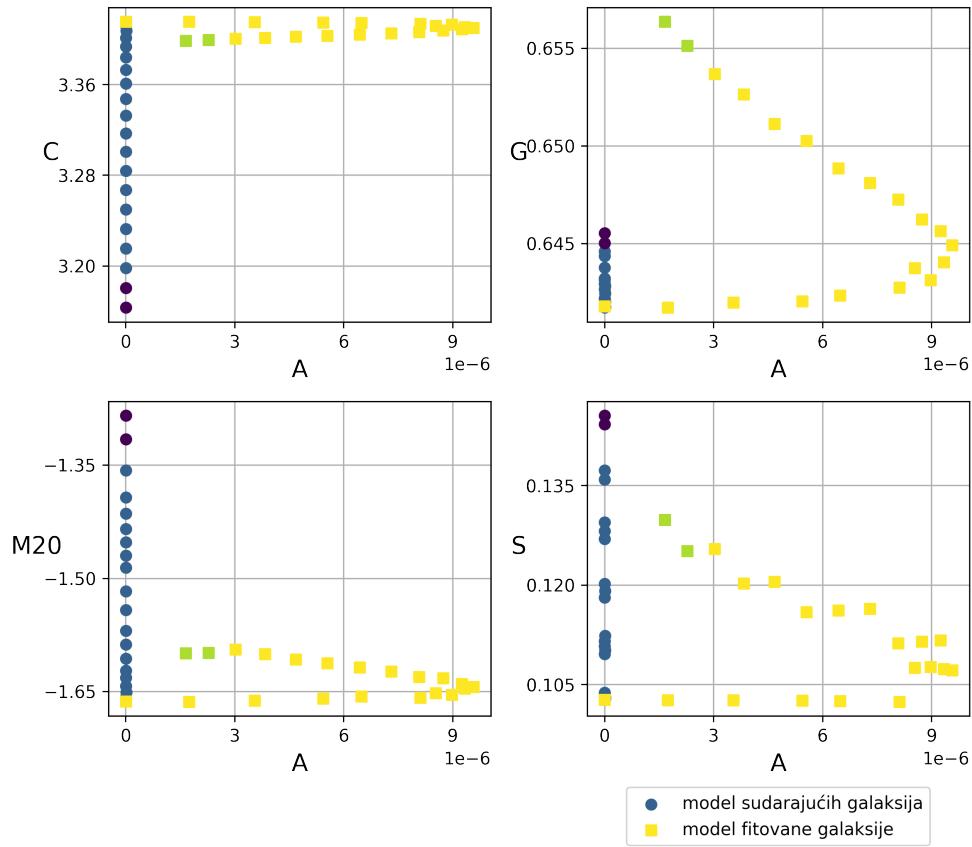
da mahom diskolike *edge-on* normalne galaksije imaju težnju da se nađu iznad definisane linije, u oblasti sudsarajućih galaksija.



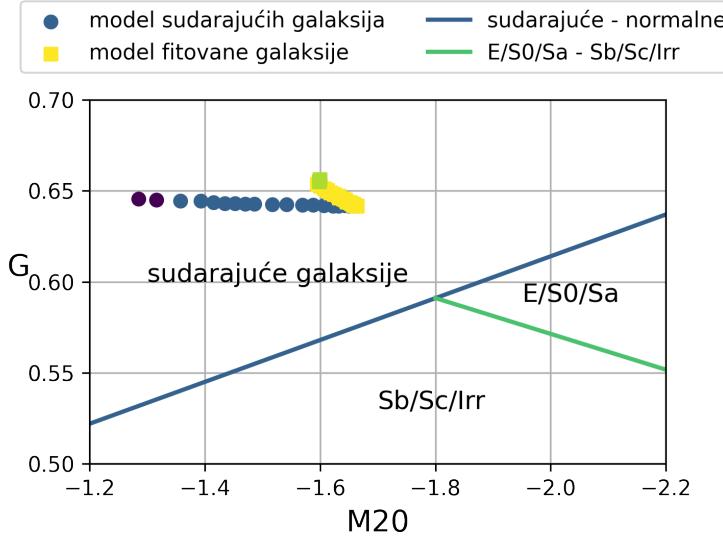
Slika 4.11: Zavisnosti morfoloških parametara G , M_{20} , C , A i S od odnosa d/r_e za model sudsarajućih (žuta) i fitovanih (plava) galaksija. Isprekidana zelena linija predstavlja granicu nerazlučivosti na osnovu Rejlijevog kriterijuma.



Slika 4.12: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - S$, $C - G$, $C - M_{20}$, $S - G$, $S - M_{20}$ i $G - M_{20}$, za model sudarajućih galaksija (plava) i fitovane modele (žuta). Modeli sudarajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom.



Slika 4.13: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - A$, $G - A$, $M_{20} - A$ i $S - A$, za model sudarajućih galaksija (plava) i fitovane modele (žuta). Modeli sudarajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom.



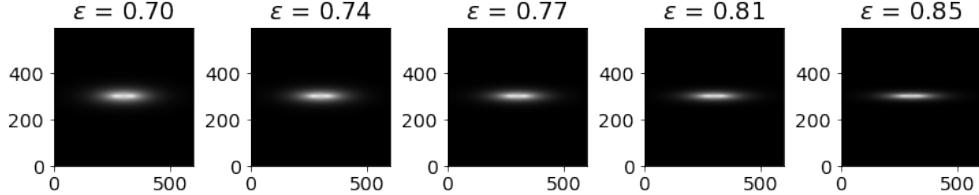
Slika 4.14: Zavisnost morfoloških parametara $G - M_{20}$ za model sudarajućih galaksija (plave tačke) i fitovane modele (žute tačke). Modeli sudarajućih galaksija koji su razlučivi su izdvojeni ljubičastom bojom, a odgovarajući modeli fitovanih galaksije zelenom bojom. Prikazane su i linije koje razdvajaju različite oblasti: sudarajuće galaksije od normalnih (plava linija) i rane Hablove tipove od kasnijih (zelena linija).

4.2.3 Model galaksija promenljive eliptičnosti u interakciji

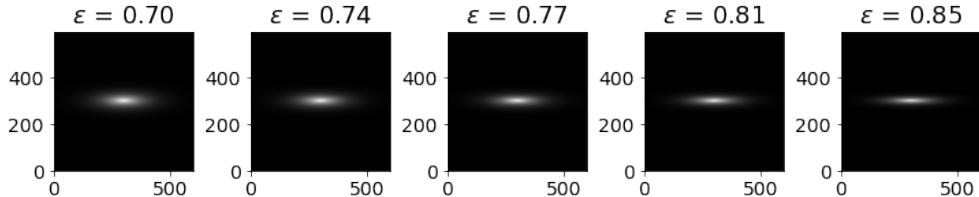
Evidentno je da se *face-on* i *edge-on* nalaze u različitim oblastima definisanim na $G - M_{20}$ zavisnosti. Kako bismo ispitivali kako se parametri ponašaju pri promeni eliptičnosti, u sledećem koraku su uzeti u obzir ponovo modeli sudarajućih i fitovanih galaksija. Posmatrane su diskretne vrednosti eliptičnosti ϵ od 0,7 do 0,85. Dakle, kod ovih modela osim što je varirana eliptičnost, varirano je rastojanje d kao kod prethodnih. Na slici 4.15 su prikazani modeli sudarajućih galaksija sa fiksiranim rastojanjem između centara $d = 66px$ za prikazane eliptičnosti ϵ , dok su na slici 4.16 prikazani korespondenti modeli fitovanih galaksija.

Na slici 4.17 su prikazani morfološki parametri u zavisnosti od d/r_e za sudarajuće i fitovane modele duž različitih eliptičnosti. Vidi se da parameter M_{20} poseduje najveću moć izdvajanja ova dva modela i to već na malim odnosima d/r_e . Uz njega, dosta dobro razdvajanje se vidi kod C i S uz izvesno preklapanje modela različitih eliptičnosti. Parametar G za oba modela odstupa značajno tek za veće odnose d/r_e , odnosno

blizu granice nerazlučivosti. Parametar A , iako pokazuje odstupanja za oba modela, nije pouzdan jer su vrednosti vrlo male zbog simetrije posmatranih modela, kao što je i ranije navedeno. Stoga, A nećemo nadalje razmatrati.



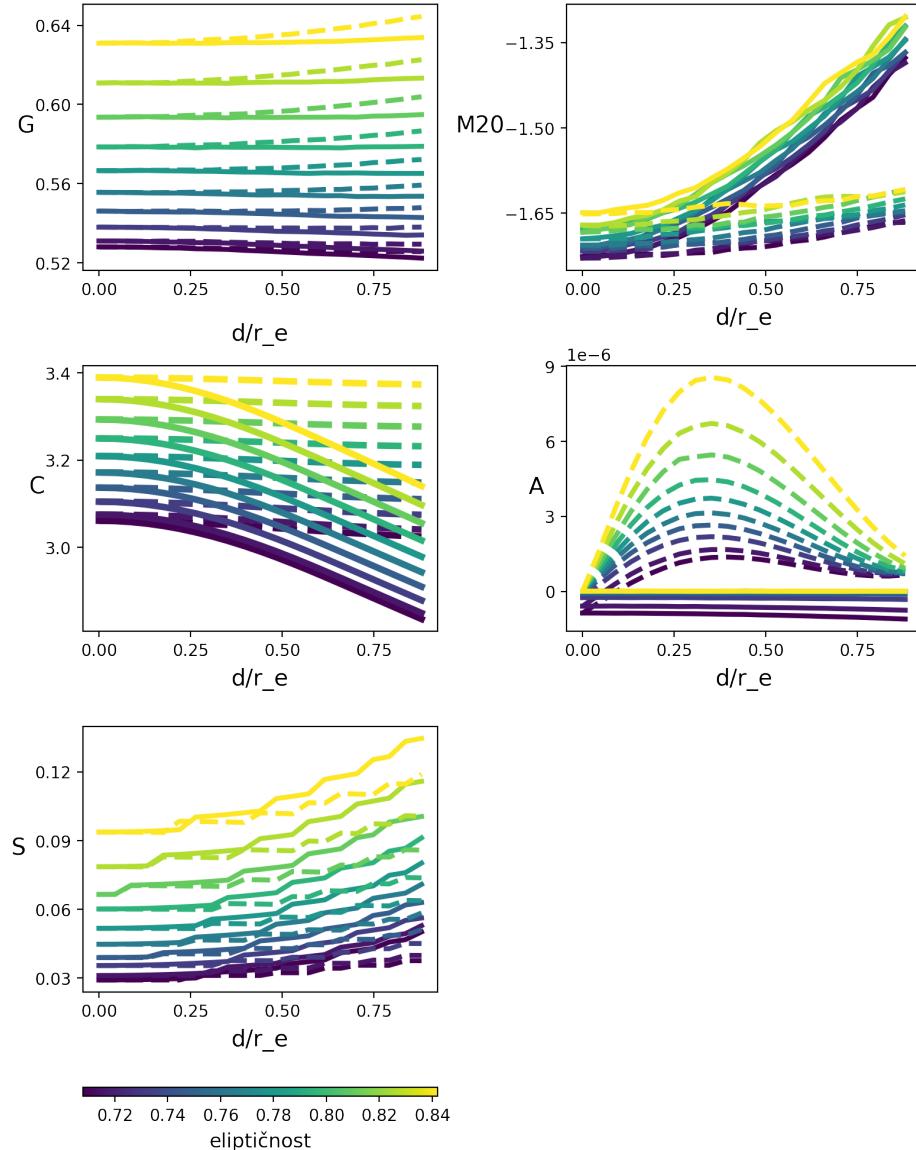
Slika 4.15: Izgled modela sudsaranja galaksija različitih eliptičnosti u vidnom polju.



Slika 4.16: Izgled korespondentnih modela fitovanih galaksija različitih eliptičnosti u vidnom polju.

Slika 4.18 prikazuje parametraski prostor G , C , S i M_{20} . Na svim zavisnostima se izdvajaju oblasti koju naseljava sudsaranjući model od fitovanog, sa boljom distinkcijom kod zavisnosti sa M_{20} , a najmanjom na zavisnosti $S - G$. Kao i na prethodnoj slici, tako i na ovoj, veće eliptičnosti poseduju značajno veće vrednosti svih parametara. Samim tim, iako postoji preklapanje različitih modela, oni se mogu razlikovati po eliptičnosti.

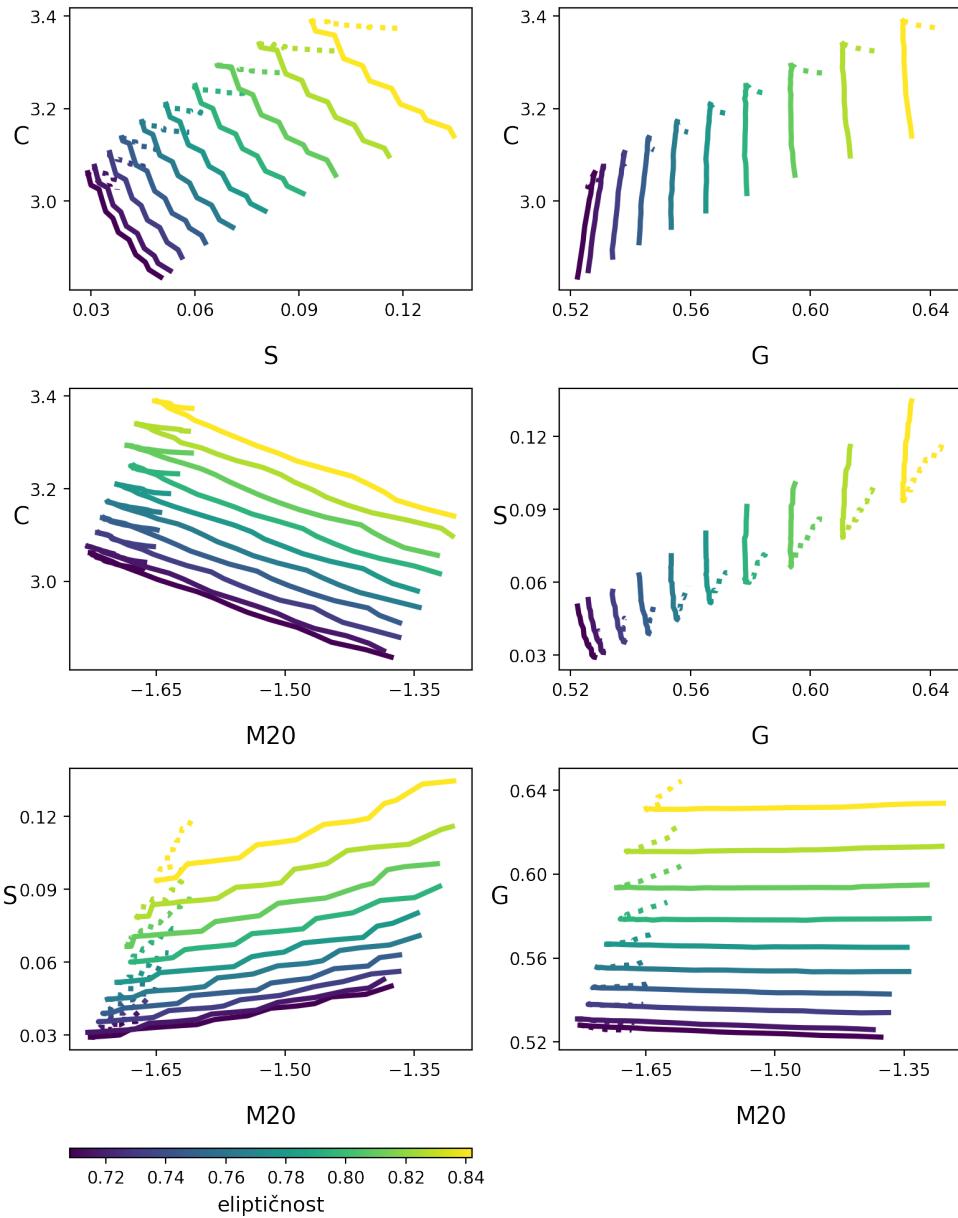
Na slici 4.19 su date iste zavisnosti kao na slici 4.18, ali uz linije koje razdvajaju normalne od sudsaranjućih galaksija definisane u radu [Lotz et al. \(2004\)](#). Ideja je da se ispitaju oblasti kojima pripadaju modeli: na zavisnostima $S - C$, $C - M_{20}$ i $S - M_{20}$ oba modela upadaju u oblast normalnih galaksija čime nije moguće rekonstruisati viđene zavisnosti iz radova. Razlog ovome može biti to što je Sersikova raspodela glatka funkcija i izuzima potencijalne grudvičaste regije koje su brojne u spiralnim galaksijama. Izuzimanje tih regija u izvesnoj meri smanjuje vrednosti parametara C , S i M_{20} . Međutim, kod zavisnosti $S - G$, a posebno $C - G$ i $G - M_{20}$ galaksije većih eliptičnosti prelaze u oblast sudsaranjućih galaksija. Ove oblasti su uveličane i prikazane na slici 4.20.



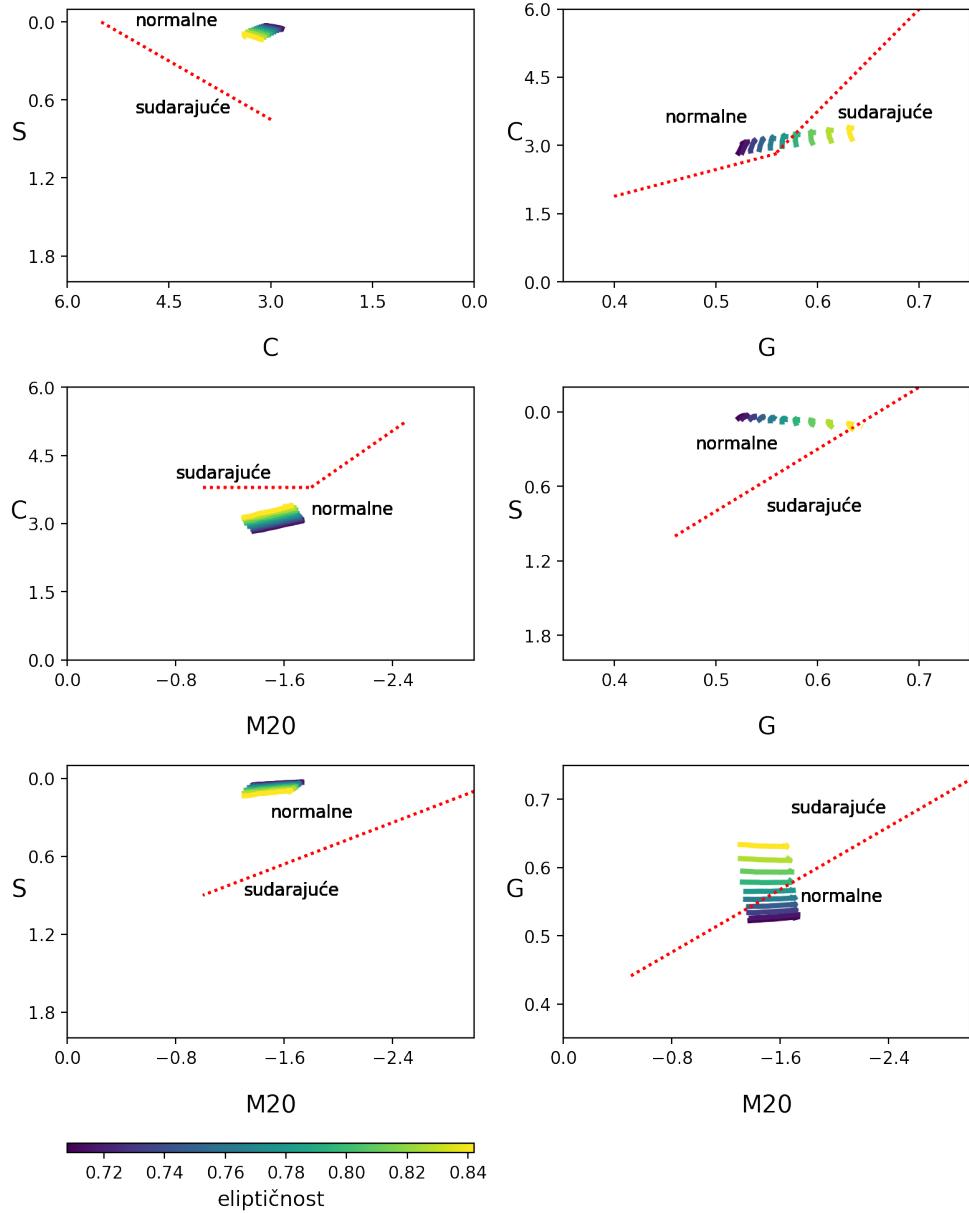
Slika 4.17: Zavisnost morfoloških parametara, redom: G , M_{20} , C , A i S , za model sudarajućih galaksija (pone linije) i fitovane modele (isprikidane linije) u odnosu na d/r_e . Parovi modela su određeni za različite vrednosti eliptičnosti ϵ .

Na slici 4.21 je bolje prikazana zavisnost sa prethodne slike u oblasti interesa. Odavde je jasno da se modeli galaksija eliptičnosti većih od 0,78 mahom nalaze u oblasti sudarajućih, s tim da modeli mogu međusobno da se razlikuju za vrednosti parametra M_{20} . Upoređivanjem ovih sa postojećim rezultatima na slici 3.9 jasno je da diskolike *edge-on* galaksije u većoj meri kontaminiraju prostor sudarajućih galaksija. Potencijalni

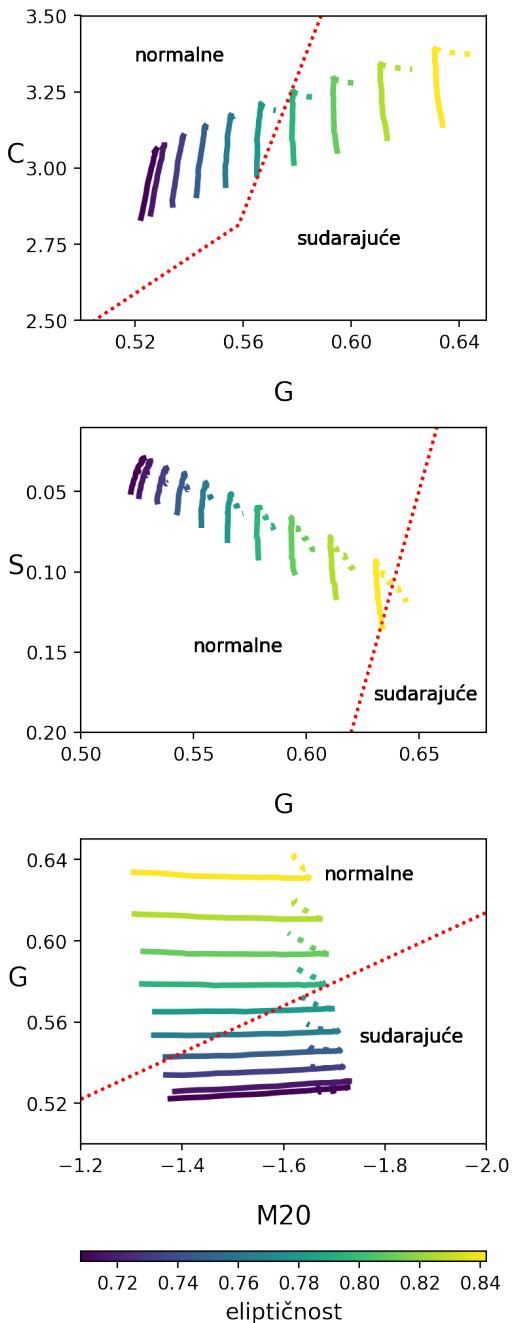
način razdvajanja normalnih diskolikih *edge-on* od sistema u interakciji jeste dubljom analizom eliptičnosti i posebno vrednosti M_{20} . Ovi parametri predstavljaju dobar indikator u oblasti $G - M_{20}$ zbog različite oblasti koji naseljavaju različiti modeli.



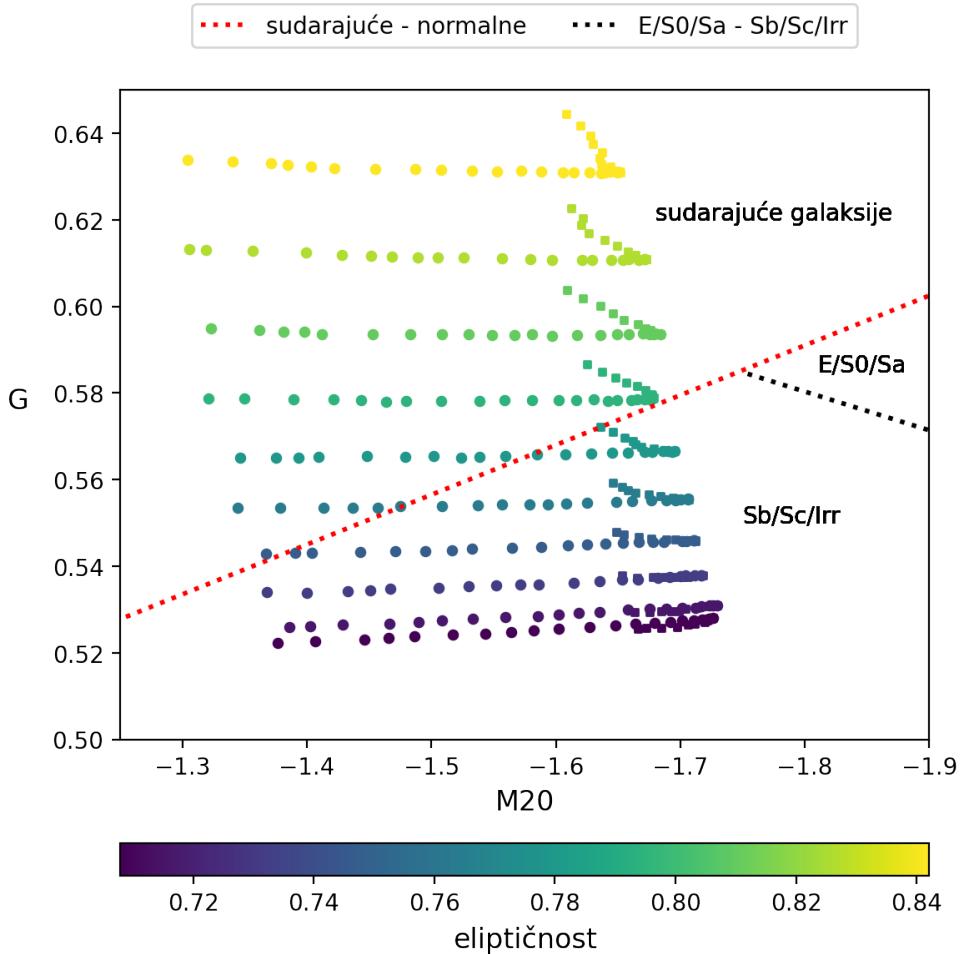
Slika 4.18: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - S$, $C - G$, $C - M_{20}$, $S - G$, $S - M_{20}$ i $G - M_{20}$, za model sudarajućih galaksija (pone linije) i fitovane modele (isprekidane linije). Parovi modela su određeni za različite vrednosti eliptičnosti ϵ .



Slika 4.19: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - S$, $C - G$, $C - M_{20}$, $S - G$, $S - M_{20}$ i $G - M_{20}$, za model sudarajućih galaksija (pune linije) i fitovane modele (isprekidane linije). Parovi modela su određeni za različite vrednosti eliptičnosti ϵ . Na svakoj zavisnosti su prikazane razdvojne linije normalnih i sudarajućih galaksija preuzete sa grafika u radu [Lotz et al. \(2004\)](#), a navedenih u poglavljju [Korelacije parametara](#). Zavisnosti su date u istim razmerama kao i u radu radi lakšeg poređenja.



Slika 4.20: Međusobne zavisnosti morfoloških parametara, redom: $C - G$, $S - G$ i $G - M_{20}$, za model sudarajućih galaksija (pune linije) i fitovane modele (isprekidane linije). Na svakoj zavisnosti su prikazane razdvojne linije normalnih i sudarajućih galaksija preuzete sa grafika u radu [Lotz et al. \(2004\)](#), a navedenih u poglavljju [Korelacije parametara](#). Prikazane su izdvajene i uvećane oblasti za zavisnosti sa prethodne slike koje delom prelaze u oblast sudarajućih galaksija.

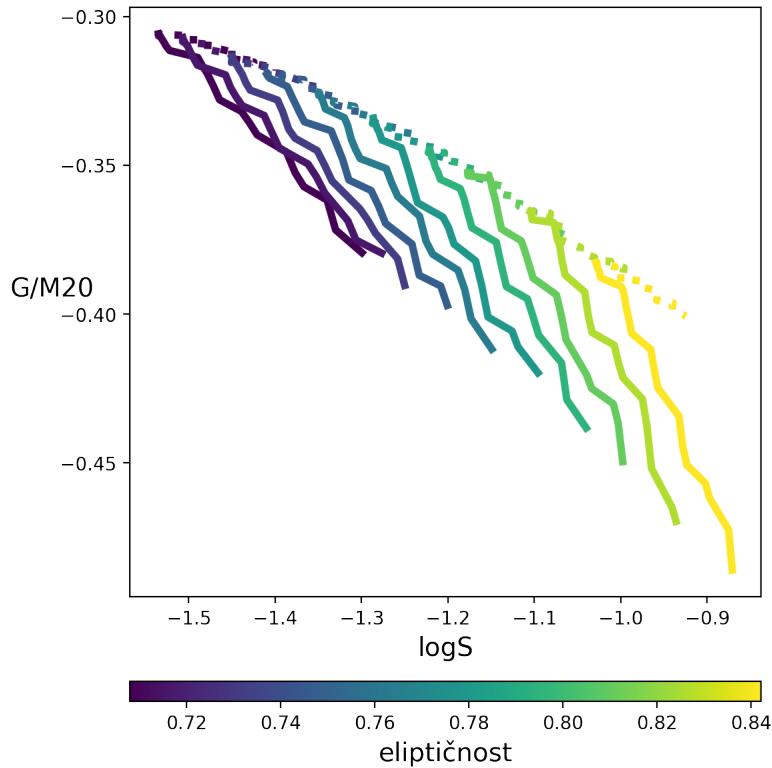


Slika 4.21: Zavisnost morfoloških parametara $G - M_{20}$ za model sudarajućih galaksija (krugovi) i fitovane modele (kvadrati). Parovi modela su određeni za različite vrednosti eliptičnosti ϵ . Prikazane su i isprekidane linije razdvajanja različitih tipova galaksija.

4.2.4 Nove kombinacije parametara

Imajući u vidu prethodne rezultate, dalja ideja jeste da se kombinuju parametri time dobijajući novi, osetljiviji parametar kako bi u konačnom parametarskom prostoru jasno mogle da se razdvoji sudarajući model od fitovanih. Parametri G , M_{20} i S su se pokazali pogodnim za dalje razmatranje, te su oni i uzeti u obzir. Na slici 4.22 je prikazan količnik G/M_{20} u zavisnosti od $\log S$ na kojoj fitovani modeli skoro savršeno leže na jednoj krivoj, dok se sudarajući modeli izdvajaju ispod te krive nezavisno od eliptičnosti. Ova kriva je u oblasti dobijenih vrednosti $\log S$ fitovana

eksponencijalnom funkcijom:



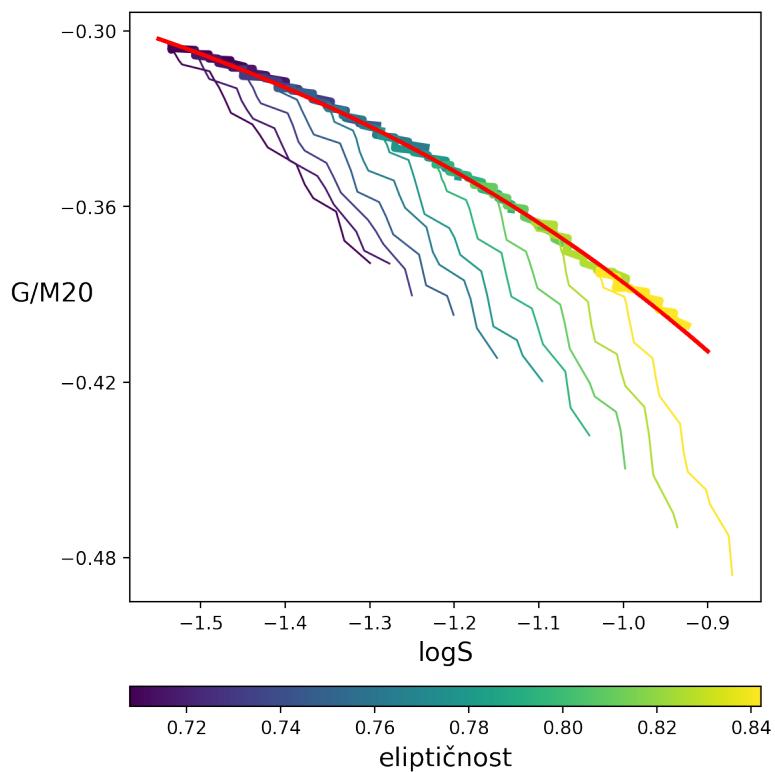
Slika 4.22: Zavisnost novih parametara G/M_{20} od $\log S$ za ispitane modele različite eliptičnosti.

$$\frac{G}{M_{20}} = \alpha \exp\left(\frac{\log S}{\beta}\right) + \gamma, \quad (4.1)$$

pri čemu su vrednosti koeficijenata i grešaka dati u tabeli 5, a na slici 4.23 pomenuta kriva sa podacima za oba modela.

Tabela 5: Koeficijenti za fit oblasti koju nastanjuju fitovani modeli galaksija u zavisnosti kombinacije parametara $G/M_{20} - \log S$.

koeficijent	vrednost koeficijenta	vrednost greške
α	-0,639	0,016
β	0,699	0,023
γ	-0,233	0,003



Slika 4.23: Zavisnost novih parametara G/M_{20} od $\log S$ za ispitane modele različite eliptičnosti. Crvena kriva data jednačinom 4.1 fituje usku oblast koju nastanjuju fitovani modeli.

5 Diskusija

Razmatranjem dva različita modela, simetričnih sudarajućih diskolikih galaksija Sersikove raspodele sjaja sa dva sjajna jezgra koje su međusobno nerazlučiva i modela normalne galaksije Sersikove raspodele fitovane na sudarajućem modelu, ispitano je ponašanje morfoloških parametara C , A , S , G i M_{20} . Glavni rezultati su sledeći:

- model sudarajućih galaksija u nerazlučenoj oblasti se od fitovanog modela jasno može razlikovati najpre sa parametrom M_{20} , dok su C i S dovoljno dobri tek blizu granice razlučivosti;
- modeli veće eliptičnosti, koji predstavljaju diskolike *edge-on* galaksije, imaju značajno veće vrednosti parametara M_{20} , G , C i S čime bivaju izdvojene iz grupe *face-on* galaksija;
- zbog značajnog raspona vrednosti M_{20} koji poseduju sudarajući modeli (za sve eliptičnosti), jasno mogu da se izdvoje oblasti koje su naseljene ovim modelom u odnosu na model fitovanih galaksija na $C - M_{20}$, $S - M_{20}$ i $G - M_{20}$ zavisnostima, dok je razdvajanje u $C - S$ i $C - G$ zavisnosti manje.
- u radu [Lotz et al. \(2004\)](#) diskolike galaksije u značajnoj meri kontaminiraju oblast sudarajućih galaksija u svim parametarskim prostorima, a rezultati koji su dobijeni u ovom radu za zavisnosti $C - G$ i $G - M_{20}$ pri eliptičnostima $\gtrsim 0,77$ i zavisnost $S - C$ pri eliptičnostima 0,83 za oba modela se upravo poklapaju sa tim oblastima;
- za sve uzete eliptičnosti, model sudarajućih i model fitovanih se jasno i nedvosmisleno mogu izdvojiti u novom parametarskom prostoru zavisnosti $G/M_{20} - \log S$, pri čemu fitovani modeli svih eliptičnosti leže u uskoj oblasti koja se može fitovati krivom datom jednačinom [4.1](#).

Poslednji navedni rezultat zavisnosti $G/M_{20} - \log S$ jeste cilj ispitivanja u ovog rada i značajan je za razdvajanje galaksija u interakciji od normalnih galaksija na ovom stadijumu istaživanja gde su korišćeni pomenuti jednostavni modeli. Ovo je od posebne važnosti pri uklanjanju normalnih diskolikih *edge-on* galaksija koje upadaju u oblast interagujućih od onih za koje bi se smatralo da su kandidati galaksija u sudaru u fazi gde nisu zasebno razlučiva dva razdvojena objekta. Dodatna prednost ovakov

tipa ispitivanja se sastoje u tome da se posmatraju isključivo raspodele površinskog sjaja, bez potrebe za zahtevnim trodimenzionim simulacijama galaksija u interakciji. S obzirom da se dosta rezultata korišćenih modela poklapa sa postojećim rezultatima iz posmatranja, očekuje se da će se i ovaj rezultat u izvesnoj meri preneti i na realne posmatračke podatke.

6 Zaključak

Iz posmatračkih podataka se uveliko zna da su interakcije i sudari galaksija značajni za njihovu evoluciju i izgled. Ono što danas predstavlja glavni problem jeste identifikacija sudara kada je raspodela površinskog sjaja takva da pojedinačne strukture karakteristične za sudare nisu razlučive. Odavde polazi i motivacija za ovaj rad – ispitivanje kako se na osnovu raspodele površinskog sjaja galaksija, data u vidu različitih modela, potencijalno mogu razdvojiti normalne galaksije od sudarajućih.

Polazeći od dva modela galaksija kreiranih pomoću Sersikovih profila, model sudarajućih galaksija u fazi kada činioci nisu međusobno razlučivi i modela galaksije koja je fitovana na prvi model, glavni cilj ovog rada je bio da se ispita da li su ova dva modela na neki način razdvojni pomoću definisanih morfoloških parametara: koncentracije, asimetrije, grudvičastosti, Džini koeficijenta i momenta drugog reda ili potencijalno njihovih kombinacija datih parametara. Parametri za Sersikove raspodele koji su uzeti u obzir se odnose na diskolike spiralne galaksije pri različitim nagibima, a posebno pri velikim inklinacijama gde one predstavljaju *edge-on* galaksije. Ispostavlja se da se ovi modeli *edge-on* galaksija mogu jasno razdvojiti ako se prikažu u zavisnosti $G/M_{20} - \log S$, nezavisno od eliptičnosti sistema.

Dalja istraživanja na ovu temu bi obuhvatala pre svega poređenje sa posmatračkim podacima i simulacijama pažljivo odabranim tako da kandidati predstavljaju najpribližnije navedene modele. Pre svega, ovo bi pokazalo sa kolikom greškom bi ovaj rezultat bi održiv i koje korekcije parametara bi bile neophodne. Uz to, posmatrani sistemi ne bi bili nužno simetrični, te bi značajan udeo mogao da ima parametar asimetrije koji je na ovom stadijumu istraživanja zanemaren. Sledeći korak bi bio uopštenje modela na razne druge slučajeve interagujućih sistema čime bi se dobila potpuna slika i način da se razlikuju interagujući sistemi od neinteragujućih. Na kraju bi se modeli proširili na sve grupacije veličina galaksija i sa različitom količinom regiona u kojima se formiraju zvezde. Ovim bi se rešila izvesna dilema oko pitanja detekcije i klasifikacije galaksija što u bliskom svemiru, tako i u dalekom.

Dodatak

Kod

Osnovni kod na osnovu kojeg su se kreirali modeli i računali parametri.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.modeling import models
from photutils.segmentation import detect_sources,
                                    detect_threshold
import time
import statmorph

#vidno polje
y, x = np.mgrid[0:600, 0:600]

#parametri za Sersik model
amplitude=1
r_eff=100
n=1
x_0=300
y_0=300
ellip=0.5
theta=0.0

#kreiranje Sersik modela
SersicModel = models.Sersic2D(amplitude=amplitude,
                               r_eff=r_eff,
                               n=n,
                               x_0=x_0,
                               y_0=y_0,
                               ellip=ellip,
                               theta=theta)

#postavljanje modela na vidno polje
Image = SersicModel(x,y)

#defisanje praga za detekciju galaksije
threshold = detect_threshold(Image, nsigma=3)
```

```
#određivanje segmentacione mape
Segmentation_map = detect_sources(Image, threshold, npixels=5)

#računanje morfoloških parametara
start = time.time()
source_morphs = statmorph.source_morphology(Image,
                                              Segmentation_map,
                                              gain = 10000.0)
print('Time: %g s.' % (time.time() - start))
morph=source_morphs[0]

#rezultati
print('C = ', morph.concentration)
print('A = ', morph.asymmetry)
print('S = ', morph.smoothness)
print('G = ', morph.gini)
print('M20 = ', morph.m20)

#podaci za fitovani Sersik profil
print('amplitude =', morph.sersic_amplitude)
print('r_eff =', morph.sersic_rhalf)
print('n =', morph.sersic_n)
print('x_0 = ', morph.sersic_xc)
print('y_0 = ', morph.sersic_yc)
print('ellip =', morph.sersic_ellip)
print('theta = ', morph.sersic_theta)
```

Literatura

- Abraham, R. G., van den Bergh, S. and Nair, P. (2003), A New Approach to Galaxy Morphology. I. Analysis of the Sloan Digital Sky Survey Early Data Release, *ApJ* **588**(1), 218–229. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJ...588..218A>
- Bershady, M. A., Jangren, A. and Conselice, C. J. (2000), Structural and Photometric Classification of Galaxies. I. Calibration Based on a Nearby Galaxy Sample, *AJ* **119**(6), 2645–2663. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000AJ....119.2645B>
- Boch, T. and Fernique, P. (2014), Aladin Lite: Embed your Sky in the Browser, in N. Manset and P. Forshay, eds, ‘Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII’, Vol. 485 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 277. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014ASPC..485..277B>
- Bonnarel, F., Fernique, P., Bienaymé, O., Egret, D., Genova, F., Louys, M., Ochsenbein, F., Wenger, M. and Bartlett, J. G. (2000), The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources, *A&AS* **143**, 33–40. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2000A&AS..143...33B>
- Buta, R. J. (2011), Galaxy Morphology, *arXiv e-prints* p. arXiv:1102.0550. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2011arXiv1102.0550B>
- Carroll, B. and Ostlie, D. (2014), *An Introduction to Modern Astrophysics*, Pearson custom library, Pearson.
- Conselice, C. J. (2003), The Relationship between Stellar Light Distributions of Galaxies and Their Formation Histories, *ApJS* **147**(1), 1–28. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2003ApJS..147....1C>
- Conselice, C. J., Rajgor, S. and Myers, R. (2008), The structures of distant galaxies - I. Galaxy structures and the merger rate to $z \sim 3$ in the Hubble Ultra-Deep Field, *MNRAS* **386**(2), 909–927. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.386..909C>
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Herold G., J., Buta, R. J., Paturel, G. and Fouque, P. (1991), *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991rc3..book.....D>

- Donevski, D. and Prodanović, T. (2015), Possible breaking of the FIR-radio correlation in tidally interacting galaxies, MNRAS **453**(1), 638–644. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015MNRAS.453.638D>
- Eggen, O. J., Lynden-Bell, D. and Sandage, A. R. (1962), Evidence from the motions of old stars that the Galaxy collapsed., ApJ **136**, 748. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1962ApJ...136..748E>
- Hubble, E. P. (1926), Extragalactic nebulae., ApJ **64**, 321–369. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1926ApJ....64..321H>
- Kartaltepe, J. S., Mozena, M., Kocevski, D., McIntosh, D. H., Lotz, J., Bell, E. F., Faber, S., Ferguson, H., Koo, D., Bassett, R., Bernyk, M., Blancato, K., Bournaud, F., Cassata, P., Castellano, M., Cheung, E., Conselice, C. J., Croton, D., Dahlen, T., de Mello, D. F., DeGroot, L., Donley, J., Guedes, J., Grogin, N., Hathi, N., Hilton, M., Hollon, B., Koekemoer, A., Liu, N., Lucas, R. A., Martig, M., McGrath, E., McPartland, C., Mobasher, B., Morlock, A., O’Leary, E., Peth, M., Pforr, J., Pillepich, A., Rosario, D., Soto, E., Straughn, A., Telford, O., Sunquist, B., Trump, J., Weiner, B., Wuyts, S., Inami, H., Kassin, S., Lani, C., Poole, G. B. and Rizer, Z. (2015), CANDELS Visual Classifications: Scheme, Data Release, and First Results, ApJS **221**(1), 11. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015ApJS..221...11K>
- Kelvin, L. S., Driver, S. P., Robotham, A. S. G., Graham, A. W., Phillipps, S., Agius, N. K., Alpaslan, M., Baldry, I., Bamford, S. P., Bland-Hawthorn, J., Brough, S., Brown, M. J. I., Colless, M., Conselice, C. J., Hopkins, A. M., Liske, J., Loveday, J., Norberg, P., Pimbblet, K. A., Popescu, C. C., Prescott, M., Taylor, E. N. and Tuffs, R. J. (2014), Galaxy And Mass Assembly (GAMA): ugri-zYJHK Sérsic luminosity functions and the cosmic spectral energy distribution by Hubble type, MNRAS **439**(2), 1245–1269. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014MNRAS.439.1245K>
- Kim, E., Hwang, H. S., Jeong, W.-S., Kim, S. J., Burgarella, D., Goto, T., Hashimoto, T., Jo, Y.-S., Lee, J. C., Malkan, M., Pearson, C., Shim, H., Toba, Y., Ho, S. C. C., Santos, D. J., Ikeda, H., Kim, H. K., Miyaji, T., Matsuhara, H., Oi, N., Takagi, T. and Wang, T.-W. (2021), The evolution of merger fraction of galaxies at $z \geq 0.6$ depending on the star formation mode in the AKARI NEP-Wide Field, MNRAS **507**(3), 3113–3124. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021MNRAS.507.3113K>

- Lotz, J. M., Jonsson, P., Cox, T. J. and Primack, J. R. (2008), Galaxy merger morphologies and time-scales from simulations of equal-mass gas-rich disc mergers, *MNRAS* **391**(3), 1137–1162. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008MNRAS.391.1137L>
- Lotz, J. M., Primack, J. and Madau, P. (2004), A New Nonparametric Approach to Galaxy Morphological Classification, *AJ* **128**(1), 163–182. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004AJ....128..163L>
- Lotz, J. M. et al. (2008), The Evolution of Galaxy Mergers and Morphology at $z < 1.2$ in the Extended Groth Strip, *ApJ* **672**(1), 177–197. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008ApJ...672..177L>
- NASA (2018), ‘The multywavelenght milky way: Multiwavelength milky way images’. URL: https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmw_images.html
- Peth, M. A. (2016), Using machine learning to study the relationship between galaxy morphology and evolution, PhD thesis, Johns Hopkins University, Maryland. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016PhDT.....284P>
- Petrosian, V. (1976), Surface Brightness and Evolution of Galaxies, *ApJL* **210**, L53. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1976ApJ...209L...1P>
- Radulović, N. D., Pavlović, M. S. and Prodanović, T. S. (2019), Examining the morphology of galaxies at high redshifts, *Zbornik Matice srpske za prirodne nauke* **137**, 23–31. URL: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?id=0352-49061937023R>
- Richmond, M. (2014), ‘Describing the radial profile of light in a galaxy’. URL: http://spiff.rit.edu/classes/phys443/lectures/gal_1/petro/petro.html
- Rodriguez-Gomez, V., Lotz, J. and Snyder, G. (2022), ‘statmorph: Non-parametric morphological diagnostics of galaxy images’, Astrophysics Source Code Library, record ascl:2201.010. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022ascl.soft01010R>
- Rodriguez-Gomez, V., Snyder, G. F., Lotz, J. M., Nelson, D., Pillepich, A., Springel, V., Genel, S., Weinberger, R., Tacchella, S., Pakmor, R., Torrey, P., Marinacci, F., Vogelsberger, M., Hernquist, L. and Thilker, D. A. (2019), The optical morphologies of galaxies in the IllustrisTNG simulation: a comparison to Pan-STARRS observations, *MN-*

RAS **483**(3), 4140–4159. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019MNRAS.483.4140R>

Searle, L. and Zinn, R. (1978), Composition of halo clusters and the formation of the galactic halo., ApJ **225**, 357–379. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1978ApJ...225..357S>

Sérsic, J. L. (1963), Influence of the atmospheric and instrumental dispersion on the brightness distribution in a galaxy, *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina* **6**, 41–43. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1963BAAA....6...41S>

Thompson, R., Davé, R., Huang, S. and Katz, N. (2015), Identifying mergers using non-parametric morphological classification at high redshifts, *arXiv e-prints* p. arXiv:1508.01851. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2015arXiv150801851T>

Toomre, A. and Toomre, J. (1972), Galactic Bridges and Tails, ApJ **178**, 623–666. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1972ApJ...178..623T>

Biografija

Nataša Pavlov je rođena 17.02.1998. godine u Kikindi. Osnovnu školu „Đura Jakšić” u Kikindi završava 2012. godine, nakon čega upisuje Gimnaziju „Dušan Vasiljev” u Kikindi. Godine 2016. upisuje osnovne studije fizike modula astronomija sa astrofizikom na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Iste završava u oktobru 2020. godine i upisuje master studije astrofizike na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Od oktobra 2021. godine je zaposlena kao saradnik u nastavi na katedri za astronomiju Matematičkog fakulteta u Beogradu.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj (RBR):

**Identifikacioni
broj (IBR):**

Tip dokumentacije (TD): Monografska dokumentacija

Tip zapisa (TZ): Tekstualni štampani materijal

Vrsta rada (VR): Master rad

Autor (AU): Nataša Pavlov

Mentor (MN): dr Nikola Jovančević

Naslov rada (NR): Ispitivanje osetljivosti morfoloških parametara na različite faze interakcije galaksija

Jezik publikacije (JP): srpski (latinica)

Jezik izvoda (JI): srpski i engleski

**Zemlja publikova-
nja (ZP):** Srbija

**Uže geografsko po-
dručje (UGP):** Vojvodina

Godina (GO): 2022.

Izdavač (IZ): Autorski reprint

Mesto i adresa (MA): Novi Sad, Departman za fiziku, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 3

Fizički opis rada (FO): 6 poglavlja/75 strana/5 tabela/55 slika/29 referenci

Naučna oblast (NO): Fizika

Naučna disciplina (ND): Astrofizika

Predmetna odrednica/ključne reči (PO): morfologija galaksija, Sersikova raspodela površinskog sjaja, morfološki parametri, suda-rajuće galaksije

UDK:

Čuva se (ČU): Biblioteka Departmana za fiziku, Prirodno-matematički fakultet u Novom Sadu

Važna napomena (VN):

Izvod (IZ): Prikupljanjem značajnih količina podataka o galaksijama i postojećom težnjom za klasifikacijom galaksija, javlja se problem sa galaksijama u interakciji. Za ispitivanje ponašanja ovih kompleksnih sistema koriste se utvrđeni neparametarski morfološki parametri: koncentracija, asimetrija, grudvičastost, Džini koeficijent i moment drugog reda na modelima galaksija u različitim fazama suda-ra. Poređenjem modela sistema nerazlučivih suda-rajućih galaksija sa modelom jedne galaksija kojim je sistem fitovan, ovaj master rad ima za cilj da istraži kako se morfološki parametri menjaju za ta dva slučaja i omogući način za razlikovanje normalnih galaksija od interagujućih.

Datum prihvatanja 19. septembar 2022.
teme od strane NN
veća (DP):

Datum odbrane
(DO):

Članovi komisije
(KO):

Predsednik: dr Miodrag Krmar, redovni profesor, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

Član: dr Petar Mali, docent, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu

Član: dr Nikola Jovančević, docent, Prirodno-matematički fakultet, Univerzitet u Novom Sadu, mentor

**UNIVERISTY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCES**

KEY WORDS DOCUMENTATION

**Accession number
(ANO):**

**Identification number
(INO):**

Document type (DT): Monograph type

Type of record (TR): Printed text

Contents Code (CC): Master's thesis

Author (AU): Nataša Pavlov

Mentor (MN): Nikola Jovančević, PhD

Title (TI): Examination of the sensitivity of morphological parameters to different phases of galaxy interaction

**Language of text
(LT):** Serbian (Latin)

**Language of abstract
(LA):** Serbian and English

Country of publication (CP): Serbia

Locality of publication (LP): Vojvodina

**Publication year
(PY):** 2022.

Publisher (PU): Author's reprint

Publication place (PP):	Novi Sad, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Novi Sad, Trg Dositeja Obrenovića 3
Physical description (PD):	6 chapters/75 pages/5 tables/55 pictures/29 references
Scientific field (SF):	Physics
Scientific discipline (SD):	Astrophysics
Subject/Key words (SKW):	galaxy morphology, Sersic surface brightness distribution, morphological parameters, merger galaxies
UC:	
Holding data (HD):	The Library of the Department of Physics
Note (N):	
Abstract (AB):	With acquisition of a significant amount of data on galaxies and an ongoing urge for galaxy classification, a problem with galaxies in interaction arises. For examination of the behaviour of such complex systems the well established non-parametric morphological parameters: concentration, asymmetry, clumpiness, Gini coefficient and, the second-order moment are used on models of galaxies in different stages of merging. Comparing the models of unresolvable merger galaxies with a one-galactic model fitted on the system, this Master's thesis has the goal of investigating how do the morphological parameters change for these two cases and provide a method for differentiating normal galaxies from interacting ones.

**Accepted by the September 19, 2022
Scientific Board on
(ASB):**

Defended (DE):

**Thesis defend bo-
ard (DB):**

President: Miodrag Krmar, PhD, full professor, Faculty of Science, University of Novi Sad

Member: Petar Mali, PhD, associate professor, Faculty of Science, University of Novi Sad

Member: Nikola Jovančević, PhD, associate professor, Faculty of Science, University of Novi Sad, mentor