

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MATEMATIČKI FAKULTET

Milena M. Jovanović

**ODREĐIVANJE BARIONSKE FUNKCIJE  
MASE ZA UZORAK BLISKIH GALAKSIJA**

doktorska disertacija

Beograd, 2021.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
FACULTY OF MATHEMATICS

Milena M. Jovanović

**DETERMINING THE BARYONIC MASS  
FUNCTION FOR A SAMPLE OF NEARBY  
GALAXIES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021.

**Mentor:**

dr Srđan SAMUROVIĆ, naučni savetnik  
Astronomska opservatorija, Beograd

**Članovi komisije:**

dr Milan ĆIRKOVIĆ, naučni savetnik  
Astronomska opservatorija, Beograd

prof. dr Olga ATANACKOVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

prof. dr Dejan UROŠEVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

dr Slobodan NINKOVIĆ, naučni savetnik  
Astronomska opservatorija, Beograd

**Datum odbrane:** \_\_\_\_\_

## *Vidu, mom multiverzumu*

*„Somewhere, something incredible is waiting to be known.”*

*Sharon Begley, Newsweek profile of Carl Sagan*

*Zasluge za nastanak ove teze pripadaju celokupnom kolektivu Astronom-ske opservatorije koji mi je pružio veliku podršku. Najveću zahvalnost dugujem mom mentoru, dr Srđanu Samuroviću, za potencijal koji je video u mom radu, a zatim i za ogromno znanje i iskustvo koje je podelio sa mnom. Upornošću i energijom koju je uložio dao mi je primer koji ću slediti u akademskom radu i van njega. Ne mogu se, osim prijateljstvom, zahvaliti Milanu M. Ćirkoviću za nebrojene razgovore o ovoj disertaciji, ali i o sveukupnoj nauci, umetnosti i životu, koji su me oblikovali. Veoma korisne savete koji su umnogome poboljšali tezu dali su i ostali članovi komisije, prof. dr Olga Atanacković, dr Slobodan Ninković i prof. dr Dejan Urošević. Kolegama Ani, Milanu, Moniki i ostalima, vi ste jedini zaista razumeli i prošli svaki korak sa mnom, hvala vam za solidarnost i prostor za ideje. Hvala Ivanu, za životnu filozofiju koja inspiriše, koju delimo i usput iznova smišljamo.*

*Zorici i Mariji V. hvala što su, svaka na svoj način, pomogle toplim prijateljstvom uz odlučnu trezvenost kada je bila potrebna. Mileni, Nenadu, Mariji N. i Radetu, ovaj put bi verovatno bio nemoguć, a svakako dosadniji bez vas!*

*Neizmerno hvala mojim dvema porodicama što postoje i za sve što nastavljaju svakog dana da čine. Roditeljima Kaji i Miodragu hvala za večnu dozvolu za istraživanje, za njihovo tanano osluškivanje i jednostavno slušanje - bez vas ovo sigurno ne bi bilo moguće! Mom bratu Rodoljubu zahvalna sam za svakodnevnu dozu najbritkijih zapažanja koja usmeravaju i neguju. Na kraju, hvala Danetu za svu njegovu ljubav, poštovanje i savezništvo, moj život je neizmerno bogatiji zato što te poznajem i volim. Hvala i Vidu, što nema dana bez zraka sunca.*

Ovaj rad je omogućilo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnoloskog razvoja Republike Srbije kroz učešće autorke na projektu ON176021 „Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja”, kao i kroz ugovor br. 451-03-68/2020-14/200002. Autorka se zahvaljuje i Evropskoj komisiji na čijem je projektu BELISSIMA (BELgrade Initiative for Space Science, Instrumentation and Modelling in Astrophysics, poziv FP7-REGPOT-2010-5, br. ugovora 256772) takođe učestvovala.

**Naslov disertacije:** Određivanje barionske funkcije mase za uzorak bliskih galaksija

**Sažetak:**

Predmet ove disertacije je precizno određivanje barionske funkcije mase (dalje BFM) za reprezentativni uzorak bliskih galaksija, gde BFM galaksija predstavlja raspodelu galaksija po barionskoj masi. Izvodimo detaljne dinamičke modele za osnovni uzorak galaksija koji se bazira na javno dostupnim podacima iz pregleda THINGS (*The HI Nearby Galaxy Survey*), što je pregled emisije atomskog vodonika HI u liniji na talasnoj dužini od 21 cm.

THINGS rotacione krive, koje predstavljaju dinamičku masu, fitujemo ukupnim doprinosom zvezda, neutralnog gasa i tamne materije za 20 galaksija iz uzorka. Masa zvezdanih komponenti procenjena je iz fotometrije na  $3.6 \mu\text{m}$  sa misije *Spitzer*, a količina atomskog gasa sledi iz THINGS radio-posmatranja. Za pretpostavljenu raspodelu tamne materije koristili smo posmatrački motivisan pseudo-izotermalni profil (ISO), i Navaro-Frenk-Vajt (NFW) profil zasnovan na opšteprihvaćenom  $\Lambda$ CDM kosmološkom modelu. Dinamičko modelovanje ukupne mase urađeno je sa slobodnim parametrom skaliranja, tzv. odnosom masa-sjaj,  $M/L$ , kao i sa procenom istog parametra iz evolucionih modela zvezdanih populacija. Postignuta je konvergencija fita za sve modele sa slobodnim odnosom masa-sjaj, dok je modelovanje sa fiksnim odnosom postignuto za 16 objekta. Iz pomenuta četiri skupa modela (dva profila tamne materije sa slobodnim i fiksnim  $M/L$  parametrom) proizlaze mase zvezdanih komponenti, gasa, tamne materije, barionska, kao i ukupna masa galaksija iz uzorka.

Ukupna BFM se dobija sabiranjem barionskih činioca (zvezda i gasa) za galaksije iz zadatog raspona galaktičkih masa.

Razmatramo tipičnost naše Galaktičke okoline i Mlečnog puta kao velike spiralne galaksije, u pogledu mase komponentata i položaja na globalnoj (i lokalnoj) BFM.

**Ključne reči:** galaksije: kinematika i dinamika, galaksije: funkcija mase, galaksije: zvezdana komponenta, tamna materija, Galaksija: osnovni parametri

**Naučna oblast:** astrofizika

**Uža naučna oblast:** vangalaktička astronomija

**Dissertation title:** Determining the baryonic mass function for a sample of nearby galaxies

**Abstract:**

The subject of this thesis is a precise determination of the Baryonic Mass Function (BMF) for a representative sample of nearby galaxies, where BMF stands for the distribution of the galaxies' baryonic masses. Detailed dynamical models were derived for a sample of galaxies based on the publicly available THINGS (The HI Nearby Galaxy Survey) survey, based on the the 21 cm emission line of atomic hydrogen HI.

THINGS rotation curves, that reflect dynamical mass, were fitted by the sum of the contributions from the stellar component, neutral atomic gas, and dark matter for 20 THINGS galaxies. The mass of stellar components is measured from the Spitzer photometry in the 3.6  $\mu\text{m}$  band, while the amount of atomic gas is derived directly from the radio observations in THINGS. For the assumed dark matter distribution we used the observationally motivated pseudo-isothermal profile (ISO) and the Navarro-Frenk-White (NFW) profile based on the  $\Lambda\text{CDM}$  cosmological model.

Dynamical modeling of the total mass was performed with free scaling of the stellar component contribution (mass-to-light ratio,  $M/L$ ), and also with the same parameter fixed on a value consistent with stellar evolution population models. Convergence of the fitting procedure was reached for all the dynamical models with the free mass-to-light ratio, while the modeling with the fixed ratio was successful for 16 objects. The mass of the stellar component, gas, dark matter, baryonic, and total mass, were derived for the sample of galaxies and the aforementioned four sets of dynamical models (two dark matter models with both free and fixed  $M/L$  values).

The total BMF is constructed by summing the masses of the baryonic components (stars and gas) for galaxies in the given range of galactic masses.

Furthermore, we discuss how typical our Galactic neighborhood and our Galaxy, the Milky Way, as a giant spiral, are in terms of component masses and their place on the global (and local) BMF.



**Key words:** galaxies: kinematics and dynamics, galaxies: mass function, galaxies: stellar component, dark matter, Galaxy: fundamental parameters

**Scientific field:** astrophysics

**Scientific subfield:** extragalactic astronomy

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teorijske osnove i hipoteza</b>	<b>9</b>
2.1	Određivanje mase zvezda i odnosa masa-sjaj zvezdane komponente . . .	11
2.1.1	Zvezdana masa iz fotometrijskih posmatranja . . . . .	11
2.1.2	Odnos masa-sjaj iz modela zvezdanih populacija . . . . .	12
2.2	Dinamička masa iz rotacionih krivih . . . . .	16
2.2.1	Kratka istorija izučavanja rotacionih krivih . . . . .	18
2.2.2	Zračenje atomskog vodonika na talasnoj dužini od 21 cm . . . .	20
2.2.3	Savremene rotacione krive galaksija kasnog tipa bazirane na HI posmatranjima . . . . .	22
2.3	Tamna materija . . . . .	32
2.4	Barionska funkcija mase, ciljevi i hipoteze . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Posmatrački podaci i metode</b>	<b>42</b>
3.1	Uzorak . . . . .	44
3.2	Fotometrijska posmatranja . . . . .	47
3.2.1	GALFIT modeli zvezdane komponente . . . . .	51
3.3	Radio-posmatranja . . . . .	66
3.3.1	Masa gasne komponente . . . . .	66
3.3.2	Gas kao pokazatelj dinamičke mase . . . . .	68
3.4	Pregled galaksija iz uzorka . . . . .	81
<b>4</b>	<b>Dinamičko modelovanje</b>	<b>126</b>
4.1	Njutnovski dinamički modeli sa tamnom materijom . . . . .	130

4.1.1	Postupak modelovanja . . . . .	132
4.2	Dinamički modeli sa slobodnim odnosom masa-sjaj . . . . .	135
4.3	Dinamički modeli sa fiksiranim odnosom masa-sjaj . . . . .	161
4.3.1	Određivanje odnosa masa-sjaj iz SPS modela . . . . .	162
4.4	Rezultati dinamičkih modela . . . . .	189
<b>5</b>	<b>Mase komponenti i funkcije mase</b>	<b>192</b>
5.1	Barionska funkcija mase i diskusija . . . . .	198
<b>6</b>	<b>Sumiranje rezultata i zaključaka</b>	<b>211</b>
6.1	Pravci za budući rad . . . . .	221
<b>A</b>	<b>Radijalni profili</b>	<b>223</b>
	<b>Bibliografija</b>	<b>228</b>

# Poglavlje 1

## Uvod

Raspodela materije u Univerzumu predstavlja njegovu fundamentalnu osobinu i ključ za razumevanje evolucije svih sistema koje poznajemo. Kod zvezda je evolucija kao što znamo skoro u potpunosti zavisna od početne mase. Evolucija galaksija, koje su predmet ove disertacije, takođe esencijalno zavisi od mase i njene raspodele, ali indirektno.

Formiranje i evolucija galaksija još uvek nisu dovoljno dobro poznati, ali rezultati kosmoloških simulacija koji se slažu sa posmatranjima ukazuju da se nastanak galaksija, kao i veliki deo njihovog života, odvija u hijerarhijskom režimu ili hibridnim verzijama istog (Silk, 1968; Peebles and Yu, 1970; Press and Schechter, 1974a; Baugh, 2006; Jiang et al., 2012). Grupisanjem manjih haloa tamne materije nastaju veći (eng. *bottom-up*), a interakcije koje se nadalje dešavaju odražavaju se i na posmatranu raspodelu vidljive materije tj. galaksija u ovim tamnim haloima. Sve vrste sudara, prolaza, spajanja ovde generalizujemo pod imenom interakcije, ali sa različitim intenzitetom i uticajima na vidljivu materiju u njima. Osim interakcija, u galaksijama je od izuzetne važnosti i proces formiranja zvezda (eng. *star formation*), kao i proces gašenja daljeg nastanka zvezda (eng. *quenching*). Oba ova procesa posmatramo ne kao karakteristiku pojedinačnih zvezda ili njihovih grupa, već kao globalnu osobinu međuzvezdane materije u galaksijama; ova osobina varira sa vremenom i mestom u svakoj pojedinačnoj galaksiji. Masa galaksija vrlo verovatno određuje uzajamno dejstvo procesa nastanka i gašenja zvezda, čime je u mnogome određena i evolucija (Courteau et al., 2014).

Posmatrajući raspodelu mase galaksija na različitim skalama možemo posredno testirati različite modele formiranja struktura kroz poređenje sa barionskim i nebarionskim funkcijama mase koje predviđaju ovi modeli. Odnos barionske i nebarionske materije je indikativan za još uvek nedovoljno shvaćene procese u formiranju galaksija koji dovode do dobro definisanih skaliranja fundamentalnih veličina koje opisuju galaksije (eng. *scaling relations*), a posredno se odnose i na zvezdanu i dinamičku masu (Tully and Fisher, 1977; Djorgovski and Davis, 1987; Dressler et al., 1987; McGaugh et al., 2000).

Iz onoga što do danas znamo, galaksije, kao osnovni gradivni elementi posmatranog Univerzuma, se sastoje od vidljive i nevidljive materije. Vidljiva materija dominantno doprinosi ukupnom elektromagnetnom zračenju, i to preko zvezda, gasa i prašine. Gas u galaksijama nalazimo u više različitih stanja, tzv. faza, kao što su hladan atomski i molekulski gas, jonizovan i vreo koronalni gas. Dok vidljivi deo materije spada u potpunosti u barionsku materiju, nevidljiva materija prisutna u galaksijama može se podeliti na barionsku i nebarionsku komponentu. Barionska materija je sastavljena od bariona, i za razliku od klasične definicije bariona koja obuhvata teške čestice sastavljene od 3 kvarka, u astrofizici ova definicija je proširena i obuhvata sve gradivne elemente konvencionalne materije, atoma, što znači da osim protona i neutrona uključuje i elektrone. Pored vidljive komponente barionske materije, koja je, kao što je već pomenuto, smeštena u zvezdama, gasu i prašini, nevidljiva komponenta obuhvata substelarne objekte (braon patuljci, slobodne planete itd.), ostatke zvezdane evolucije (beli/crni patuljci, neutronske zvezde i crne rupe), kao i neke količine gasa i prašine koji su za sada nedostupni direktnim posmatranjima zato što su ili suviše male gustine (u međugalaktičkom prostoru) ili suviše niske temperature (na periferiji galaktičkih diskova) (Fukugita and Peebles, 2004). Iako je količina barionske materije u celini fiksirana od Velikog praska do danas, deo iste koji je taman/nevidljiv se drastično razlikuje u zavisnosti od epohe istorije svemira o kojoj govorimo. Ovo je posledica toga što barioni mogu prelaziti i iz nevidljivih stanja u vidljivo (npr. formiranje zvezda od hladnog gasa), ali i obratno (završetak zvezdane evolucije).

Na osnovu posmatranih zvezda prisutnih u sistemu jedne galaksije, teorija zve-

zdane evolucije uz stopu formiranja zvezda, inicijalnu funkciju mase i još neke pretpostavke, može dati dobre procene o količini materije sadržane u nevidljivim ostacima zvezda. Međutim, direktna i indirektna dinamička merenja ukupne mase galaksija, kao i numeričke simulacije nastanka galaksija u okviru dominantne  $\Lambda$ CDM paradigme,<sup>1</sup> daju mnogo veće vrednosti za masu galaksija od mase sadržane u pomenutim vidljivim i nevidljivim činiocima galaksija. To je još tridesetih godina prošlog veka dovelo do formulisanja hipoteze o tamnoj materiji (npr. [Oort, 1932](#); [Zwicky, 1933](#)), koja do dan-danas ostaje dominantna u ovoj oblasti. Više reči o ovoj teoriji biće u Poglavlju 2.

Ključni parametar za razumevanje dinamike i evolucije galaksija jeste odnos barionske i nebarionske materije koja je fizički vezana za svaku pojedinačnu galaksiju, te oblici u kojima se ova barionska masa nalazi. Indirektno, ovo nam daje značajne informacije i o načinu i tempu formiranja galaksija i drugih oblika strukture, što je od značajnog kosmološkog interesa. Dalja evolucija ostavlja trag na raspodeli bariona sadržanih u različitim komponentama galaksije, i u različitom obliku (kolapsirani zvezdani objekti i prisustvo gasa u različitim fazama).

Barionska funkcija mase (eng. *Baryonic Mass Function*, u daljem tekstu BFM) se obično definiše kao učestalost (broj, frekvencija) galaksija u funkciji njihove barionske mase ([Press and Schechter, 1974b](#)). BFM se konstruiše kao zbir različitih komponenti barionske materije, što može uključivati zvezdanu komponentu, atomski i molekularni gas, kao i prašinu. Iz BFM integracijom dobijamo ukupnu količinu bariona vezanih za jednu galaksiju (detalji su dati u npr. sledećim radovima: [Salucci and Persic, 1999](#); [Bell et al., 2003](#); [Read and Trentham, 2005](#)). Poznato je da je količina bariona iz BFM u značajnom neslaganju sa cenzusom za barionsku materiju koji proizlazi iz široko prihvaćene teorije nukleosinteze u Velikom prasku (eng. *Big Bang Nucleosynthesis*, BBN, [Alpher et al., 1948](#)), kada se ona normalizuje pomoću izmerene temperature kosmičke mikrotalasne pozadine. Ovo neslaganje se često naziva problem nedostajućih bariona. Poredeći barionsku komponentu sa ukupnom dinamičkom masom možemo dobiti barionsku frakciju, i njenu ranije primećenu zavisnost

---

<sup>1</sup> $\Lambda$ CDM je opšte prihvaćen kosmološki model koji osim hladne (nerelativističke) tamne materije uključuje i kosmološku konstantu  $\Lambda$ .

od ukupne mase haloa. Ovo nam zauzvrat omogućava bolje određivanje graničnih uslova u scenarijima formiranja i evolucije galaksija, naročito na kontroverzno pitanje razduvavanja bariona (eng. *blow-out*), efikasnosti povratne sprege eksplozija supernovih, kasnog priliva gasa i formiranja centralnog ovala (videti npr. [Baugh, 2006](#)). S obzirom da je predviđanje koje proističe iz primordijalne nukleosinteze poslednjih decenija dovedeno do veoma visokog nivoa preciznosti, jasno je da razlika u odnosu na BFM mora predstavljati barione koji nisu povezani sa galaksijama na uobičajeni način, bez obzira da li se nalaze u „pravom” međugalaktičkom prostoru ili ispunjavaju male grupe galaksija kao što je Lokalna grupa.

Moguće je konstruisati BFM za uzorak bliskih galaksija izabranih na osnovu prisustva neutralnog vodonika HI, za koje su dostupne rotacione krive (eng. *rotation curve*; predstavljaju raspodelu rotacione brzine po galaktocentričnom radijusu) visoke rezolucije.

Iz rotacionih krivih baziranih na liniji HI mogu se dobiti dobri i detaljni dinamički modeli. Rotacione krive nam daju informacije o ukupnoj gravitaciono interagujućoj materiji unutar galaksije i dinamici sistema. Procedura dinamičkog modelovanja se oslanja na određivanje doprinosa rotacionoj krivoj koji potiče od gasa i zvezda (uključuje dodatno modelovanje), kao i pretpostavke o funkciji koja opisuje raspodelu tamne materije u okviru Njutn-Ajnštajnovе gravitacije.

Ovo bi dalje omogućilo da mali ali pouzdan skup modela uporedimo sa sistemima na visokom crvenom pomaku (eng. *redshift*), i tako testiramo inkorporaciju gasa u kasnim epohama istorije galaksija. Ovo je značajno u kontekstu činjenice da je iz posmatranja na visokim crvenim pomacima jasno da se daleko najveći deo bariona tada nalazio u obliku difuznog gasa sa malom, ali merljivom neutralnom komponentom. Jedan deo tog gasa se tokom galaktičke istorije pretvorio u zvezde, dok je drugi najverovatnije ostao u agregatima suviše male gustine da otpočne aktivno formiranje zvezda, ali koji su ostali vezani za grupe galaksija poput Lokalne grupe (videti npr. [Rees and Ostriker, 1977](#); [Fukugita et al., 1998](#); [Salucci and Persic, 1999](#)). Na indirektnoj detekciji ovih bariona se već duže vreme radi (npr. [Verde et al., 2002](#); [Ricotti, 2009](#)). Poređenje sa BFM optički izabranog i(li) statistički značajnog uzorka, dato na primer u [Papastergis et al. \(2012\)](#); [Papastergis \(2013\)](#), je

takođe moguće i pruža značajan uvid u reprezentativnost raspodele mase u odnosu na širu okolinu.

Uzorak na kome se bazira ova disertacija preuzet je iz pregleda THINGS<sup>2</sup> (*The HI Nearby Galaxy Survey*, Walter et al., 2008). THINGS je pregled emisije linije atomskog vodonika HI, na talasnoj dužini od 21 cm, sa visokom rezolucijom u obližnjim razlučivim galaksijama. Linija HI je odavno poznata kao pogodna za dobijanje dubokih (prostiru se do velikih radijusa) rotacionih krivih, a sa poboljšanjem radio-prijemnika rezolucija se približila posmatranjima na drugim talasnim dužinama, na primer liniji H $\alpha$ . Rotacione krive su inače tradicionalno najpouzdaniji način određivanja dinamičke mase kod galaksija sa diskom. Pregled THINGS, iako manjeg obima, imao je za cilj da obezbedi rotacione krive najveće rezolucije (ispod parseka) koje se mogu koristiti za veoma detaljno dinamičko modelovanje, za šta su korišćene i u ovoj disertaciji. Uzorak nije oslobođen selekcionih efekata, imajući u vidu samu prirodu posmatranja koja su zasnovana na prisustvu većih količina hladnog atomskog vodonika. Dalje, određivanje rotacionih krivih zavisi od geometrijskih parametara galaksije, kao i prisustva diska u galaksiji i dominantnosti kružnog kretanja u njemu. To čini da u ovom uzorku nisu zastupljeni svi morfološki tipovi galaksija, kao što su eliptične i sočivaste (lentikularne). Nepovoljni geometrijski parametri galaksija (položaj njihovog diska u odnosu na naš ugao gledanja), kao i dominantno prisustvo drugih vrsta kretanja pored rotacije unutar galaksija, dodatno smanjuju broj iskoristivih objekata, pa je u finalnom uzorku prisutno 20 od ukupno 34 galaksije posmatrane u okviru THINGS pregleda. Ipak, ovaj uzorak se može smatrati reprezentativnim za našu blisku okolinu (bližu od 15 Mpc), zbog čega smo i odlučili da ga koristimo u istraživanju.

Spektrofotometrijska posmatranja (tzv. „*data cube*”, detaljnije u 3.3.2) HI iz pregleda THINGS korišćena su za izvođenje rotacionih krivih galaksija. Iz istih posmatranja, pošto se baziraju na hladnom atomskom vodoniku, dobijamo i količinu prisutnog atomskog gasa - jednostavno empirijsko skaliranje je urađeno za korekciju za drugu najzastupljeniju vrstu atomskog gasa, a to je helijum (detalji u 3.3.1). Za naše dinamičke modele je u svim slučajevima bila korišćena i procena mase zvezdane

---

<sup>2</sup>Dostupan na <http://www.mpia.de/THINGS>.



komponente dobijena iz SINGS<sup>3</sup> (*Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey*, Kennicutt et al., 2003) pregleda galaksija. Iz SINGS smo koristili posmatranja u bliskoj infracrvenoj oblasti spektra na talasnoj dužini od 3.6 mikrona, što je detaljnije opisano i obrazloženo u Poglavlju 3.2.

Pre nego što smo pristupili analizi izabranog uzorka testirali smo proceduru dinamičkog modelovanja u Samurović, Vudragović and Jovanović (2015) i Jovanović (2017). To znači da su po istoj proceduri izloženoj u ovoj disertaciji, koristeći iste posmatračke podatke, detaljno analizirane dve galaksije za koje verujemo da predstavljaju ekstreme funkcije raspodele mase obližnjih galaksija - velika spiralna NGC 5055 i patuljasta nepravilna DDO 154 (videti Jovanović, 2017). Za njih je potvrđeno da imaju veoma različitu zvezdanu masu i masu haloa, i samim time barionsku frakciju i frakciju zadržavanja bariona (eng. *baryon retention fraction*; sposobnost galaksije da zadrži količinu inkorporiranih bariona kao funkcija mase haloa domaćina). Pomenute dve galaksije detaljno su dinamički modelovane, što predstavlja studiju slučaja dva ekstremna dinamička režima za galaksije kasnog tipa<sup>4</sup>. Uspešno su izvedeni modeli koji daju realistične vrednosti za odnos masa-sjaj<sup>5</sup> ( $M/L$ ) u Spicerovom filteru centriranom na talasnoj dužini od 3.6  $\mu\text{m}$ , što nas je uverilo da je moguće odrediti zvezdanu masu i konstruisati BFM. Takođe, u okviru Samurović et al. (2015) dinamičko modelovanje je primenjeno na dobro proučenu galaksiju NGC 2841, i to koristeći modele za tamnu materiju (ISO i NFW), kao i modele Modifikovane teorije gravitacije (*MODified Newtonian Dynamics*, MOND). Ipak, za celokupan uzorak iz disertacije odlučili smo da se zadržimo samo na modelima koji uključuju tamnu materiju.

---

<sup>3</sup>Detalji na <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/SINGS/>.

<sup>4</sup>Galaksije kasnog tipa uključuju sve klase spiralnih i nepravilnih galaksija. Poreklo termina „kasni tip” je mesto na Hablovom dijagramu i prvobitno tumačenje istog, gde se pretpostavljalo da galaksije evoluiraju sa leva na desno (videti npr. <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/L/late-type+galaxies>).

<sup>5</sup>Odnos masa-sjaj (eng. *mass-to-light ratio*) se nameće kao prirodna mera koja povezuje fizičke veličine od interesa vezane za određenu galaksiju do radijusa do kog su dostupna merenja, a to su luminoznost u određenom opsegu talasnih dužina i masa zvezda koja doprinosi posmatranom sjaju, uključujući i ostatke zvezdane evolucije koji više ne doprinose sjaju. Izražava se u jedinicama odnosa Sunčeve mase i luminoznosti,  $M_{\odot}/L_{\odot}$ , i ovu jedinicu podrazumevamo kroz celokupan tekst disertacije. Odnos masa-sjaj obeležava se i sa  $\Upsilon$ . U skraćenicama  $M/L_{*}^{3.6}$  i  $M/L_{*}$  indeks ” \* ” ukazuje da se radi o odnosu masa-sjaj zvezdane komponente, a ”3.6” u indeksu  $M/L_{*}^{3.6}$  označava talasnu dužinu od 3.6  $\mu\text{m}$ .

Kao i u Jovanović (2017) koristili smo Navaro, Frenk i Vajt model (NFW, Navarro, Frenk and White, 1997) i model izotermalnog haloa (ISO, Jimenez et al., 2003) za raspodelu tamne materije. Određivanje rotacione krive, merenje prisutne količine HI i merenje i modelovanje zvezdane komponente urađeni su samostalno od strane autora. Dinamičko modelovanje koje uključuje nabrojane komponente sprovedeno je za ceo uzorak od 20 galaksija koji je definisan u tabeli 3.1, čak i u slučajevima gde je rotaciona kriva manje pouzdanosti. Izotermalni model se pokazao kao bolji u fitovanju posmatranih rotacionih krivih kod malih i nepravilnih galaksija, jer NFW model ima problema u fitovanju centralnih delova takvih galaksija, što je ranije zabeleženo u literaturi i našoj test-studiji (Jovanović, 2017).

Evolucionni modeli zvezdanih populacija (eng. *Stellar Population Synthesis*, u daljem tekstu SPS modeli<sup>6</sup>) koristeći boju kao indikator i za zadat opseg metaličnosti daju procenu zvezdanog odnosa masa-sjaj  $M/L$  u određenom domenu talasne dužine (npr. Bell and de Jong, 2001; Into and Portinari, 2013). Ovaj deo procedure takođe je testiran u našim prethodnim istraživanjima (Samurović et al., 2015; Jovanović, 2017) i rezultati su korišćeni za odgovarajuće objekte. Procene najboljeg  $M/L_*^{3.6}$  služile su kao ulazni parametar za drugi skup dinamičkih modela, gde je parametar odnosa mase i sjaja fiksiran. Ovo je omogućilo poređenje modela iz dva pomenuta pristupa - naročito poređenje parametra  $M/L_*^{3.6}$  koji opisuje masu zvezdane komponente, a zatim i raspodele mase sadržane u različitim komponentama.

Moguće promene odnosa masa-sjaj sa radijusom nisu razmatrane u okviru disertacije, ali je iz rada Jovanović (2017) preuzeta analiza radijalnih trendova faktora skaliranja  $M/L$  za galaksiju NGC 5055, i izložena u okviru Dodatka A. Poredili smo zvezdanu masu i odnos masa-sjaj iz modela sa radijalnom promenom  $M/L$  sa istim veličinama iz dinamičkih modela sa konstantnim parametrom  $M/L$ , koji su u najvećem delu predmet ove disertacije.

Za oba skupa modela konstruisane su funkcije mase: ukupne dinamičke mase, zvezdane mase, HI, barionske i mase haloa. Takođe je diskutovano poređenje sa

---

<sup>6</sup>Modeli sinteze zvezdanih populacija koriste evolucione putanje i izohrone i biblioteke zvezdanih spektara i daju spektralnu raspodelu energije sistema (galaksije) u funkciji od starosti  $t$ , istorije formiranja zvezda (koja opet zavisi od metaličnosti, udela težih elemenata, inicijalne funkcije mase) i stope formiranja zvezda.

funkcijama mase optički izabranog i statistički značajnog uzorka zasnovanog na radu Papastergisa sa saradnicima (Papastergis et al., 2012).

Ukratko, disertacija je organizovana na sledeći način: u Poglavlju 2 predstavljamo teorijske osnove na kojima se zasniva rad kao i hipoteze koje smo pokušali da dokažemo. U Poglavlju 3 predstavljamo posmatračke osnove i metode za dobijanje parametara koji ulaze u dalje modelovanje. Poglavlje 4 daje detalje dinamičkog modelovanja i rezultate dobijene sa različitim  $M/L_*$ , slobodnim i proizašlim iz SPS modela. Mase različitih komponentata galaksija iz uzorka, kao i BFM bazirana na njima zajedno sa drugim funkcijama mase i poređenjima sa literaturom date su u Poglavlju 5. Rezultati su sumirani i izloženi sa zaključcima i pravcima za budući rad u Poglavlju 6.

# Poglavlje 2

## Teorijske osnove i hipoteza

U ovoj disertaciji bavimo se raspodelom materije u lokalnom svemiru, kako vidljive tako i ukupne, i dotičemo se ukratko implikacija ovih raspodela na formiranje i evoluciju struktura uopšte. Kao što je pomenuto, moguće je poređenje raspodele mase galaksija na svim skalama sa predviđanjima za funkcije mase barionske i nebarionske komponente iz kosmoloških modela. Odavde slede i granični uslovi za primenu kosmoloških modela. Dalje, odnos barionske i nebarionske komponente je indikativan za fundamentalne, a slabo poznate procese u formiranju i potonjoj evoluciji galaksija i posmatrane relacije skaliranja (kao što je npr. poznata Tali-Fišerova relacija za spiralne galaksije). Ovaj odnos nam takođe daje granične uslove za primenu i testiranje kosmoloških modela.

Za određivanje mase galaksija koriste se mnoge tehnike, i dok neke od njih daju globalne procene mase na velikim radijusima (primer su gravitaciona sočiva data u [Kaiser and Squires, 1993](#); [Bolton et al., 2008](#), i kosmičko smicanje, eng. *shear*, [Fu et al. \(2008\)](#)), druge omogućavaju detaljnu dekompoziciju na komponente na manjim skalama ([de Blok et al., 2008](#); [Lelli et al., 2016](#)). Dekompozicija zahteva posmatranja test-čestica (eng. *tracers*) i primenjiva je unutar radijusa gde su dominantni barioni i nešto šire, do oblasti gde se veruje da uticaj bariona postaje sekundaran. Neke od tehnika za procenu mase sadržane u okviru galaksija su Doplerovo pomeranje linija u spektru zvezda ili gasa, koje zavisi od unutrašnje dinamike sistema (za bliže sisteme uključujući i našu Galaksiju možemo razlučiti pojedinačne zvezde dok se kod daljih oslanjamo na integrisane spektre), određivanje mase na osnovu posmatranog sjaja

koristeći procene  $M/L$  parametra, kao i tehnike koje nam govore o masi galaksije na većoj skali mapirajući efekte gravitacionih sočiva (Tyson et al., 1990; Bolton et al., 2008). Ovo su samo neke od metoda u upotrebi, a od značajnih treba pomenuti i:

- merenja masa na visokim crvenim pomacima (Alaghband-Zadeh et al., 2012; Grazian et al., 2015),
- direktno poređenje zvezdane i dinamičke mase (npr. de Jong and Bell, 2007),
- određivanje različitih funkcija masa (da pomenemo samo nekoliko, zvezdane, Maraston et al., 2013, i dinamičke, Papastergis et al., 2012, Papastergis, 2013),
- statističke tehnike koje koriste kinematičke osobine satelita za određivanje mase haloa (Mamon et al., 2013), TME<sup>1</sup> metod (eng. *Tracer Mass Estimator*, Evans et al., 2003),
- tehnika zasnovana na povezivanju posmatrane zvezdane mase i simulirane mase haloa (eng. *abundance matching*, Behroozi et al., 2013; Wechsler and Tinker, 2018),

i druge. Treba pomenuti da iako u principu spadaju u istu grupu metoda (koriste Doplerovo pomeranje linija u spektru), metode koje se koriste kod galaksija bogatih i siromašnih gasom praktično se veoma razlikuju jer se dinamika sistema znatno razlikuje kao i prisustvo test-čestica u njima. Ovo se praktično prevodi u korišćenje linija atomskog gasa kod galaksija kasnog tipa i korišćenje spektara zvezda i posmatranja koronalnog gasa kod galaksija ranog tipa.

Sve pomenute metode pretpostavljaju da su galaksije virijalizovani sistemi i sve se baziraju na Njutnovskoj dinamici.

---

<sup>1</sup>Koristili smo ga za određivanje mase eliptičnih galaksija u radu Jovanović et al. (2017).

## 2.1 Određivanje mase zvezda i odnosa masa-sjaj zvezdane komponente

### 2.1.1 Zvezdana masa iz fotometrijskih posmatranja

Snimanje u bliskoj infracrvenoj oblasti spektra (eng. *Near-Infrared*, NIR) smatra se optimalnim za posmatranje starih zvezda koje dominiraju ukupnom barionskom masom u galaksijama (Elmegreen and Elmegreen, 1984; Meidt et al., 2014). Snimci dobijeni uz pomoć filtera u ovoj oblasti spektra zato služe kao dobri reprezentanti ukupne mase zvezda. Infracrveni filteri umnogome izbegavaju unutrašnju i spoljašnju ekstinkciju koja potiče od prašine. Unutrašnja ekstinkcija (na izvoru, od posmatrane galaksije) može biti potpuno zanemarena na bliskim i srednjim infracrvenim talasima (Draine and Lee, 1984), a i Galaktička ekstinkcija (potiče od galaksije iz koje posmatramo, u našem slučaju Mlečni put) je veoma niska. Dalje, posmatrani sjaj u bliskoj infracrvenoj oblasti najmanje je zavisao od intenziteta formiranja zvezda i praatnih astrofizičkih procesa. To se odnosi i na zračenje mladih zvezda i HII regiona, a NIR sjaj je takođe oslobođen i tzv. „*frosting*” efekta,<sup>2</sup> koji potiče od skorašnjih manjih epizoda formiranja zvezda (Sheth et al., 2010; Meidt et al., 2014). Odnos masa-sjaj u bliskom infracrvenom delu spektra po svojoj prirodi manje varira u odnosu na zračenje u drugim opsezima.

Ipak, nije zanemariv efekat emisije koja potiče od prašine i koja doprinosi posmatranoj svetlosti na  $3.6 \mu\text{m}$ . Boja  $[3.6] - [4.5] \mu\text{m}$  korišćena je u Meidt et al. (2014) za razdvajanje zračenja od prašine i zvezda, a koristeći iste rezultate Querejeta et al. (2015) dobili su da je faktor kontaminacije prašinom korelisan sa stopom formiranja zvezda. Time se potvrđuje pretpostavka da je zračenje prašine na ovoj talasnoj dužini povezano sa formiranjem zvezda, i procena je da doprinosi od 10-30 % infracrvenom sjaju galaksija kasnog tipa. Pošto mape zračenja prašine nisu bile dostupne za većinu galaksija iz našeg uzorka, predložena korekcija nije sada ušla u naš rad. Ukupan efekat doprinosa zračenju od strane prašine indirektno je u tom

---

<sup>2</sup>Posmatrana starost populacija se postiže u evolucionim modelima dodavanjem male populacije mladih zvezda na osnovnu stariju populaciju, slikovit opis bi bila „glazura” (eng. *frosting*) od mlade populacije na starijoj (Trager et al., 2000; Into and Portinari, 2013).

slučaju sadržan u faktoru  $M^*/L$ . Poređenje mase zvezdane komponente koja se dobija računajući efekte prašine (na primer u [Querejeta et al., 2015](#)) i mase dobijene u ovom radu osnova su za budući rad autora.

Kriva rotacione brzine zvezda (i gasa) prisutnih u disku i centralnom ovalu dobija se pretvaranjem posmatranih emisionih profila sjaja u profile mase koristeći odgovarajući potencijal i odnos masa-sjaj za zvezdanu komponentu,  $M^*/L$ . Parametar skaliranja  $M^*/L$  na odgovarajućoj talasnoj dužini, tj. za odgovarajući filter, može se dobiti kao izlazni parametar prilikom procedure fitovanja posmatrane rotacione krive (korišćeno u potpoglavlju 4.2). U tom slučaju profil barionske komponente, a naročito zvezda, degenerisan je preko dva parametra koja opisuju potencijal haloa tamne materije, i za realistične modele potrebno je dobro poznavanje sva tri: odnosa masa-sjaj i parametara koji opisuju profil tamne materije. Još uvek nije moguće dobiti jedinstvene masene modele delimično i zbog previše širokog prostora parametra za tamni halo iz npr.  $\Lambda$ CDM modela. Izborom optimizovane vrednosti  $M^*/L$  na osnovu modela zvezdanih populacija (korišćeno u potpoglavlju 4.3) može se delimično otkloniti problem, ili dati granica za realistične vrednosti  $M^*/L$ . Ipak, kao što je već pomenuto, čak i u bliskoj infracrvenoj oblasti ekstinkcija prašinom i mlade zvezde utiču na posmatrani sjaj, što uslovljava zavisnost  $M^*/L$  od metaličnosti, istorije formiranja zvezda (eng. *Star Formation History*, SFH) i naročito starosti zvezdane populacije ([Courteau et al., 2014](#), i reference iz istog preglednog rada ([Rix and Rieke, 1993](#); [Rhoads, 1998](#))), o kojoj se mora voditi računa u modelovanju  $M^*/L$ . Više detalja o modelovanju zvezdanih populacija i parametra  $\Upsilon$  dato je u nastavku, u potpoglavlju 4.3.1.

### 2.1.2 Odnos masa-sjaj iz modela zvezdanih populacija

Već smo pomenuli skup metoda koji određuje masu galaksije na osnovu modelovanja konverzije luminoznosti u masu tj. veličinu koja se naziva odnos masa-sjaj,  $\Upsilon \equiv M/L$ . Zvezdana masa galaksije  $M^*$  raste kroz procese unutrašnjeg pretvaranja gasa i prašine u zvezde i kroz spoljašnje interakcije. Interakcije mogu biti većih razmera tipa spajanja/sudara, koji ne samo što dodaju novu zvezdanu masu, već i zbog sabijanja međuzvezdanog gasa podstiču dalji nastanak zvezda, i interakcije manjeg

intenziteta kao što je akrecija satelita. Premda teorijski postoje procesi kojima se zvezdana masa galaksije smanjuje (jedan od njih je nastanak malobrojnih tzv. hiperbrzih zvezda koje vidimo u Mlečnom putu), oni su daleko manjeg intenziteta i generalno se mogu zanemariti, bar kad je reč o galaksijama koje nisu ekstremni patuljci. Poznavanje mase zvezdane komponente ključno je za dekompoziciju dinamičke mase na zvezdanu (i ostalu barionsku) i tamnu materiju.

Galaksije su vidljive prvenstveno zbog zračenja zvezda koje emituju energiju nastalu u jezgri u procesima nuklearnih reakcija. Teorija zvezdane evolucije predviđa količinu energije oslobođenu od zvezde određene početne mase. Tako modelujući elektromagnetno zračenje svih zvezda u galaksiji na svim energijama, tzv. integrisanu spektralnu raspodelu energije (eng. *Integrated Spectral Energy Distribution*, SED), možemo u principu dobiti masu koja proizvodi posmatrani sjaj (Walcher et al., 2011; Conroy, 2013; Noll et al., 2009; Chevallard and Charlot, 2016; Iyer and Gawiser, 2017). Određeni deo zvezda više ne zrači ali doprinosi ukupnoj masi, i tu ubrajamo bele patuljke, neutronske zvezde i crne rupe. Zbir svih aktivnih zvezda i ostataka zvezdane evolucije čini zvezdanu masu  $M^*$  galaksije. Moguće je modelovati SED tako da udeo zvezda različitih tipova odgovara posmatranoj raspodeli energije galaksije, i to se naziva optimizovana sinteza populacija (npr. MacArthur et al., 2009). Iako korisna, ovakva metoda ne govori nam ništa o evoluciji celog sistema, nije nužno u skladu sa vremenskim skalama zvezdane evolucije, niti sa onim što znamo o inicijalnoj funkciji mase (eng. *Initial Mass Function*, IMF, predstavlja spektar masa zvezda pri rađanju tj. nastanku), i ne može se ekstrapolirati u prošlost ili budućnost. S druge strane, teorija zvezdane evolucije je dobro razvijena, počevši od Hertcsprunga i Rasela (orig. *Hertzsprung, Russell*), Baade and Gaposchkin (1963), preko Švarčšilda (orig. *Martin Schwarzschild*), Čandrasekara (npr. Chandrasekhar, 1989), pa sve do modernih simulacija zvezdanih populacija (Herwig, 2005), i podržana posmatranjima (Young et al., 2001), i detaljno opisuje luminoznost i temperaturu u zavisnosti od mase zvezde tokom njene evolucije. Postulirajući jednostavne zvezdane populacije (eng. *Simple Stellar Populations*, SSP) kao skup zvezda nastalih istovremeno u jednoj epizodi formiranja, iz oblaka sličnog hemijskog sastava i zajedničkih kinematičkih karakteristika, omogućilo je da se de-



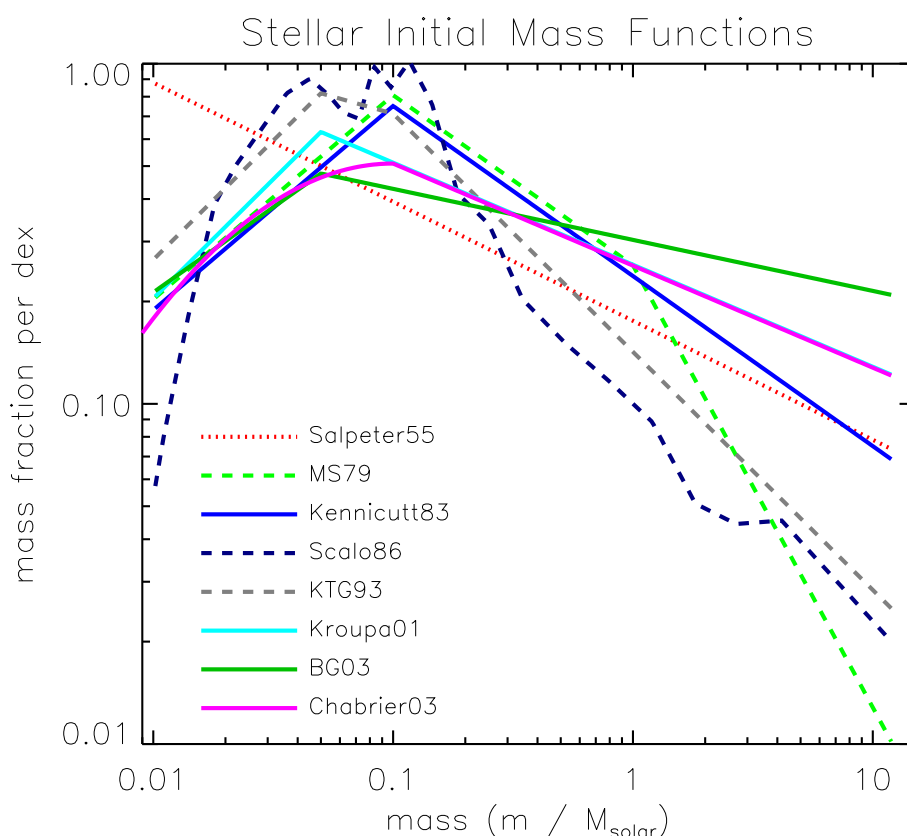
taljno poznavanje teorije zvezdane evolucije iskoristi u svrhu opisivanja galaksija i drugih sistema. Zbijena zvezdana jata (eng. *Globular Clusters*, GCs) su prirodni objekti veoma bliski idealizovanom konceptu SSP. Najbliža korisna aproksimacija galaksija je prost zbir različitih SSP-ova. Da bismo opisali jednu galaksiju potrebno je još da znamo i njenu istoriju formiranja zvezda, za šta su razvijeni analitički modeli: eksponencijalno opadajući,  $\tau$ -modeli, modeli sa konstantnom stopom formiranja zvezda (eng. *Star Formation Rate*, SFR)... Teorija zvezdane evolucije bila je bitna i u oblikovanju prve IMF dobijene od strane Salpetera (Salpeter, 1955), koji ju je iskombinovao sa posmatranjima Sunčeve okoline i dobio prost stepeni zakon. Salpeterova IMF se i danas daje radi poređenja sa savremenim IMF (slika 2.1), i mi smo je koristili u istu svrhu u potpoglavlju 4.3.1. Zvezdana komponenta galaksije može biti predstavljena kao:

$$\text{Galaxy} = \sum_{\text{time}} \text{SFR}(t) \times \text{SSP}(t, Y, Z, \text{IMF}), \quad (2.1)$$

gde  $Y$  označava prisustvo helijuma, a  $Z$  težih elemenata (metaličnost).  $Y, Z$  i IMF mogu da variraju između različitih SSP ali ne i u okviru iste SSP, po definiciji (preuzeto iz Courteau et al., 2014). Opšta teorija koja određuje stopu formiranja zvezda i spektar masa koji tada nastaje još uvek nije formulisana. Ove dve funkcije su najveća nepoznanica i figurišu kao parametrizovane u modelima zvezdanih populacija. Ovakvi modeli populacija mogu se evoluirati u oba pravca i na proizvoljnim kosmičkim udaljenostima. Iz poređenja modela i posmatranja dobijaju se procene epohe formiranja, metaličnosti i SFH galaksije, odakle je moguće proceniti  $M^*/L$ . Prvi ovakvi modeli računati su npr. u radovima Tinzlijeve (Tinsley, 1972) i Bruzuala (Bruzual, 1983).

Kao što pregled Kurtoa sa sardnicima (Courteau et al., 2014) lepo sumira, evoluciono modeliranje populacija (eng. *Evolution Population Synthesis*, EPS) daju spektralnu raspodelu energije u funkciji od parametara uključenih u simboličnu jednačinu 2.1: starosti  $t$ , parametara u analitičkoj funkciji kojom je opisana istorija formiranja, npr.  $\tau$ , metaličnosti  $Z$ , hemijskog udela ključnih elemenata i IMF. Za modelovanje su potrebne i evolucione putanje i izohrone, biblioteke zvezdanih spektara i para-

metrizacija gubitka mase u kasnim fazama evolucije (TP-AGB, RGB, HB<sup>3</sup> faze, npr. Herwig, 2005), i tokom boravka na Glavnom nizu kod mladih populacija. Različite procedure računanja evolucionih modela podrazumevaju integraciju po masi u odnosu na doprinos luminoznosti, dok se npr. druga tehnika zasniva na tzv. „teoremi trošenja goriva” (eng. *fuel consumption theorem*; Renzini, 1981). Ova teorema kaže da je broj zvezda u određenoj fazi sagorevanja proporcionalan vremenu potrebnom da se potroši gorivo u toj fazi.



Slika 2.1: Različite zvezdane IMF: udeo mase (u logaritamskom binu) sa masama za Salpeterovu (1955), Miler i Skalo (1979), Skalo (1986, 1998) i Kroupa (2001) IMF, da nabrojimo samo najpoznatije (Baldry and Glazebrook, 2003).

Najveća neodređenost u modelima zvezdanih populacija potiče od nepoznavanja IMF i odnosi se na sve tipove galaksija. Kod galaksija koje formiraju zvezde prisutno je i nepoznavanje SFH, kao i mogućnost da mali broj mladih jako sjajnih zvezda sjajem nadjača populaciju starijih koje su odgovorne za većinu mase (tzv. *frosting*, npr. Maraston et al., 2010). Korišćenje bliskog infracrvenog zračenja, kao što ra-

<sup>3</sup>TP-AGB, RGB, HB faze (eng. *Thermally-Pulsating Asymptotic Giant Branch, Red Giant Branch, Horizontal Branch*, respektivno) su kasne faze u evoluciji zvezda male do srednje mase.

dimo u okviru ove disertacije, doprinosi boljem praćenju stare masivne populacije zvezda (Maraston et al., 2010). Izuzimajući ekstremne primere veoma komplikovanih SFH, kao i galaksije sa velikim prisustvom prašine (eng. *dusty galaxies*), ovakvo određivanje mase može se smatrati robustnim u okviru  $0.2 - 0.3$  dex. Takođe, novije simulacije zvezdanih populacija kvantifikuju neodređenosti povezane sa izborom SFH, IMF, opsegom talasnih dužina i crvenim pomakom (pregled istraživanja dostupan u radu Kurtoa i saradnika, Courteau et al., 2014).

U ovoj disertaciji korišćeni su kako stariji, jednostavniji evolucionari modeli bazirani na Bell and de Jong (2001), tako i noviji modeli koji uključuju tretiranje TP-AGB faze u evoluciji i prašine u galaksijama (Into and Portinari, 2013). Detalji o korišćenim modelima izloženi su u 4.3.1.

## 2.2 Dinamička masa iz rotacionih krivih

Pod dinamičkim procesima unutar galaksija podrazumevamo kretanje objekata u gravitacionom potencijalu određene količine materije koja gravitaciono deluje. Rotaciona kriva dobija se merenjem rotacione brzine objekata u galaksiji sa promenom galaktocentričnog radijusa,  $v = f(R)$ , pomoću posmatranih prostorno razdvojenih test-čestica, na primer zvezda ili čestica hladnog gasa. Pod test-česticom u ovom smislu možemo smatrati i integrisano zračenje zvezda ili gasa iz jednog dela neba. Iz rotacione krive, uz relativno mali broj dobro utemeljenih pretpostavki, možemo izvesti zaključke o celokupnoj materiji prisutnoj u galaksiji koja deluje gravitaciono unutar posmatranog radijusa.

Kod objekata koji obilaze oko centra velikih sistema kao što su zvezde u galaksijama, galaksije u jatima itd., centrifugalna sila bi trebalo da bude uravnotežena gravitacionim privlačenjem mase koja se nalazi unutar radijusa tog objekta (posledica Njutn-Ajnštajnova teorije gravitacije; Binney and Tremaine, 2008). Ovo je uopštenje teoreme virijala za sistem u dinamičkoj ravnoteži. Iz teoreme virijala sledi da je potencijalna energija objekta u virijalizovanom sistemu uravnotežena kinetičkom (jednačina 2.2). Pojednostavljena teorema virijala za sistem bez sudara, statičan, bez površinskog pritiska, ista je kao i za idealni gas i data je skalarnom

jednačinom:

$$2T + U = 0 \quad , \quad (2.2)$$

gde je  $T$  ukupna kinetička, a  $U$  ukupna gravitaciona potencijalna energija sistema (npr. [Binney and Tremaine, 2008](#); [Mo et al., 2010](#)). Kod objekata čija je kinetička energija skoro u potpunosti rotaciona, kao što su galaksije kasnog tipa, možemo da nađemo vezu između brzine rotacije i mase sistema koja određuje gravitaciju, tj. potencijal. Ukupna kinetička energija sistema u tom slučaju jednaka je:

$$T = \frac{1}{2}Mv^2 \quad , \quad (2.3)$$

a potencijalna:

$$U \approx -\frac{GM^2}{R} \quad . \quad (2.4)$$

Veza između brzine i dinamičke mase sistema je, prema teoremi virijala primenjenoj na ovakav sistem:

$$v^2 \approx \frac{G M(R)}{R} \quad , \quad (2.5)$$

$$M \approx \frac{Rv^2}{G} \quad . \quad (2.6)$$

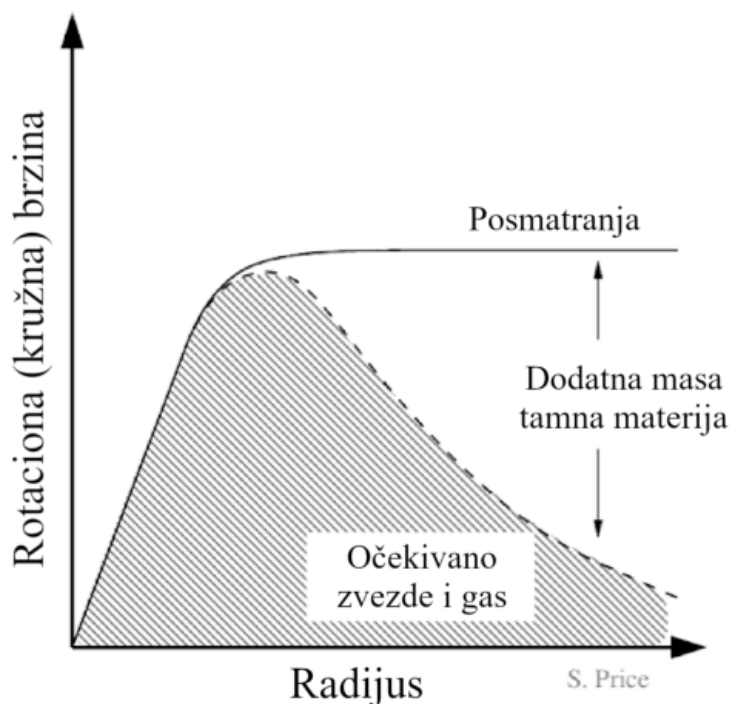
U principu brzina se određuje iz sistematskog pomeranja linija (crvenog i plavog pomaka) u spektrima posmatranih test-čestica, a daljina do galaksije određuje se nezavisnim tehnikama. Određivanje razdaljine je klasičan astronomski izazov, a više detalja o procenama udaljenosti za galaksije iz našeg uzorka dajemo u Poglavlju 3.1. U slučaju galaksija kasnog tipa, većina gasa i zvezda kreće se unutar relativno tankog diska oko centra galaksije, po približno kružnim zatvorenim putanjama koje se ne presecaju ([Binney and Tremaine, 2008](#)). Tada je dovoljno posmatrati relativno uređena kružna kretanja u disku da bismo dobili raspodelu materije koja određuje ova kretanja (u jednačinama 2.5 i 2.6 rotacionu brzinu menja kružna/cirkularna brzina,  $V_{\text{circ}}$ , na određenoj orbiti). Tipične brzine zvezda u disku Mlečnog puta su  $200 \text{ km s}^{-1}$  ([Binney and Tremaine, 2008](#)).

### 2.2.1 Kratka istorija izučavanja rotacionih krivih

Prve mase galaksija izračunate su iz rotacionih krivih spiralnih galaksija koje su izmerene još početkom XX veka. Već tada je uočeno da posmatrane linije zabranjenih prelaza u jonizovanom gasu koji čini sjajne magline (eng. *nebular lines*) pokazuju određenu asimetriju, što je indikacija rotacije. Francis Piz (*Francis Pease*) je u svom radu iz 1918. godine (Pease, 1918) izmerio rotacionu krivu Andromede (M31), a Ernst Julijus Opik (*Ernst Julius Öpik*) je 1922. godine izveo masu uzimajući  $M/L$  Sunčeve okoline (Opik, 1922). To je bilo prvo merenje mase neke galaksije u savremenom smislu reči (u to doba, sve do epohalnog Hablovog rada iz 1924. godine, još uvek nije postojao konsenzus u pogledu prirode „spiralnih maglina”). Iste godine, Jakobus Kaptejn (*Jacobus Kapteyn*) je u svojoj studiji gustine mase u Sunčevoj okolini (Kapteyn, 1922) prvi put pomenuo termin „tamna materija” (eng. *dark matter*) misleći na nevidljivu materiju koja doprinosi gustini Mlečnog puta. Osavremenjenje pionirskog rada Kaptejna dao je Jan Ort (*Jan Oort*) 1932. godine, kome se može pripisati otkriće tamne materije u galaksijama (Oort, 1932). Slično otkriće u jatima galaksija predmet je rada Frica Cvikija (*Fritz Zwicky*) iz 1933. godine (Zwicky, 1933). Cviki je upotrebio upravo jednačinu 2.6 da proceni dinamičku masu jata u Berenikinoj kosi (*Coma*).

Teorija nam kaže da brzina opada kao kvadratni koren od rastojanja, a proporcionalna je masi galaksije koja se nalazi unutar radijusa objekta (jednačina 2.5). Na većim udaljenostima od centra, van vidljivog dela galaksije, očekujemo da je sva masa unutar radijusa putanje i da brzina opada kao kvadratni koren od radijusa. To se ne dešava, naprotiv, posmatrane brzine su u okviru optičkog diska, ali i znatno dalje, konstantne ili čak i rastu.

Istorija snimanja rotacionih krivih je ujedno i istorija teorije tamne materije. Naime, krajem šezdesetih godina 20. veka rotacione krive su se već rutinski ispostavljale kao „ravne”. Pionirska istraživanja izvela je Vera Rubin, prvo na našoj Galaksiji (Rubin et al., 1962) i iz zvezdanih spektara zaključila da je rotaciona kriva ravna na radijusima većim od 8.5 kpc, što znači da ne pokazuje očekivano keplerovsko opadanje. Rubin i Ford su 1972. godine utvrdili slično ponašanje rotacione krive galaksije M31 do čak 27 kpc, što su potvrdila i prva merenja rotacionih krivih



Slika 2.2: Šematski prikaz rotacione krive bliske diskolike galaksije: isprekidana linija i oščenjena oblast prikazuju očekivani profil kružne brzine pod uticajem posmatranih zvezda i gasa, i posmatrani profil označen punom linijom. Razliku pripisujemo dodatnoj masi u spoljašnjim delovima galaksije. Preuzeto sa <http://mosdef.astro.berkeley.edu/for-the-public/public/galaxy-masses/>.

iz neutralnog vodonika 1975. godine (Roberts and Whitehurst, 1975). Ken Frimen (*Ken Freeman*) je u svom radu iz 1970. godine (Freeman, 1970) neopaženo od savremenika prvi put jasno formulisao neslaganje između tada dostupnih rotacionih krivih i zvezdane raspodele sa konstantnim odnosom  $M/L$ . Pomenuti rad je inače bio veoma uticajan u interpretaciji eksponencijalnog diska kod galaksija kasnog tipa.

Manifestacija onoga što smatramo tamnom materijom kroz dinamiku galaksija i njihove rotacione krive nedvosmisleno je potvrđena tek merenjima na radio talasima i to prvenstveno koristeći WSRT (*Westbrooke Synthethis Radio Telescope*). Uz detaljne rotacione krive bazirane na liniji HI na talasnoj dužini od 21 cm, pojavila se i podjednako bitna mogućnost određivanja gornje granice doprinosa barionske komponente posmatranoj rotacionoj krivoj. Veliki pomak ostvaren je u izuzetnoj doktorskoj disertaciji Alberta Bosme (*Albert Bosma*), koji je u njoj dekomponovao „duboke” (idu do najdaljih galaktrocentričnih radijusa) rotacione krive za 25 spiralnih galaksija da bi pokazao da ukupan odnos  $M/L$  raste sa radijusom (Bosma,

1978).

### 2.2.2 Zračenje atomskog vodonika na talasnoj dužini od 21 cm

Za poslednjih pola veka posmatranja međuzvezdane materije (eng. *Interstellar Medium*, ISM) su se pokazala kao ključna za bolje upoznavanje procesa koji dovode do formiranja zvezda, dinamike i strukture u samoj ISM, kao i raspodele vidljive i nevidljive materije. Samim time ova istraživanja dotakla su se fundamentalnog problema evolucije galaksija, i povezane teme kojom se mi ovde bavimo, a to je raspodela materije u galaksijama. Verovatno najznačajniji način na koji vidimo međuzvezdani gas je kroz neutralni vodonik kao najprisutniju vrstu gasa.

Atomski neutralni vodonik detektuje se kroz hiperfinski prelaz u atomu vodonika i emisionu liniju koju taj prelaz proizvodi. Talasna dužina linije gasa koji miruje u vakuumu je blizu 21 cm (frekvencija od oko 1420 MHz), što se nalazi u radio-oblasti spektra elektromagnetnog zračenja. Prednost ovog zračenja je to što lako prolazi kroz atmosferu, i za razliku od UV i optičkog zračenja, ne podleže ekstinkciji na međuzvezdanoj prašini. Emisija na 21 cm je u većini slučajeva optički tanka, što znači da se količina prisutnog gasa duž linije vida može direktno prevesti u linijsku gustinu (eng. *column density*) i samim time masu posmatranog vodonika iz tog prostornog ugla, a integraljenjem i u masu HI u celoj galaksiji. Linija je prirodno izuzetno uska, pa nam Doplerov pomak govori i o brzini perturbovanog emitujućeg gasa, što obezbeđuje dragocene kinematičke podatke koji se koriste u ovoj disertaciji.

Linija HI na 21 cm zanimljiva je sa aspekta istorije nauke, a značajan je i njen kulturološki status. Iz tih razloga u okviru ovog potpoglavlja posvećujemo joj posebnu pažnju. Bitno je pomenuti da apsorpciona linija HI na istoj talasnoj dužini puno obećava i kao instrument budućih kosmoloških istraživanja (na primer [Ji et al., 2021](#)).

Naime, emisiona linija HI je jedno od onih elegantnih otkrića u istoriji nauke kad nakon teorijskog predviđanja dolazi i eksperimentalna potvrda, i to u jedinoj laboratoriji gde se tada mogla posmatrati, a to je svemir. Tridesetih godina 20. veka

zabeleženo je „šuštanje” na radio-talasima koje se menja na dnevnom nivou i za koje se sumnjalo da potiče sa izvora izvan Zemlje. Nakon inicijalne pretpostavke da šum potiče sa Sunca, merenja Karla Janskog (*Karl Jansky*) 1932. godine su pokazala da dolazi iz pravca koji su Ort (*Jan Oort*) i Šepli (*Harlow Shapley*) označili kao centar naše Galaksije. Ort je pročitao rad Rebera (*Grote Reber*), koji je 1942. napravio prvu mapu radio-neba, i shvatio da bi mu linija u radio-području omogućila proučavanje kinematike galaksije na većim rastojanjima do kojih se zbog prašine nije moglo posmatrati u vidljivom. Ort je zadužio svog studenta Hendrika C. van de Hulsta (*Hendrik C. van de Hulst*) da istraži radio spektralne linije koje bi mogle da postoje, kao i na kojim frekvencijama. Van de Hulst je radio pod veoma teškim uslovima, tokom nemačke okupacije, a posebno zloglasne „gladne zime” (*Hongerwinter*)<sup>4</sup> 1944-45. godine. Pošavši od vodonika zbog njegove najveće zastupljenosti, on je našao da tzv. zabranjeni hiperfina prelaz u osnovnom stanju neutralnog vodonika zrači na frekvenciji od 1420 MHz ili oko 21 centimetar. U osnovnom stanju elektron u atomu vodonika može imati magnetni momenat paralelan ili antiparalelan protonu. Poluzivot u paralelnom stanju spina je jako dug, reda  $\sim 10^{10}$  godina, pa je to što nazivamo zabranjenim u stvari jako malo verovatan prelaz na Zemlji. Prilikom prelaska iz stanja paralelnog spina u stabilnije antiparalelno stanje sa nižom energijom izračuje se foton na pomenutoj radio-frekvenciji. Van de Hulst je svoje predviđanje objavio 1945. na holandskom, a prevod je dostupan u radu [Sullivan \(1982\)](#). Ovo predviđanje potvrđeno je 1951. godine od strane astronoma sa Harvarda ([Muller and Oort, 1951](#)), da bi ubrzo nastale i prve mape neutralnog vodonika u Mlečnom putu, čime je prvi put viđena i spiralna struktura naše Galaksije ([van de Hulst et al., 1954](#)).

Osim za opisivanje dinamike naše kao i drugih galaksija računanjem rotacionih krivih i određivanjem daljina, veliki je potencijalni značaj linije HI na talasnoj dužini od 21 cm i za kosmologiju. Posmatranja na ovoj talasnoj dužini mogla bi da utiču i na promenu vrednosti gravitacione konstante. Jedini poznati način ispitivanja kosmičke epohe od rekombinacije do rejonizacije (eng. „*dark ages*”) jeste pomoću ove linije. Merenje intenziteta bi precizno odredilo maseni spektar snage (eng. *mass*

---

<sup>4</sup>Detaljnije na [https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch\\_famine\\_of\\_1944-45](https://en.wikipedia.org/wiki/Dutch_famine_of_1944-45).



*power spectrum*) nakon rekombinacije, a posmatrane rupe u raspodeli koje odgovaraju zvezdama i galaksijama bi nam dale saznanje o rejonizaciji. Iako su za sada takva posmatranja tehnički neizvodljiva, ovde leži mogućnost za pomerenje granica posmatračke kosmologije u bliskoj budućnosti.

Kulturološki linija HI na talasnoj dužini od 21 cm smatra se toliko simboličnom da je njena talasna dužina iskorišćena kao merna jedinica na pločicama koje su deo letelica iz misija Pionir (eng. *Pioneer*) 10 i 11, kao i Vojadžer (eng. *Voyager*) 1 i 2, iz sedamdesetih godina 20. veka. Na primer, na letelicama Pionir, visina ljudi je predstavljena kao umnožak  $\lambda_{\text{HI}}$ , a na diskovima koje nose Vojadžeri Sunce je mapirano u odnosu na 14 obližnjih pulsara čija je frekvencija rotacije data kao umnožak frekvencije HI. Za pretrage signala koji potiče od vanzemaljskih civilizacija u okviru programa SETI<sup>5</sup> (eng. *Search for Extraterrestrial Intelligence*) predložene su različite kombinacije frekvencije upravo ove linije.

### 2.2.3 Savremene rotacione krive galaksija kasnog tipa bazirane na HI posmatranjima

Kod spiralnih galaksija posmatranje kinematičkih svojstava međuzvezdane materije u potpunosti je preuzelo primat i u određivanju rotacionih krivih, i samim time, i upoznavanju dinamičkih procesa unutar galaksija (Courteau et al., 2014). Za ovu vrstu analize kretanje međuzvezdanog gasa koncentrisanog u tankom disku se aproksimira kružnim zatvorenim orbitama koje se međusobno ne presecaju i duž kojih se kreću čestice gasa. Za razliku od diska gde se zvezde kreću po kružnim orbitama, postoje komponente galaksije koje ne podležu aksijalnoj (osnoj) simetriji. Primer takvih struktura su prečaga (eng. *bar*) i spiralne grane, i one uzrokuju da čak i dobro uređeno kretanje gasa odstupa od kružnih orbita. Van centralnih delova sa prečagom efekat necirkularnih kretanja bi trebalo da nestane usrednjavanjem po celom posmatranom disku galaksije, a efekat bi trebalo da ne prevazilazi 10 % brzine gasa (Bovy, 2021).

Posmatranja međuzvezdanog gasa iz kojih dobijamo rotacione krive drugih ga-

---

<sup>5</sup><https://www.seti.org/>.

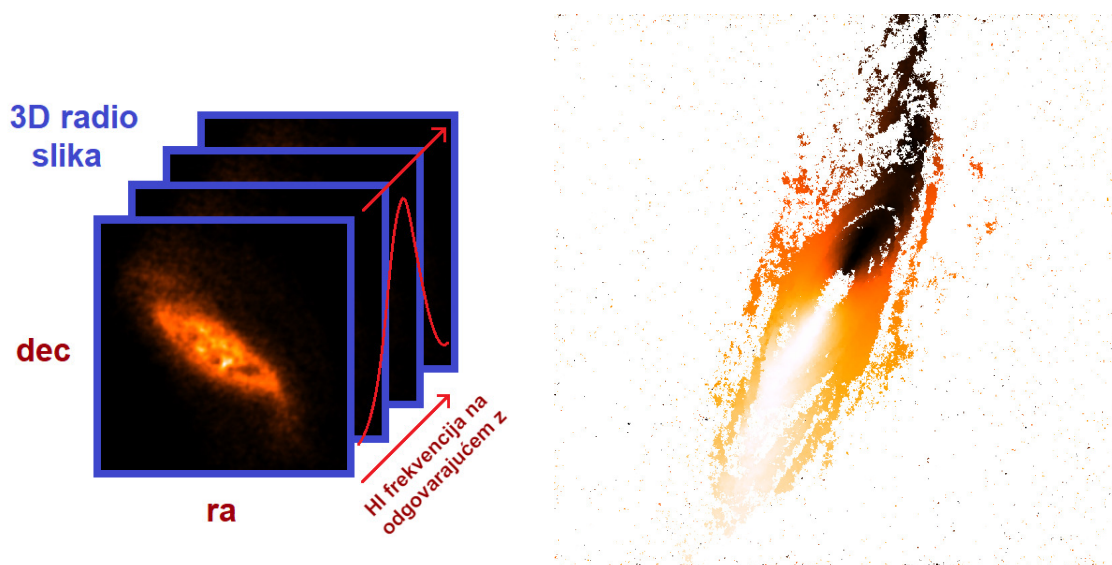
laksija podrazumevaju spektroskopiju određene emisione linije duž jedne izabrane dimenzije (velike ose galaksije) ili razlučenih elemenata dvodimenzionalne slike galaksije na nebu. Doplerovska pomeranja posmatrane linije sadrže informaciju o kinematici gasa duž vizure. Tipično se koriste linije  $H\alpha$  i  $[NII]$  koje su u mirovanju prisutne u vidljivom delu spektra, CO u milimetarskom delu i radio-linija HI. Posmatrani spektar linije mapira raspodelu brzina duž linije vida,  $V_{LOS}$  (eng. *line-of-sight*), u prostor talasnih dužina. Tradicionalno optička merenja se vrše spektrografom pomoću proreza (eng. *long-slit*), gde se prorez spektrografa postavlja duž fotometrijske velike i male ose galaksije i produkuje 1D (jednodimenzionalnu) raspodelu brzina duž te ose. Savremena posmatranja spektrografom sa integralnim poljem IFU (eng. *integral-field unit*) danas rutinski obezbeđuju 2D (dvodimenzionalnu) mapu brzina. Kada svakoj tački projektovane slike galaksije na nebu možemo pridružiti brzinu koja je opisuje,  $V(x, y)$ , takvu mapu nazivamo polje brzine (eng. *velocity field*, VF) ili kinematička mapa.

Spektroskopska posmatranja molekularne linije CO (koja je glavni indikator prisustva molekularnog gasa) i prvenstveno HI takođe produkuju dvodimenziono polje brzina. Kinematičke mape,  $V(x, y)$ , obezbeđuju nam mnogo više informacija; na primer moguće je posmatrati odstupanja od cirkularnih orbita i takva posmatranja su korišćena u ovoj disertaciji. Moguće je videti i da li kinematički geometrijski parametri kao što su velika osa, inklinacija i centar galaksije odstupaju od fotometrijskih. Dvodimenziono polje brzina je ključno za utvrđivanje najbolje moguće rotacione krive, za koju ovde dajemo bližu definiciju: brzina koju bi test-čestica imala na kružnoj orbiti na radijusu  $R$  koji je usrednjen duž ose normalne na ravan diska, u galaksiji sa osno-simetričnom raspodelom materije (Bovy, 2021). Pri poređenju posmatranih profila linija i idealizovanog profila okarakterisanog jednom brzinom moguće je osim disperzije odrediti i više momente brzine, što je slučaj sa podacima koje mi koristimo.

## Polje brzina

Kod prostorno i spektralno razlučenih posmatranja linije HI (na odgovarajućoj fre-

kvenciji za datu galaksiju) moguće je modelovanjem efekata koji doprinose širenju linije ustanoviti rotacionu brzinu posmatranog gasa koja potiče od ukupne samogravitirajuće materije unutar obuhvaćenog radijusa. Poljem brzina nazivamo mapu konstruisanu tako što svakoj razlučenoj tački posmatrane projekcije galaksije na nebu dodelimo jednu, „tipičnu”, vrednost brzine. U svakom pikselu snimljen je spektar linije HI oko frekvencije (isto što i brzina) očekivane za galaksiju sa posmatranom sistemskom brzinom (šematski prikaz na levom panelu slike 2.3). Doprinos širenju i deformaciji linije HI u svakoj tački potiče od sistematskih efekata koje unose fizički procesi u galaksiji i neodređenosti samih posmatranja tj. merenja. Naš cilj je da „otkrijemo” brzinu koja bi odgovarala čistoj rotaciji na kružnoj orbiti koja prolazi kroz tu tačku. Polje brzine sastavljeno je od dobijenih karakterističnih brzina za svaki od elemenata na projektovanoj slici galaktičkog diska.



Slika 2.3: Polje brzina: Levo - šematski prikaz trodimenzionalnog radio snimka galaksije na frekvencijama oko očekivane emisije HI, i kako se u svakom pikselu kroz širenje linije beleži ponašanje tog elementa gasa; Desno - polje brzina NGC 2841 konstruisano u našem radu fitujući linije Gaus-Ermitovim  $h_3$  polinomom. Svetlije oblasti predstavljaju veće brzine (eng. *receding side*), a tamne manje (eng. *approaching side*).

Instrumentalni i posmatrački efekti su naročito bitni kod posmatranja manje rezolucije u koja spada i HI (de Blok et al., 2008). Od posmatračkih efekata poznato je razmazivanje snopa (eng. *beam smearing*) koje uzrokuje asimetričnost u posmatranim profilima i izraženo je u slučaju kad je snop antene relativno veliki u odnosu na dimenzije galaksije. Duži „rep” profila u tom slučaju uvek pokazuje ka sistemskoj

brzini, što možemo korigovati tako što izaberemo brzinu blisku maksimalnoj, a što dalje od systemske. Od fizičkih procesa najvažnije su različite vrste necirkularnih kretanja, uređena i neuređena, uzrokovana interakcijama na galaktičkoj skali izraženim kroz plimsko strujanje ili malim lokalnim „komešanjima”. Kada se ne koriguju, svi pomenuti efekti **snižavaju** posmatranu brzinu (de Blok et al., 2008).

Izbor polja brzina je temelj za dalje izvođenje rotacione krive. Ovaj izbor se svodi na izbor funkcije tj. raspodele koju fitujemo na liniju HI u svakoj od tačaka našeg posmatranog polja. Već smo pomenuli da svaki piksel u sebi sadrži spektar (raspodelu) koji odgovara proširenoj liniji HI u toj tački. Ovu raspodelu potrebno je okarakterisati jednom vrednošću brzine koja najbolje opisuje haotično kretanje gasa koji posmatramo u tom delu neba, tj. rekonstruisati reprezentativnu rotacionu brzinu očišćenu od uticaja drugih uzroka proširenja i deformisanja linije. Neki od načina za konstrukciju različitih polja brzina su (de Blok et al., 2008):

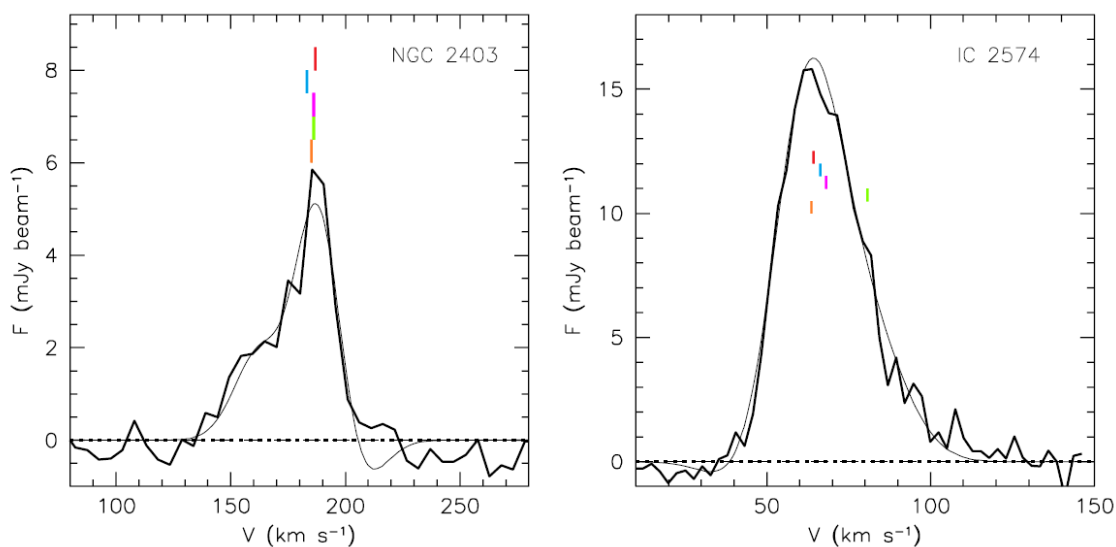
- **polje brzina vrha linije (eng. *peak VF*)** - u svakoj tački polja je vrednost koja odgovara poziciji vrha (maksimuma) linije sadržane u tom elementu. Maksimum linije dobro odgovara centru kada je rotacija dominantna i u delovima spektra gde je visok odnos signal-šum (eng. *signal-to-noise*, S/N). Prednost je da ne zavisi od oblika i fita profila linije;
- **srednja brzina otežana intenzitetom (eng. *intensity weighted mean*)** - ovako konstruisano polje brzine naziva se još i prvi momenat brzine. Kod asimetričnih profila teži dužem „repu” raspodele. Pri određivanju srednje vrednosti bitno je koristiti oblasti gde nema puno šuma. Uprkos pomenu tim nedostacima jedan je od najčešće korišćenih načina za konstrukciju polja brzine;

ili centar neke od funkcija korišćenih za fitovanje prisutne linije:

- **Gausova (nem. *Gauss*)** - maksimum fitovanog Gausovog profila uzima se za tipičnu brzinu. Nešto je robusniji na manje asimetrije i prisustvo šuma od prvog momenta, ali je i dalje osetljiv. Dobra je aproksimacija kada je širina profila približna rezoluciji instrumenata;

- **Fojtova (nem. *Voigt*)** - koristimo maksimum fita Fojtovog profila, koji je konvolucija Gausovog i Lorencovog profila. Ređe se koristi jer lošije od Gausovog opisuje linije gde je dominantna rotacija;
- **Gaus-Ermitovi (nem-fra. *Gauss-Hermite*) polinomi  $h_3$  i  $h_4$**  - maksimum Gaus-Ermitovog<sup>6</sup>  $h_3$  polinoma se dobro pokazuje prilikom fitovanja asimetrije (eng. *skewness*) linija (van der Marel and Franx, 1993) i koristićemo ga primarno u ovoj disertaciji (kao i u Samurović et al., 2015; Jovanović, 2017). Polinom  $h_4$  određuje debljinu odnosno „špicastost” profila, i nije koristan za radio-posmatranja loše rezolucije, te se ne koristi u našoj analizi.

Takođe je moguće profile fitovati sa više komponenta pomenutih funkcija, što koristimo kada osim rotacije imamo još neko izraženo ili čak dominantno kretanje. Iako potreban, fit više komponenti je manje pouzdan zbog velikog broja slobodnih parametara koji brzo preopterećuju proces računanja i često daju besmislene rezultate.



Slika 2.4: Različiti načini za određivanje centra linije ili tipične brzine predstavljeno je vertikalnim crtama na oba panela, i to su odozgo na dole:  $h_3$  – crvena, Gausov – plava, prvi moment – ljubičasta, *bulk* polje brzine (Oh et al., 2008) – zelena, i vrh linije – narandžasta. Preuzeto iz rada de Bloka i saradnika (de Blok et al., 2008).

Kada je dominantan uzrok širenja linije rotacija rezultat korišćenja različitih polja brzina prilično je sličan; kada je potrebno uračunati i druge vrste kretanja ili

<sup>6</sup>U domaćoj literaturi ponekad se se sreće „Hermitovi”.

abracije koje unose instrumenti neki od ovih profila pokazali su se kao bolji od drugih. Korišćenje Gaus-Ermitovog  $h_3$  polinoma je najrobustniji način da se minimizira broj komponenti u fitu i da se uračuna asimetrija linija koja se posebno javlja kod ove vrste radio-spektroskopije. Kod objekata koji imaju izražena necirkularna kretanja  $h_3$  polje brzina nije dovoljno dobro za izdvajanje rotacije. Na slici 2.4 (de Blok et al., 2008) vidimo primere različito određenih centara linije za dve galaksije iz uzorka. Kod galaksije NGC 2403 (levo), gde je dominantno rotaciono kretanje, različite metode konstrukcije polja brzine daju sličan rezultat; kod galaksije IC 2574 (desno), gde su druga kretanja značajnija od rotacije, samo *bulk* metoda uspeva da nađe pik koji potiče od rotacije. Po uzoru na rad Oha i saradnika (Oh et al., 2008) za galaksije sa značajnim necirkularnim kretanjima izveli smo novu proceduru, i polje brzina koje tako konstruišemo nazvali smo **dominantno rotaciono polje brzine** (detaljnije u odeljku 3.3.2).

### Nacrt procedure izvođenja rotacione krive

Da bismo iz posmatrane brzine duž linije vida  $V_{\text{LOS}}$  dobili traženu rotacionu tj. kružnu brzinu, jedna od korekcija koju je potrebno uračunati je deprojehtovanje:

$$V_{\text{rot}} = V_{\text{LOS}} / \sin i,$$

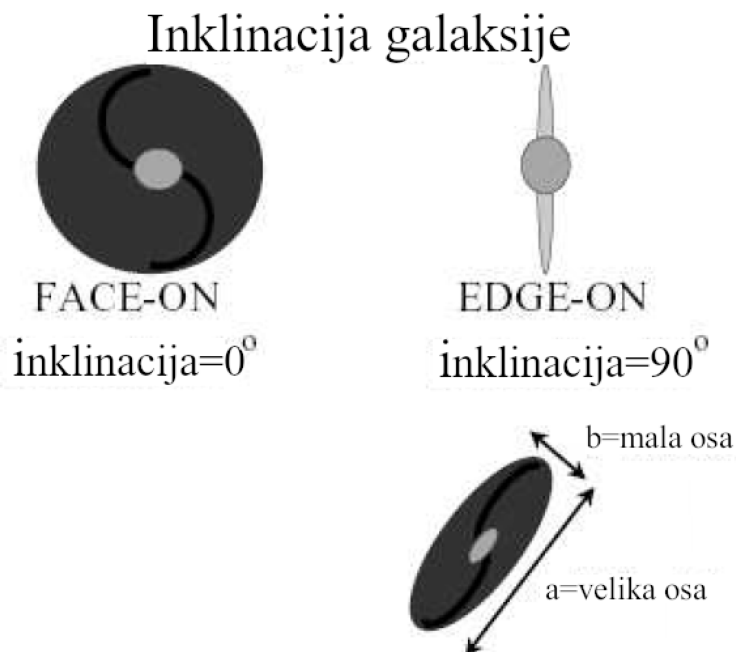
gde je  $i$  inklinacija diska galaksije (ili prstena kod metode fitovanja nagnutih prstenova).

Inklinacija galaksije tj. ugao pod kojom je vidimo, umnogome određuje mogućnost da izdvojimo i posmatramo rotaciono kretanje gasa. Inklinacija galaksije od  $90^\circ$  znači da je njena osa rotacije normalna na liniju vida i da disk posmatramo sa strane (eng. *edge-on disk*, slika 2.5), što bi značilo da svaka naša linija vida preseca sve slojeve gasa koji rotiraju raznim brzinama oko centra, pa su takve galaksije nepogodne za izvođenje radijalne raspodele rotacione brzine tj. rotacione krive.<sup>7</sup> Takođe, suviše mala inklinacija (od nule do nekoliko desetina stepeni, eng. *face-on disk*, slika 2.5)

---

<sup>7</sup>Istorijski su upravo kod *edge-on* diskova galaksija bile dosta precizno određene brzine na ravnom delu krive, što je mera totalne dinamičke mase do radijusa do kog se disk prostire. Iako je teško/nemoguće dobiti rotacionu krivu u ovim slučajevima ne znači i da je nemoguće odrediti asimptotsku rotacionu brzinu.

onemogućava da uopšte izdvojimo rotaciono kretanje, jer je ono kosinusna projekcija pozicionog ugla i time čini previše mali deo ukupne brzine u datoj tački da bi sa sigurnošću moglo da se razlikuje od šuma.



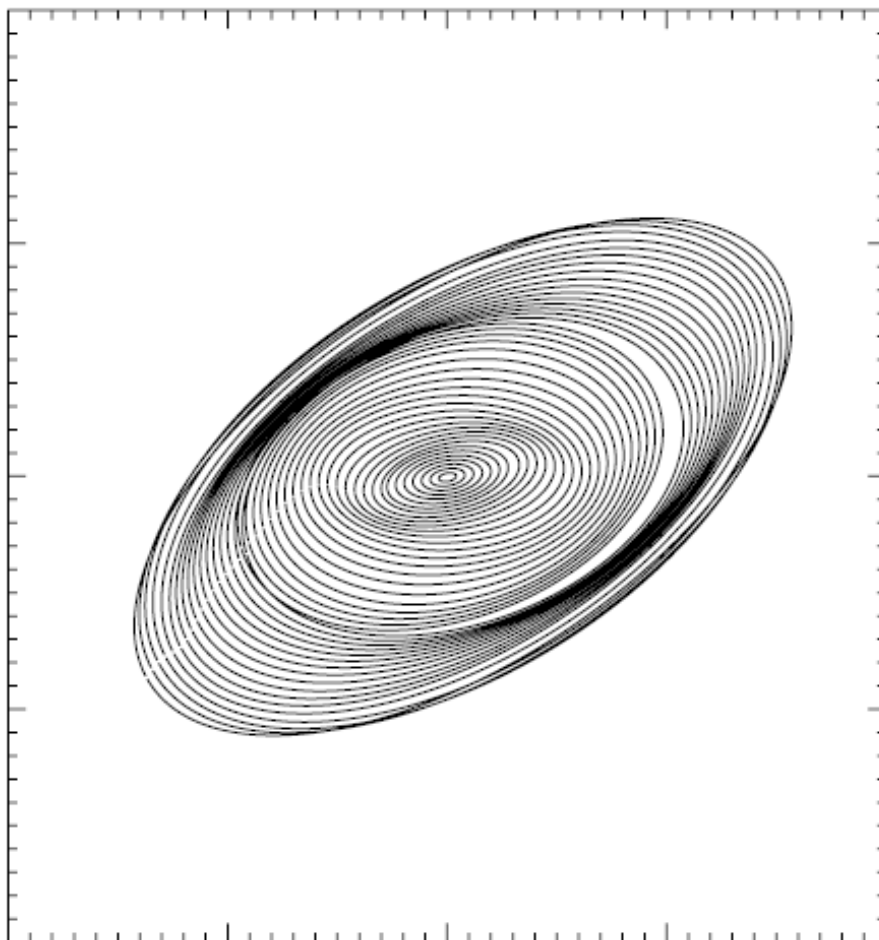
Slika 2.5: Inklinacija posmatrane galaksije, dva ekstremna slučaja:  $i = 0^\circ$ , disk gleda ka nama (eng. *face-on*), i  $i = 90^\circ$ , disk posmatramo sa strane (eng. *edge-on*). Ilustracija iz Samurović (2007).

Određivanje geometrijskih parametara zasniva se na pretpostavci da je disk galaksija približno kružnog oblika u ravni galaksije, pa je time brzina gasa duž velike ose posmatrane elipse koja predstavlja disk (i određena je pozicionim uglom) najbliža realnoj brzini rotacije gasa. Zato ovim tačkama pridajemo najveću težinu u proceduri fitovanja brzina (jednačina 3.5).

U slučaju dvodimenzionalnog polja brzina, gde svaka tačka sadrži informaciju o brzini gasa iz tog dela neba, fitovanje iskošenih/nagnutih (eng. *tilted-rings*) eliptičnih prstenova omogućava dobijanje optimalne rotacione brzine na određenom radijusu. Svaki prsten okarakterisan je radijusom, inklinacijom ( $i$ ), pozicionim uglom ( $P.A.$ ), sistemskom brzinom ( $V_{\text{sys}}$ <sup>8</sup>), rotacionom brzinom ( $V_c$ ), i položajem centra ( $x_0, y_0$ ),

<sup>8</sup>Ono što u ovom radu nazivamo sistemskom brzinom u stvari je zbir sopstvenog kretanja galaksije i lokalne vrednosti crvenog pomaka.

koje možemo varirati ili ne. Model iskošenih prstenova za galaksiju NGC 5055 koja ima uvrtnje u spoljašnjim delovima diska prikazan je na slici 2.6.

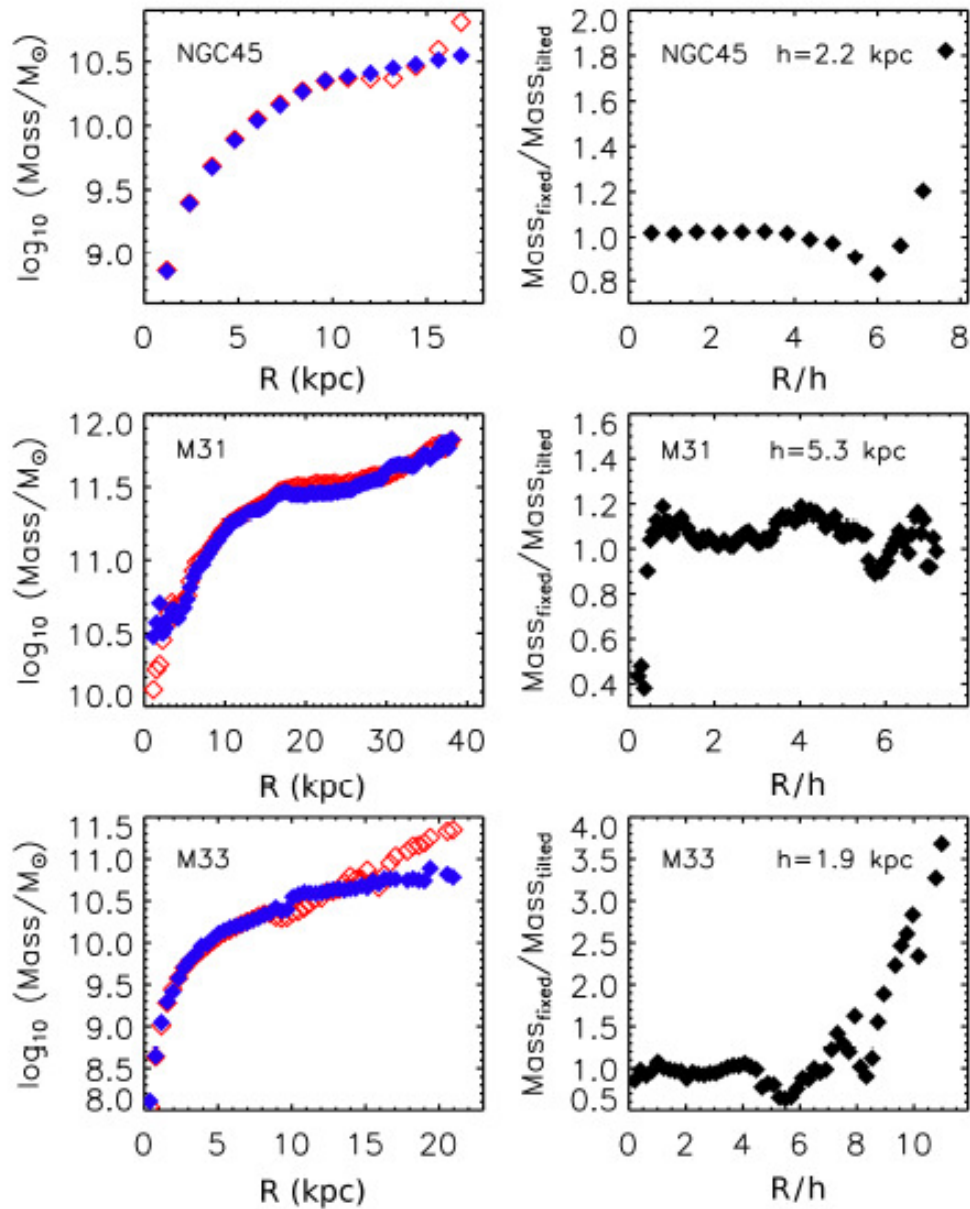


Slika 2.6: Model iskošenih prstenova za galaksiju NGC 5055 sa uvrtnjem u spoljašnjem delu diska (Battaglia et al., 2006).

Neodređenost u inklinaciji je jedan od ključnih izvora neodređenosti izvedene rotacione brzine. Osim posmatračkih neodređenosti koje su minimizirane kod HI posmatranja, prisutne su i fizičke promene u nagibu. Inklinacija zavisi od talasne dužine i podleže promenama kao što su uvrtnja (eng. *warp*) van optičkog diska (Courteau et al., 2014, i reference u njemu; de Blok et al. (2008)). Zbog toga što se uvrtnje dešava u spoljašnjim delovima diska ono naročito utiče na procenu ukupne mase. Može se pokazati da zanemarivanje efekta uvrtnja i sličnih, korišćenjem jedne globalne vrednosti za inklinaciju, uvek dovodi do **potcenjivanja** ukupne mase (Chemin et al., 2006, videti sliku 2.7). U ovoj disertaciji koriste se posmatranja najdubljih delova gasnog diska, preko 5-6 dužina optičkog diska i neophodno je bilo



usvojiti pristup da inklinacija nema konstantnu vrednost u proceduri fitovanja. Dovoljeno je variranje, pa čak i znatna promena u spoljašnjim delovima, naročito tamo gde se iz analize polja brzine vidi prisustvo uvrtnja (videti objašnjenje konkretne procedure u 3.3.2 i usvojene profile inklinacije na slikama 3.29 - 3.48).



Slika 2.7: Profili mase (levo) i njihov odnos (desno) iz HI rotacionih krivih sa fiksiranom inklinacijom (plavi kvadratići) u odnosu na inklinaciju iz modela iskošenih prstenova (crveni prazni kvadratići). Preuzeto iz pregleda Courteau et al. (2014) i referenci koje su tamo date.

Pouzdanost određivanja mase zavisi od toga koliko dobro posmatrane  $V_{\text{rot}}$  odgo-

varaju pretpostavljenim  $V_{\text{circ}}$  brzinama. Idealno, ukupna (barionska) masa galaksije trebalo bi da se izvodi iz rotacionih krivih koje su ušle u ravan „režim” (dostigle plato). To nije uvek moguće, naročito za patuljaste galaksije gde je veliko prisustvo šuma u odnosu na posmatrani nizak sjaj na radijusima većim od  $4R_s$  ( $R_s$  je karakteristična skala dužine kod eksponencijalnog diska i predstavlja radijus na kom se površinski sjaj smanji  $e$  puta), i za koje veoma često rotacione krive uopšte ne ulaze u ravan režim već sporo rastu (Oman et al., 2015).

Vredi podsetiti da se raspodela mase u galaksijama kasnog tipa pored metode razlučenih rotacionih krivih može izvesti i iz integrisanih profila emisionih linija koje se pored HI često zasnivaju na posmatranjima  $H\alpha$  i CO linije. Sa  $H\alpha$  i CO postiže se veća spektralna rezolucija unutar optičkog diska, ali na račun veće prostorne pokrivenosti koju nam obezbeđuje HI. Integrisani profili linija nam obezbeđuju procenu ukupne mase unutar nekog radijusa izofote koji znamo sa većom neodređenošću (Courteau et al., 2014). S druge strane, bolje procene šire raspodele mase galaksije mogu se dobiti iz razlučenih 2D polja brzine (detaljnije u 2.2.3), ali na račun spektralne rezolucije i sa dugačkim ekspozicijama, što značajno ograničava veličinu uzorka.

Jasno je da koristeći ovakvu proceduru ne možemo govoriti sa dovoljnom tačnošću o prisustvu barionske materije u halou na velikim galaktocentričnim udaljenostima. Najdalje tačke u našim merenjima i dalje su mnogo bliže nego što su dimenzije haloa dobijene iz nezavisnih merenja, kakva su npr. korelacione analize Lajman-alfa ( $\text{Ly}\alpha$ ) apsorpcije (Lanzetta et al., 1995; Churchill et al., 2015) ili apsorpcija šest puta jonizovanim kiseonikom OVII (Miller et al., 2016). Problem količine bariona prisutnih u onome što se u novije vreme naziva cirkumgalaktička materija/medijum (eng. *CircumGalactic Medium*, CGM) je veoma aktivno polje tekućih istraživanja, kako u posmatračkoj astronomiji, posebno u rendgenskom domenu, tako i u numeričkim simulacijama (npr. Marra et al., 2021).

## 2.3 Tamna materija

Još od objavljivanja Njutnovog klasičnog dela *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* 1687. godine veliki naponi su uloženi u interpretaciju kretanja astronomskih objekata u okviru teorije gravitacije. Istorijski gledano svako odstupanje posmatranih kretanja nebeskih tela od predviđanja pokazalo se korisnim u smislu produbljiivanja naših znanja o Univerzumu. Kada su posmatrane anomalije u kretanju planeta u Sunčevom sistemu postavilo se pitanje da li one ukazuju na manjkavost zakona gravitacije ili su indikacija postojanja nevidljive, „tamne”, materije. Na primer, Neptun je otkriven kao tamna nedostajuća masa koja utiče na putanju Urana, dok je u slučaju anomalije u kretanju Merkura ovaj pristup bio neuspešan. Nova, kompletnija teorija gravitacije, Ajnštajnova Opšta teorija relativnosti, objasnila je precesiju Merkurovog perihela. Moderan problem tamne materije konceptualno je veoma sličan istorijskim problemima sa dinamikom planeta. Odavde proizlazi najšira definicija tamne materije kao bilo kog oblika gustine energije koji detektujemo samo kroz gravitaciono delovanje.

Ideja o tamnoj materiji na galaktičkim skalama javila se već sa prvim merenjima dinamičke mase naše Galaksije i Andromede (pomenuto u potpoglavlju 2.2.1), a tridesetak godina kasnije naišla je i na šire prihvatanje kroz pomenute radove (Rubin et al., 1962; Roberts and Whitehurst, 1975). Ravne rotacione krive, koje su sada dobro utvrđena pojava u skoro svim tipovima galaksija (Faber and Gallagher, 1979; Rubin et al., 1985; Sofue and Rubin, 2001), utvrdile su sliku o galaksijama kao o nekeplerovskim okruženjima. Međutim, to nije samo po sebi dokaz o postojanju tamne materije. Tek početak radio-posmatranja, i to linije neutralnog vodonika, omogućio je dinamička merenja na velikim galaktocentričnim radijusima i postavljanje čvrste granice na doprinos barionske komponente. Pomenut rad Faberove i Galagera (Faber and Gallagher, 1979) prvi je spojio sve dotadašnje rezultate merenja lokalne gustine materije, disperziju brzina u jatima galaksija (Zwicky, 1933) i ravne rotacione krive u jednu koherentnu hipotezu nedostajuće materije na globalnim galaktičkim i ekstragalaktičkim skalama.

Paralelno sa sistematskim posmatranjima neobične dinamike koja vlada u ga-

laksijama, tokom osamdesetih godina kreću istraživanja o prirodi tamne materije. Osnovna podela po prirodi tamne materije, na barionsku i nebarionsku tamnu materiju, se u najvećoj meri poklapa sa podelom na kompaktne objekte i elementarne čestice - kompaktni objekti se smatraju dobrim kandidatima za barionsku, a elementarne čestice za nebarionsku tamnu materiju.

Barionska tamna materija javlja se u obliku oblaka međuzvezdanog i međugalaktičkog gasa, ostataka zvezdane evolucije, primordijalnih crnih rupa, mikro crnih rupa i još nekih egzotičnih objekata. Prisustvo veće količine materije u okviru pomenutih kategorija podrazumevalo bi drugačije teorijske i empirijske okvire u odnosu na aktuelne. Za veće količine materije skladištene u oblacima međuzvezdanog gasa potrebno je postojanje više objekata koji su neuspešno formirali zvezde, što podrazumeva različitu inicijalnu funkciju mase; veći broj kompaktnih objekata ostataka zvezdane evolucije implicira drugačiju stopu formiranja zvezda u odnosu na posmatranu (videti npr. [Mo et al., 2010](#)), a primordijalne crne rupe formirane pre samih galaksija su u koliziji sa aktuelnim teorijama formiranja galaksija i dovedene su u pitanje skorašnjim posmatranjima ([Niikura et al., 2019](#)). Merenja optičke dubine u halou naše Galaksije ka Magelanovim oblacima i M31 dala su nam gornju granicu za količinu nevidljive komponente materije koja je sadržana u kompaktnim objektima. Nekad se za ovu vrstu objekata koristi zajednički naziv MACHO, skraćeno od masivni astrofizički kompakti objekti iz haloa (eng. *Massive Astrophysical Compact Halo Objects*), što je ujedno i naziv jedne od najpoznatijih pretraga ovakvih objekata.<sup>9</sup> Uprkos nazivu, ovi objekti se ne nalaze samo u haloima, već ih ima i u diskovima i centralnim ovalima spiralnih galaksija. Pretragama kao što su MACHO, EROS<sup>10</sup> i OGLE<sup>11</sup> došlo se do zaključka da ovakva vrsta objekata ne doprinosi značajno masi haloa Galaksije. Većina drugih barionskih kandidata može se isključiti iz spiska kandidata za tamnu materiju: mali objekti kao čestice prašine, komete i asteroidi su većinom sastavljeni od teških elemenata čija je zastupljenost mnogo manja u odnosu na vodonik i helijum. Oblaci neutralnog vodonika na galaktičkim skalama doprinose posmatranoj dinamici (što je i kvantifikovano u okviru ove di-

---

<sup>9</sup><http://wwwmcho.anu.edu.au>.

<sup>10</sup><http://eros.in2p3.fr/>.

<sup>11</sup><http://ogle.astrouw.edu.pl/>.

sertacije), ali kao i jonizovani gas koji se u većim količinama nalazi unutar jata, ne u dovoljnoj meri da bismo objasnili posmatranu dinamiku galaksija. Barionski deo tamne materije su upravo nedostajući barioni koji su od najvećeg interesa za naša istraživanja, i za koje smatramo da se nalaze u oblacima hladnog (uslovno rečeno) gasa u međugalaktičkom prostoru. Zbog svega navedenog pravimo razliku između bariona koji su od primarnog interesa ove disertacije i tamne materije, što je termin koji na dalje koristimo u svom konvencionalnom obliku koji podrazumeva samo nebarionsku materiju.

Uz pretpostavku da posmatranoj većoj gravitaciji galaksija doprinosi neka komponenta materije, a da nije u pitanju neka drugačija gravitacija od Njutn-Ajnštajnovne, dolazimo do postulata nebarionske tamne materije u vidu reliktnih čestica. Neutrino je prva čestica za koju se znalo da ispunjava potrebne zahteve i koja je zato i istorijski gledano prvi kandidat za nebarionsku tamnu materiju. U suštini, bilo koji masivni neutralni fermion koji interaguje slabom silom mogao bi biti kandidat za tamnu materiju (Padmanabhan, 1993). Takva čestica bi bila prisutna u velikim količinama u ranom svemiru. U okviru određenog modela fizike čestica mogla bi se izračunati reliktna koncentracija te čestice danas. Poznavanjem njene mase, dobili bismo i njen doprinos ukupnoj gustini materije u današnjem svemiru. Vodeći kandidat za elementarne čestice koje čine tamnu materiju je stabilna, elektroneutralna, supersimetrična čestica sa masom između 1 GeV i 1 TeV. Ovakva masivna čestica koja interaguje slabom silom (eng. *Weakly Interacting Massive Particle*, u daljem tekstu WIMP) bila bi nerelativistička tokom formiranja strukture na velikim skalama i zbog toga spada u kandidate za hladnu tamnu materiju (eng. *Cold Dark Matter*, CDM) koju su postulirali Pibls (Peebles, 1982), Blumental, Faberova, Primak i Ris (Blumenthal et al., 1984), da pomenemo samo neke. Postoje još dva moguća opsega za masu fermiona koja bi doprinela dovoljno gustini materije, tj. bila od kosmološkog značaja, i čestice sa takvom masom kandidati su za vrelu tamnu materiju HDM (eng. *hot dark matter*) i toplu tamnu materiju WDM (eng. *warm dark matter*).

Simulacije pokazuju da WIMP čestice u okviru  $\Lambda$ CDM teorije formiraju haloe čiji profili ugrubo objašnjavaju posmatrane ravne rotacione krive. Teorijski  $\Lambda$ CDM

okvir podrazumeva hladnu tamnu materiju koja ne interaguje međusobno u Univerzumu gde je gustina energije  $\Omega$  bliska 1 i uključuje i kosmološku konstantu  $\Lambda$ . Ovaj model imao je dosta uspeha i postao je dominantna paradigma poslednjih decenija. Potreba za tamnom materijom danas nadilazi jednostavno nedostajuću masu potrebnu za objašnjenje dinamike galaksija, grupa i jata galaksija. Uspešne numeričke simulacije formiranja struktura danas zahtevaju određene količine tamne materije koja interaguje samo gravitaciono (slaba sila nije od značaja za kosmološke simulacije) i reprodukuju posmatrane fluktuacije u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini (eng. *Cosmic Microwave Background*, nadalje CMB). Tamna materija obezbeđuje dovoljno pojačanje fluktuacija gravitacionog potencijala koje dalje dovode do formiranja struktura na velikim skalama (eng. *large-scale structures*). Iz posmatranja struktura CMB dobijamo da je zakrivljenost svemira bliska 0, tj. da je svemir ravan. Takođe, iz poređenja sa rezultatima dobijenim uz pomoć supernovih (Perlmutter et al., 1999; Riess et al., 1998) dobijamo da je ukupna gustina blizu kritičnoj ( $\Omega \approx 1$ ), pri čemu je gustina materije  $\Omega_m \approx 0.3$  a  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$  (na primer WMAP<sup>12</sup>; Planck<sup>13</sup> kolaboracija). Dalje, fiksiranjem početnih uslova u kosmološkim simulacijama na posmatrane fluktuacije u kosmičkoj mikrotalasnoj pozadini kroz rast struktura proizvode niz slaganja sa posmatranjima. Poznate kosmološke simulacije su na primer *Millennium*<sup>14</sup> i EAGLE (Schaye et al., 2015). Funkcija mase haloa iz ovakvih simulacija odgovara posmatranoj hijerarhiji virijalizovanih sistema, od patuljastih galaksija do jata galaksija (prvenstveno zasnovane na Pres-Šekterovom formalizmu, Press and Schechter, 1974a). Tamna materija nam je potrebna da bismo objasnili posmatranu raspodelu galaksija, Ly $\alpha$  šumu, barionske akustičke oscilacije i druge posmatrane fenomene. Upravo je maseni spektar snage predviđen u  $\Lambda$ CDM konzistentan sa posmatranjima CMB, preko distribucije galaksija, Ly $\alpha$  šume, slabih gravitacionih sočiva, do prisutnosti jata galaksija (Tegmark et al., 2004). Naročito je impresivno slaganje sa studijama jakih i slabih gravitacionih sočiva, jer one testiraju tamnu materiju u galaksijama, kao i grupama i jatima, na nezavisian način. .

Problemi sa standardnim  $\Lambda$ CDM modelom tamne materije dolaze do izražaja na

---

<sup>12</sup><https://map.gsfc.nasa.gov/>.

<sup>13</sup><https://www.cosmos.esa.int/web/planck/planck-collaboration>.

<sup>14</sup><https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>.

malim skalama, u centrima galaksija i delovima gde dominiraju barioni, kojima se i mi ovde bavimo. Poznat je i problem prevelike produkcije patuljastih galaksija u  $\Lambda$ CDM numeričkim simulacijama u odnosu na posmatranja (eng. *missing satellite problem*), koji je donekle ublažen poslednjih godina (na primer [Kim et al., 2018](#)).

Neki od eksperimenta koji su se bavili detekcijom čestica tamne materije su DAMA, CoGeNT, CDMSS, CRESST. DAMA<sup>15</sup> projekat tvrdi da je pronašao signal ([Bernabei et al., 2013](#)) sa velikom preciznošću. CoGeNT<sup>16</sup> i CRESST-II<sup>17</sup> su prijavili registrovanje uzmarka jezgara prilikom elastičnog rasejanja čestica WIMP tamne materije na njima, a koji ne mogu biti pripisani nekom od drugih poznatih uzročnika ili bar ne u potpunosti (videti [Aalseth et al., 2011](#); [Angloher et al., 2012](#)). Za sada eksperimenti nisu nedvosmisleno dokazali da posmatrani signali zaista potiču od WIMP čestica.

Neuspešna detekcija čestica tamne materije poslednjih godina pojačala je potrebu da se razmatraju alternative standardnom CDM modelu. Od alternativnih „ukusa” tamne materije sve veću pažnju dobija sterilni neutrino, WDM čestica koja ne interaguje nijednom silom osim gravitacione. MiniBooNE<sup>18</sup> eksperiment koji pokušava da registruje oscilacije neutrina zabeležio je signal jači od očekivanog, što je naznaka sterilnih neutrina.

Bez obzira na to što nam detekcija tamne materije i dalje izmiče, ona je postala jedan od temelja moderne kosmologije. Razvijena je detaljna teorija koja objašnjava osobine Univerzuma i uključuje kosmološku konstantu  $\Lambda$  i hladnu tamnu materiju koja ne interaguje sudarima. Ovaj model poznat je kao  $\Lambda$ CDM (prva razmatranja u [Silk and Vittorio, 1987](#); [Efstathiou et al., 1990](#)). Eksperimenti na velikim skalama kao što su WMAP ili *Planck* pokazali su izuzetno slaganje sa  $\Lambda$ CDM modelom, ali na skalama gde dominiraju barioni i dalje ostaju problemi. Ova disertacija kroz detaljno razmatranje dinamike galaksija u oblastima gde dominiraju barioni može implicitno da utvrdi granične okvire za primenu modela tamne materije, ali to nam nije primarna motivacija. Pregled THINGS je dizajniran sa rezolucijom ispod 1 kpc

<sup>15</sup><http://people.roma2.infn.it/~dama>.

<sup>16</sup><http://cogent.pnnl.gov>.

<sup>17</sup><http://cresst.de>.

<sup>18</sup><https://www-boone.fnal.gov/>.

da bi rasvetlila debatu koju u slobodnom prevodu možemo nazvati „jezgro ili nagib”, što je i predmet rada de Bloka i saradnika (de Blok et al., 2008). Problem „jezgro ili nagib” (eng. *core vs. cusp*) odnosi se na centralne delove galaksija gde je moguće prisustvo jezgra konstantne gustine, ili strm rast gustine u centru. Ovo je ujedno i razlika između dva najrasprostranjenija modela za sferni potencijal haloa tamne materije - pseudo-izotermalnog (Jimenez et al., 2003) i NFW (Navarro et al., 1997). Rezultati kosmoloških simulacija sugerišu da je profil gustine haloa tamne materije univerzalan, i ne zavisi od mase haloa. Ovakav profil gustine ima karakterističan nagib ili „špic” tj. strm rast u centru opisan stepenim zakonom  $\rho \sim r^\alpha$ , sa  $\alpha \lesssim -1$  (Navarro et al., 1997).<sup>19</sup> S druge strane, posmatranja se bolje slažu sa profilom koji ima jezgro tipičnih dimenzija reda kpc,  $\alpha \simeq 0$  (de Blok et al., 2008, i drugi). Mi se nismo detaljnije bavili profilom tamne materije, već smo izabrali ISO i NFW profile kao dva klasična rešenja koja predstavljaju dve krajnosti „raspodele” modela i obezbeđuju najviše mogućnosti za poređenje sa literaturom (uključujući i de Blok et al., 2008).

U okviru ove disertacije ograničili smo se na korišćenje modela tamne materije, što nije nužno naš komentar na stanje stvari u ovoj grani posmatračke i teorijske astronomije i kosmologije. Osim postojanja neopservabilne mase u samim galaksijama i/ili u intergalaktičkom prostoru jata postoje još dve mogućnosti za objašnjenje posmatrane dinamike. Prva je da sistemima dominira kinetička energija, usled čega su u stanju raspadanja i to veoma brzog, a druga je mogućnost redefinisavanja Njutnovne gravitacije, tj. opadanja gravitacione sile sa kvadratom rastojanja. Za prvu opciju nemamo nikakvog razloga da verujemo da je tačna samim tim što smo u prilici da posmatramo sisteme koji se nisu raspali, i ne razmatra se više ozbiljnije u literaturi. Druga opcija je modifikovanje teorije gravitacije, u prošlosti veoma plodno u smislu produkovanja novih teorijskih formalizama, ali ne i kao ozbiljna alternativa tamnoj materiji u posmatračkoj kosmologiji. Naime, većina autora se slaže da najpopularnija ovakva alternativna teorija, MOND (*Modified Newtonian Dynamics*, Milgrom, 1983), uprkos velikom uspehu u opisivanju rotacionih krivih i relacija

---

<sup>19</sup>Svi stepeni profili ove vrste su problematični po definiciji zbog singulariteta. U prirodi ne očekujemo singularitete, tako da je samo pitanje gde odgovarajuća funkcija prestaje da važi.



skaliranja, takođe zahteva uvođenje značajnih količina tamne materije da bi objasnila dinamiku (nekih) galaktičkih jata i naročito treći pik u anizotropijama CMB-a (npr. [Dodelson, 2011](#)). Poslednjih godina ponovo je oživela debata oko MOND-a, podstaknuta radovima Mekgoa ([McGaugh, 2012](#)), Lelija ([Lelli et al., 2016](#)) i drugih, kao i neuspehom u detektovanju čestica tamne materije. U okviru ove disertacije nismo koristili dinamičko modelovanje koje uključuje MOND, iako smo MOND hipotezu testirali na THINGS podacima za galaksiju NGC 2841<sup>20</sup> ([Samurović et al., 2015](#)). Rezultate ne predstavljamo ovde zbog konzistentnosti obrade celog uzorka.

## 2.4 Barionska funkcija mase, ciljevi i hipoteze

Predmet ove disertacije je precizno određivanje barionske funkcije mase (dalje BFM) za reprezentativni uzorak bliskih galaksija, gde barionska funkcija mase galaksija predstavlja raspodelu galaksija po masama, analogno funkcijama mase za zvezde, asteroide, itd. Doprinosi dominantnih oblika vidljive barionske materije obuhvaćeni su ovom analizom (kao i njihove funkcije raspodele), a to su zvezdana komponenta i atomski gas. Ukupna BFM se dobija sabiranjem ovih doprinosa za galaksije iz zadatog raspona galaktičkih masa. Iz BFM integraljenjem dobijamo ukupnu količinu bariona, za koju je poznato da značajno odstupa, tj. manja je, od predviđanja koje daje teorija za količinu barionske materije stvorene tokom Velikog praska. Teorija primordijalne nukleosinteze (*Big Bang Nucleosynthesis*, BBN; [Alpher et al., 1948](#)) daje nam vrednost od  $0.016 < \Omega_b h^2 < 0.024$  ([Peebles, 1993](#)) za količinu nastale barionske materije. Poređenje sa dinamičkom masom (masom haloa iz direktnih merenja, kao i sa funkcijom mase haloa iz numeričkih simulacija u kontekstu dominantne  $\Lambda$ CDM paradigme, te pojedinim indirektnim merenjima zasnovanim na uopštavanju lokalno posmatrane dinamike) nam govori o tome kolika je barionska

---

<sup>20</sup>U okviru [Samurović et al. \(2015\)](#) zaključili smo da bar jedan MOND model (standardni) može da fituje posmatranu rotacionu krivu galaksije NGC 2841 za razliku od galaksije ranog tipa slične virijalne mase koja se ne može fitovati bez dodatne tamne materije ([Samurović, 2014](#)). Zaključuje se da, iako postoji neka vrednost mase iznad koje je MOND neuspešan, ona nije ista za spiralne galaksije. Vrednost  $M/L$  iz ovog MOND modela je u okviru neodređenosti vrednosti dobijene iz SPS modela sa Kroupinom inicijalnom funkcijom mase. Dalje, fitovi sa Njutnovskim modelima (ISO i NFW) bili su boljeg kvaliteta od MOND modela, koji naročito značajnije odstupa od posmatrane rotacione krive u unutrašnjim delovima,  $R < 10$  kpc.

frakcija, i moguće je utvrditi kako ona zavisi od ukupne mase haloa.

Danas znamo da u jatima galaksija imamo dve „vidljive” komponente, galaksije koje se sastoje od zvezda koje zrače u vidljivom području i gasa koji je zagrejan (prilikom pada u ogromnu gravitacionu potencijalnu jamu) i zrači u X-području. U jatima galaksija gas ima veći udeo u ukupnoj barionskoj materiji, ali ta vrednost prilično varira. Podaci dobijeni sa CHANDRA<sup>21</sup>, NEWTON<sup>22</sup> i HST<sup>23</sup> misija ukazuju da je masa međugalaktičkog medijuma (eng. *InterGalactic Medium*, IGM) od jedan do deset puta veća od mase zvezdane komponente u jatima (Lin et al., 2012; David et al., 1990). Jedan od razloga je što su jata međusobno veoma različiti objekti, prvenstveno po masi. Odnos vidljive zvezdane materije i vrelog gasa u jatima se jako dobro slaže sa ograničenjima koja nam daje nukleosinteza (odnos luminozne materije prema ukupnoj količini bariona). Većina galaksija se ipak ne nalazi u jatima pa pretpostavljamo da su u međugalaktičkom prostoru prisutne značajne količine hladnog gasa, tj. onog koji se nije zagrejao i koji ne vidimo kroz zračenje. Pojam „hladnog” gasa ovde se koristi uslovno - ova faza se nalazi na temperaturi od nekoliko puta  $10^4$  K: međugalaktički gas je hladan u poredjenju sa koronalnim gasom, ali ne i u poredjenju sa većinom galaktičkog ISMa. Pored ovog postoji i zaista hladni molekularni gas na periferiji diska, što je nekada bila popularna ideja za nedostajuću tamnu materiju.

I pored ovih procena za količinu prisutnog gasa, posmatranja nam daju da prisutna masa vrelog gasa i materije ne može da objasni gravitaciono privlačenje koje vidimo. Potrebno je oko deset puta više materije (Liddle, 2003). Potrebno je naglasiti da ako ove efekte pripišemo tamnoj materiji i dalje se ne približavamo granici za kritičnu gustinu svemira.

Jedna od hipoteza koja se razmatra u ovom radu jeste tvrdnja da naša Galaksija, Mlečni put, predstavlja tipičnu veliku spiralnu galaksiju u terminima masa komponentata i položaja na globalnoj BFM. Ova hipoteza se koristi kao, uglavnom vrlo prećutna i neeksplicirana, pretpostavka u čitavom nizu studija iz područja kako vangalaktičke astronomije, tako i galaktičke dinamike, hemijske evolucije, astrohe-

---

<sup>21</sup><http://chandra.harvard.edu/>.

<sup>22</sup><http://xmm.esac.esa.int/>.

<sup>23</sup><http://asd.gsfc.nasa.gov/archive/hubble/>.

mije i astrobiologije. „Tipičnost” ili „prosečnost” naše Galaksije je ključna za čitav niz zaključaka koji se često ne mogu čak ni formulirati bez korišćenja pojmova koji su definisani na osnovu lokalnih posmatranja i analiza. Po analogiji sa mestom Sunčevog sistema unutar velikog skupa novootkrivenih ekstrasolarnih planetskih sistema, ovo pitanje ima veliki praktični značaj u osmišljavanju budućih i posmatračkih i teorijskih istraživanja (npr. [Stojković et al., 2019](#)).

Posmatrački nalazi u prilog ove hipoteze su, međutim, krajnje oskudni. Ako išta, neke od retkih studija ukazuju da je Mlečni put netipično „mirna” galaksija sa niskom i prilično uniformnom stopom formiranja zvezda, bar u docnijim epohama svoje istorije ([Hammer et al., 2007](#)). U svakom slučaju ovo je pitanje veoma otvoreno, a svaka studija koja se zasniva na detaljnijoj analizi uzorka galaksija sa diskom u sadašnjoj epohi može pružiti korisne naznake u ovom smislu.

Ciljevi ove disertacije su, da sumiramo:

- da samostalno izvedemo rotacione krive za THINGS uzorak i time potvrdimo prethodne rezultate iz literature. Za dve galaksije iz uzorka, NGC 2366 i IC 2574, koristimo samostalno izveden metod za konstrukciju polja brzina. Za galaksiju NGC 3351 ovde je izvedena rotaciona kriva iz posmatranja HI koja originalno nije izvedena iz THINGS podataka u [de Blok et al. \(2008\)](#).
- da nađemo odgovarajuće dinamičke modele koji uspešno opisuju izvedene rotacione krive. Dinamičko modelovanje je trenutno najdetaljniji dostupan alat za merenje mase pojedinačnih komponenti galaksija, i koristeći ga odredićemo dinamičku masu galaksija i masu pojedinačnih komponenti. Određivanje mase astrofizičkih objekata, naročito na galaktičkim i većim skalama, jedan je od klasičnih astronomskih izazova.
- da izmerimo BFM i ostale funkcije raspodele iz detaljnih dinamičkih modela. To je još uvek moguće za jako male uzorke, i zbog dostupnosti takvih podataka i zbog same procedure modelovanja. Nije nam poznato da je u literaturi zabeleženo konstruisanje BFM (i ostalih raspodele) iz detaljnih dinamičkih modela. Iako je očigledan uzrok tome ograničenost veličine uzorka, smatramo da je korisno istražiti BFM koja karakteriše našu neposrednu okolinu.

- određivanjem funkcija raspodele za neposrednu okolinu Mlečnog puta ( $z = 0$ ,  $D < 15$  Mpc) omogućilo bi poređenje sa funkcijama mase iz literature što otvara prostor za procenu reprezentativnosti naše bliske okoline.
- pokazaćemo da konstrukcija BFM zavisi od izabranog modela tamne materije i u određenoj meri od izbora između slobodnog ili fiksiranog odnosa masa-sjaj ali ne presudno, tj. da barionsku masu možemo znati sa određenom preciznošću do poslednjeg posmatranog radijusa koristeći bilo koji od prezentovanih teorijski ili empirijski zasnovanih modela.
- posebno ćemo se osvrnuti na raspodelu  $M/L$  u infracrvenom filteru na 3.6 mikrona, kao i na određivanje srednjeg  $M/L^{3.6}$  koji bi se mogao koristiti kao adekvatna globalna vrednost tog parametra ubuduće. U tom kontekstu diskutovaćemo koja IMF i evolucionni (SPS) modeli najbolje reprodukuju prihvaćeni  $M/L^{3.6}$ .
- možemo proceniti mase pojedinačnih komponenti Mlečnog puta, kao i njegovu ukupnu dinamičku masu, i time odrediti mesto Galaksije unutar lokalnih funkcija raspodele. Time bismo zaključili koliko je naša Galaksija tipična unutar svoje neposredne okoline.

# Poglavlje 3

## Posmatrački podaci i metode

Sva posmatranja korišćena u ovoj doktorskoj disertaciji preuzeta su iz javno dostupnih izvora podataka i odgovarajuće su citirana. Samostalno smo iz posmatranja izmerili ili izračunali parametre koje koriste naši modeli gde god je to bilo moguće, a u cilju dobijanja najpouzdanijih i najaktuelnijih vrednosti zasnovanih na savremenim posmatračkim i teorijskim principima.

Jedan od glavnih alata u saznavanju o stanju i procesima u međuzvezdanoj materiji je atomski vodonik i njegovo zračenje na talasnoj dužini od 21 cm (približno 1.4 GHz) u radio delu elektromagnetnog spektra, što je detaljnije opisano u Poglavlju 2. Nakon ere teleskopa sa jednom antenom kada su se posmatranja fokusirala na našu galaksiju Mlečni put, i merenja globalnih veličina koje opisuju obližnje galaksije (ukupnu masu HI), ekspanzija istraživanja se desila sa generacijom radio-interferometara koji su doneli značajno povećanje razdvojne moći i osetljivosti, a time i mogućnost posmatranja drugih galaksija i njihovih partikularnih delova. Zbog malog svojstvenog površinskog sjaja emisije HI potrebna je velika površina prijemnika, naročito za željene rezolucije ispod lučnog minuta, što za bliske galaksije znači dužinske skale reda kiloparseka.

Za naš rad bitna su merenja kinematike HI i procena promene u rotaciji gasa sa galaktrocentričnim radijusom. Sa svakom novom generacijom interferometara spoljašnje galaksije i rotacija gasa u njima (a odatle i masa) su opisivane sa sve većom rezolucijom i osetljivošću, od [Bosma \(1981a,b\)](#), preko [Begeman \(1987\)](#), pa do najnovijih [Lelli et al. \(2016\)](#); [Koribalski et al. \(2018\)](#), da pomenemo samo nekoliko

njih.

U ovoj disertaciji korišćena su posmatranja iz pregleda *The HI Nearby Galaxy Survey*, THINGS, urađene sa teleskopom VLA (*Very Large Array*), koji je deo NRAO<sup>1</sup> (*National Radio Astronomy Observatory*).



Slika 3.1: THINGS uzorak; izvor <https://www2.mpa-hd.mpg.de/THINGS/Sample.html>

Pregled THINGS, iz kog su podaci objavljeni 2008. godine, bio je pregled sa do tada najvećom prostornom rezolucijom, na granici mogućnosti za VLA teleskop, kao i najvećom senzitivnošću i homogenošću podataka. Za ovakvu vrstu pregleda posmatran je značajan broj objekata, 34 galaksije sa velikom varijabilnošću morfologije iz Hablove klasifikacije, i velikog opsega vrednosti za stopu formiranja zvezda, apsolutne luminoznosti i metaličnosti. Smatramo da je taj pregled i danas konkurentan, jer daje uzorak bez presedana sa jedinstvenom kombinacijom rezolucije i senzitivnosti, i time omogućava posmatranje gasa i njegove rotacije do najvećih galaktocentričnih radijusa, kao i detaljnu dekompoziciju na različite doprinose masi. Većina

<sup>1</sup><https://public.nrao.edu/telescopes/vla/>.

THINGS uzorka izdvojena je iz *Spitzer Infrared Nearby Galaxy Survey*, (SINGS, Kennicutt et al., 2003), pregleda koji je posmatrao galaksije na različitim infracrvenim talasnim dužinama i čije rezultate i snimke koristimo u Poglavlju 3.2.

Druge veće pretrage zasnovane na liniji HI su pretrage WHISP<sup>2</sup> (Swaters et al., 2002), HALOGAS (Heald et al., 2011) i LVHIS<sup>3</sup> (Koribalski et al., 2018), da pomenemo samo neke.

### 3.1 Uzorak

Izbor objekata u pregledu THINGS (Walter et al., 2008) je, kao što smo pomenuli, većinom baziran na SINGS pregledu zarad dostupnosti posmatranja na raznim talasnim dužinama. Nekoliko galaksija nije iz SINGS pregleda ali su takođe posmatrane sa svemirskim teleskopom *Spicer*<sup>4</sup> (*Spitzer Space Telescope*) kao garantovane ključne mete. Galaksije su izabrane tako da pokrivaju veliki raspon fizičkih karakteristika, morfoloških tipova, metaličnosti, magnituda i veličine. Uzorak je naravno izabran i vodeći računa o prisustvu neutralnog vodonika (eng. *HI-selected*) tako da galaksije ranog tipa (E/S0) nisu zastupljene zahvaljujući malim količinama gasa u ovoj fazi.

Prilikom izbora uzorka kritična veličina je inklinacija i veliki deo uzorka bio je nepogodan za dobijanje rotacionih krivih, tj. adekvatne mape brzina zbog svoje inklinacije. Galaksije koje vidimo pod uglom od  $90^\circ$  su isključene zbog projekcionih efekata (detaljnije u 3.3.2). U analizi de Blok et al. (2008) koriste se inklinacije iz raspona:  $40^\circ < i < 70^\circ$ . U našem radu koristili smo manje konzervativnu donju granicu za upotrebljivu inklinaciju od 30 stepeni. Naročito treba pomenuti da se ovde radi o inklinaciji gasnog diska, koja može u nekim slučajevima biti različita od istog parametra za zvezdani disk. Radi poređenja tri različite globalne inklinacije date su u tabeli 3.3: inklinacija gasnog diska određena u našem radu, isti parametar iz de Blok et al. (2008) i inklinacija zvezdanog diska iz baze *HyperLeda*.<sup>5</sup> Pomeranje granice za inklinaciju nije mnogo proširilo naš uzorak u odnosu na de Blok et al.

<sup>2</sup><https://www.astro.rug.nl/~whisp/>.

<sup>3</sup><https://www.atnf.csiro.au/research/LVHIS/>.

<sup>4</sup><https://www.jpl.nasa.gov/missions/spitzer-space-telescope>.

<sup>5</sup><http://leda.univ-lyon1.fr>.

(2008) jer su galaksije sa  $30^\circ < i < 40^\circ$  većinom bile isključene iz analize na osnovu drugih kriterijuma. Iako ovaj uslov ispunjava čak 9 galaksija, za većinu njih nije bilo moguće dobiti pouzdane rotacione krive. Jak uticaj interakcija, značajno prisustvo necirkularnih kretanja ili rotaciono kretanje koje nije dominantno neki su od uzroka.

THINGS pregled je eliminisao sve galaksije koje se nalaze na razdaljini većoj od 15 Mpc, jer je cilj pregleda bio postići prostorne rezolucije manje od 1 kpc. Ova rezolucija potrebna je za razlučivanje između različitih modela tamne materije, oličeno u već pomenutoj „jezgro ili nagib” debati.

U ovoj disertaciji rotacione krive izvedene su za 20 galaksija, a maseni modeli različitog kvaliteta dobijeni su za svih 20 objekata iz našeg poduzorka. Ovo predstavlja poboljšanje u odnosu na rad [de Blok et al. \(2008\)](#) gde je za 34 galaksije iz uzorka njih 19 imalo izvedene rotacione krive, a 16 i modele mase. Osnovni parametri koji opisuju naš uzorak predstavljeni su u tabelama [3.1](#) i [3.4](#).

U svim izračunavanjima daljina do galaksija fiksirana je na vrednost zasnovanu na najnovijim merenjima koja su data u EDD<sup>6</sup> bazi (*Extragalactic Distance Database*), i to iz *Cosmicflow-3* kalkulatora ([Shaya et al., 2017](#)), u velikoj većini slučajeva. *Cosmicflow-3* vrednost daljine koriguje za zajedničko kretanje Lokalne grupe ka galaktičkom jatu Virgo. U slučaju galaksije DDO 154 nije bila raspoloživa *Cosmicflow-3* vrednost pa je korišćena TRGB<sup>7</sup> daljina takođe dostupna u okviru EDD baze. Za galaksiju NGC 6946 korišćena je daljina koja je određena sličnom tehnikom kao i u *Cosmicflow-3* korigujući za lokalna kretanja malih galaksija satelita u odnosu na velike lokalne galaksije ([Karachentsev et al., 2014](#)). Korišćene daljine date su u tabeli [3.1](#).

Radio-centar galaksije može odstupati od infracrvenog i kinematičkog centra galaksije, a naročito od optičkog centra koji se obično navodi u bazama podataka i literaturi. U najvećem broju slučajeva za određivanje centra oslanjali smo se na rad [Trachternach et al. \(2008\)](#), gde je kroz detaljnu proceduru uporedno određen centar galaksija iz istog uzorka i to iz fotometrije na  $3.6 \mu\text{m}$ , radio-posmatranja i

<sup>6</sup>Dostupna na <http://edd.ifa.hawaii.edu/dfirst.php>.

<sup>7</sup>TRGB daljina dobija se koristeći populaciju zvezda u fazi koja odgovara vrhu grane crvenih džinova na HR dijagramu (eng. *Tip of the Red Giant Branch*) kao standardne sveće ([Jacobs et al., 2009](#)).



kinematički, koristeći paket `rotcur`, koji je deo GIPSY okruženja. Ovako određen centar je relevantan i za analizu kojom se mi bavimo. Zarad provere izvodili smo i svoj najbolji kinematički centar iz procedure `rotcur`, ali smo u svim dostupnim slučajevima koristili vrednost [Trachternach et al. \(2008\)](#) kao pouzdaniju (videti detalje [3.3.2](#)). U velikoj većini slučajeva naša analiza dala je koordinate centra  $(x, y)$  bliske najboljem centru iz [Trachternach et al. \(2008\)](#). Za galaksiju NGC 3351 korišćen je kinematički određen položaj centra dobijen sa rutinom `rotcur` u okviru ove disertacije. Koordinate centra koje smo koristili za finalno izvođenje rotacionih krivih softverom GIPSY i rutinom `rotcur` date su u tabeli [3.1](#).

Tabela 3.1: Osnovni parametri koji opisuju galaksije iz korišćenog uzorka: tip - morfološka klasifikacija iz baze *HyperLeda*;  $D$  - daljina u megaparsecima iz EDD baze- korišćena je *Cosmicflow-3* vrednost osim kod dva objekata označena sa „TRGB” i „K” (detalji u tekstu); centar - koordinate centra koje su usvojene za izvođenje rotacione krive GIPSY i rutinom `rotcur` (dobijene za radio ili 3.6  $\mu\text{m}$  snimke u [Trachternach et al., 2008](#)). Sa \* označene su koordinate centra koje su dobijene iz kinematičke analize. Za detalje izvođenja videti potpoglavlje [3.3.2](#).

ID galaksije	tip	$D$ [Mpc]	centar	
			$\alpha_{2000}$ [h m s]	$\delta_{2000}$ [° ' "]
NGC 925	Scd	$8.67 \pm 0.14$	02 27 16.5	33 34 43.5
NGC 2366	IB	$3.34 \pm 0.12$	07 28 53.9	69 12 37.4
NGC 2403	SABc	$3.18 \pm 0.12$	07 36 51.1	65 36 02.9
NGC 2841	SBb	$14.59 \pm 0.07$	09 22 02.7	50 58 35.4
NGC 2903	Sbc	$9.33 \pm 0.17$	09 32 10.1	21 30 04.3
NGC 2976	Sc	$3.63 \pm 0.08$	09 47 15.3	67 55 00.0
NGC 3031	Sab	$3.61 \pm 0.12$	09 55 33.1	69 03 54.7
NGC 3198	Sc	$13.24 \pm 0.18$	10 19 55.0	45 32 58.9
IC 2574	SABm	$3.89 \pm 0.08$	10 28 27.5	68 24 58.7
NGC 3351	Sb	$10.57 \pm 0.12$	10 43 57.8 *	11 42 12.3 *
NGC 3521	SABb	$13.24 \pm 0.20$	11 05 48.6	-00 02 09.2
NGC 3621	SBcd	$6.70 \pm 0.12$	11 18 16.5	-32 48 50.9
NGC 3627	Sb	$8.99 \pm 0.14$	11 20 15.0	12 59 29.6
NGC 4736	SABa	$4.59 \pm 0.16$	12 50 53.0	41 07 13.2
DDO 154	I	$4.04^{\text{TRGB}} \pm 0.20$	12 54 05.9	27 09 09.9
NGC 4826	SABa	$5.30 \pm 0.16$	12 56 43.6	21 41 00.3
NGC 5055	Sbc	$8.99 \pm 0.45$	13 15 49.2	42 01 45.3
NGC 6946	SABc	$5.89^{\text{K}} \pm 0.08$	20 34 52.2	60 09 14.4
NGC 7331	Sbc	$14.06 \pm 0.16$	22 37 04.1	34 24 56.5
NGC 7793	Scd	$3.60 \pm 0.14$	23 57 49.7	-32 35 27.9

## 3.2 Fotometrijska posmatranja

Za analizu zvezdane komponente i dalju procenu dinamičke mase koristili smo slike snimljene svemirskim teleskopom *Spicer*, i to na talasnoj dužini od  $3.6 \mu\text{m}$ . Posmatranja za veći deo uzorka (14 galaksija) vršena su u okviru pregleda *Survey of Stellar Structure in Galaxies*, S4G<sup>8</sup> (Sheth et al., 2010), dok je za manji deo uzorka (6 galaksija) fotometrija dobijena iz *Spitzer Heritage Archive*, SHA<sup>9</sup> baze. S4G pregled podrazumevao je duboko snimanje (sa dugom ekspozicijom) obližnjih galaksija i to u bliskom i srednjem infracrvenom delu spektra (eng. *Mid-Infrared*, MIR). Infracrveni filteri posebno odgovaraju potrebama našeg rada jer umnogome izbegavaju unutrašnju i spoljašnju ekstinkciju koja potiče od prašine. Kao što smo pomenuli, unutrašnja ekstinkcija može biti potpuno zanemarena na srednjim infracrvenim talasima (Draine and Lee, 1984), a ekstinkcija u Mlečnom putu, koja je inače niska, korigovana je u okviru S4G. Zračenje u bliskoj i srednjoj infracrvenoj oblasti dobro oslikava prisutnu populaciju starih zvezda, i relativno je oslobođeno uticaja skorašnjih epizoda formiranja zvezda (zašto nije u potpunosti videti u potpoglavlju 2.1.1 i tamo navedenim referencama). Odnos masa-sjaj u NIR posmatranjima instrumenta iz orbite kao što je *Spicer*, manje varira nego isti odnos u posmatranjima koja se vrše sa površine Zemlje, i u NIR i u vidljivom delu spektra (videti npr. Meidt et al., 2014). Konkretno, upravo snimci koje koristimo, sa teleskopa *Spicer* na  $3.6 \mu\text{m}$ , smatraju se jednim od najboljih pokazatelja zvezdane mase (Pahre et al., 2004).

Sa snimaka na  $3.6 \mu\text{m}$  za galaksije iz našeg uzorka određen je površinski sjaj unutar određene aperture, a zatim je ovakav sjaj modelovan. Za modelovanje sjaja korišćene su funkcije (jedna ili zbir) poznate iz literature za opis zvezdanih komponenti galaksija koje imaju prisutne diskolike strukture, kao što su eksponencijalni disk i centralni oval. Iz modelovanog sjaja je zatim procenjena površinska gustina mase, a zatim iz nje i doprinos dinamičkoj masi i rotaciji galaksije koji potiče od zvezdane komponente, ili više njih. Taj doprinos se prilikom procedure fitovanja posmatrane rotacije gasa skalira sa parametrom  $M/L$ , čije je preciznije određivanje

<sup>8</sup>Dostupna na: <https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/S4G/>.

<sup>9</sup><https://sha.ipac.caltech.edu/applications/Spitzer/SHA/>.

jedan od glavnih fokusa ove disertacije.

Da bismo iz slike nekog rasprostrtog astronomskog objekta (koji zauzima veći prostorni ugao) relativno niskog sjaja, kao što su galaksije, dobili „pravu” raspodelu površinskog sjaja potrebno je ove snimke obraditi kroz niz koraka po dobro utvrđenoj proceduri. Skica ove procedure sledi. Prvi korak je dobijanje mozaičnih slika kombinovanjem više snimaka čije se vidno polje bar delimično preklapa. Rezultujuća slika ima veće vidno polje, veći odnos signal-šum ( $S/N$ ) i uniformnu veličinu piksela (eng. *pixel scale*). Ovu mozaičnu sliku u daljem opisu nazivamo prosto **slikom galaksije**. Za dalju obradu potrebno je iz pratećih snimaka sa neodređenostima kombinovanjem dobiti matricu koja u svakom pikselu sadrži neodređenost posmatranja mozaika baš u toj tački (istih dimenzija kao i snimak galaksije). Takvu sliku nazivamo **sigma-slika**. Dalje, da bismo koristili snimak galaksije potrebno je napraviti odgovarajuću masku loših piksela. Maska treba da obuhvati sve piksele gde je prisutan signal koji ne potiče od galaksije, bilo od objekata koji su između nas i galaksije, bilo od onih koji su iza galaksije. Takođe potrebno je maskirati i raznorodne defekte samog snimka. Ovakva maska obuhvata i označava sve piksele koje ne treba uključiti u dalju analizu, najčešće ih označavajući nekim celim brojem. Za svaku astronomsku obradu još je potrebno imati i tzv. PSF sliku (eng. *Point Spread Function*), koja opisuje konvoluciju astronomskih instrumenata sa posmatranim tačkastim objektom na nebu, i njen glavni parametar je poluširina Gausovog profila sjaja posmatranog tačkastog objekta. Od neophodnih procedura kod objekata niskog sjaja posebno je važno dobro oduzeti sjaj neba. Rezultat merenja sjaja na više mesta na snimku koji su dovoljno udaljeni od galaksije se usrednjava i dobija se konstantna vrednost koja se oduzima od datog snimka na kome želimo da merimo površinski sjaj objekta. Često postoji dodatni snimak koji se uzima u istom trenutku i sa istim podešavanjima sa koga određujemo sjaj neba. Za naš uzorak urađeno je i fitovanje sjaja eliptičnim profilima, izofotama, odakle se dobija raspodela sjaja po radijusima elipsi, kao i globalni parametri kao što su: centar  $(x, y)$ , pozicioni ugao i inklinacija (u ovom slučaju zvezdanog diska).

Kao što smo već pomenuli naš uzorak se što se tiče fotometrije deli na dva poduzorka. Veći deo uzorka od 14 galaksija bio je deo S4G pregleda koji je podrazumevao

i implementiranje softverskih kanala obrade, tzv. *pipelines* za automatsku analizu slika, dok smo za manji deo uzorka (6 galaksija) samostalno uradili odgovarajuću obradu.

**Poduzorak iz S4G** Procesuiranjem kroz softverski kanal obrade *Pipeline 1* (dalje P1) od originalnih snimaka dobijenih u pregledu S4G nastali su mozaični snimci koje smo i mi koristili u ovom radu. Korišćeni su i proizvodi kanala *Pipeline 2, 3 i 4* (dalje P2, P3 i P4), koji uključuju prateće snimke potrebne za dalju analizu, ali i parametre dobijene kao rezultat obrade softverskim kanalima. Maske loših piksela napravljene su u okviru P2 (Muñoz-Mateos et al., 2015), a u okviru P4<sup>10</sup> (Salo et al., 2015) su i ručno popravljene. Odgovarajuće sigma-slike i PSF su takođe bile raspoložive kao deo P4. Veličina piksela kod svih objekata iz ovog pregleda nakon obrade je 0.75 arcsec/px. Podaci iz P3 korišćeni su za ovaj deo uzorka prvenstveno ilustrativno. Naime, P3 sadrži rezultat korišćenja astronomskog softvera IRAF i njegovog paketa *ellipse* na posmatranoj raspodeli površinskog sjaja. Izlaz iz *ellipse* rutine su parametri koji opisuju eliptične izofote na odgovarajućim radijusima (pozicija centra, pozicioni ugao i eliptičnost  $\epsilon$ ), koje smo koristili samo kao kontrolne ili eventualno kao ulazne za program GALFIT (verzija 3, Peng et al., 2010, detaljnije u potpoglavlju 3.2.1). Raspodela sjaja po odgovarajućim radijusima iz *ellipse* (usrednjeni površinski sjaj izofote na odedenom radijusu) je pak svuda korišćena za ilustrativno poređenje sa modelima sjaja koje smo dobili koristeći program GALFIT (grafikoni 3.3 - 3.24), koji je naš glavni alat kojim fitujemo i opisujemo površinski sjaj posmatranih galaksija. Korišćeni su obrađeni snimci galaksija dostupni kroz P4. *Pipeline 5* (dalje P5) sadrži slike koje mapiraju zračenje prašine (Querejeta et al., 2015) i njegovo korišćenje bi bio još bolji izbor (za deo uzorka gde je prisutna prašina), koji ostaje kao predmet budućeg rada.

**Poduzorak iz SHA** Šest galaksija iz našeg uzorka (NGC 925, NGC 2366, NGC 2403, NGC 3621, NGC 6946 i NGC 7331) nisu deo pregleda S4G, i nemaju dostupne slike i podatke u P1-P4 kao one koje pripadaju S4G delu uzorka. Navedeni objekti su ipak posmatrani *Spitzer* teleskopom i deo su *Spitzer Heritage Archive*, SHA. Izabrali

<sup>10</sup>Dostupno na [http://www.oulu.fi/astronomy/S4G\\_PIPELINE4/MAIN](http://www.oulu.fi/astronomy/S4G_PIPELINE4/MAIN).

smo odgovarajuće mozaične slike koje su već iskombinovane (koristeći algoritam za kombinovanje) od originalnih snimaka, i to *Level 2* mozaike. Prilikom izbora vodili smo računa o dovoljno širokom posmatranom polju snimka iz kog bi bilo moguće adekvatno proceniti sjaj neba. U nekim slučajevima postoje dva snimka, i snimak objekta i obližnjeg neba, i takvi su birani kao posebno povoljni zato što omogućavaju preciznu procenu pozadine koja je ključna u modelovanju spoljnih delova galaksije. Naime, pozadina merena u blizini galaksije kontaminirana je sjajem same galaksije i njena vrednost je procenjena, što dovodi do potcenjivanja površinskog sjaja galaksije na većim galaktocentričnim udaljenostima. U okviru *Level 2* proizvoda dostupne su i mape neodređenosti koje se jednostavnim korekcijama prevode u potrebne sigma-slike. Korisno je napomenuti da je kod ovih snimaka veličina piksela bila 0.6 arcsec/px.

Dalja obrada podrazumevala je oduzimanje pozadine koristeći softver IRAF. Zatim smo „ručno” (koristeći IRAF-ovu proceduru `objmask`) pokušali da napravimo maske loših piksela i objekata za koje procenjujemo da ne pripadaju galaksiji, i u najvećem broju slučajeva smo morali da iterativno dođemo do finalnih maski koje koristimo. Uz pomoć IRAF-ove `ellipse` procedure i podataka iz literature dobili smo prve procene za globalne parametre koji opisuju galaksiju, kao što su centar, pozicioni ugao, eliptičnost i centralni površinski sjaj  $\mu_0$ . Koristeći ove preliminarne procene, prvi put bismo pustili GALFIT na ovim snimcima u cilju dobijanja preliminarnog modela, a samim time i mape reziduala (ostatak na snimku nakon oduzimanja modelovanog sjaja galaksije, videti sliku 3.2 za primer komponenti GALFIT fita). Sa ove mape reziduala je lakše i bolje maskirati objekte za koje pretpostavljamo da ne pripadaju galaksiji. Masku sa mape reziduala sabiramo sa prethodnim maskama.

Procedura može da se primenjuje i više puta iterativno: bolji model galaksije uz bolju masku, ponovno oduzimanje galaksije i formiranje nove maske itd. To najčešće nije potrebno jer model vrlo brzo konvergira i jedino što se popravlja je kvalitet fita opisan sa  $\chi^2$ . Mi nismo insistirali na maskiranju svih objekata koje smo mogli da ne bismo slučajno oduzeli i deo oblaka/sjaja koji pripada galaksiji, tako da u pojedinim slučajevima (označenim sa ”\*” u tabeli 3.2) imamo visoke vrednosti za  $\bar{\chi}^2$  ( $> 150$ ),

čemu ne treba pridavati poseban značaj.<sup>11</sup> Procedura `ellipse` se na kraju koristi uz sada već većinu fiksiranih parametara, za dobijanje 1D (jednodimenzionalne) raspodele površinskog sjaja. Sigma-sliku potrebno je prilagoditi veličini slike objekta i obezbediti da nigde nema vrednost nula (pošto se njenom inverznom vrednošću otežava razlika modela i prave galaksije), tj. zameniti nule vrednostima koje su jako male, manje od postojećih minimuma ili višestruko manje od medijane.

Sa takvom sigma-slikom, najnovijom maskom i PSF slikom koju smo koristili iz SHA ili sami napravili, puštamo GALFIT ovoga puta zarad finalne dekompozicije površinskog sjaja na modelovane komponente. Vrednost za  $\chi^2$  ovde nije toliko relevantna jer jako zavisi od kvaliteta maske i sigma-slike, i ne govori mnogo o kvalitetu izabranog modela. Takođe, ovaj deo poduzorka sadrži nekoliko atipičnih objekata gde je i sama procedura fitovanja i čišćenja bila zahtevnija. Često su se galaksije iz ovog poduzorka pokazale kao problematične i za druge analize u našem radu (npr. dobijanje rotacione krive). U pitanju su objekti niskog sjaja, patuljasti, često nepravilnog oblika (u ovom smislu kao posebno nepogodna izdvaja se galaksija NGC 2366), tako da nije iznenađujuće što izgleda da ih lošije opisuju modeli dobijeni GALFIT dekompozicijom. U tabeli 3.2 i na odgovarajućim slikama takvi modeli označeni su sa " \* ".

### 3.2.1 GALFIT modeli zvezdane komponente

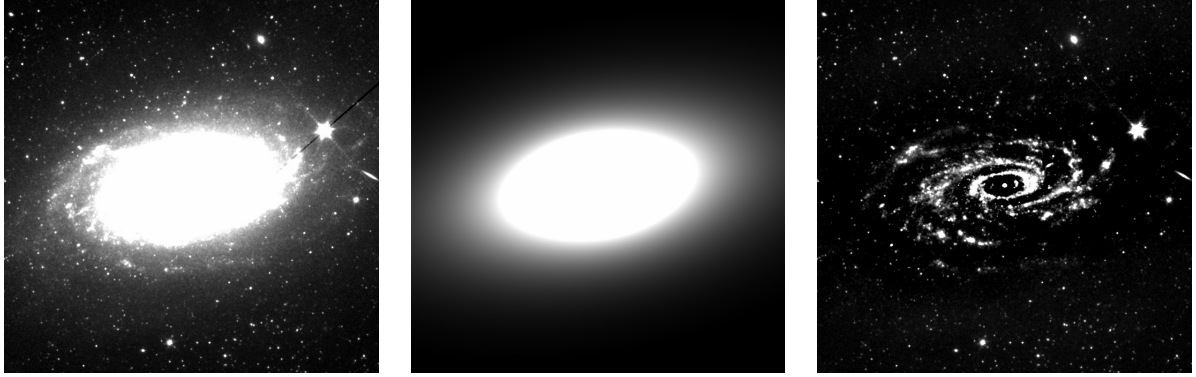
Program GALFIT (Peng et al., 2010) vrši dekompoziciju posmatranog dvodimenzionalnog površinskog sjaja na komponente modelovane teorijskim funkcijama koje se tradicionalno koriste za opis sjaja galaksija. Osim snimka galaksije GALFIT prilikom fitovanja koristi i prateće već pomenute slike: masku, sigma-sliku i PSF. Iz zaglavlja slike, ovaj softver očitava vreme ekspozicije snimka, a kao ulaz potrebna mu je i nulta vrednost magnitude. Takođe, potrebno mu je dati realističnu vrednost za početne parametre. Svi parametri fita: pozicija centra, karakteristične magnitude -  $\mu_s$ ,  $\mu_e$ , karakteristični radijusi -  $R_s$ ,  $R_e$ , Sersic  $n$  i ostali indeksi, pozicioni ugao,

---

<sup>11</sup>Visoke vrednosti  $\chi^2$  samo svedoče o komponentama galaksije koje nisu modelovane, tako na primer, spiralne grane će uvek dovesti do visokih vrednosti  $\chi^2$  iako je sama galaksija uspešno modelovana. Cilj ovog rada je procena mase galaksije, pri čemu se može zanemariti njena fina struktura.

eliptičnost  $b/a$ , mogu se fiksirati ili ostaviti slobodni po potrebi.

Na slici 3.2 je predstavljen primer galaksije NGC 5055 i rezultati dekompozicije koji se dobijaju kroz GALFIT: originalna slika, model i rezidual.



Slika 3.2: Primer snimaka koje koristi softver GALFIT za dekompoziciju površinskog sjaja: nemaskirana galaksija NGC 5055 (levo), model sjaja koji je opisuje (srednji panel) i rezidual (desno).

U okviru GALFIT softvera na raspolaganju su modeli eksponencijalnog diska, Sersic, *Ferrers* i PSF funkcija (videti Peng et al., 2010, za detalje). Eksponencijalna funkcija je tradicionalno korišćena kao dobar opis sjaja zvezdanih (i ponekad gasovitih) diskova i površinski sjaj takvog diska dat je kao (na primer Mo et al., 2010):

$$\Sigma(r) = \Sigma_0 \exp\left(-\frac{r}{r_s}\right). \quad (3.1)$$

Sersic funkcija koristi se za opis sjaja galaksija ranog tipa i centralnog ovala (eng. *bulge*) kod galaksija kasnog tipa, koje su i prisutne u našem uzorku. Površinski sjaj u tom slučaju dat je kao (Sersic, 1968):

$$\Sigma(r) = \Sigma_e \exp\left\{-\kappa \left[\left(\frac{R}{R_e}\right)^{1/n} - 1\right]\right\}. \quad (3.2)$$

*Ferrers* funkcija koristi se za opis prečage kod galaksija kasnog tipa, a PSF funkcija opisuje kompaktno jezgro (eng. *nucleus*). Kod jednog broja galaksija iz uzorka vidljive su spiralne strukture, prečaga i jezgro, i GALFIT je iste komponente takođe nalazio kao najbolji fit (sa najmanjom  $\chi^2$  vrednošću), međutim mi smo se u finalnom setu modela koje predstavljamo ovde odlučili da koristimo maksimalno dve komponente za opis sjaja, a gde je moguće i jednu. Tokom procedure fitovanja dinamičke

mase, prisustvo većeg broja komponenti sa nepoznatim  $M/L$ , koje iz tog razloga ne možemo lako fiksirati, povećava broj slobodnih parametara i otežava postizanje konvergencije fita. Pored toga, često se u proceduri fitovanja tada dobijaju besmisleno velike ili negativne vrednosti za pozitivno-definitne parametre kao što su  $M/L$ , radijus, gustina i slično. Zato su galaksije iz našeg uzorka dekomponovane GALFIT programom samo modelom eksponencijalnog diska i Sersic komponente, i mislimo da je to urađeno bez velikog gubitka u kvalitetu modela. Za patuljaste galaksije prisutne u uzorku i teorijski najopravdaniji model sjaja je **eksponencijalni disk**, i gde god je to bilo moguće opisane su samo tom funkcijom. Za jedan broj većih galaksija izabran je model **eksponencijalni disk + centralni oval**, a postoji i par slučajeva nepravilnih objekata (Irr) gde smo se odlučili za opis samo Sersic funkcijom.

Za sve objekte iz našeg poduzorka, a koji su deo S4G, u okviru P4 dostupni su i rezultati dekompozicije, automatske i od strane astronoma, što smo mi koristili kao kontrolni set parametara. U našim modelima, koji kasnije služe za određivanje dinamičke mase, posebnu pažnju smo obraćali na spoljašnje delove galaksija, i pokušavali da bolje opišemo sjaj na većim galaktrocentričkim radijusima jer smatramo da se tu nalazi velika količina mase. Iz istog razloga nije nam bilo bitno da modelujemo jezgro, koje čak iako značajno doprinosi sjaju u centru galaksije nema značajan udeo u ukupnoj masi. Zbog navedenih razloga dekompozicija usvojena u ovom radu razlikuje se od modela predstavljenih u [Salo et al. \(2015\)](#).

Na grafikonima 3.3 - 3.24 prikazano je poređenje modela koje smo usvojili iz procedure dekompozicije sjaja programom GALFIT (i koje nadalje koristimo) i jednodimenzionalne raspodele površinskog sjaja na izofotama izmerenog sa procedurom `ellipse`. Poređenje je dato samo zarad slikovitosti opisa, i vrednosti dobijene sa procedurom `ellipse` nisu korišćene za dinamičko modelovanje.

Za dve galaksije, NGC 3031 i NGC 6946, date su dekompozicije i na jednu i na dve komponente jer su podjednako dobro opisivale posmatrani površinski sjaj. Dinamičko modelovanje je urađeno za oba modela.

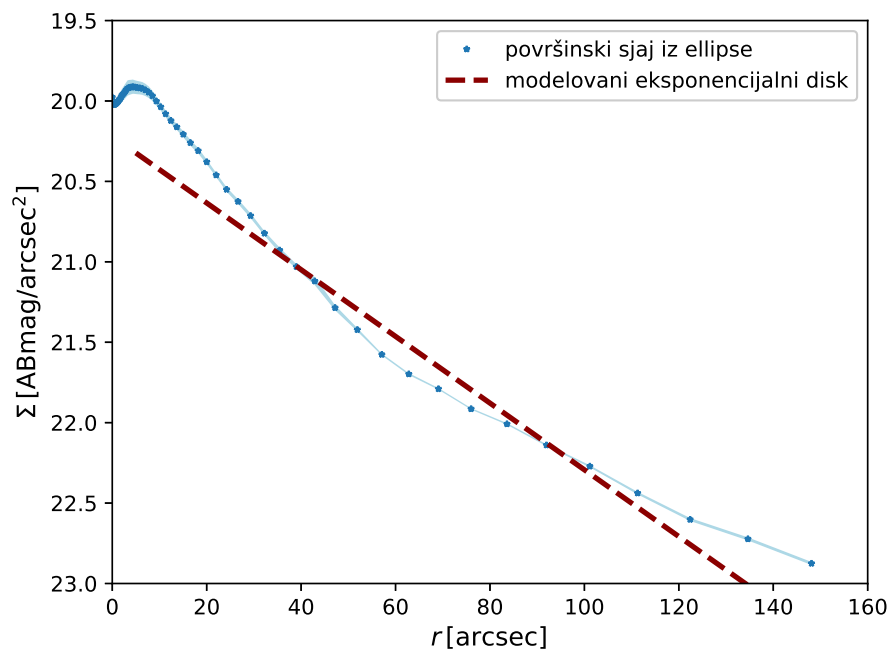
Dobijeni modeli površinskog sjaja korišćeni su da se izračuna površinska gustina mase, a zatim i uticaj mase sadržane u zvezdanim komponentama na rotaciju gasa, tj. doprinos ukupnoj dinamičkoj masi sistema. Prilikom dinamičkog modelovanja



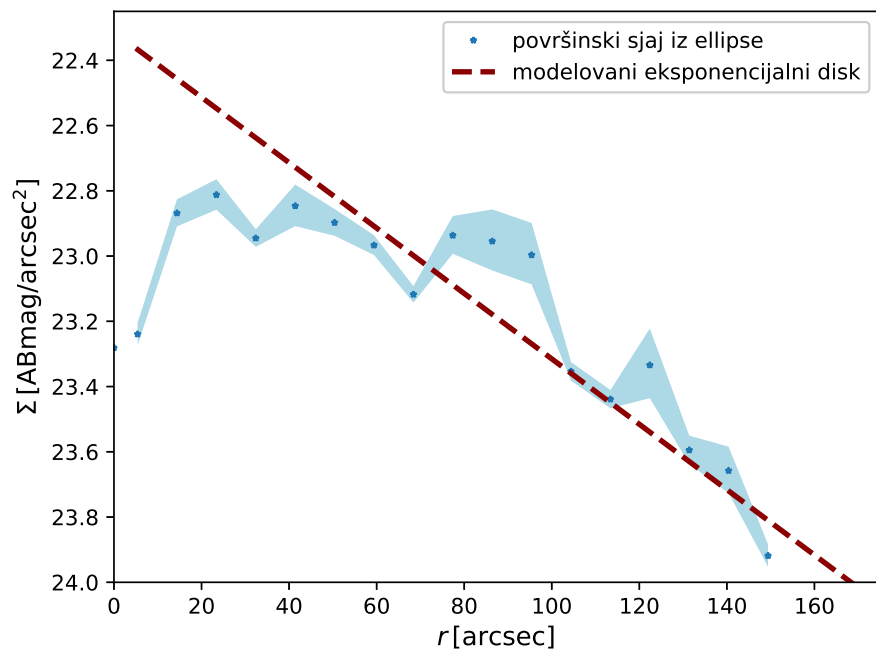
Tabela 3.2: Parametri modelovanog površinskog sjaja dobijeni programom GALFIT koji opisuju zvezdane komponente disk i centralni oval:  $\mu_0$  – centralni površinski sjaj eksponencijalnog diska i  $r_s$  – karakteristična dužina diska u ugaonim jedinicama;  $\mu_e$  – površinski sjaj Sersic centralnog ovala na efektivnom radijusu i  $r_e$  – odgovarajući efektivni radijus;  $n$  – indeks Sersic funkcije (tamo gde smo koristili ovu komponentu); redukovani  $\bar{\chi}^2$ . Oznake '1k' i '2k' koriste se kod galaksija gde su korišćena oba modela. Oznake 'd2' i 'd' označavaju da su obe modelovane komponente eksponencijalni disk, a parametri u tabeli odgovarajući.

ID galaksije	eksp. disk		Sersic centralni oval			$\bar{\chi}^2$
	$\mu_0$ [AB mag arcsec <sup>-2</sup> ]	$r_s$ [arcsec]	$\mu_e$ [AB mag arcsec <sup>-2</sup> ]	$r_e$ [arcsec]	$n_{\text{Sersic}}$	
NGC 925	20.219	52.35	-	-	-	35.8
NGC 2366	22.312	108.33	-	-	-	44.8
NGC 2403	19.566	85.68	-	-	-	442.5*
NGC 2841	18.397	48.75	17.265	6.27	1.76	17.9
NGC 2903	18.324	54.14	16.763	6.00	0.66	39.8
NGC 2976	19.800	41.25	-	-	-	69.5
NGC 3031 <sup>1k</sup>	18.400	127.50	-	-	-	275.2
NGC 3031 <sup>2k</sup>	18.560	130.00	17.860	28.16	2.13	42.5
NGC 3198	19.585	48.88	-	-	-	23.4
IC 2574	22.764	167.38	-	-	-	8.0
NGC 3351 <sup>d2</sup>	19.526	45.03	15.862 <sup>d</sup>	4.44 <sup>d</sup>	-	28.9
NGC 3521	-	-	19.652	65.25	2.17	56.9
NGC 3621	18.598	48.12	-	-	-	212.4*
NGC 3627	18.441	58.18	-	-	-	165.3
NGC 4736	21.545	155.80	18.467	32.80	3.15	43.0
DDO 154	23.26	26.54	-	-	-	2.2
NGC 4826	17.939	50.04	17.160	8.02	2.20	25.6
NGC 5055	20.210	105.22	19.586	45.00	2.059	30.4
NGC 6946 <sup>1k</sup>	19.178	79.21	-	-	-	939.0*
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	19.660	108.23	19.042 <sup>d</sup>	25.42 <sup>d</sup>	-	834.7*
NGC 7331	-	-	19.150	57.12	1.94	267.5*
NGC 7793	19.946	71.84	-	-	-	22.8

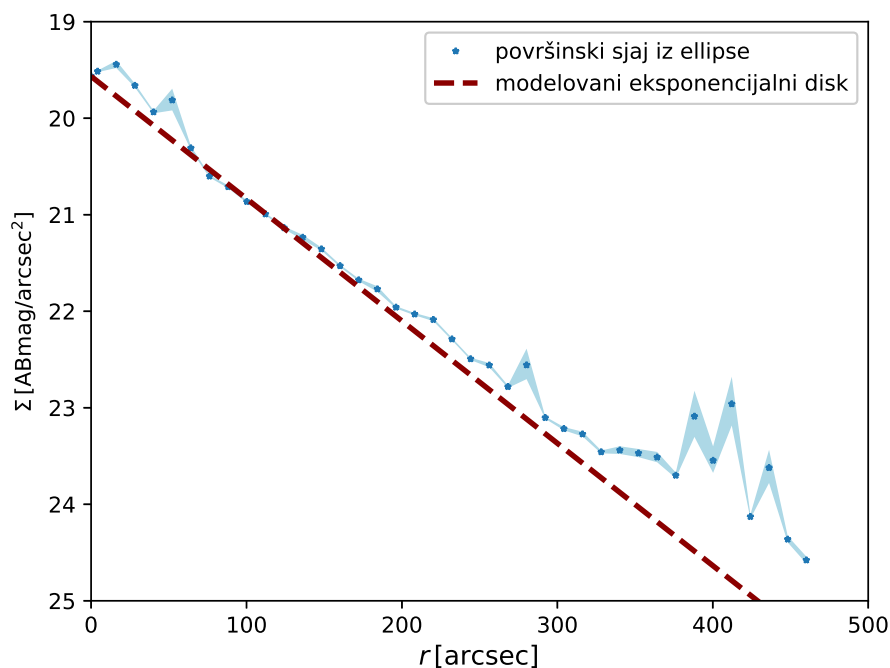
sa slobodnim parametrom  $M/L$  (potpoglavljje 4.2), odnos masa-sjaj oslikava pored svojstvenih osobina posmatranog medijuma i posmatračke uticaje. Za drugi skup dinamičkih modela, gde  $M/L$  dobijamo iz SPS modela (potpoglavljje 4.2), prisutna je zavisnost od metaličnosti, SFH, starosti i boje (odnos sjaja različitih populacija), što smo i uzeli u obzir. Detalji procedure dinamičkog modelovanja zvezdane komponente i dobijeni parametri sadržani su u Poglavlju 4 i dalje.



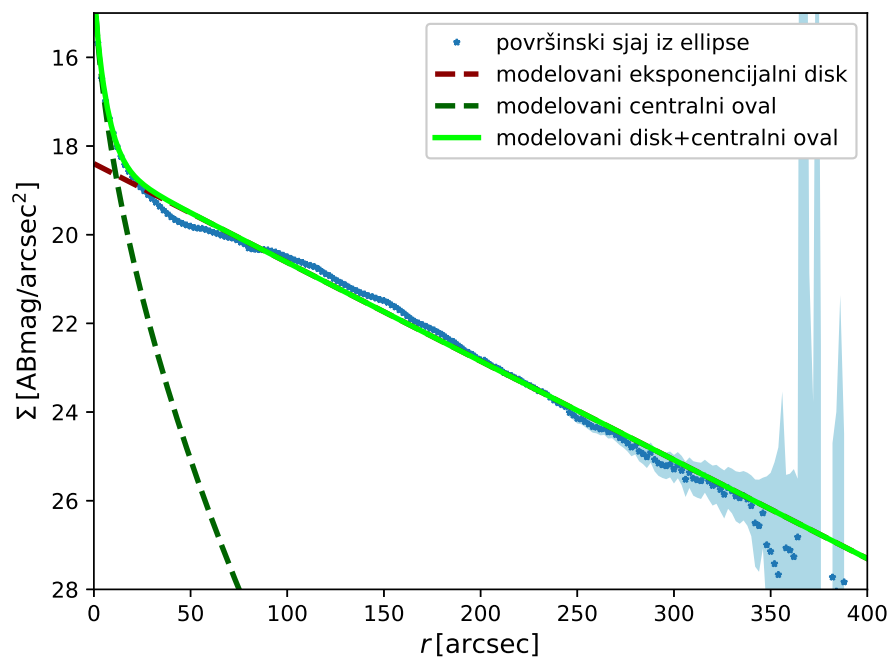
Slika 3.3: Površinski sjaj NGC 925\*: sjaj izmeren sa ellipse (plave zvezdice) i odgovarajuće neodređenosti (svetlo plava oblast); usvojeni GALFIT model eksponencijalnog diska (crvena isprekidana linija).



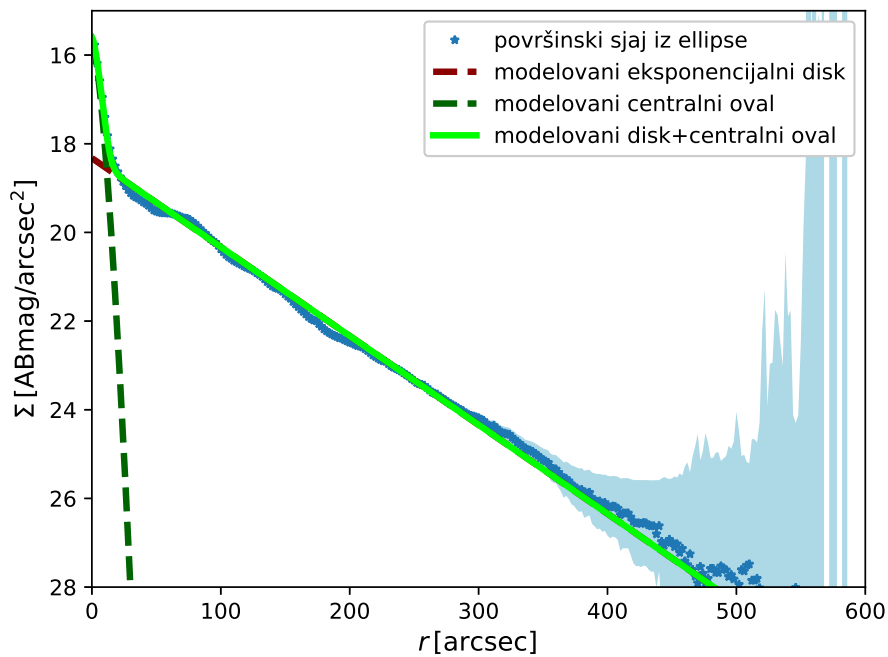
Slika 3.4: Površinski sjaj galaksije NGC 2366\*: oznake kao na slici 3.3.



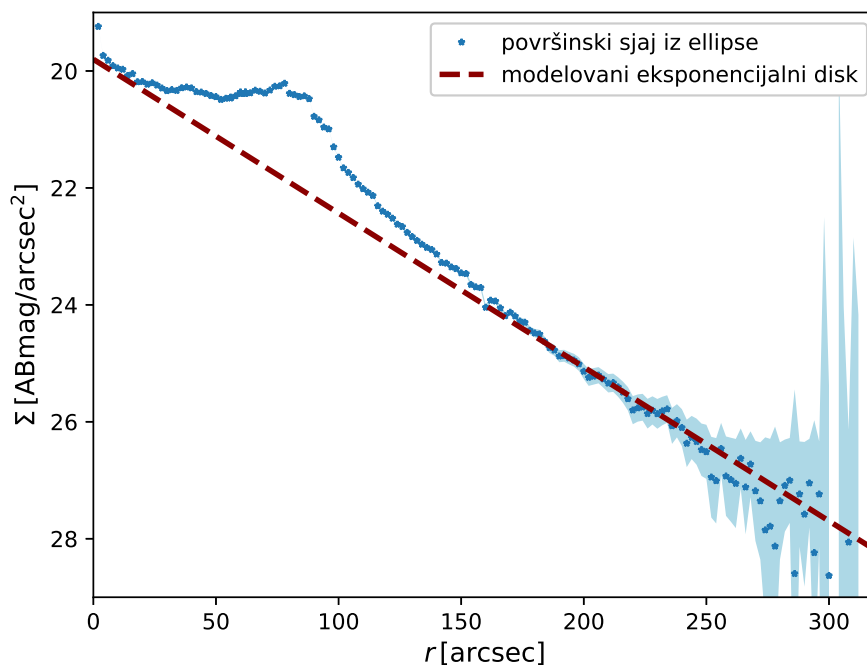
Slika 3.5: Površinski sjaj NGC 2403\*: oznake kao na slici 3.3.



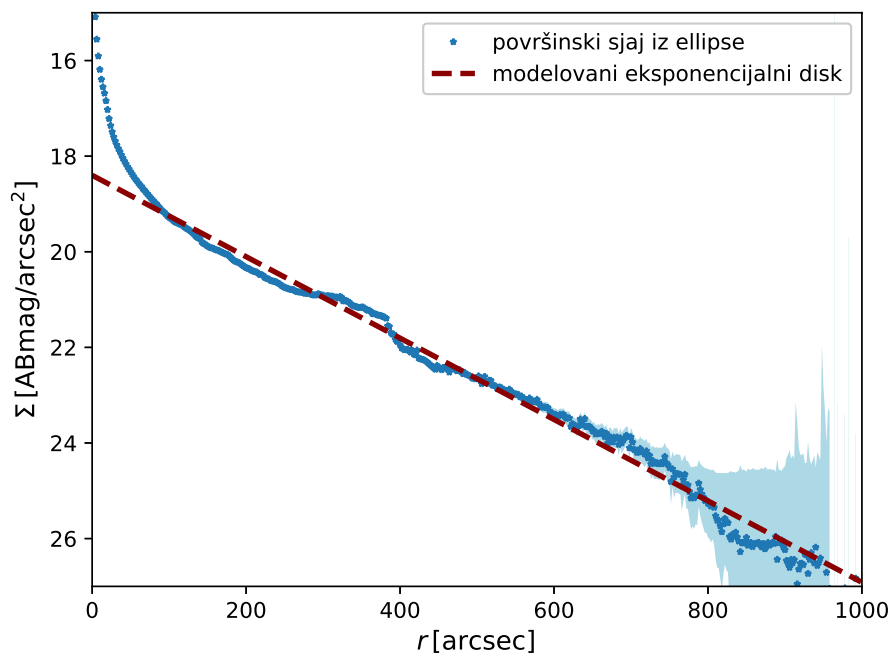
Slika 3.6: Površinski sjaj NGC 2841: sjaj izmeren sa ellipse (plave zvezdice) i odgovarajuće neodređenosti (svetlo plava oblast); usvojene komponente iz GALFIT modela - eksponencijalni disk (crvena isprekidana linija); Sersic centralni oval (tamno zelena isprekidana linija); ukupan zbir modelovanih zvezdanih komponenti disk+centralni oval (svetlo zelena puna linija).



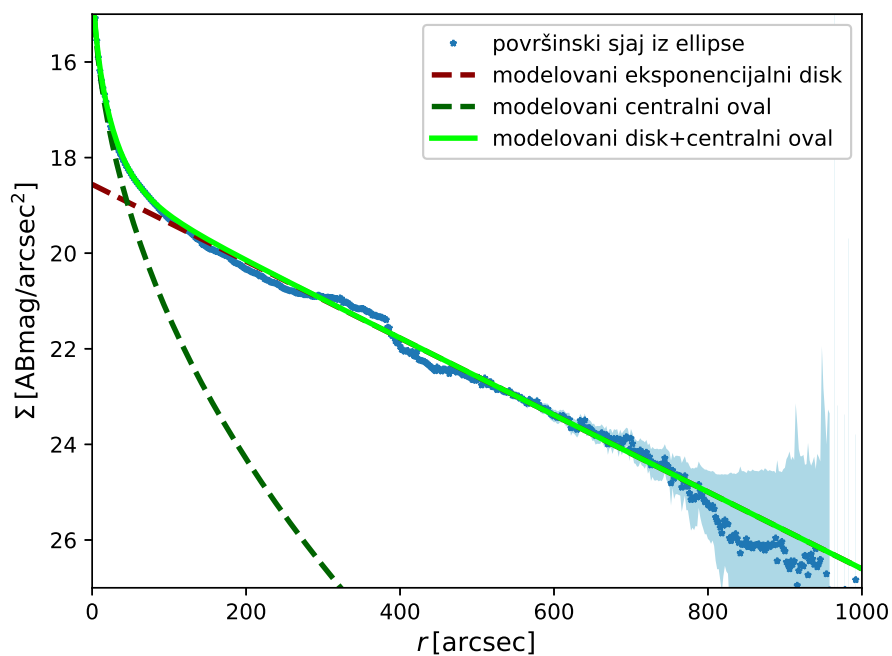
Slika 3.7: Površinski sjaj NGC 2903: oznake kao na slici 3.6.



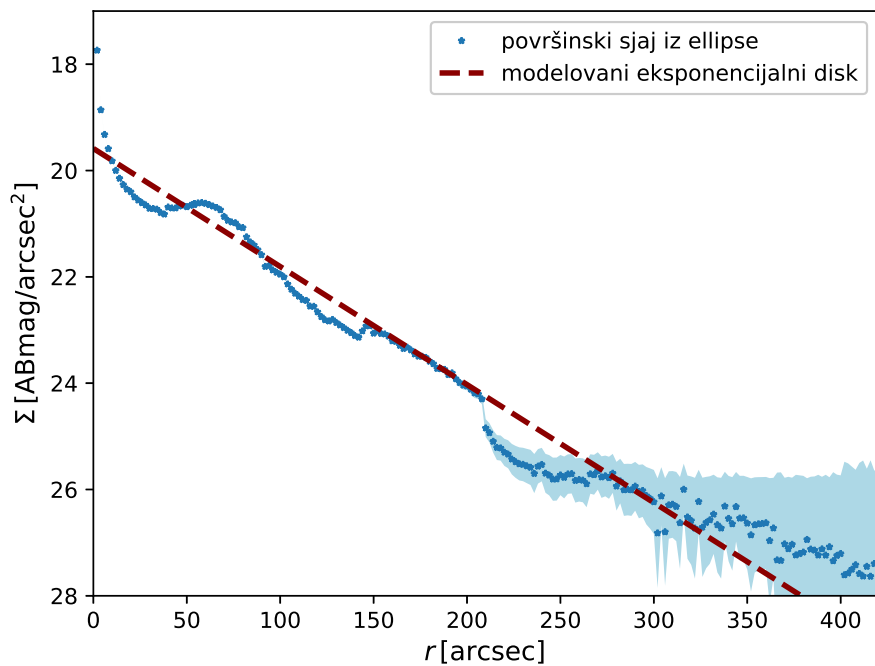
Slika 3.8: Površinski sjaj NGC 2976: oznake kao na slici 3.3.



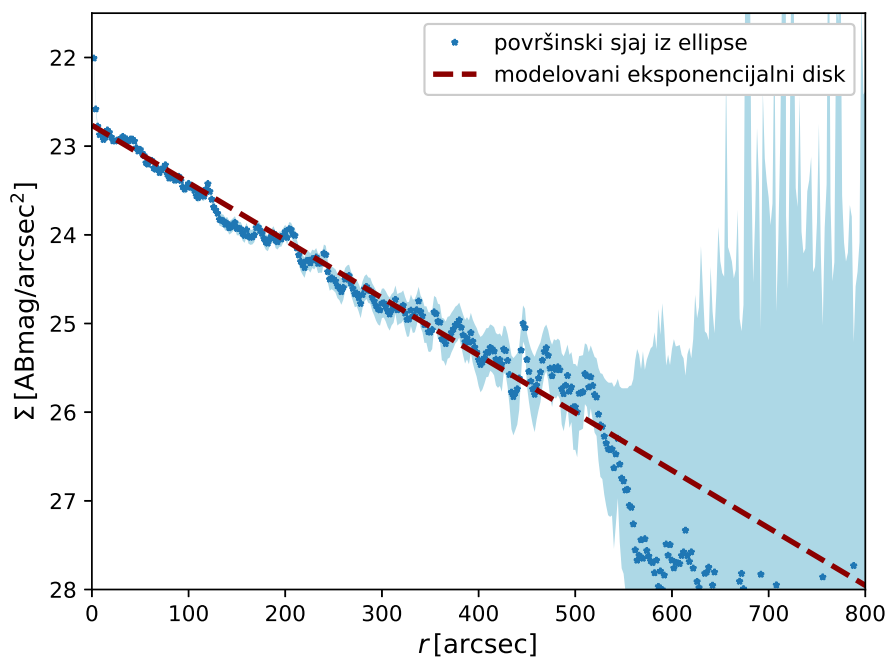
Slika 3.9: Površinski sjaj NGC 3031<sup>1k</sup>: oznake kao na slici 3.3.



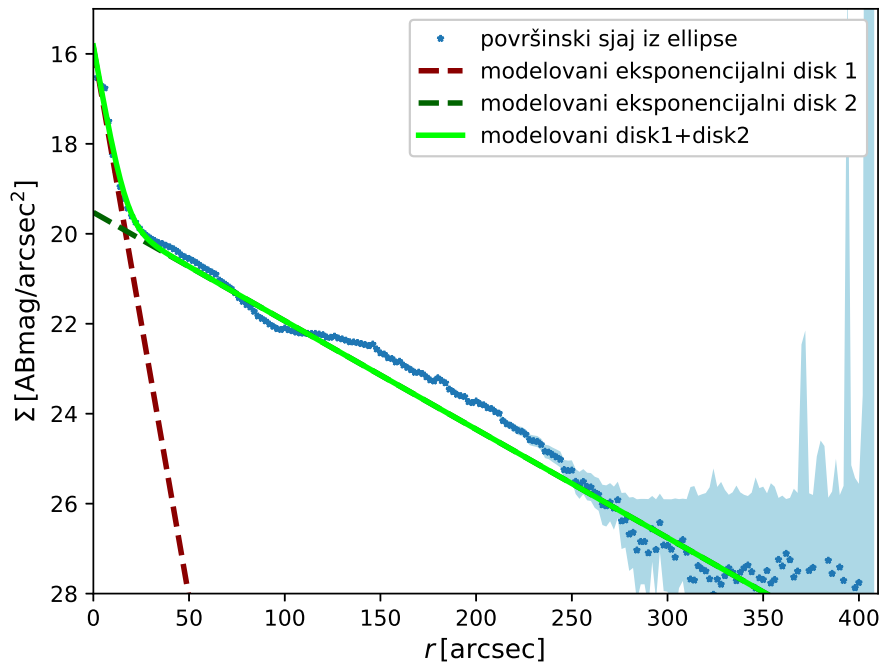
Slika 3.10: Površinski sjaj NGC 3031<sup>2k</sup>: oznake kao na slici 3.6.



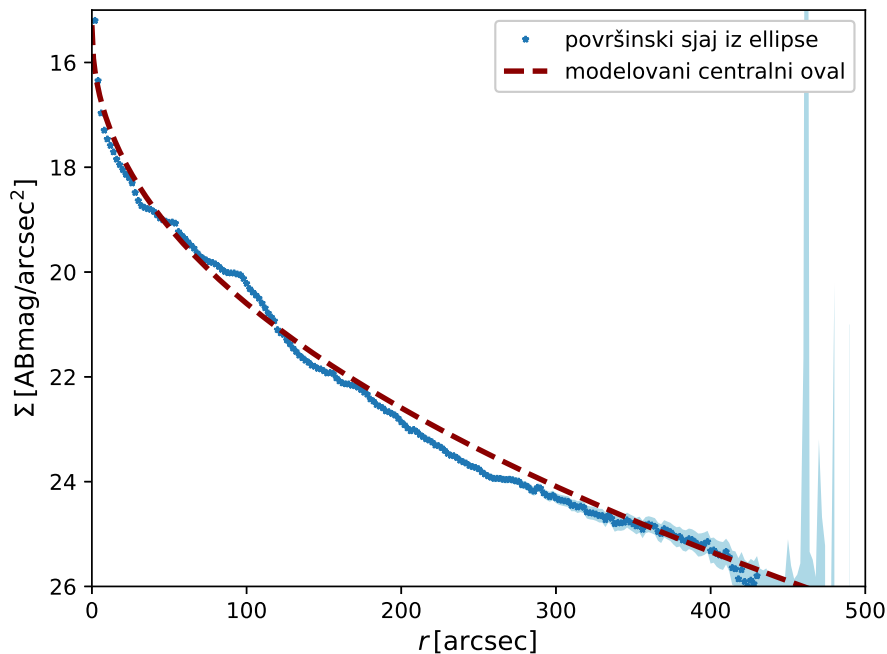
Slika 3.11: Površinski sjaj NGC 3198: oznake kao na slici 3.3.



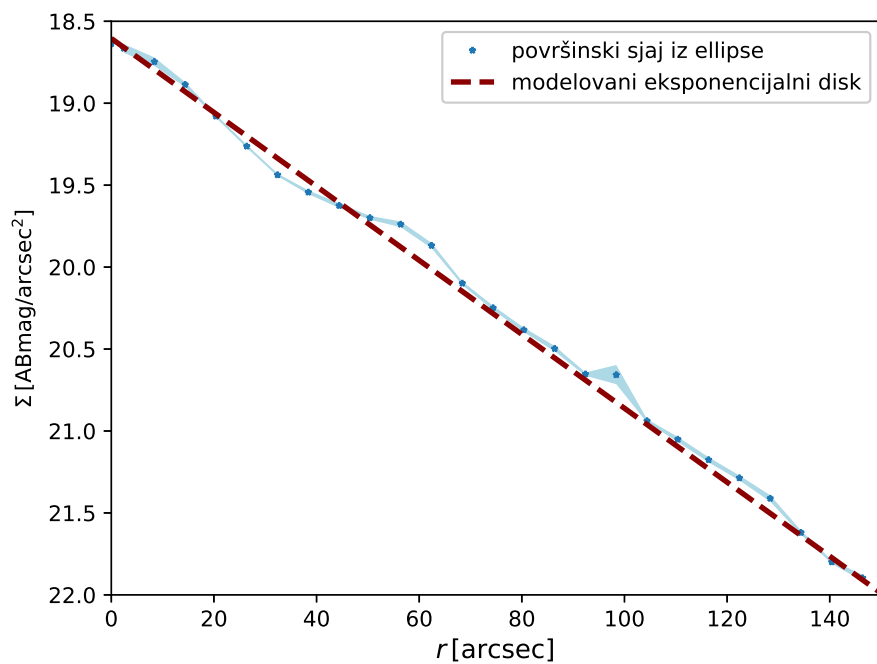
Slika 3.12: Površinski sjaj IC 2574: oznake kao na slici 3.3.



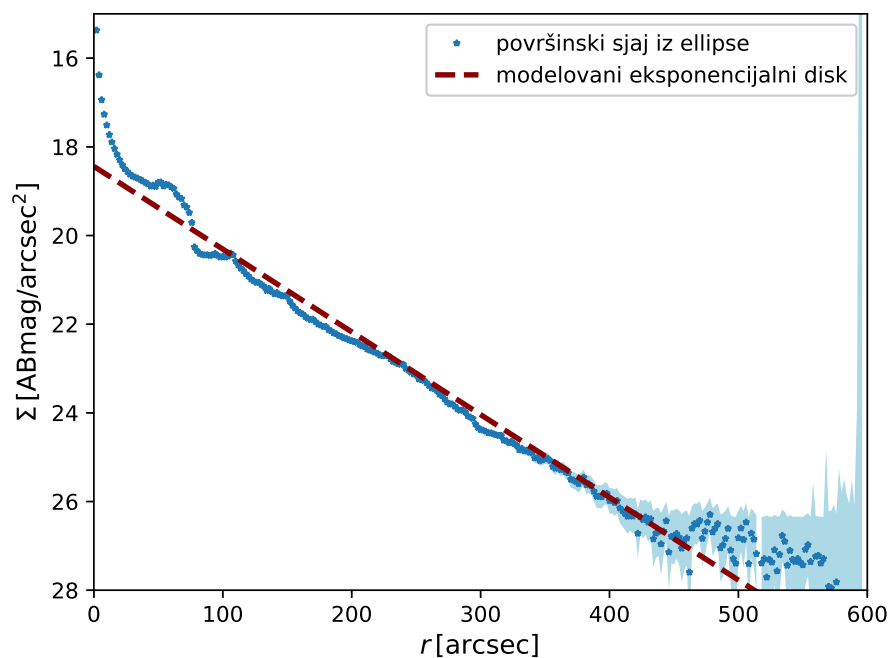
Slika 3.13: Površinski sjaj NGC3351: sjaj izmeren sa ellipse (plave zvezdice) i odgovarajuće neodređenosti (svetlo plava oblast); usvojene komponente iz GALFIT modela - eksponencijalni disk 1 (tamno zelena isprekidana linija); eksponencijalni disk 2 (crvena isprekidana linija); ukupan zbir modelovanih zvezdanih komponenti disk1+disk2 (svetlo zelena puna linija).



Slika 3.14: Površinski sjaj NGC3521: sjaj izmeren sa ellipse (plave zvezdice) i odgovarajuće neodređenosti (svetlo plava oblast); usvojeni GALFIT model za Sersic centralni oval (crvena isprekidana linija).

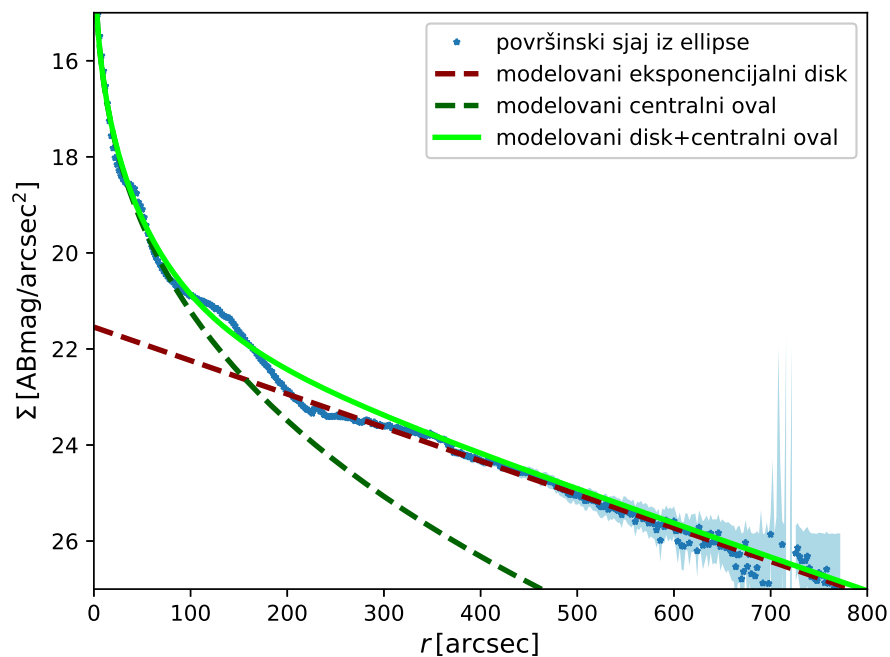


Slika 3.15: Površinski sjaj NGC 3621\*: oznake kao na slici 3.3.

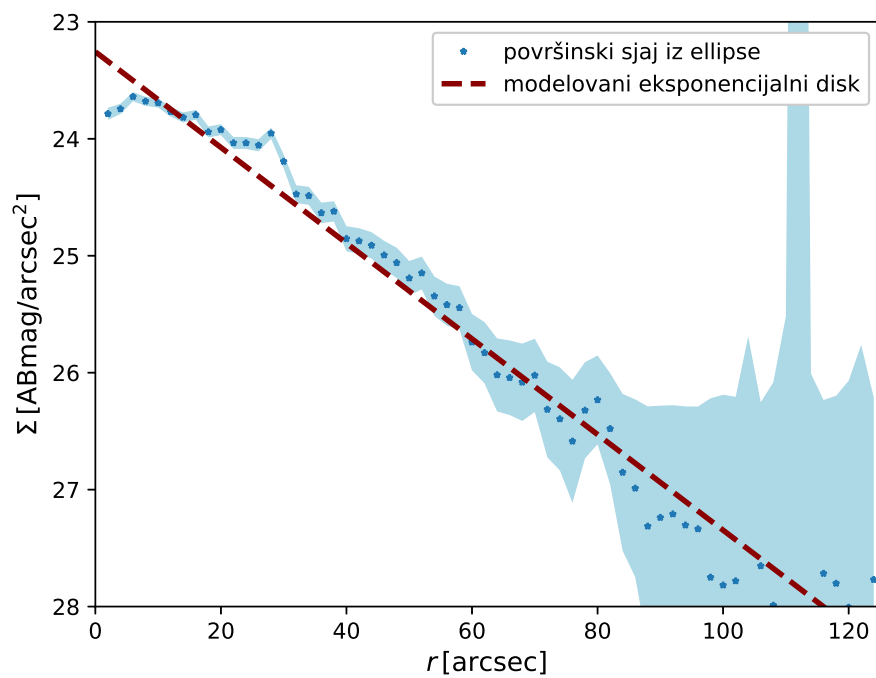


Slika 3.16: Površinski sjaj NGC 3627: oznake kao na slici 3.3.

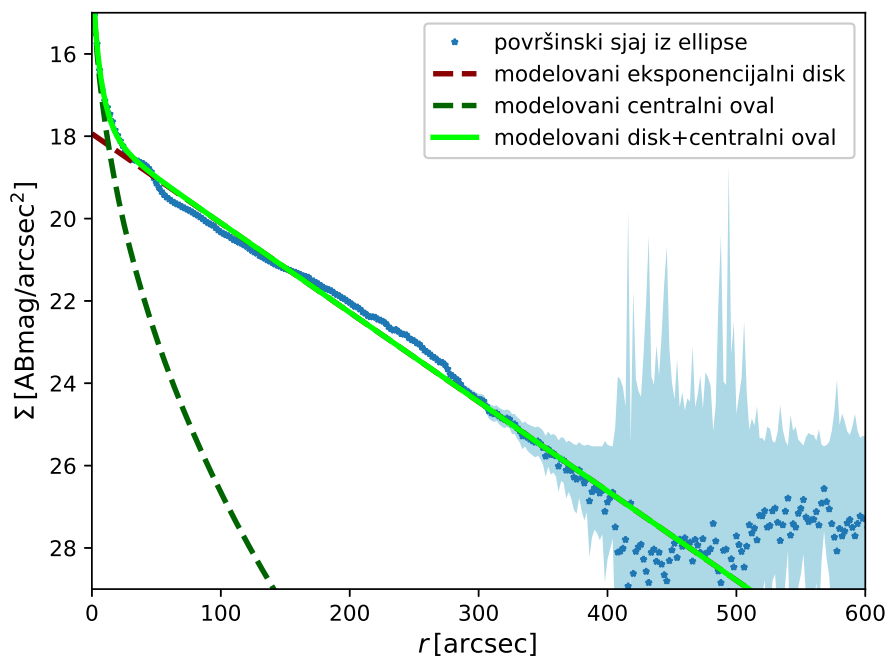




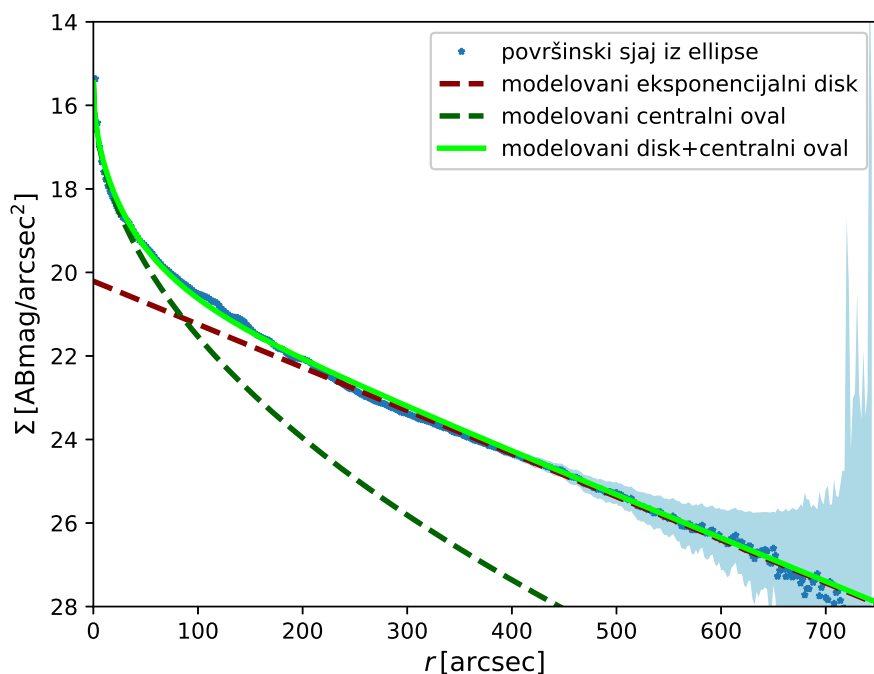
Slika 3.17: Površinski sjaj NGC 4736: oznake kao na slici 3.6.



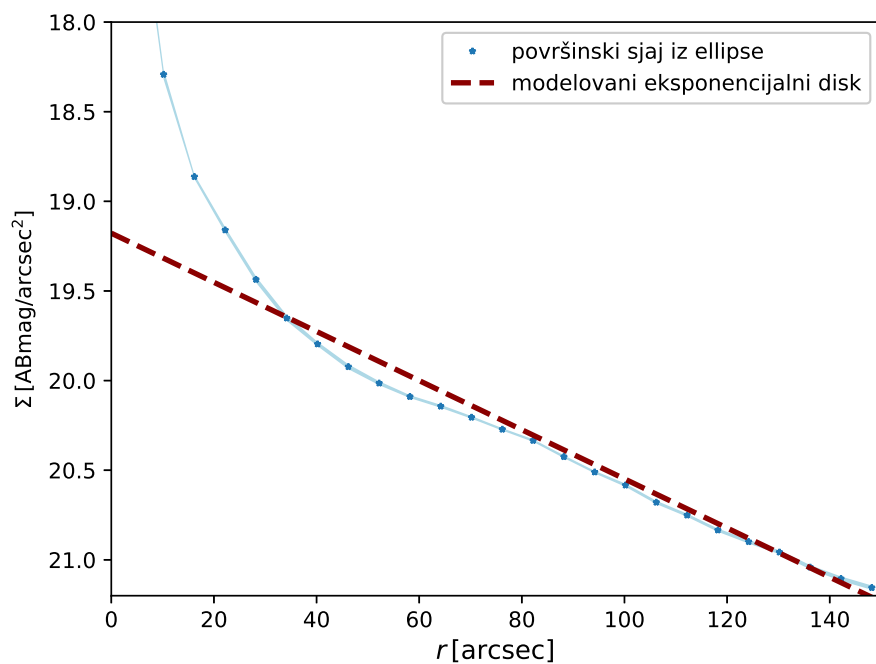
Slika 3.18: Površinski sjaj DDO 154: oznake kao na slici 3.3.



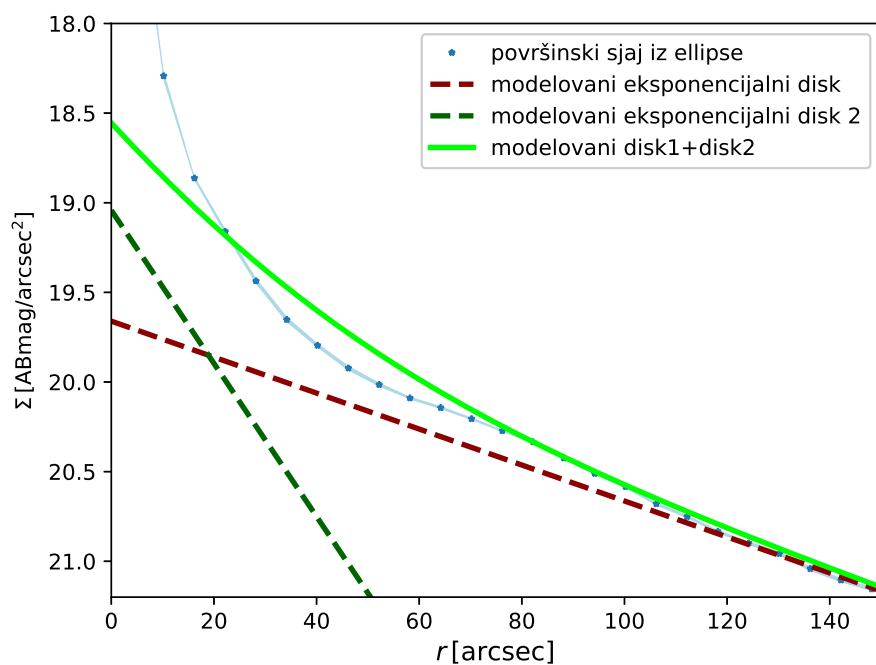
Slika 3.19: Površinski sjaj NGC 4826: oznake kao na slici 3.6.



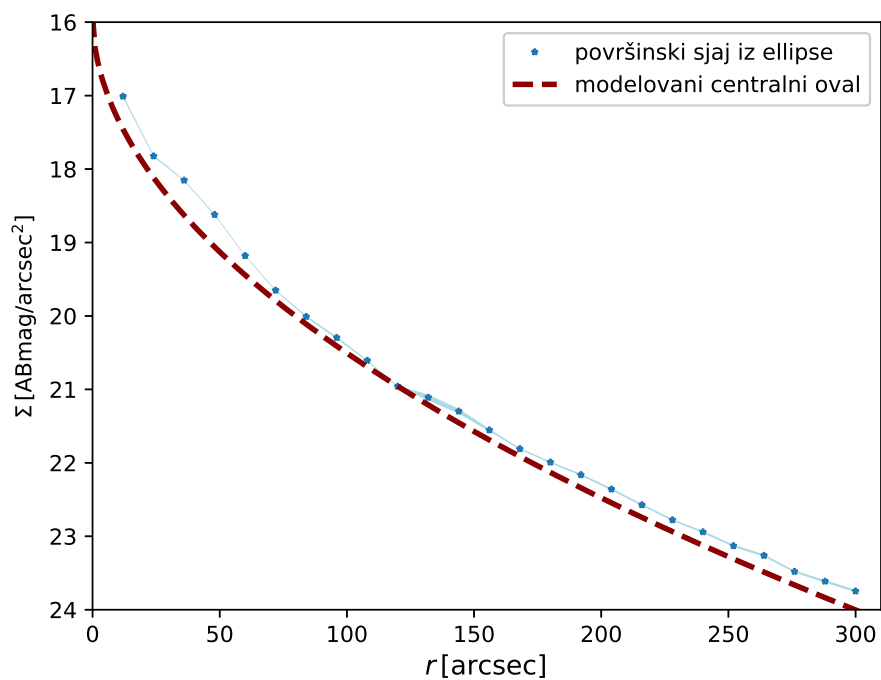
Slika 3.20: Površinski sjaj NGC 5055: oznake kao na slici 3.6.



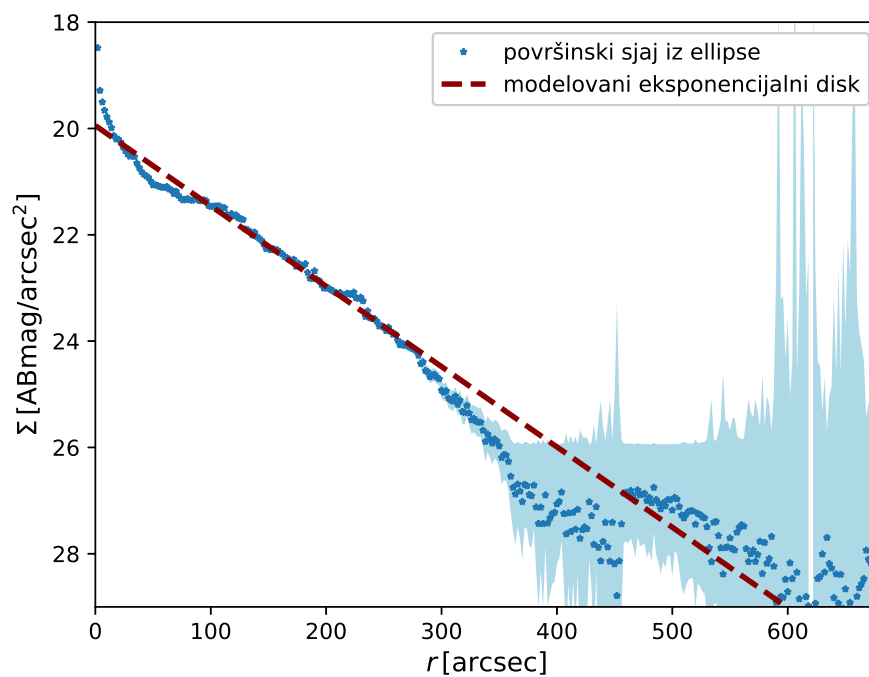
Slika 3.21: Površinski sjaj NGC 6946<sup>1k</sup>: oznake kao na slici 3.3.



Slika 3.22: Površinski sjaj NGC 6946<sup>2k,d2</sup>: oznake kao na slici 3.13.



Slika 3.23: Površinski sjaj NGC7331: oznake kao na slici 3.14.



Slika 3.24: Površinski sjaj NGC 7793: oznake kao na slici 3.3.

### 3.3 Radio-posmatranja

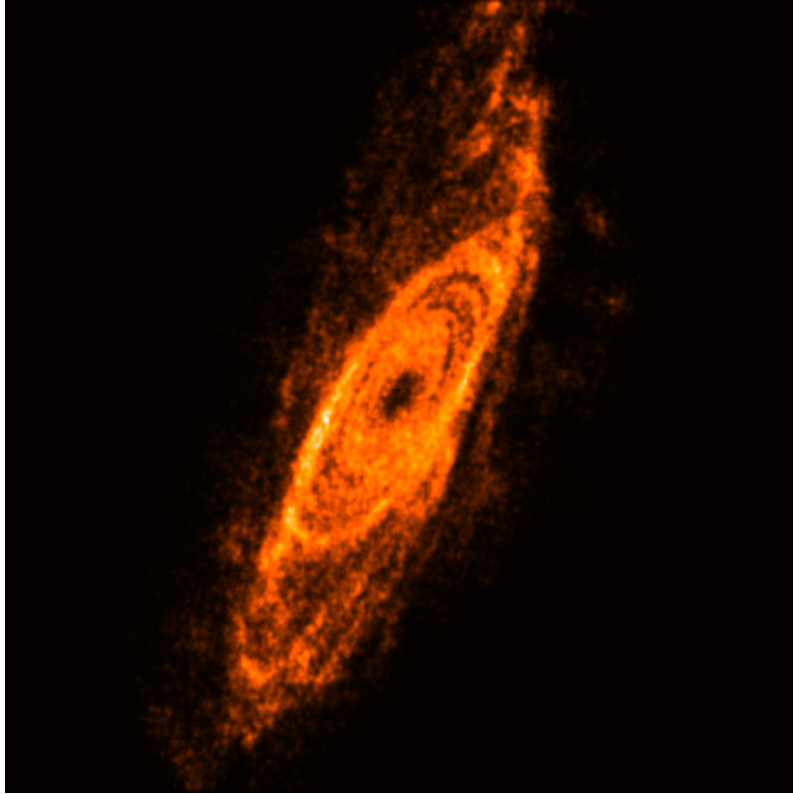
Posmatranja iz radio- područja korišćena u ovoj disertaciji se u potpunosti baziraju na pregledu THINGS i detaljima pregleda objavljenim u [Walter et al. \(2008\)](#).

#### 3.3.1 Masa gasne komponente

THINGS pregled mapirao je zračenje atomskog vodonika na 21 cm za sve galaksije iz našeg uzorka. Za detalje posmatranja i instrumentalne postavke videti [Walter et al. \(2008\)](#). Površinske gustine mase atomskog gasa  $\Sigma_{\text{HI}}$  predstavljene u okviru ove disertacije dobijaju se iz THINGS integrisanih mapa HI. Ove mape se još nazivaju nultim momentom. Softver *Groningen Image Processing System*, GIPSY<sup>12</sup>, i njegov odgovarajući paket `ellint` primenjeni su na prirodno otežane NA mape nultog momenta (NA označava eng. *naturally-weighted*). Na slici 3.25 prikazana je korišćena NA mapa nultog momenta za galaksiju NGC 2841 iz pregleda THINGS. Programski paket `ellint` izračunava statistiku po eliptičnim prstenovima na koje je podeljena slika galaksije (prsten je definisan radijusom centra prstena tj. radijusom duž velike ose diska i debljinom prstena, slično kao procedura iz IRAF `ellipse`). U našem slučaju `ellint` je korišćen za dobijanje srednjeg intenziteta po prstenu, što dalje čini radijalnu raspodelu srednjeg intenziteta. Prilikom ove procedure vrednosti za centar, pozicioni ugao i inklinaciju su fiksirane na najbolje parametre dobijene drugim GIPSY paketom `rotcur`. Najbolje izabrane i usvojene vrednosti `rotcur` parametara prikazane su u okviru tabele 3.1. Detaljniji opis izvođenja globalnih parametara za svaku galaksiju predstavljen je u sekciji 3.3.2. Vredi i ovde napomenuti da je za centar galaksija najčešće birana vrednost iz [Trachternach et al. \(2008\)](#), dok je situacija sa pozicionim uglom i inklinacijom gasa komplikovanija. Globalni pozicioni ugao i inklinacija birani su od slučaja do slučaja; nekad su to srednje vrednosti radijalnih profila izvedenih u okviru sekcije 3.3.2, a nekad su izabrane vrednosti koje bolje opisuju tipične delove galaksije gde nisu prisutna uvrtnja, interakcije i gde nisu u pitanju druge generalno značajne promene parametara. Treba naročito obratiti pažnju na razlike u inklinaciji za zvezdani i gasni disk iz ovog rada (za inklinaciju

<sup>12</sup><https://www.astro.rug.nl/~gipsy/>.

zvezdanog diska koristili smo bazu *HyperLeda*), prikazane u tabeli 3.3. Naravno, za izračunavanje površinske gustine mase gasnog diska korišćene su vrednosti usvojene za gasni disk.



Slika 3.25: Mapa linijske gustine neutralnog vodonika za galaksiju NGC 2841 iz pregleda THINGS.

Konverzija srednjeg integrisanog intenziteta u distribuciju površinske gustine mase izračunata je koristeći izraz iz [Leroy et al. \(2008\)](#):

$$\Sigma_{\text{HI}} [\text{M}_{\odot} \text{pc}^{-2}] = 0.020 \cos i I_{21\text{cm}} [\text{K km s}^{-1}], \quad (3.3)$$

koji koriguje za inklinaciju i uračunava prisustvo helijuma (sa faktorom 1.36).

Pošto su vodonik i helijum daleko najprisutnije atomske vrste formula 3.3 daje nam približno ukupnu masu svog optički tankog atomskog gasa. Neki autori koriste i faktor skaliranja 1.33 između HI i ukupnog gasa (navedena u [Courteau et al., 2014](#)).<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup>Jedan od razloga za neslaganje jeste prisustvo Populacije I, odnosno Populacije II, zvezda. Studije koje se delimično ili u celini odnose na visoke crvene pomake i rani univerzum uvek koriste 1.33.

Zbog konzistencije sa prethodno objavljenim rezultatima (Samurović et al., 2015; Jovanović, 2017) koristili smo faktor 1.36 dat u Leroy et al. (2008).

Procena količine molekuskog gasa je teža:  $H_2$  kao najprisutniji molekul nema stalan električni dipolni momenat i iz tog razloga teže emituje zračenje (Courteau et al., 2014). Dodatni problem jeste što je molekularni gas, što znamo iz Mlečnog puta, izrazito grupisan u kompaktne oblake visoke optičke dubine i veoma malog faktora pokrivanja, koje je teško pronaći u vangalaktičkom kontekstu. Drugi najzastupljeniji molekul CO ima izrazito veliki električni dipolni moment i često je optički debeo, a sudarno se pobuđuje od strane  $H_2$ . Konverzija iz intenziteta CO u  $H_2$  koristeći  $X_{CO}$  faktor je tradicionalno nepouzdana. Procene su da je ukupan doprinos molekuskog gasa  $\sim 20\%$  mase HI, a ovaj odnos se smanjuje za galaksije kasnog tipa (Courteau et al., 2014, i tu navedene reference). Sa druge strane, ovaj odnos teži da raste sa porastom metaličnosti (što je izvor brojnih selekcionih efekata). Dodatni problem predstavlja činjenica da bi veliki deo molekularnog gasa u diskovima galaksija mogao ostati efektivno skriven ukoliko je kinetička temperatura medijuma suviše niska (npr. ispod 15 K), jer se tada ne ekscituje nijedna opservabilna spektralna linija. Dalje nećemo razmatrati ili koristiti doprinos molekuskog gasa u ovoj disertaciji. Ova tema predstavlja jednu od osnova za budući rad autora.

### 3.3.2 Gas kao pokazatelj dinamičke mase

Kao što smo detaljnije objasnili u okviru Poglavlja 2 pod dinamičkom masom galaksije podrazumevamo svu materiju koja gravitaciono deluje. Atomski neutralni vodonik HI koji koristimo u ovoj disertaciji kao test-česticu osetljiv je na gravitacioni potencijal koji potiče od ukupne mase. Ukupna masa uključuje i barionsku i nebarionsku komponentu. Dalje, za test-čestice gasa pretpostavljamo da se kreću po kružnim orbitama unutar tankog gasnog diska. Posmatranjem emisije na 21 cm (koja je optički tanka i ne podleže međuzvezdanoj ekstinkciji) iz jednog razlučenog elementa na nebu, zaključujemo o kretanju gasa tj. rotaciji pod uticajem gravitacionog potencijala. Element mora da bude dovoljno mali da bi se mogao okarakterisati jednom brzinom rotacije, odnosno prostorna rezolucija mora biti dovoljno velika. U slučaju THINGS pregleda prostorna rezolucija bila je dovoljna: od 3-6 lučnih se-

kundi, što za usvojene daljine daje skale reda veličine 500 pc. Povoljna orijentacija galaksije u odnosu na nas takođe je uslov da bi rezolucioni element bio koristan, i tu je ograničenje  $30^\circ < i < 70^\circ$ . Posmatranjem polja brzina formiranog od rotacionih brzina pojedinačnih elemenata (detaljno u potpoglavlju 2.2.3) izvodimo idealizovanu rotacionu brzinu gasa na datoj udaljenosti od centra i sa teorijski utemeljenom orbitom, izuzimajući male perturbacije ili usmerena plimska kretanja. Opisana merenja rotacione brzine gasa sa galaktocentričnim radijusom u galaksijama iz uzorka predstavljaju rotacionu krivu.

Dobijene rotacione krive u proceduri fitovanja dekomponovane su na pojedinačne doprinose zasnovane na posmatranjima gasa i zvezda, i parametre koji opisuju halo tamne materije utemeljene u teoriji.

Jednostavnom transformacijom koristeći jednačinu 2.6 iz brzine rotacije dobili smo ukupnu masu unutar radijusa do kog idu posmatranja gasnog diska.

### Obrada trodimenzionalnih posmatranja emisije HI

Rotacione krive izvedene su iz trodimenzionalnih podataka (eng. *data cubes*) dobijenih u okviru THINGS pregleda. 3D matrica je zapravo niz 2D slika (eng. *snapshots*) u različitim frekvencionim kanalima, koji se prevode u različite brzine. Kanali su tako definisani da obuhvate proširenu emisionu liniju HI na pretpostavljenoj sistemskoj brzini i crvenom pomaku.

Trodimenzionalna slika galaksije u našem slučaju podrazumeva da je u svakom pikselu, tj. svakoj tački na projekciji galaksije na nebu, snimljena spektralna raspodela oko frekvencije linije HI. Naravno, frekvencija je pomerena ka crvenom delu spektra za odgovarajuću vrednost crvenog pomaka  $z$  za datu galaksiju (šema na slici 2.3 levo). Crveni pomak za naš uzorak potiče samo od sopstvenog kretanja galaksije jer su galaksije iz našeg uzorka veoma blizu Mlečnom putu.

Ispravno određivanje inklinacije ključno je za kvalitet izračunate rotacione krive. U ovom delu se naša analiza razlikuje od [de Blok et al. \(2008\)](#) koji su za donju granicu inklinacija uzeli  $40^\circ$ , dok smo mi u analizu uključili i objekte sa inklinacijom većom od  $30^\circ$  (poreklo ograničenja za inklinaciju objašnjeno je u potpoglavlju 3.1). Ovo



Tabela 3.3: Različite inklinacije u stepenima: izračunata u ovom radu koristeći paket GIPSY i rutinu *rotcur* ( $i$ ), inklinacija HI gasnog diska iz [de Blok et al. \(2008\)](#) ( $i_{\text{HI dB}}$ ) i inklinacija zvezdanog diska iz HyperLeda ( $i_{\text{stellar LEDA}}$ ). Za detalje izvođenja videti potpoglavlje 3.3.2. Podebljana su imena i podaci kod objekta gde je značajna razlika u nagibu gasnog i zvezdanog diska (veća od 10 %).

ID galaksije	$i$ [°]	$i_{\text{HI dB}}$ [°]	$i_{\text{stellar LEDA}}$ [°]
NGC 925	59.6	66.0	58.7
<b>NGC 2366</b>	<b>62.0</b>	63.8	<b>90.0</b>
NGC 2403	62.1	62.9	61.3
NGC 2841	71.9	73.7	67.1
NGC 2903	67.4	65.2	67.1
NGC 2976	64.0	60.5	64.5
NGC 3031	59.9	59.0	62.7
NGC 3198	72.6	71.5	77.8
<b>IC 2574</b>	<b>53</b>	53.4	<b>83.0</b>
<b>NGC 3351</b>	<b>42.7</b>	-	<b>54.6</b>
<b>NGC 3521</b>	<b>72.0</b>	72.7	<b>60.0</b>
NGC 3621	66.7	64.7	67.6
NGC 3627	61.4	61.8	67.5
<b>NGC 4736</b>	<b>41.1</b>	41.4	<b>31.8</b>
<b>DDO 154</b>	<b>65.0</b>	70	<b>56.2</b>
NGC 4826	65.7	65.2	64.0
NGC 5055	60.0	51	54.9
<b>NGC 6946</b>	<b>32.0</b>	32.6	<b>18.3</b>
NGC 7331	76.0	75.8	70.0
NGC 7793	51.9	49.6	63.5

dodaje veću nesigurnost kod izvedene rotacione krive ali smo smatrali da je i dalje prihvatljiva. Greška u inklinaciji od  $5^\circ$  menja vrednost kružne brzine za 15 %, za inklinacije iz ovog opsega ([de Blok et al., 2008](#)). Značajan deo THINGS uzorka ima inklinaciju u ovoj „sivoj” oblasti, između  $30^\circ$  i  $40^\circ$ , međutim nije bilo moguće proširiti našu analizu na sve takve objekte, jer su neki od njih imali druga ograničenja - značajna usmerena plimska kretanja i druge artefakte koji verovatno potiču od interakcija sa drugim galaksijama (sudara ili prolaza). Bitno je obratiti pažnju da je inklinacija o kojoj govorimo inklinacija gasnog diska, koja se kod nekoliko galaksija iz uzorka značajno razlikuje od inklinacije zvezdanog diska, čak i do  $\sim 40\%$  kod NGC 6946 (prikazano u tabeli 3.3).

Poseban oprez potreban je i kod korišćenja pozicionog ugla iz literature ili odre-

divanja ellipse procedurom, zbog različitih konvencija u upotrebi. U ovom radu pozicioni ugao meri se od pravca ka severu ka velikoj osi galaksije, i to delu velike ose koji se udaljava, u direktnom smeru (suprotno od kretanja kazaljke na satu). Ista definicija koristi se i u softveru GIPSY. Isto tako, inklinacija navedena u tabeli 3.3 dobijena uz pomoć programa `galfit` i eliptičnost iz ellipse procedure su povezane fizičke veličine, ali ne i jednake.

### Računanje polja brzina (VF)

Da bismo iz spektroskopije linije HI dobili rotacionu krivu koristili smo uobičajenu proceduru fitovanja polja brzine iskošenim/uvrnutim eliptičnim prstenovima. THINGS pregled ima dovoljno veliku prostornu, kao i rezoluciju brzina, da posmatrački sistematski efekti više ne predstavljaju problem. Što se tiče fizičkih efekata kao što su nekružna kretanja na malim skalama, različiti metodi za konstrukciju polja brzina su korišćeni za njihovo umanjenje. Pomenuta velika rezolucija u odnosu na uobičajena HI posmatranja omogućava i detaljan uvid u kretanja koja odstupaju od kružnih (de Blok et al., 2008). Konstrukcija različitih polja brzina (videti potpoglavlje 2.2.3) i njihov uticaj na dobijene rotacione krive za konkretne podatke koje koristimo detaljno su analizirani u Oh et al. (2008) i Trachternach et al. (2008).

Kod najvećeg broja galaksija iz našeg uzorka korišćen je Gaus-Ermitov  $h_3$  polinom (van der Marel and Franx, 1993), po uzoru na de Blok et al. (2008), i po proceduri utvrđenoj u Jovanović (2017). Poznato je da Gaus-Ermitov  $h_3$  dobro opisuje iskrivljenost posmatranih profila sa značajnom asimetrijom, kao što je raspodela brzine (isto što i frekvencija) duž linije vida (LOSVD). LOSVD se modeluje skraćenim Gaus-Ermitovom nizom koji je konstruisan od gausijana pomnoženog polinomom iz niza (van der Marel and Franx, 1993; Samurović, 2007):

$$F_{\text{TGH}}(v_{\text{LOS}}) = \Gamma \frac{\alpha(\omega)}{\sigma} \exp\left(-\frac{1}{2}\omega^2\right) \left[ 1 + \sum_{k=3}^n h_k H_k(\omega) \right],$$

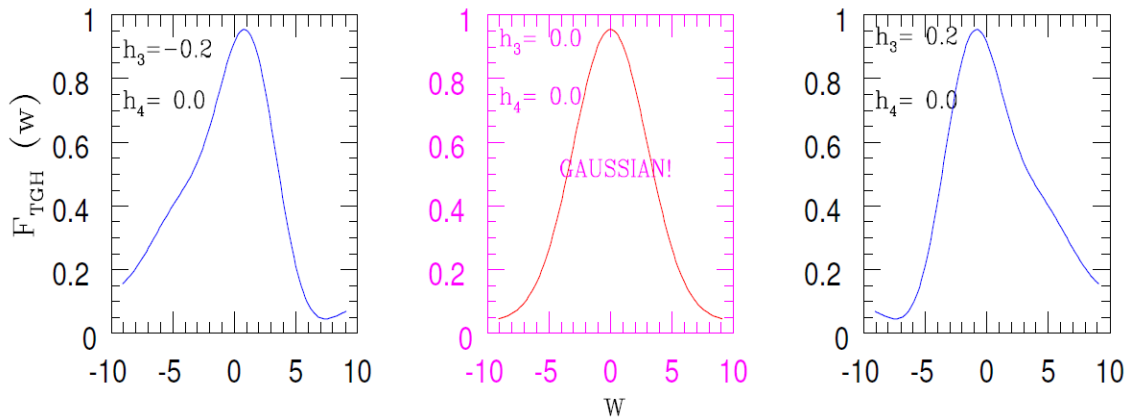
gde  $\Gamma$  predstavlja jačinu linije,  $\omega \equiv (v_{\text{LOS}} - \bar{v})/\sigma$ ,  $\alpha \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\omega^2/2)$ , gde su  $\bar{v}$  i  $\sigma$  slobodni parametri.  $h_k$  su konstantni koeficijenti a  $H_k(\omega)$  je Gaus-Ermitova funkcija,

tj. polinom reda  $k$ . Ovde koristimo samo skraćeni niz koji ide do 3. polinoma  $H_3$ :

$$H_3(\omega) = \frac{1}{\sqrt{6}}(2\sqrt{2}\omega^3 - 3\sqrt{2}\omega).$$

U opštem slučaju variraju se parametri  $\bar{v}$ ,  $\sigma$ ,  $h_3$  i  $h_4$  dok se ne postigne najbolje slaganje funkcije  $F_{\text{TGH}}(v_{\text{LOS}})$  sa posmatranim spektrom galaksije. Parametri  $h_3$  i  $h_4$  su bitni jer mere asimetrična i simetrična odstupanja od gausijana, a mi u ovom radu koristimo isključivo  $h_3$ .

Primer uticaja razičitih vrednosti  $h_3$  parametra na izgled funkcije  $F_{\text{TGH}}(\omega)$  prikazan je na slici 3.26).



Slika 3.26: Prikazan je efekat razičitih vrednosti Gaus-Ermitovog parametra  $h_3$  (za  $h_4 = 0$ ) na modelovani profil linije (preuzeto iz Samurović, 2007).

Ermitovi  $h_3$  polinomi daju stabilnije rezultate, čak i za nizak odnos signal-šum ( $S/N$ ) profila, u odnosu na druge tipove mapa brzine (npr. mapa prvog momenata, *peak* polje brzina, jedan Gausov profil; videti Oh et al., 2008). Koristili smo GIPSY paket `xgaufit` za fit  $h_3$  polinoma na posmatrani profil brzine u svakom pikselu (poziciji na nebu). Ova procedura je jako zahtevna, jer je za pojedine galaksije gde je veličina polja  $2048 \times 2048$  piksela to značilo fitovati više od 4 miliona profila. Ovde dolazi do izražaja optimizovanost softvera GIPSY i paketa `xgaufit`, koji ovako kompleksan zadatak obavlja, u zavisnosti od ostalih parametara fita, za sat vremena na desktop računaru sa 8 GB RAM memorije i procesorom Intel i5.<sup>14</sup> Centar ovakvog asimetričnog Gaus-Ermitovog profila je zatim dodeljen svakoj poziciji na nebu, što je

<sup>14</sup>Naša procena je da je nespecializovanoj rutini za fitovanje krive u nekom od programskih jezika visokog nivoa potreban jedan dan za ovakav zadatak na istom računaru, odakle se vidi zašto smo bili veoma skloni da koristimo GIPSY softver.

rezultiralo mapom brzina korišćenoj u daljoj analizi. Korišćeni su slični filteri što se tiče jačine signala (amplitude) i disperzije kao u [de Blok et al. \(2008\)](#) (zasnovani na podacima o posmatranjima iz [Walter et al., 2008](#), i korišćeni i u [Jovanović \(2017\)](#)). Kriterijum za amplitudu bio je da posmatrani maksimum linije bude viši od  $3\sigma_{\text{chan}}$ , gde je  $\sigma_{\text{chan}}$  prosečan šum u kanalu koji ne sadrži liniju a koji odgovara posmatranju za datu galaksiju. Disperzija veća od separacije kanala u prostoru brzina je drugi filter koji smo primenili. Separacija kanala, šum i ostali parametri preuzeti su iz originalnog THINGS rada ([Walter et al., 2008](#)). Dodatna maska koju smo koristili dobijena je na osnovu mape integrisanog intenziteta HI. Iz mape nultog momenata, koja predstavlja mapu integrisane linije u svakom pikselu, izdvojili smo piksele gde nije bilo signala, pri čemu je kriterijum da signal bude viši od granice osetljivosti  $3\sigma_N$ , gde je  $\sigma_N = \sqrt{N}\sigma_{\text{chan}}$ . Tipična granica osetljivosti u terminima linijske gustine neutralnog vodonika za THINGS podatke je oko  $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  (videti [Walter et al., 2008](#)). Poređenja radi, analogna prosečna linijska gustina Mlečnog puta u okolini Sunčevog sistema procenjuje se na oko  $4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$  ([Kalberla and Kerp, 2009](#)) iz čega vidimo da je osetljivost pregleda THINGS vrlo velika.

Kod dve galaksije iz uzorka, NGC 2366 i IC 2574 bila je potrebna dodatna procedura koja određuje i izdvaja glavnu komponentu rotacije. Za proceduru dobijanja polja brzina ove dve galaksije idejno smo se oslanjali na [Oh et al. \(2008\)](#), ali sa značajnim razlikama. Ove dve galaksije imaju usmerena kretanja (eng. *streaming motions*) jača nego ostatak uzorka i fit jednim  $h_3$  profilom ne oslikava zaista prisutnu rotaciju. Iste te galaksije izdvojene su i iz [de Blok et al. \(2008\)](#) uzorka i tretirane u okviru [Oh et al. \(2008\)](#), konstrukcijom polja brzina koje su nazvali *bulk velocity field*. Oslanjajući se na pomenuti rad, mi smo izveli svoju jednostavniju metodu za dobijanje polja brzina koje smo nazvali **dominantno rotaciono polje brzina**. Uzrok zbog kog Gaus-Ermitov  $h_3$  polinom neuspešno opisuje rotaciju NGC 2366 i IC 2574 je što u velikom broju piksela (naročito u spoljnim delovima diska) ne postoji samo jedan prisutan profil. Često su prisutna dva preklapljena (tzv. blendovana) profila tj. dva uzročnika širenja linije: rotaciono kretanje i još jedna vrsta kretanja za koju pretpostavljamo da potiče od usmerenih strujanja. Jačina dva profila ne može se koristiti kao kriterijum za selekciju jer profil koji odgovara rotaciji može imati manju

amplitudu od drugog profila (rotacija nije dominantna za posmatrani skup čestica gasa). U takvim linijama pokušali smo da izdvojimo uticaj „čisto” rotacionog kretanja jer je, kao što smo objasnili u potpoglavlju 2.2.3, jedino ono bitno za procenu dinamičke mase. Prvo smo izveli rotacionu krivu zasnovanu na mapi intenziteta HI otežanog srednjom brzinom, tzv. mapa prvog momenta brzine (MOM1). Mapa prvog momenta je sada standardni deo paketa proizvoda u radio-spektroskopiji, pa je tako slučaj i sa THINGS podacima. Prilikom izvođenja rotacione krive parametri fita su fiksirani na vrednosti iz literature. Generička mapa prvog momenta brzine je dovoljno dobra kada je dominantno kretanje rotacija, kao što smo detaljnije objasnili u potpoglavlju 2.2.3, međutim u slučaju ove dve galaksije nikako nije ilustrativna za dinamiku spoljnih delova. Ovako dobijenu prvu aproksimaciju rotacione krive smo zatim fitovali polinomom 5. stepena. Fit znatno odstupa u spoljnim delovima ( $R > 600$  lučnih sekundi za IC 2574 i  $R > 300$  lučnih sekundi za NGC 2366) od pomenute rotacione krive u smislu da fit polinomom 5. stepena ostaje ravan u spoljašnjim oblastima, što je ponašanje kakvo očekujemo ali ga ne pretpostavljamo. U sledećem koraku na način sličan opisanom (koristeći iste ili slične filtere kao za  $h_3$  polje brzina) konstruisemo dva polja brzine sa `xgaufit`: standardno, zasnovano na Gaus-Ermitovom  $h_3$  polinomu, i polje brzine dobijeno fitom dva Gausova profila.

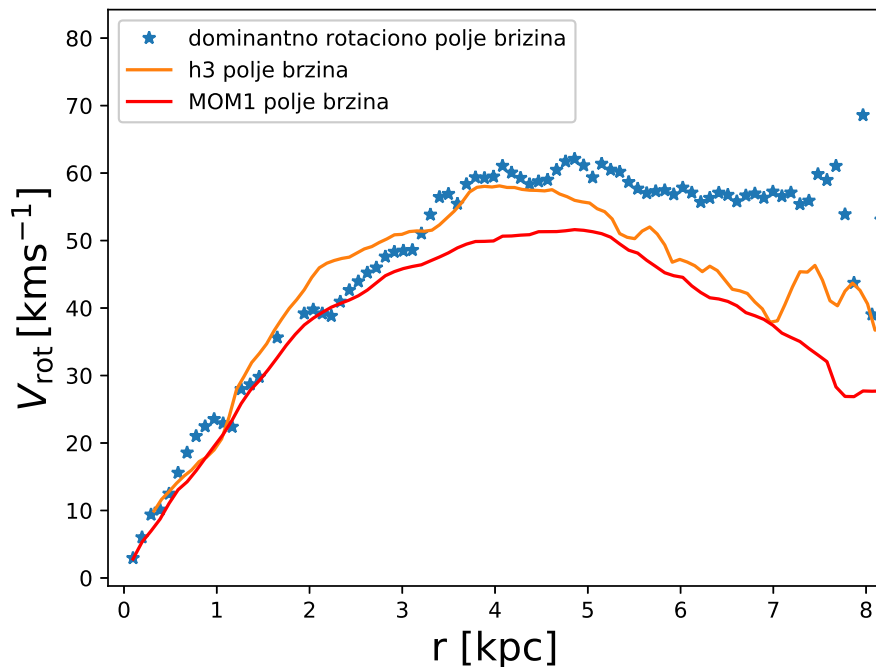
Nadalje takođe, kao pomoćno, koristimo i polje brzina zasnovano na prvom momentu brzine. Problem kod fitovanja dva profila je u prevelikom broju slobodnih parametara (u odnosu na broj tačaka u profilu), zbog kojih procedura često kolapsira ili daje besmislene rezultate. Iz tog razloga mnogo manji broj tačaka je prisutan u ovako konstruisanom polju brzina. Dalje, definišemo odstupanje  $\delta$ , koje smo uzeli da ima vrednost maksimalne razlike između očekivane ravne rotacione krive (u našem slučaju fit polinomom) i rotacione krive bazirane na prvom momentu. U svakoj tački konstruisanih VF vršeno je poređenje sa MOM1 i računata je razlika. Naš prvi izbor je opet bio  $h_3$  profil: ako je njegov centar bio unutar razlike od  $\delta$  u odnosu na brzinu iz MOM1, on je uzet za brzinu tog piksela. Opisani kriterijum možemo da zapišemo kao:

$$|V_{h_3}(x, y) - V_{\text{MOM1}}(x, y)| < \delta. \quad (3.4)$$

U suprotnom, tražimo brzinu rotacije u fitu jednog od dva gausijana. Ako je bliži

od njih unutar razlike  $\delta$  uzimamo njega, ako nije razmatramo drugi i da li je opet unutar razlike  $\delta$  u odnosu na brzinu iz MOM1. Ako nijedan od profila ne ispunjava uslov (centri su im isuviše udaljeni od  $V_{\text{MOM1}}$ ) taj piksel ostaje „prazan”. Ovakvim tretmanom dobili smo VF koje ima manje tačaka (manje je popunjeno polje) nego polje brzina dobijeno sa fitom  $h_3$ , ali za ovako dobijene tačke možemo smatrati da pouzdanije opisuju rotaciono kretanje/centar linije. Nijedna tačka nije interpolirana ili ekstrapolirana, već je zaista dobijena iz posmatranja. Rotacione krive koje se zasnivaju na ovako konstruisanom polju brzina zaista pokazuju prethodno „skriveni” ravan trend u spoljašnjim delovima, koji za galaksije NGC 2366 i IC 2574 možemo videti na slikama 3.30 i 3.37, respektivno.

Na slici 3.27 prikazana je razlika među rotacionim krivama za NGC 2366 dobijenim iz tri različita polja brzine: naše izvedeno dominantno rotaciono polje, polje brzina koje se bazira na  $h_3$  polinomu i tradicionalna mapa prvog momenta, MOM1. Vidimo da kod pojedinih galaksija, kao što je slučaj sa NGC 2366, računanje polja brzina ključno određuje dobijenu krivu rotacije kao i da su potrebne dodatne korekcije za izražena nekružna kretanja gasa u disku.



Slika 3.27: NGC 2366: Rotacione krive izvedene za dominantno rotaciono polje brzina (plave zvezdice),  $h_3$  polje brzina (narandžasta linija) i iz polja srednjih brzina otežanih intenzitetom (tzv. mapa prvog momenta, crvena linija).

## Rotacione krive

Rotacione krive izvedene su uz pomoć softvera GIPSY i njegovog paketa `rotcur`. GIPSY je dizajniran za obradu radio-podataka sa WSRT teleskopa (*Westbrooke Synthesis Radio Telescope*), i to upravo za posmatranja neutralnog vodonika. Softver je i istorijski korišćen za sličnu analizu HI posmatranja, pa su i podaci iz THINGS pregleda u odgovarajućem 3D formatu. Većina ovog softvera napisana je u programskom jeziku C, što ga i danas, skoro 40 godina od nastanka, čini konkurentnim u pogledu brzine računanja. Skorašnja integracija sa modernim paketima pisanim u jeziku PYTHON poboljšava i jednostavnost instalacije i korišćenja, mada i dalje ostaje dosta mesta za napredak.

Fitovanje iskošenih/uvrnutih/nagnutih prstenova podrazumeva da posmatrani projektovani disk galaksije bude podeljen u niz koncentričnih eliptičnih prstenova, okarakterisanih radijusom, inklinacijom, pozicionim uglom, sistemskom brzinom ( $V_{\text{sys}}$ ), rotacionom brzinom ( $V_c$ ), i položajem centra  $(x_0, y_0)$ . GIPSY paket `rotcur` varira ove parametre koji opisuju svaki dvodimenzionalni eliptični prsten koristeći metodu najmanjih kvadrata da fituje sledeći izraz:

$$V(x, y) = V_{\text{sys}} + V_c(r) \sin i \cos \theta + (V_{\text{exp}}), \quad (3.5)$$

dok se ne dostigne konvergencija. Fazni ugao  $\theta$  meri se u koordinatnom sistemu galaksije od dela velike ose koji se više udaljava od nas (kao npr. u [Begeman, 1987](#)). Uticaj projekcije manji je na tačke koje su bliže velikoj osi galaksije, tako da koristimo funkciju otežanu sa  $\cos \theta$  za fit.  $V_{\text{exp}}$  označava brzinu ekspanzije, širenja, koju smo u proceduri fitovanja uvek izjednačavali sa nulom, nakon što smo proverili da se time ne menja  $V_c$  značajno, bar za naš uzorak.

Zarad konzistencije (i jednostavnosti) svi početni parametri uzeti su iz baze *HyperLeda*, sa početnom vrednošću za centar  $(0, 0)$  (to znači da je vrednost za centar iščitana iz zaglavlja slike, eng. *header*). Opet prateći proceduru testiranu u [Jovanović \(2017\)](#), a koja se bazira na [de Blok et al. \(2008\)](#), puštamo `rotcur` nekoliko puta da bismo osim rotacione brzine bolje odredili i druge parametre, npr. sistemsku brzinu, poziciju centra, pozicioni ugao i inklinaciju. Svi ovi parametri su

Tabela 3.4: Širina iskošenog prstena kojim se opisuje polje brzine  $\Delta R$  (bliska rezoluciji posmatranja, rezolucija rezultujuće rotacione krive) data je u obe jedinice i samim time predstavlja konverziju iz kiloparseka u lučne sekunde. Globalne vrednosti za sistemsku brzinu ( $V_{\text{sys}}$ ), pozicioni ugao ( $PA$ ) i inklinaciju ( $i$ ), sračunate su koristeći paket GIPSY i rutinu `rotcur`.

ID galaksije	$\Delta R$ arcsec	$\Delta R$ kpc	$V_{\text{sys}}$ [km s <sup>-1</sup> ]	$PA$ [°]	$i$ [°]
NGC 925	5	119	548.6	285.7	59.6
NGC 2366	6	370	102.5	40.4	62.0
NGC 2403	4	259	132.7	123.9	62.1
NGC 2841	5	71	635.0	154.5	71.9
NGC 2903	5	110	556.3	204.3	67.4
NGC 2976	5	284	1.1	335	64.0
NGC 3031	6	343	-39.1	329.9	59.9
NGC 3198	6	93	661.1	215.4	72.6
IC 2574	6	318	50.2	55.7	53
NGC 3351	5	98	778.6	191.6	42.7
NGC 3521	5	154	803.1	339.8	72.0
NGC 3621	5	78	728.2	346.7	66.7
NGC 3627	3	69	707.8	173.2	61.4
NGC 4736	5	225	307.6	295.5	41.1
DDO 154	5	255	375.5	225.5	65
NGC 4826	5	194	410	121.6	65.7
NGC 5055	5	115	496.5	100.9	60
NGC 6946	3	105	42.1	241.3	32.0
NGC 7331	6	88	817.5	168.8	76.0
NGC 7793	6	344	227.2	291.6	51.9

ostavljeni kao slobodni pri prvom fitovanju sa `rotcur`. Lučno rastojanje na kome uzorkujemo (rastojanje između dve uzastopne koncentrične elipse) je 3 do 6 lučnih sekundi, što je blisko rezoluciji korišćenih radio-posmatranja. Detalji su dati u tabeli 3.1.

Nakon prvog prolaska `rotcur` sa svim parametrima fita kao slobodnim prvo analiziramo ponašanje  $x$  i  $y$  koordinate centra duž radijusa fitovanih prstenova. Iz ovih profila dobijenih sa `rotcur` izvodili smo najbolji kinematički centar. Kao što je već napomenuto, autori [Trachternach et al. \(2008\)](#) su se veoma detaljno bavili uporednim određivanjem centara za isti uzorak galaksija, i to iz fotometrije na  $3.6 \mu\text{m}$ , radio-posmatranja i takođe kinematički koristeći `rotcur` paket. Ovako određene koordinate centra se mogu međusobno razlikovati, a mogu se znatno razlikovati od



centra određenog iz vizuelnih posmatranja. Rezultati naše kinematičke analize bili su bliski najboljem centru iz Trachternach et al. (2008). Kada je postojala razlika testirali smo simetričnost rotacionih krivih dobijenih sa ova dva seta vrednosti koordinata centra. To se postiže tako što se izvodi rotaciona kriva za različite strane galaksije (uz fiksiran centar ovoga puta), posmatranjem tzv.  $V - r$  dijagrama. Polovina koja se u srednjem kreće brzinom većom od sistemske tj. većom brzinom se udaljava od nas (eng. *receding*) i polovina koja se manjom brzinom udaljava ili nam se čak u nekim slučajevima približava (eng. *approaching*) bi trebalo da budu donekle simetrične. Naravno, lokalni efekti kao što su usmerena kretanja, uvrtnja i slično, smanjuju simetričnost rotacione krive definisane za različite delove galaksije. Ipak, može se i vizuelnom inspekcijom i računanjem razlike između dve rotacione krive zaključiti o efektima koje proizvodi različit izbor centra. Kao što je i očekivano izbor između ovako određena dva centra ili nije imao značajan uticaj na simetriju ili je centar određen u Trachternach et al. (2008) bio nešto bolji. Zato je za sve galaksije gde je bilo dostupnih podataka centar preuzet iz Trachternach et al. (2008). Za galaksiju NGC 3351 položaj centra korišćen za poređenje preuzet je iz kataloga 2MASS<sup>15</sup> (*Two Micron All Sky Survey*, Jarrett et al., 2003), ali smo za finalnu vrednost koristili kinematički centar dobijen sa *rotcur* procedurom u ovom radu. Centar određen u okviru 2MASS kataloga (posmatranja u bliskoj infracrvenoj oblasti na 1 do 2  $\mu\text{m}$ ) je i inače uvek korišćen kao početna i kontrolna vrednost u proceduri fitovanja centra. Postoje galaksije, kao što je na primer NGC 5055 (detaljna analiza dostupna u Jovanović, 2017), kod kojih je moguće uočiti dve odvojene (disktinktno) oblasti sa različitim centrom (u ovom slučaju i sistemskom brzinom). Ovo je argument za kinematičko razdvajanje (dekuplovanje) spoljašnjih delova od centralnih. U okviru Jovanović (2017) centar NGC 5055 je pomeran na različite vrednosti, u skladu sa analizom iz Battaglia et al. (2006), što je rezultovalo poboljšanjem simetrije ali bez vidljivih efekata na druge parametre i ukupnu rotacionu krivu. Iz tog razloga kao i zbog spekulativne prirode argumenata za promenljiv centar galaksije, u ovom radu centar je svuda fiksiran na jednu vrednost. Usvojene koordinate za poziciju centra navedene su u tabeli 3.1.

---

<sup>15</sup>Dostupan na <https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/2mass.html>.

Sa ovako određenim i fiksiranim vrednostima za  $(\alpha, \delta)$  centra drugi put puštamo proceduru fitovanje sa `rotcur`. Analiza izlaznih vrednosti parametara iz ove iteracije ima za cilj bolje određivanje sistemske brzine objekta. To je brzina kojom se određena galaksija kreće u odnosu na nas, tj. Sunčev sistem. Pošto galaksija nije kompaktan objekat ne postoji jedna tačna vrednost njene heliocentrične brzine. Cilj je da vrednost sistemske brzine bude što reprezentativnija za celokupnu galaksiju, tj. potrebno je „očistiti” je od uticaja kretanja koja nisu sistemska i karakterišu samo određene delove galaksije. Kao što smo već pomenuli u slučaju analize koordinata centra, i prilikom analize radijalne raspodele  $V_{\text{sys}}$  kod nekih objekata primećeno je moguće kinematičko odvajanje oblasti sa različitom dobro definisanom  $V_{\text{sys}}$ . U slučaju pomenute galaksije NGC 5055 izabrane su dve vrednosti koje opisuju sistemska brzinu u dve izražene oblasti (oslanjajući se na analizu u [Jovanović, 2017](#)), dok je kod svih ostalih galaksija izabrana samo jedna vrednost koja najbolje opisuje sistemska brzinu. Da bismo dobili bolji „osećaj” o tome koja vrednost najbolje reprezentuje radijalnu raspodelu sistemske brzine poredili smo srednju vrednost  $V_{\text{sys}}$  u celoj oblasti sa vrednošću u centralnim delovima, kao i sa srednjom vrednošću u oblastima koje vizuelnom inspekcijom deluju kao stabilne, a u nekim slučajevima određivali smo i vrednost  $V_{\text{sys}}$  iz 20 % i 50 % nivoa raspodele. Ne postoji jedna univerzalna procedura koju smo primenili u određivanju  $V_{\text{sys}}$  već smo se od slučaja do slučaja odlučivali koja od vrednosti najbolje opisuje na prvom mestu kretanje centra galaksije, kao i veće delove galaksije i one koje smatramo stabilnijim. U najvećem broju slučajeva ove vrednosti nisu se značajno razlikovale, tj. razlike su bile unutar  $1\sigma$  od izabrane vrednosti. Usvojene vrednosti  $V_{\text{sys}}$  su navedene u tabeli 3.4. Sistemska brzina je fiksirana u daljoj analizi na usvojene vrednosti.

Najbitniji i najosetljiviji parametri u proceduri izvođenja finalne rotacione krive su pozicioni ugao i inklinacija. Nakon fiksiranja  $V_{\text{sys}}$  (u tom prolasku kroz `rotcur` proceduru i dalje su fiksirane koordinate centra i  $V_{\text{exp}}$  koja je uvek = 0), fokus je na boljem opisu upravo pozicionog ugla i inklinacije, i to kroz inspekciju njihove radijalne raspodele. Kod ovih parametara smo se, prateći opet proceduru iz [de Blok et al. \(2008\)](#) i testiranu od autora u okviru [Jovanović \(2017\)](#), odlučili da dopustimo radijalne promene. Dopuštanje određene varijacije inklinacije duž radijusa diska

uvek donosi podizanje izvedene rotacione brzine u odnosu na izvođenje sa fiksnom inklinacijom (videti sliku 2.7 i Courteau et al., 2014). Radijalni profili izvedeni su najčešće tako da prate uočene globalne trendove ali da nema velikih varijacija, osim ako za to ne postoje posmatrački dokazi kao što su detektovano prisustvo uvrtnja i drugih značajnih distorzija diska galaksije. Inicijalni radijalni profili su prošli kroz proceduru usrednjavanja konvolucionim težinskim kernelima koje zovemo smutting (eng. *smoothing*) filteri. U našem slučaju korišćen je kernel širine 3 ili 5. Time smo očistili manje varijacije u radijalnim profilima i zagladili celokupan profil. Nakon toga smo po potrebi delove profila fitovali jednostavnim linearnim, kvadratnim i kubnim polinomima, a spoljašnje delove galaksije bismo često fiksirali na poslednju pouzdano određenu vrednost. Neki autori (*McGaugh* u privatnoj komunikaciji) smatraju da nema osnova za dopuštanje da ugao pod kojim vidimo galaksiju tj. inklinacija varira od jednog do drugog eliptičnog prstena u tolikoj meri. S druge strane jasno je da postoje fizički procesi kao što su uvrtnja i drugi deformiteti diska koji dovode do promene u inklinaciji u spoljašnjim delovima galaksije. Očekujemo da bi interakcije sa drugim objektima, procesi formiranja zvezda, udarni talasi (eng. *shocks*) i slično, naročito uticali na gasnu komponentu i uzrokovali promene u pozicionom uglu i inklinaciji diska. Jedan od pokazatelja inklinacije bila je i vrednost istog parametra za zvezdani disk, međutim, kao što smo naveli u tabeli 3.3, mogu postojati značajne razlike u orijentaciji gasnog i zvezdanog diska. Drugi orijentir bilo je u literaturi zabeleženo prisustvo uvrtnja kroz posmatranja na različitim talasnim dužinama, a najbitnije je bilo posmatranje dve strane rotacione krive. Slično se uočava i posmatranjem tzv.  $r - V$  dijagrama i njegove simetričnosti - tu se mogu uočiti oblasti koje su problematične i odvojiti lokalni efekti od globalnih. Procedura biranja završnog profila je bila subjektivna, i oslanjala se na vizuelnu inspekciju. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju prikazani su na slikama 3.29 - 3.48 na drugom i trećem panelu, respektivno.

Nakon izbora radijalnog profila koji adekvatno opisuje pozicioni ugao i inklinaciju, i ovi parametri su fiksirani, samo ne na konstantnu vrednost već na niz vrednosti koje odgovaraju različitim uglovnim i fizičkim radijusima duž velike ose galaksije.

U poslednjem fitovanju svi parametri fiksirani su na vrednosti dobijene u pret-

hodnim prolazima rotcur na način koji smo opisali iznad:  $(x_0, y_0)$  i  $V_{\text{sys}}$  na konstantne vrednosti, a pozicioni ugao i inklinacija na niz vrednosti. Tako dobijamo rotacionu krivu sa najmanje varijacija.

Pri računanju neodređenosti (greške) rotacione brzine gasa na posmatranim radijusima rukovodili smo se konzervativnom procenom korišćenom u [de Blok et al. \(2008\)](#), koju smo i sami koristili u [Jovanović \(2017\)](#). Naime, za neodređenost  $V_{\text{rot}}$  na zadatom radijusu nije dovoljno uzeti samo disperziju brzina duž tog iskošenog eliptičnog prstena, što je greška koju dobijamo u proceduri fitovanja ( $\sigma_V$ ). Na tu vrednost potrebno je dodati i neodređenost koja potiče od razlike između rotacionih brzina dve strane galaksije, one koja se „udaljava” ( $V_{\text{rec}}$ ) i one koja nam se „približava” ( $V_{\text{app}}$ ), koje smo već definisali iznad. Izraz za neodređenost koja potiče od asimetrije dat je oslanjajući se na procene iz [Swaters \(1999\)](#) kao:  $1/4 \times (V_{\text{app}} - V_{\text{rec}})$ . Pri izvođenju rotacionih krivih  $V_{\text{app}}$  i  $V_{\text{rec}}$ , parametri pozicioni ugao i inklinacija ostavljeni su slobodni.

### 3.4 Pregled galaksija iz uzorka

Na slikama [3.29 - 3.48](#) prikazane su izvedene rotacione krive za sve galaksije iz uzorka, zajedno sa neodređenostima (prvi panel na odgovarajućim slikama). Na drugom i trećem panelu (takođe na slikama [3.29 - 3.48](#)) prikazani su korišćeni radijalni profili za pozicioni ugao i inklinaciju, koji jako utiču na izvedene krive. Ovako dobijene rotacione krive sa neodređenostima korišćene su u dinamičkim modelima predstavljenim u Poglavlju [4](#).

U prethodnom potpoglavlju ([3.3.2](#)) detaljno je opisana procedura izvođenja rotacionih krivih kroz iterativno fitovanje i fiksiranje parametara koji figuriraju u izrazu koji fitujemo, a čije bliže poznavanje ima i fizički značaj. Koordinate centra smo u skoro svim slučajevima preuzeli iz [Trachternach et al. \(2008\)](#), i istovremeno ih poredili sa samostalno dobijenom vrednošću za kinematički centar. Nakon toga određujemo sistemsku brzinu, i to jednu vrednost, sa par izuzetaka (NGC 3521 i NGC 5055). Na kraju, najviše pažnje posvećeno je izvođenju profila za pozicioni ugao i inklinaciju jer, kao što smo objasnili, tu postoji najveća neodređenost a pri-

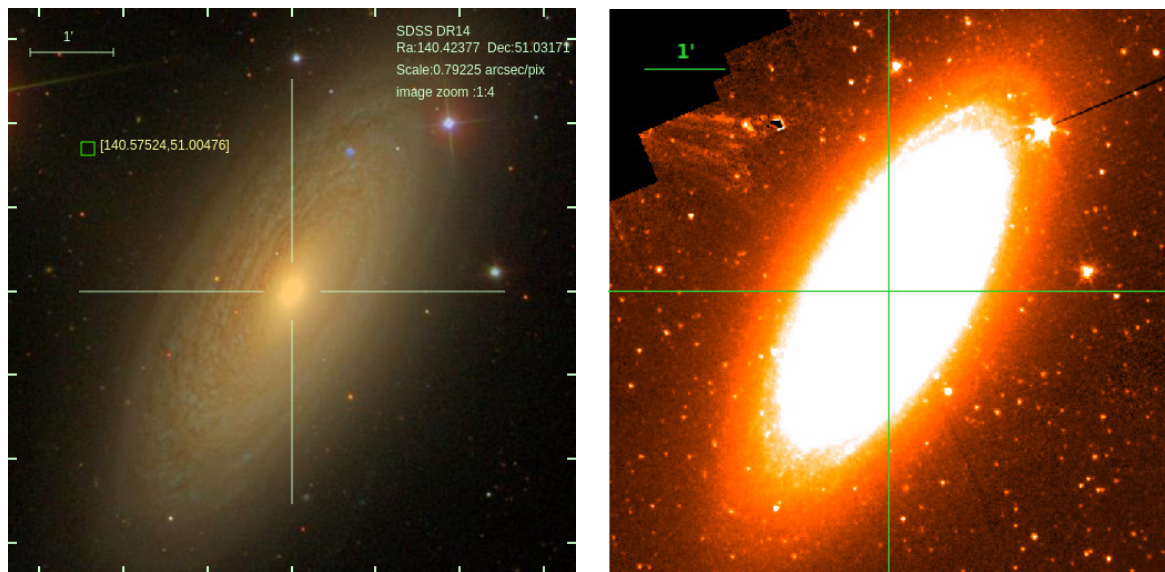
tom su ovi parametri značajno spregnuti sa rotacionom brzinom. Iz tog razloga su na svakoj od slika 3.29 - 3.48 pored rotacione krive prikazani i profili pozicionog ugla i inklinacije.

U nastavku su opisani detalji opisane procedure prilikom primene na svaki od pojedinačnih objekata. Procedura je daleko od automatizovane, iako postoje i takvi naponi, i zahtevala je veliki upliv subjektivnog odlučivanja od strane autora. Recimo, inklinaciji je „dopušteno” da značajno varira sa radijusom samo u slučajevima gde je na slikama vidljiv efekat „uvrtanja” gasnog diska.

U ovom poglavlju je svaka od galaksija iz uzorka detaljnije opisana, uključujući korišćene posmatračke podatke, morfologiju i detalje izvođenja parametara rotacione krive. Opisano je dobijanje i usvojene vrednosti za sistemsku brzinu, kao i globalne vrednosti pozicionog ugla i inklinacije. Kao slikovit primer prikazani su snimci galaksije NGC 925 u vidljivom delu spektra (koji nismo koristili) zajedno sa korišćenim snimcima na  $3.6 \mu\text{m}$  (3.28). Takođe, za svaku galaksiju je predstavljen grafikon sa izvedenom rotacionom krivom i radijalnim profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (3.29-3.48).

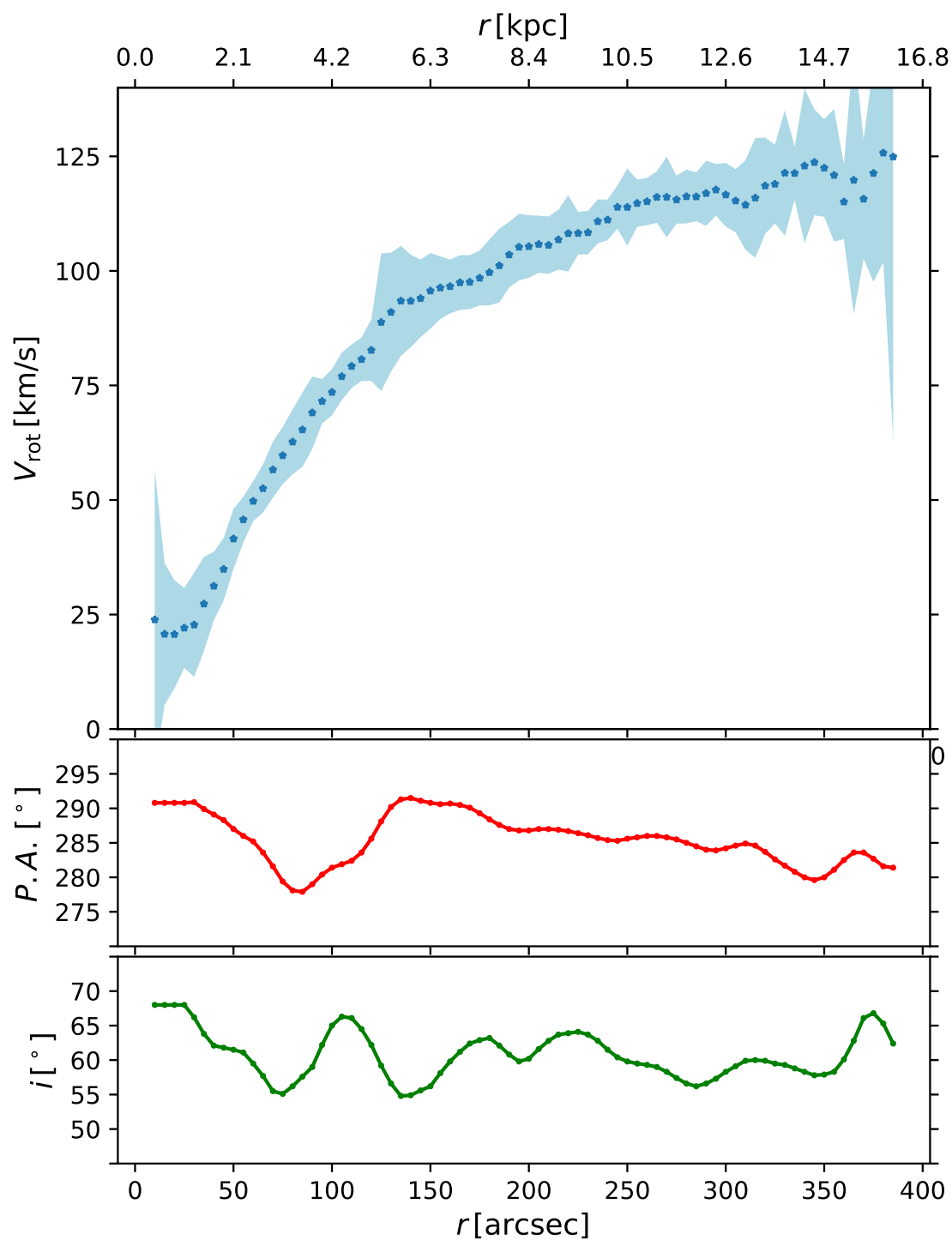
**NGC 925** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa sa slabo definisanom prečagom, ali vidljivom na slikama na  $3.6 \mu\text{m}$ ; deo je fotometrijskog SHA uzorka, što znači da su podaci nešto slabijeg kvaliteta. Profil površinskog sjaja koji smo dobili sa *Level2* slike proteže se do oko 150 lučnih sekundi (odgovara 6.3 kpc sa usvojenom daljinom), ali druge slike iz istog pregleda (npr. *Super Mosaic*) su dublje i daju sjaj do skoro 400 lučnih sekundi. Za oba snimka potvrdili smo dobro slaganje sa GALFIT modelom. Sersic funkcija je najbolje modelovala zvezdanu komponentu, ali se prilikom daljeg dinamičkog modelovanja pokazala kao loš izbor. Odlučili smo se za model eksponencijalnog diska (slika 3.3), čije slaganje sa posmatranjima je marginalno lošije.

Centar je fiksiran na najbolji kinematički *rotcur* centar iz [Trachternach et al. \(2008\)](#). Profil sistemske brzine je regularan, osim u centralnim delovima, gde su prisutne malo više vrednosti. Za globalnu vrednost  $V_{\text{sys}}$  uzeli smo srednju vrednost u oblasti od 165 do 300 lučnih sekundi, gde smatramo da je dobro definisana. Naša



Slika 3.28: NGC 2841: Levo - Kompozitna slika iz SDSS pretrage, Desno - slika iz S4G pregleda na  $3.6 \mu\text{m}$  korišćena u ovom radu.

vrednost od  $548.6 \pm 5.3 \text{ km s}^{-1}$  malo je viša od vrednosti iz [de Blok et al. \(2008\)](#)  $546.3 \text{ km s}^{-1}$ , i malo niža od prethodno izvedenih u literaturi, za šta su uzrok drugačije koordinate centra. Sve razlike su duboko unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Pozicioni ugao i inklinacija ne pokazuju velike promene, osim manje neregularnosti kod oba parametra u oblasti  $3-5 \text{ kpc}$  galaktocentričnih radijusa. Usvojeni radijalni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici [3.29](#), na drugom i trećem panelu, respektivno) veoma su bliski njihovim profilima iz iteracije fitovanja gde su ovi parametri ostavljeni slobodni. [de Blok et al. \(2008\)](#) uočili su slabo uvrtnanje na osnovu blagog pada inklinacije, ali mi nismo zabeležili ovakav trend. Globalna vrednost za pozicioni ugao  $P.A. = 285^{\circ}7 \pm 3^{\circ}5$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz oblasti gde smo smatrali da je najregularnija, a to je, slično kao i kod  $V_{\text{sys}}$ , od 180 do 310 lučnih sekundi. Za inklinaciju smo uzeli srednju vrednost unutar oblasti između 250 i 380 lučnih sekundi,  $i = 59^{\circ}6 \pm 4^{\circ}4$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre, dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici [3.29](#) na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli [3.4](#).



Slika 3.29: NGC 925: finalna rotaciona kriva sa neodređenostima izvedena koristeći  $h_3$  polje brzina (gornji panel - plavo); usvojeni profili za pozicioni ugao (srednji panel - crveno) i inklinaciju (donji panel - zeleno).

**NGC 2366** Ova galaksija je verovatno najproblematičnija u celom uzorku. U pitanju je nepravilna patuljsta galaksija jako slabog sjaja, koja je deo manje kva-

litetnog SHA uzorka. Njen površinski sjaj modelovan je eksponencijalnim diskom, ali je relativno loše opisan ovim modelom u odnosu na ostatak uzorka, naročito u centralnim delovima galaksije. I u ovom slučaju *Level2* slike prostiru se tek nešto dalje od 150 lučnih sekundi, ali dovoljno da zaključimo da površinski sjaj u spoljašnjim delovima može da se zadovoljavajuće opiše eksponencijalnim diskom, što i jeste teorijska i empirijska pretpostavka za ovaj tip. Takođe, preliminarnom analizom dubljih slika (pomenute *Super Mosaic* slike), vidimo da naš model (na slici 3.4, parametri u tabeli 3.2) dobro opisuje posmatrani površinski sjaj.

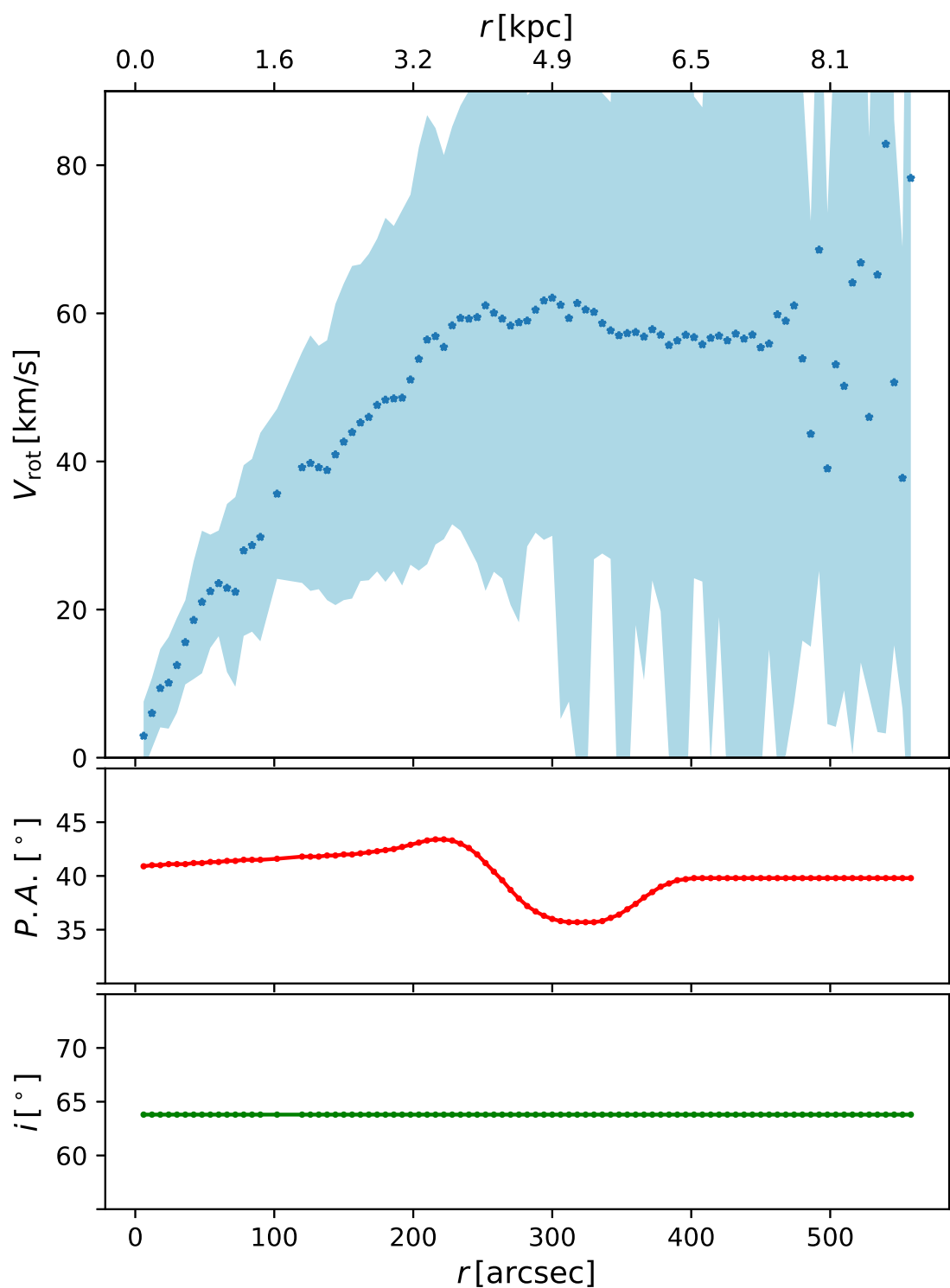
Kod ove galaksije prisutna su druga značajna kretanja pored rotacije i sistemskog kretanja, pa je za dobijanje rotacione krive korišćeno izvedeno dominantno polje brzina (detalji u potpoglavlju 3.3.2). Zbog postojanja dodatne komponente koja proširuje profil, teže je fitovati izabranu funkciju, naročito u slučaju dve komponente. Samim tim centar linije je lošije procenjen. Dalje, koristeći kriterijume opisane u potpoglavlju 2.2.3 relativno manje fitovanih centara je uključeno u formiranje polja brzina, tj. polje je manje popunjeno i fit na odgovarajućim elipsama urađen je na manjem broju tačaka. Time je svaki fit manje pouzdan, tj. prisutno je više nepouzdanih vrednosti. Uprkos manama, ovakvo polje brzina je u stanju da razdvoji različite komponente i izdvoji rotaciju. Na njemu se elipse fituju na uobičajen način, odakle se izvode parametri koristeći `rotcur`. Centar je fiksiran na najbolji kinematički `rotcur` centar iz [Trachternach et al. \(2008\)](#), čije koordinate nisu daleko od prosečne vrednosti koje smo mi dobili fitujući sa `rotcur` procedurom. Profil sistemske brzine je regularan do  $\sim 360$  lučnih sekundi, a zatim opada. Za globalnu vrednost uzeli smo srednju vrednost u regularnoj oblasti i ona iznosi  $102.5 \pm 6.0 \text{ km s}^{-1}$ , što je malo niže od vrednosti iz [Oh et al. \(2008\)](#), koja iznosi  $104.0 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike su unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Pozicioni ugao i inklinacija pokazuju veliko rasejanje koje u ovom slučaju ne prati fizičke promene u parametrima koje smo posmatrali na snimcima ili našli zabeležene u literaturi. Usvojeni profili grubo prate slobodne vrednosti za pozicioni ugao i inklinaciju do 200 lučnih sekundi, a nadalje su fiksirani na vrednosti na tom radijusu. Predstavljeni su na slici 3.30 na drugom i trećem panelu, respektivno. Globalna vrednost za pozicioni ugao,  $P.A. = 40^{\circ}4 \pm 4^{\circ}7$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz oblasti



od 180 do 540 lučnih sekundi. Za globalni profil inklinacije uzeli smo konstantnu vrednost, pa je samim tim i globalna srednja vrednost jednaka  $63.8^\circ$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.30 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 2403** Klasifikovana je kao spiralna kasnog tipa sa uočljivom prečagom i spiralnim granama koje su vidljive i na  $3.6 \mu\text{m}$ . Pripada M81 grupi galaksija. Deo je fotometrijskog SHA uzorka. Profil površinskog sjaja koji smo dobili proteže se do skoro 500 lučnih sekundi (odgovara 7.7 kpc sa usvojenom daljinom). Statistika površinskog sjaja po elipsama dobijena sa procedurom `ellipse` dobro se slaže sa modelom eksponencijalnog diska dobijenog sa programom `GALFIT` (slika 3.5). Greške fitovanja ovom procedurom navedene u tabeli nisu realistične i posledica su nedovoljno maskiranih objekata (bliže objašnjenje u potpoglavlju 3.2, delu koji se tiče SHA poduzorka; obeležene su sa "\*" u tabeli 3.2).

Polje brzina je regularno, na šta ukazuje velika simetričnost rotacionih krivih za dve strane galaksije, a mala odstupanja u inklinaciji posledica su usmerenih kretanja duž spiralnih grana (de Blok et al., 2008). Centar je fiksiran na najbolji kinematički `rotcur` centar iz Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine je dobro definisan. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost spoljašnje oblasti od 290 do 740 lučnih sekundi od  $132.7 \pm 2.3 \text{ km s}^{-1}$ , s tim što je i centralna vrednost veoma bliska izabranoj. Naša vrednost  $V_{\text{sys}}$  skoro je identična kao u de Blok et al. (2008)  $132.8 \text{ km s}^{-1}$ , a razlike su duboko unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Finalni usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.31 na drugom i trećem panelu respektivno) veoma su bliski profilima koje dobijamo u prolazu kroz proceduru fitovanja sa slobodnim parametrima. Naročito pozicioni ugao ne pokazuje velike promene. Globalna vrednost pozicionog ugla,  $P.A. = 123^\circ 9 \pm 2^\circ 2$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti 320 do 900 lučnih sekundi. Kod inklinacije smo u finalnom profilu zadržali mala odstupanja usled kretanja duž spiralnih grana. Za inklinaciju smo uzeli srednju vrednost u oblasti do 900 lučnih

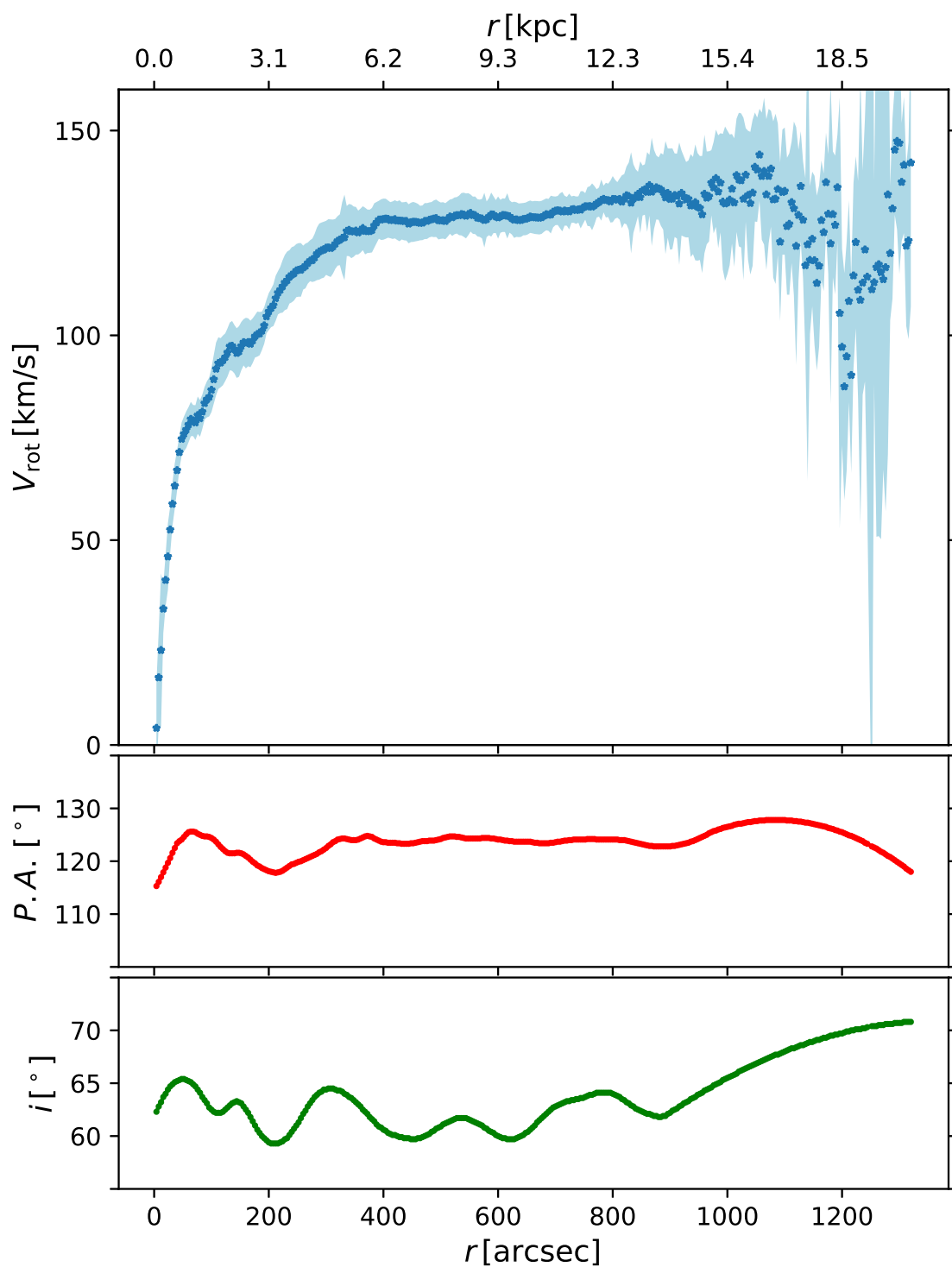


Slika 3.30: NGC 2366: finalna rotaciona kriva sa neodređenostima izvedena koristeći dominantno polje brzina (gornji panel - plavo); usvojeni profili za pozicioni ugao (srednji panel - crveno) i inklinaciju (donji panel - zeleno).

sekundi,  $i = 62^{\circ}1 \pm 1^{\circ}7$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog korišćenog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.31 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 2841** Klasifikovana je kao spiralna galaksija ranog tipa sa uočljivim centralnim ovalom, prečagom i „rupom” u HI distribuciji u centralnom delu. Deo je S4G pregleda i predmet mnoštva analiza. Mi smo se ovom galaksijom na sličan i detaljniji način bavili u radu [Samurović et al. \(2015\)](#). Profil površinskog sjaja proteže se do 400 lučnih sekundi (odgovara 28.3 kpc sa usvojenom daljinom). U ovom slučaju bilo je lako izabrati odgovarajući GALFIT model jer je morfologija galaksije ukazivala na postojanje jasno izraženog centralnog ovala, a to je ujedno bio i fit najboljeg kvaliteta (najniže  $\bar{\chi}^2$ , što nije kriterijum kojim smo se isključivo rukovodili). Usvojeni model zajedno sa 1D statistikom po elipsama iz P3 prikazan je na slici 3.6.

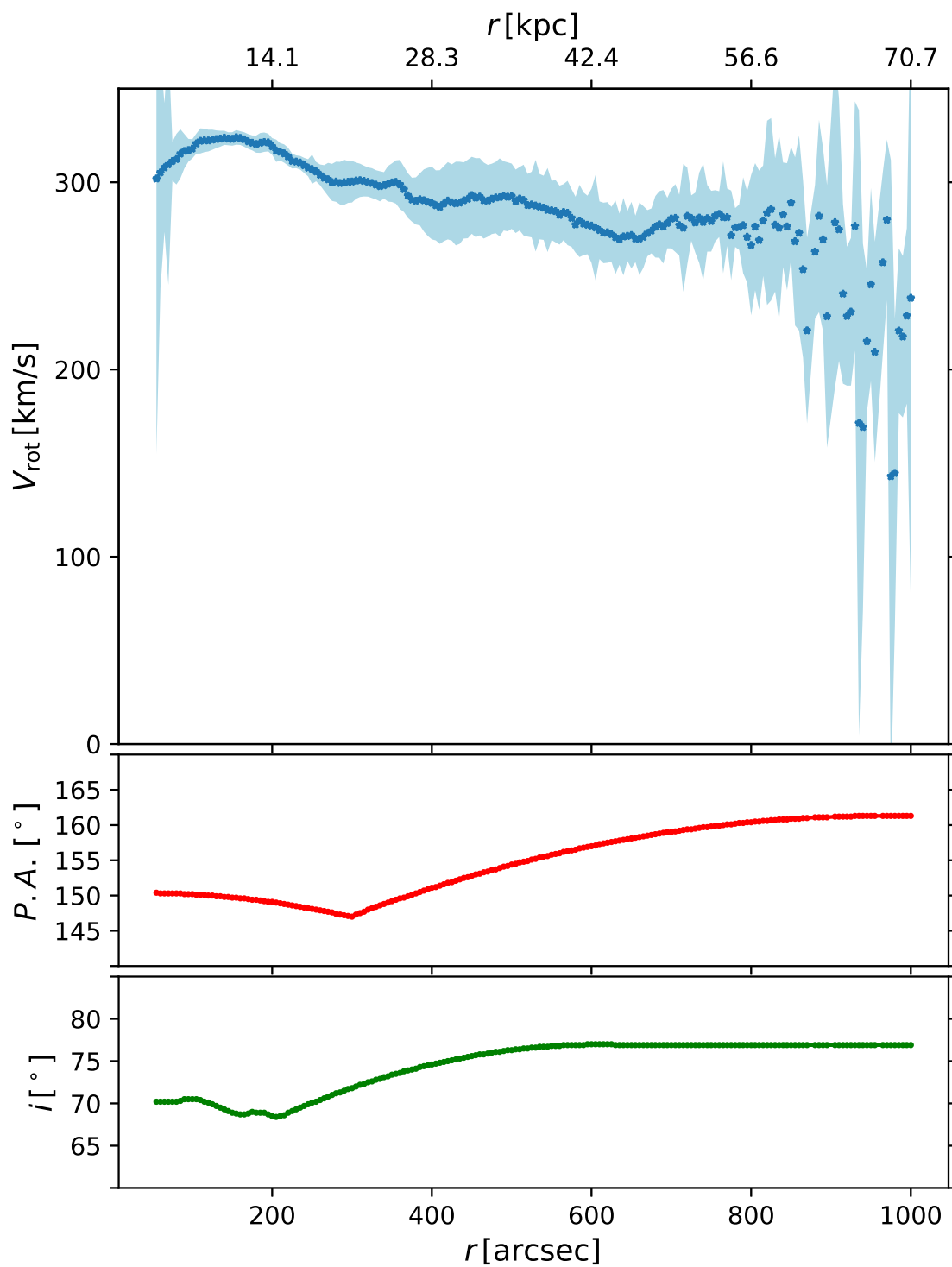
Polje brzina je regularno u unutrašnjoj oblasti, a u spoljašnjoj je jasno prisutno uvrtnje ([de Blok et al., 2008](#)). Centar je fiksiran na najbolji centar u radio-kontinuumu ([Trachternach et al., 2008](#)). Profil sistemske brzine je dobro definisan u unutrašnjem, ali su veća odstupanja prisutna u spoljašnjem delu što pripisujemo upravo uvrtnju. Za globalnu vrednost smo zato uzeli srednju vrednost unutrašnje oblasti od 30 do 310 lučnih sekundi (zahvaljujući rupi u centru) koja iznosi  $635.0 \pm 2.4 \text{ km s}^{-1}$ . To je nešto više od vrednosti iz [de Blok et al. \(2008\)](#)  $633.7 \text{ km s}^{-1}$ , sa razlikama unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Finalni usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju su skoro identični profilima gde su ovi parametri ( $P.A.$  i  $i$ ) ostavljeni slobodni, i na njima je vidljiv efekat uvrtnja. Pozicioni ugao nastavlja da raste konstantno sa povećanjem galaktocentričnog radijusa nakon 300 lučnih sekundi. Globalna vrednost za pozicioni ugao  $P.A. = 154^{\circ}5 \pm 5^{\circ}0$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila na svim fitovanim radijusima. Inklinaciju smo, gde rast takođe počinje značajnije u oblasti izvan 300 lučnih sekundi, fiksirali na poslednju pouzdano određenu vrednost u oblasti nakon 600 lučnih sekundi. Za globalnu vrednost inklinacije smo uzeli srednju vrednost u oblasti do 600 lučnih sekundi,  $i = 71^{\circ}9 \pm 3^{\circ}9$ .



Slika 3.31: NGC 2403: oznake kao na 3.29.

Neodređenosti za oba parametra uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.32 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i in-

klinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

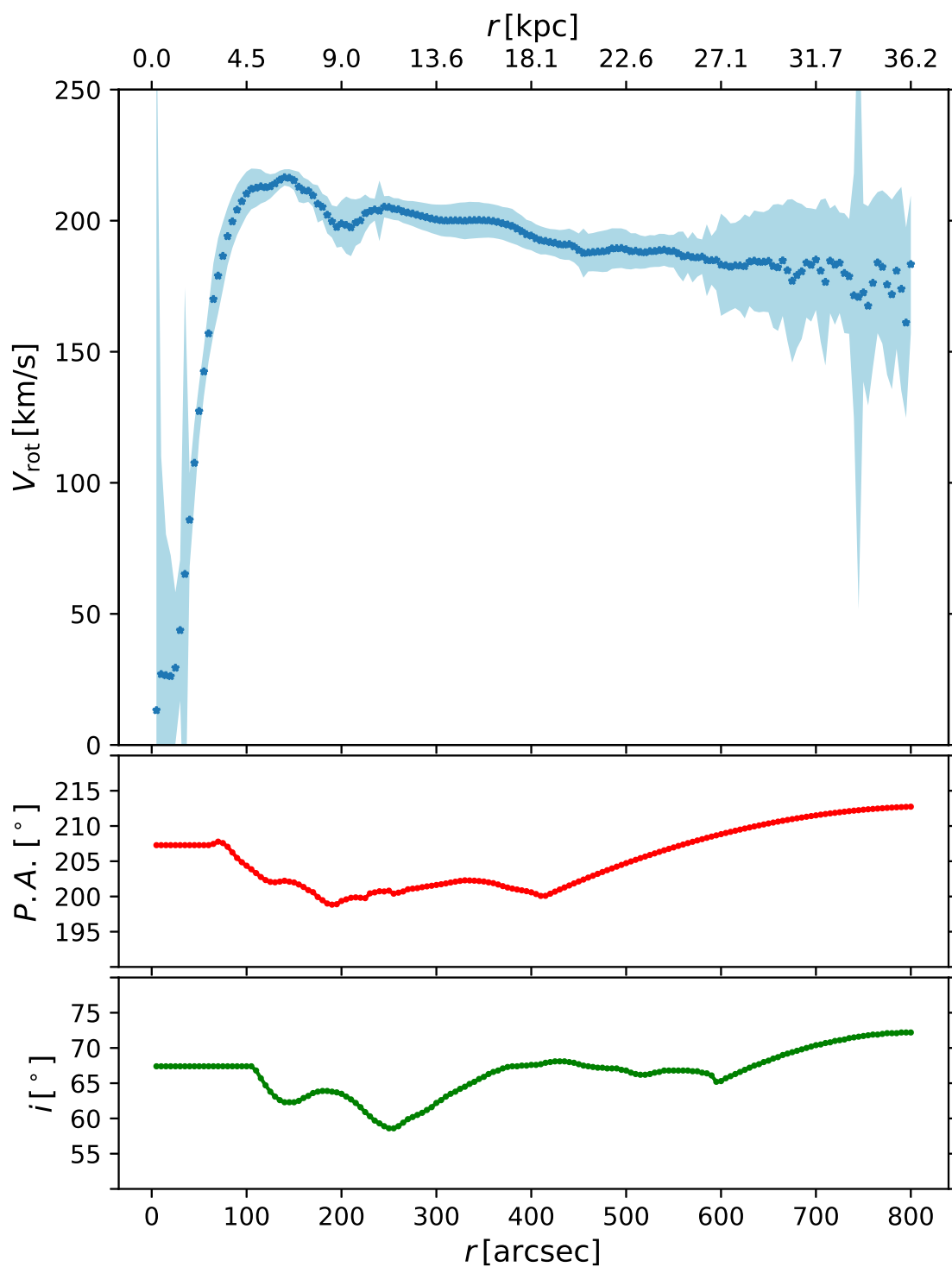


Slika 3.32: NGC 2841: oznake kao na 3.29.

**NGC 2903** Klasifikovana je kao spiralna galaksija sa uočljivom prečagom i skupljenim spiralnim granama, vidljivim i na  $3.6 \mu\text{m}$ . Deo je S4G uzorka. Profil površinskog sjaja koji smo dobili proteže se do 500 lučnih sekundi (odgovara 20.5 kpc sa usvojenom daljinom). Statistika površinskog sjaja po elipsama dobro se slaže sa GALFIT modelom eksponencijalnog diska sa malim centralnim ovalom (slika 3.7).

Polje brzina je regularno unutar 240 lučnih sekundi, što je oblast kojim dominiraju tesno skupljene spiralne grane, prečaga i prsten. U unutrašnjoj oblasti prisutne su manje promene u pozicionom uglu verovatno povezane sa usmerenim kretanjima u prečagi (de Blok et al., 2008). Spoljašnja oblast je okarakterisana diskom mnogo manje gustine i sa dve raširene spiralne grane. Centar je fiksiran na najbolji centar u radio-kontinuumu (Trachternach et al., 2008). Profil sistemske brzine pokazuje velike promene, zbog čega smo izabrali stabilnu oblast od 120 do 400 lučnih sekundi, i za globalnu vrednost smo uzeli vrednost na 98 % u ovoj oblasti, što je  $556.3 \pm 1.8 \text{ km s}^{-1}$ . Naša vrednost  $V_{\text{sys}}$  je veoma bliska vrednosti  $555.6 \text{ km s}^{-1}$ , dobijenoj u de Blok et al. (2008), sa razlikama unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.33 na drugom i trećem panelu respektivno) razlikuju se od profila dobijenih sa slobodnim parametrima u najvećoj meri u centralnim delovima. Finalni profili su interpolirani i statistički očišćeni na manjim radijusima gde je varijacija kao posledica usmerenih kretanja u prečagi i spiralnoj grani bila velika (de Blok et al., 2008). Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 204^{\circ}3 \pm 5^{\circ}3$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila do 700 lučnih sekundi. Kod inklinacije je razmatrana slična oblast, do  $\sim 800$  lučnih sekundi i rezultat je  $i = 67^{\circ}4 \pm 3^{\circ}7$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.33 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 2976** Ova galaksija klasifikovana je kao spiralna kasnog tipa bez uočljivih spiralnih grana i prečage na  $3.6 \mu\text{m}$ . Deo je S4G uzorka. Dobro definisan profil površinskog sjaja proteže se do 300 lučnih sekundi (odgovara 5.2 kpc sa usvoje-



Slika 3.33: NGC 2903: oznake kao na 3.29.

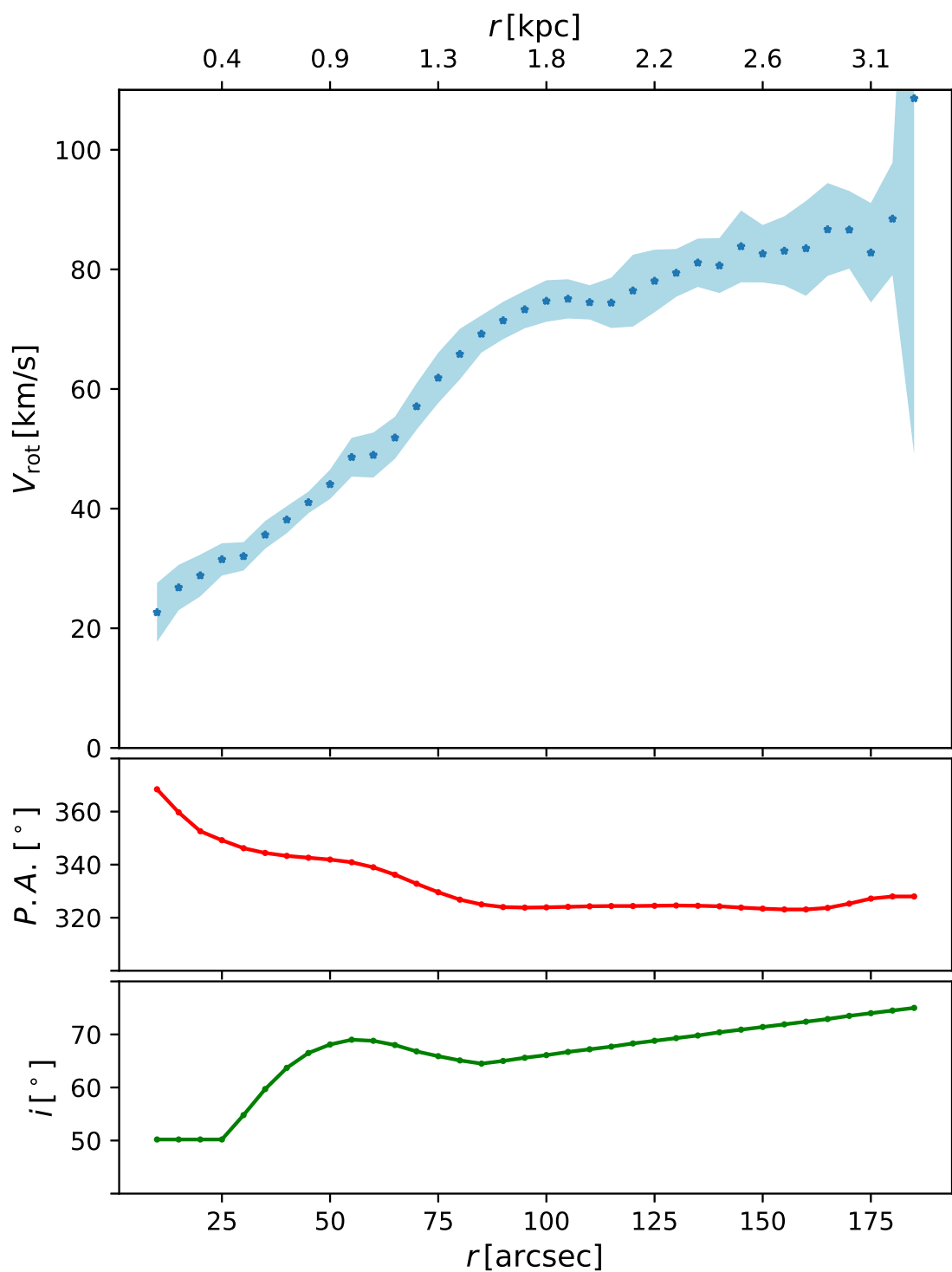
nom daljinom). Jednodimenzionalni profil površinskog sjaja (statistika po fitovanim elipsama dobijena sa procedurom `ellipse`) odstupa od `GALFIT` modela eksponencijalnog diska na radijusima od oko 50 do 100 lučnih sekundi (slika 3.8), i taj porast

u sjaju vidljiv je na slikama i na drugim talasnim dužinama (de Blok et al., 2008). Na HI mapama vidljiva su dva regiona sa povećanom gustinom koja odgovaraju oblastima sa većom stopom formiranja zvezda (de Blok et al., 2008) na krajevima diska. Eksponencijalni disk zadovoljavajuće opisuje posmatrani sjaj, i uobičajen je za opisivanje galaksija ove veličine i tipa.

Polje brzina je regularno. Centar je fiksiran na najbolji centar na  $3.6 \mu\text{m}$  definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine ne pokazuje velike varijacije, osim u samom centru. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost oblasti od 20 do 130 lučnih sekundi i ona iznosi  $1.1 \pm 1.1 \text{ km s}^{-1}$ . Naša vrednost  $V_{\text{sys}}$  ista je kao u de Blok et al. (2008), sa malim razlikama u neodređenosti. Usvojeni finalni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.34 na drugom i trećem panelu, respektivno) veoma su bliski profilima koje dobijamo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom, s tim što profil za inklinaciju pokazuje veće rasturanje. Pozicioni ugao je veći unutar radijusa od 70 lučnih sekundi, a van toga dobro definisan i konstantan. Globalna vrednost za pozicioni ugao,  $P.A. = 335^\circ \pm 12^\circ$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 150 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali prisutan blagi porast, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost na bolje definisanoj oblasti, sličnoj kao kod pozicionog ugla, do 180 lučnih sekundi,  $i = 64^\circ 0' \pm 7^\circ 8'$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.34 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 3031** Predstavlja jednu od najpoznatijih i najproučavanijih galaksija u našem uzorku. Poznata je i kao M81, i glavna je velika spiralna galaksija u istoimenoj grupi. Klasifikovana je kao spiralna galaksija ranog tipa sa jasno definisanim spiralnim granama. Deo je S4G uzorka. Profil površinskog sjaja koji smo dobili proteže se do 1000 lučnih sekundi (odgovara 17.7 kpc sa usvojenom daljinom). Kod ove galaksije mnogo bolji fit (znatno manja  $\bar{\chi}^2$  vrednost) dobija se sa dve komponente, eksponencijalnim diskom i centralnim ovalom, međutim u daljoj proceduri dina-



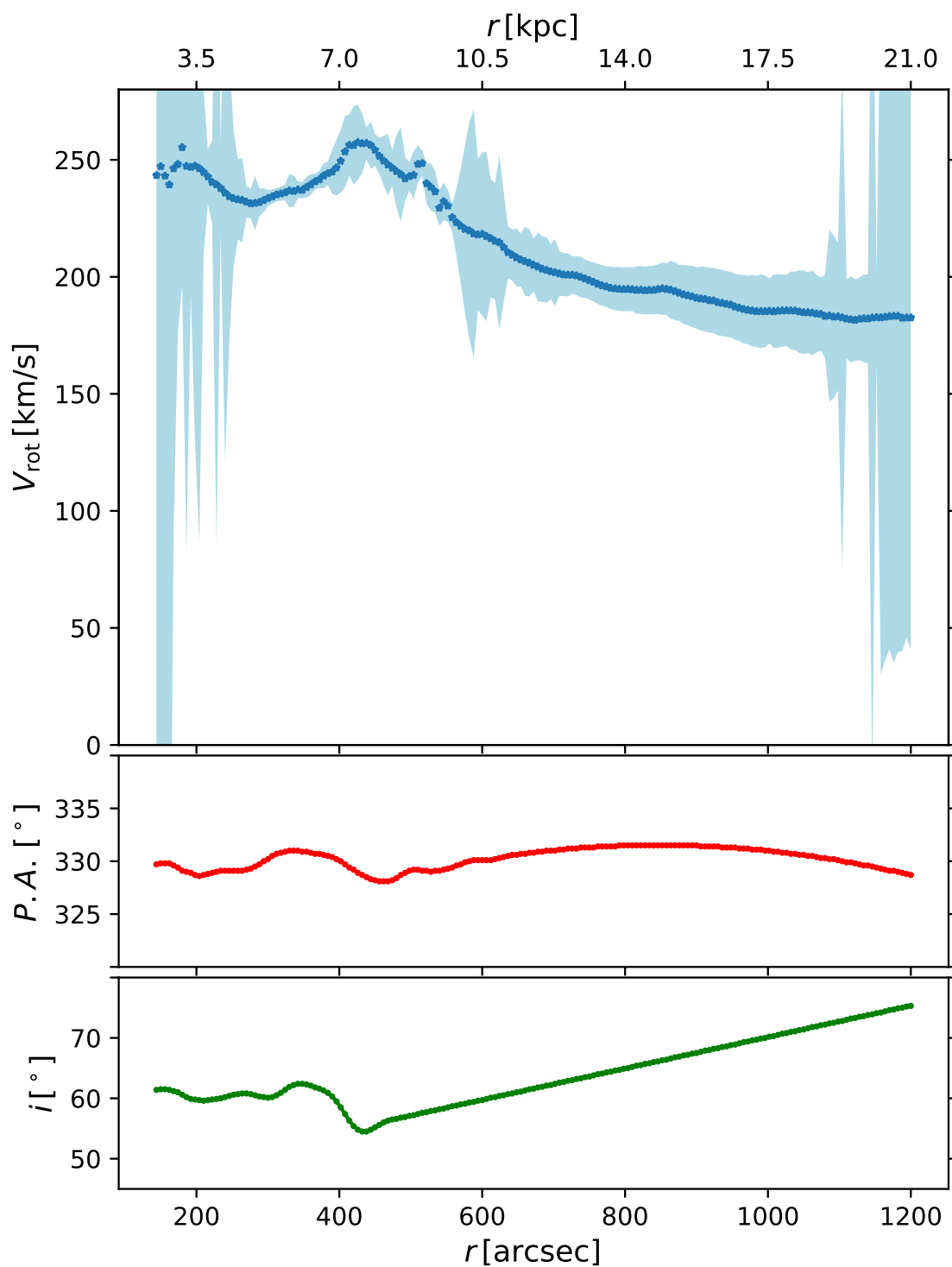


Slika 3.34: NGC 2976: oznake kao na 3.29.

mičkog modelovanja odnos masa-sjaj za centralni oval ( $M/L_{\text{bulge}}$ ) je potisnut kod modela sa slobodnim parametrima za  $M/L$ . I za model sa dve komponente našli smo zadovoljavajuće modele unutar  $3\sigma$  konture na  $\chi^2$  površi, ali pošto je dinamički model

sa jednom komponentom davao najbolji fit sa smislenim parametrima, predstavljena su oba modela zvezdane komponente. Statistika površinskog sjaja po elipsama iz P3 bolje se slaže sa GALFIT modelom eksponencijalnog diska sa centralnim ovalom (slika 3.9), a koristimo i model eksponencijalnog diska bez ovala (slika 3.10). Tro-dimenzionalna slika ove galaksije sastoji se od dve matrice, zbog njene veličine i blizine, tj. uglovne veličine na nebu.

Polje brzina pokazuje prisustvo nekružnih kretanja duž spiralnih grana, a nakon radijusa od 800 lučnih sekundi rotacija više nije dominantno kretanje već je zamenjuju plimske sile koje deluju u grupi M81 (de Blok et al., 2008). Iz tog razloga rotaciona kriva nije pouzdana nakon ovog radijusa (odgovara radijusu od 14.2 kpc), ali smo mi odlučili da prikazemo celokupnu izvedenu rotacionu krivu. Centar je fiksiran na najbolji centar iz radio-kontinuumu definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine pokazuje velike varijacije, kao što je i očekivano. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u oblasti od 255 do 675 lučnih sekundi koja iznosi od  $-39.1 \pm 2.3 \text{ km s}^{-1}$ , što je blisko centralnoj vrednosti. Naša vrednost  $V_{\text{sys}}$  slična je kao u de Blok et al. (2008),  $-39.4 \text{ km s}^{-1}$ , a razlike su unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.35 na drugom i trećem panelu respektivno) veoma su bliski profilima koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Obe veličine pokazuju globalne trendove, naglu promenu na oko 400 lučnih sekundi koja odgovara ivici dobro definisanog unutrašnjeg diska tj. pseudo-prstena, kao i značajna rasturanja u centralnoj oblasti. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 329^{\circ}9 \pm 0^{\circ}9$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 760 lučnih sekundi. Kod inklinacije smo u finalnom profilu zadržali posmatranu oštru promenu trenda na 400 lučnih sekundi, a u spoljnim delovima dopustili smo da raste kao i slobodne vrednosti. Za globalnu inklinaciju smo ipak uzeli srednju vrednost u pouzdanoj oblasti do 600 lučnih sekundi,  $i = 59^{\circ}9 \pm 2^{\circ}2$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.35 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.



Slika 3.35: NGC 3031: oznake kao na 3.29.

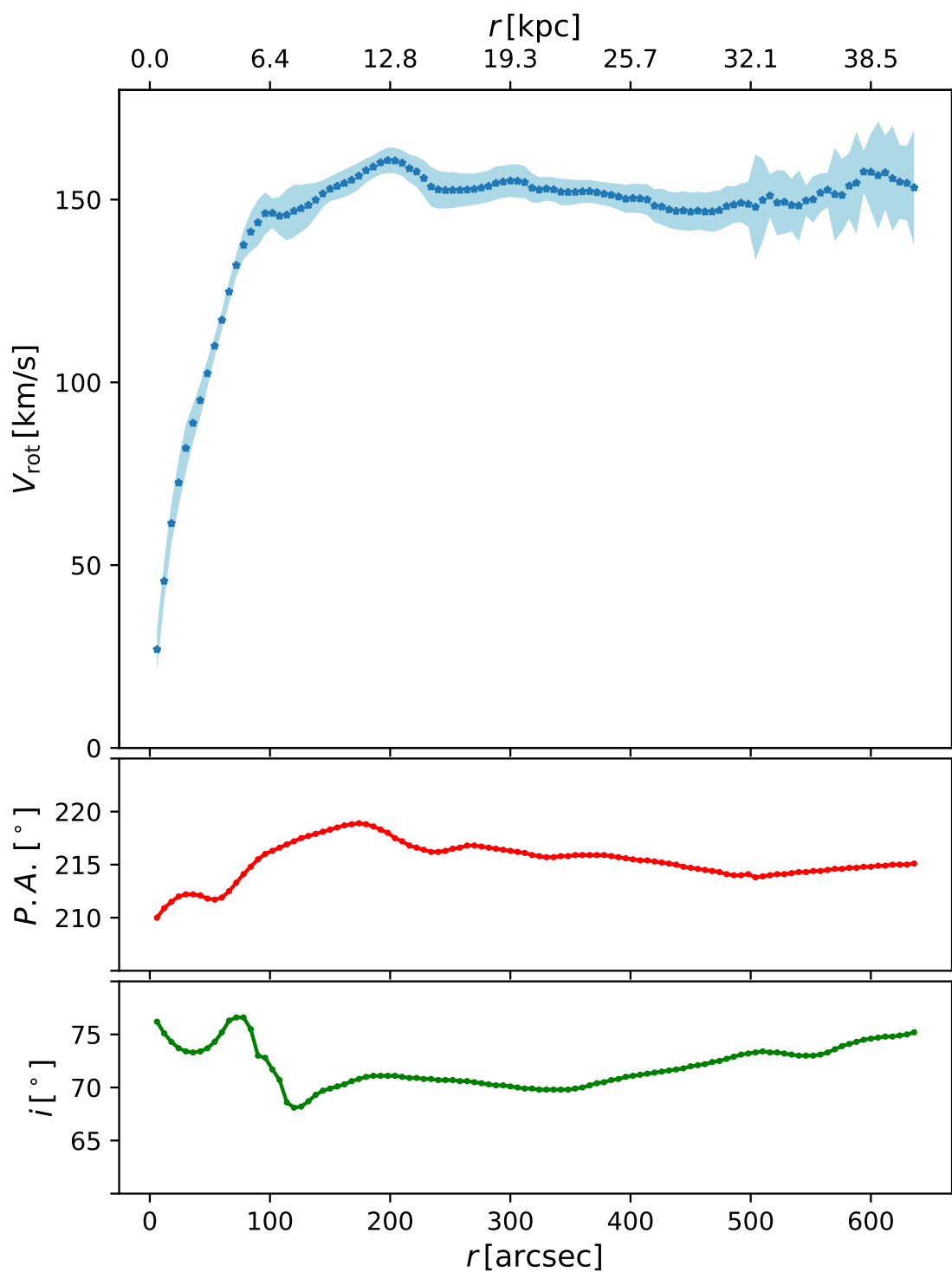
**NGC 3198** Ova galaksija klasifikovana je kao spiralna kasnog tipa sa dve uočljive spiralne grane na  $3.6 \mu\text{m}$ , kao i dve manje definisane koje se granaju od glavnih (primećeno i u [de Blok et al., 2008](#)). Deo je S4G uzorka. Dobro definisan profil

površinskog sjaja proteže se iza 400 lučnih sekundi (što odgovara 28.1 kpc sa usvojenom daljinom). 1D profil površinskog sjaja usrednjen po koncentričnim elipsama pokazuje oscilacije, što pripisujemo prisustvu spiralnih grana, ali i pored toga 2D fit površinskog sjaja sa GALFIT eksponencijalnim diskom je dobrog kvaliteta (poređenje ova dva fita dato je na slici 3.11).

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i regularno je sa manjim efektom uvrtnja. Centar je fiksiran na najbolji centar u radio-kontinuumu definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra ne pokazuje velike varijacije. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u širokoj oblasti do 640 lučnih sekundi i ona iznosi  $661.1 \pm 4.1 \text{ km s}^{-1}$ . Naša vrednost slična je kao u de Blok et al. (2008),  $660.7 \text{ km s}^{-1}$ , sa razlikama unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.36 na drugom i trećem panelu respektivno) veoma su bliski profilima koje dobijemo u proceduri `rotcur` sa slobodnim parametrima. Pozicioni ugao ne pokazuje značajna odstupanja od jedne dobro definisane vrednosti. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 215^{\circ}4 \pm 1^{\circ}8$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 780 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali prisutan blagi porast koji odgovara uvrtnju, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u oblasti od 120 do 750 lučnih sekundi,  $i = 72^{\circ}6 \pm 2^{\circ}6$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog korišćenog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.36 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**IC 2574** Ova galaksija je nepravilni patuljak sa prisutnom prečagom. Deo je S4G uzorka. Dobro definisan profil površinskog sjaja proteže se do 800 lučnih sekundi, ali znatno opada nakon  $\sim 550$  lučnih sekundi (odgovara 10.4 kpc sa usvojenom daljinom). Jednodimenzionalni profil površinskog sjaja usrednjen po koncentričnim elipsama veoma dobro odgovara korišćenom 2D modelu eksponencijalnog diska iz GALFIT programa (poređenje dato na slici 3.12).

Kod galaksije IC 2574 je prisustvo nekružnog kretanja bilo značajno i za nju je po

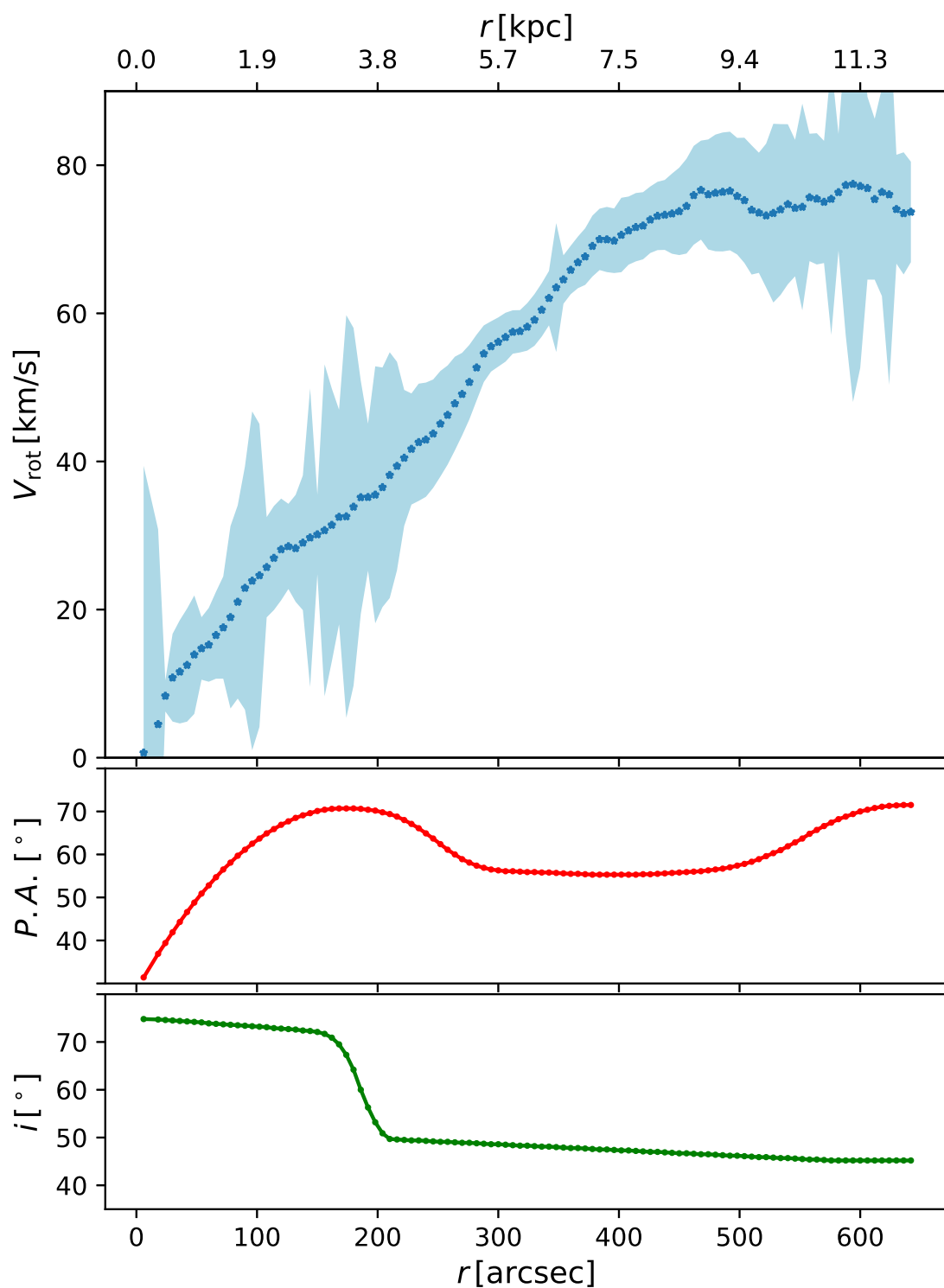


Slika 3.36: NGC 3198: oznake kao na 3.29.

opisanoj proceduri konstruisano rotaciono dominantno polje brzine (za detalje videti 2.2.3). Pored NGC 2366 ovo je jedina galaksija u uzorku gde je korišćena procedura dobijanja rotaciono dominantnog polja brzina koju smo samostalno izveli, ugrubo

se oslanjajući na proceduru iz rada [Oh et al. \(2008\)](#). Kao što smo već rekli, tako dobijeno polje je manje popunjeno (teže je imati profile gde je dobijen smisleni fit zbog same prirode podataka tj. većeg šuma), a svi odgovarajući parametri ostavljeni kao slobodni pokazuju veliko rasturanje, koje često nije fizički zasnovano. Centar je fiksiran na najbolji kinematički `rotcur` centar definisan u [Trachternach et al. \(2008\)](#). I nakon fiksiranja centra profil sistemske brzine pokazuje velike varijacije, osim u samom centru. Za globalnu vrednost sistemske brzine uzeli smo srednju vrednost oblasti od 20 do 130 lučnih sekundi i ona iznosi  $53.1 \pm 3.6 \text{ km s}^{-1}$ . Ova vrednost ista je kao i sistemska brzina usvojena u [de Blok et al. \(2008\)](#), sa malim razlikama u neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici [3.37](#) na drugom i trećem panelu respektivno) su veoma bliski profilima koje dobijemo sa istim parametrima kao slobodnim, a koji inače pokazuju veće promene. Pozicioni ugao je najstabilniji u oblasti od 250 do 600 lučnih sekundi, a van ove oblasti ima značajno viši profil koji pripisujemo uvrtnanju. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 55:7 \pm 9:8$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz iste pomenute stabilne oblasti. Inklinacija je stabilna unutar slične oblasti, dok je van nje prisutno uvrtnanje. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u oblasti do 500 lučnih sekundi,  $i = 53^\circ \pm 11^\circ$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog korišćenog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici [3.37](#) na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli [3.4](#).

**NGC 3351** Ova galaksija klasifikovana je kao spiralna ranog tipa. Primer je galaksije gde je značajno različita inklinacija zvezdanog i HI diska ([3.3](#)), i prema [de Blok et al. \(2008\)](#) inklinacija je na granici iskoristive. Mi smo ipak odlučili da ovu galaksiju uvrstimo u naš uzorak (za razliku od [de Blok et al. \(2008\)](#) koji su je isključili ne zbog inklinacije već prvenstveno zbog prečage koja dominira optičkim posmatranjima). S obzirom da u ovoj disertaciji nisu korišćeni podaci iz optičkog dela spektra, i imajući u vidu prisustvo prilično regularnog tzv. *face-on* HI diska kod ove galaksije, ušla je u našu analizu. Deo je S4G uzorka. Dobro definisan profil



Slika 3.37: IC 2574: oznake kao na 3.30.

površinskog sjaja proteže se iza 400 lučnih sekundi (što odgovara radijusu  $\sim 21$  kpc sa usvojenom daljinom). 1D profil površinskog sjaja usrednjen po koncentričnim elipsama pokazuje par manjih odstupanja od GALFIT modela dvostrukog eksponen-

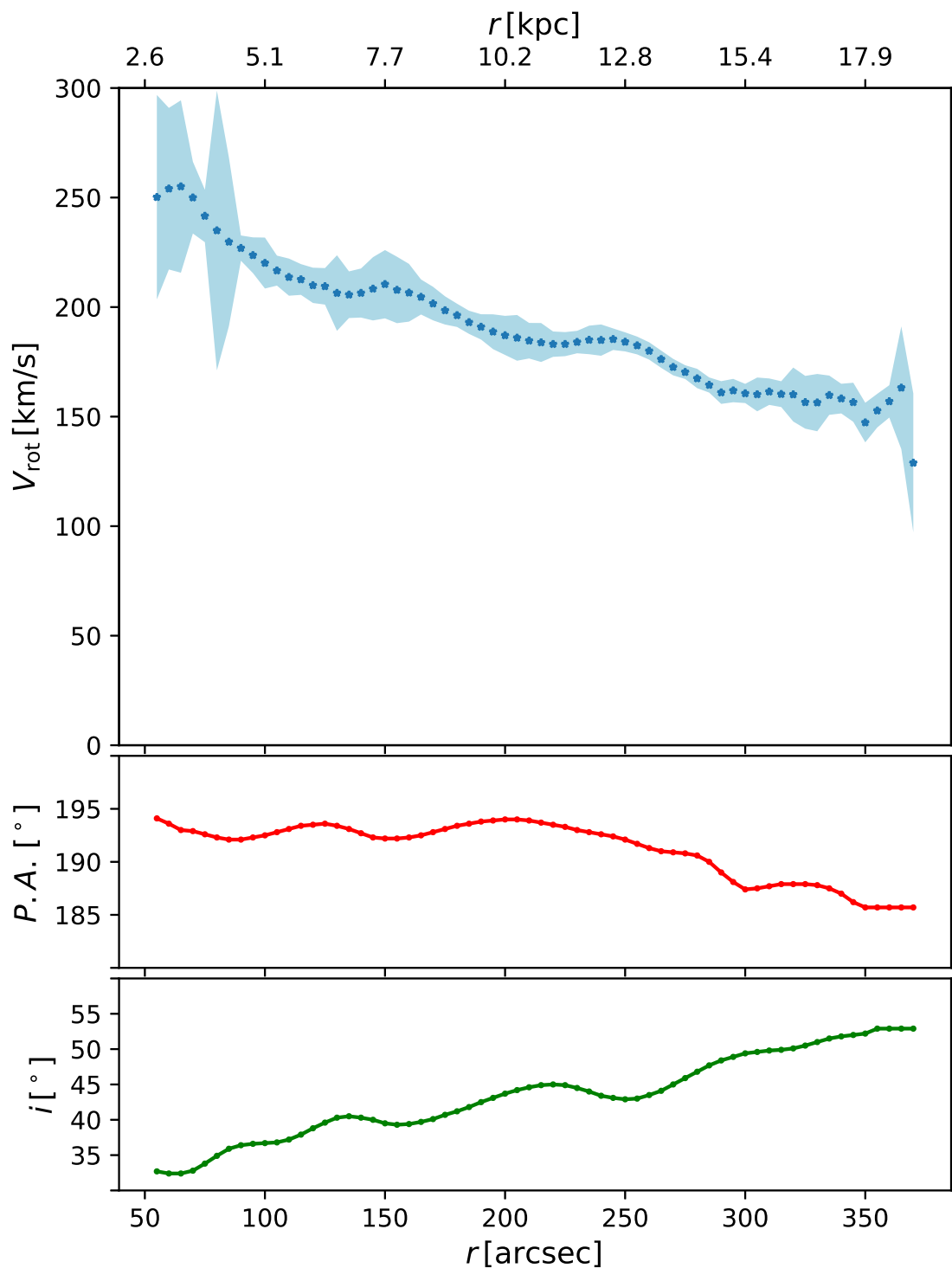
cijalnog diska. 2D fit je dobrog kvaliteta, a poređenje ova dva fita dato je na slici 3.13.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i regularno je do oko 400 lučnih sekundi, a nakon toga prisutni su efekti uvrtnja. Pošto galaksija nije prisutna u uzorku [Trachternach et al. \(2008\)](#), uzeli smo naš najbolji dinamički centar određen iz HI podataka sa `rotcur` procedurom. Za proveru (i često kao inicijalni ulazni parametar) koristimo vrednost iz 2MASS kataloga jer je talasna dužina te pretrage bliska  $3.6 \mu\text{m}$ . Profil systemske brzine nakon fiksiranja centra ne pokazuje velike varijacije. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost široke oblasti do 280 lučnih sekundi, i ona iznosi  $778.6 \pm 1.7 \text{ km s}^{-1}$ . Usvojeni finalni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.38 na drugom i trećem panelu respektivno) su veoma bliski profilima koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom do 400 lučnih sekundi. Nakon toga pozicioni ugao pokazuje veliko rasturanje i fiksiran je na poslednju pouzdanu vrednost. Globalna vrednost za pozicioni ugao,  $P.A. = 191^\circ 6 \pm 2^\circ 3$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz oblasti od 50 do 350 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali prisutan blagi porast koji odgovara uvrtnanju, ali smo iznad 400 lučnih sekundi i tu fiksirali inklinaciju na poslednju „dobru” vrednost. Za globalnu vrednost inklinacije uzeli smo srednju vrednost opet u oblasti od 120 do 750 lučnih sekundi,  $i = 42^\circ 7 \pm 8^\circ 0$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.38 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

Rotaciona kriva iz HI za galaksiju NGC 3351 po svojoj dubini skoro dvostruko prevazilazi rotacione krive dobijene iz  $H\alpha$  ([Dicaire et al., 2008](#)). Slične je dubine ali veoma različitog oblika rotaciona kriva dobijena iz istih podataka predstavljena u [Ponomareva et al. \(2016\)](#). Razlika je najznačajnija u unutrašnjem delu ( $R < 200$  lučnih sekundi), i to zbog razlike u procenjenoj inklinaciji. Unutar ovog veoma sjajnog regiona naša procena je da inklinacija raste od  $35^\circ$  do  $40^\circ$ , dok je u [Ponomareva et al. \(2016\)](#) uzeta konzervativnija vrednost, bliža optičkoj inklima-



ciji diska od približno  $50^\circ$ . Obe rotacione krive konvergiraju sličnim vrednostima,  $V_{\text{circ}}^{\text{max}} \approx (160 - 180) \text{ km s}^{-1}$ .

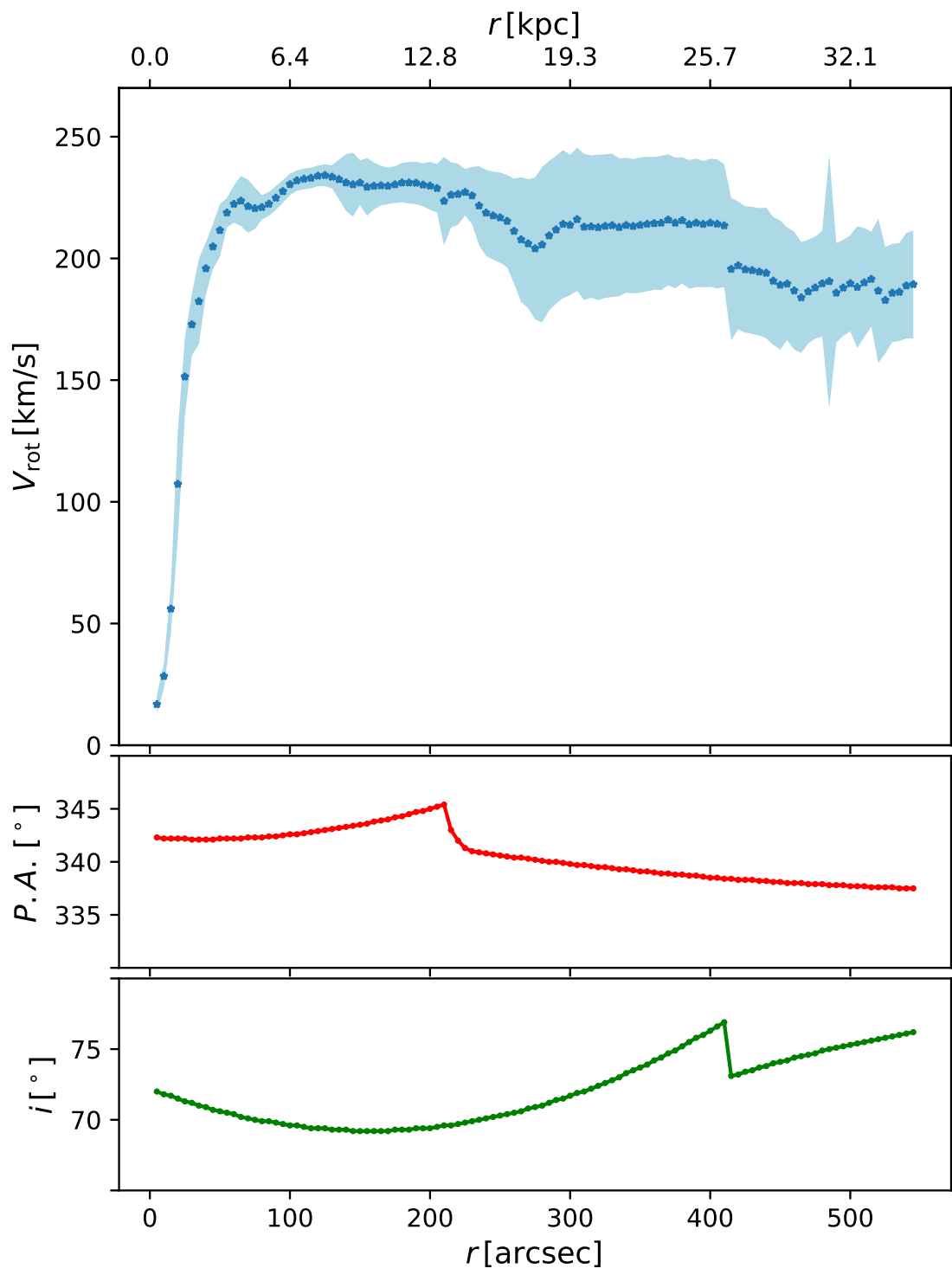


Slika 3.38: NGC 3351: oznake kao na 3.29.

**NGC 3521** Ova galaksija klasifikovana je kao spiralna ranog tipa sa slabo naznačenom i fragmentisanom spiralnom strukturom. Deo je S4G uzorka. Dobro definisan profil površinskog sjaja proteže se do 400 lučnih sekundi (što odgovara 25.7 kpc sa usvojenom daljinom), nakon čega naglo opada sjaj. Jednodimenzionalni profil površinskog sjaja usrednjen po koncentričnim elipsama pokazuje male oscilacije, što pripisujemo prisustvu spiralne strukture i verovatno usmerenog kretanja duž njih. Izabrali smo model površinskog sjaja GALFIT Sersic funkcijom, a poređenje ova dva fita dato je na slici 3.14.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i regularno je do pomenutog radijusa od 400 lučnih sekundi, a nakon toga su vidljive devijacije. Centar je fiksiran na najbolji centar na 3.6  $\mu\text{m}$  definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra i dalje pokazuje velike varijacije, najveće u THINGS uzorku prema radu de Blok et al. (2008). Na srednjim radijusima od oko 300 lučnih sekundi, vrednost  $V_{\text{sys}}$  značajno opada, ali smo se ipak odlučili da za celu galaksiju fiksiramo jednu vrednost. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u dobrim oblastima,  $R < 250$  lučnih sekundi i  $R > 450$  lučnih sekundi, i ona iznosi  $803.1 \pm 4.1 \text{ km s}^{-1}$ . Naša vrednost slična je kao u radu de Blok et al. (2008),  $803.5 \text{ km s}^{-1}$ , sa razlikama unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.39 na drugom i trećem panelu respektivno) su veoma bliski profilima koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Pozicioni ugao i inklinacija globalno su dobro definisani, sa izuzetkom oštrog skoka - pozicioni ugao na  $\sim 200$  lučnih sekundi, a inklinacija na  $\sim 400$  lučnih sekundi. Pretpostavka je da je što se tiče inklinacije odgovorno uvrtnje. Globalna vrednost  $P.A. = 339^{\circ}8 \pm 2^{\circ}4$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 600 lučnih sekundi, s tim što je vrednost nakon 400 lučnih sekundi konstantna kao što smo objasnili. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali prisutan blagi porast, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u istoj oblasti do 600 lučnih sekundi,  $i = 72^{\circ}0 \pm 2^{\circ}7$ , uz istu napomenu da je vrednost inklinacije konstantna za radijuse veće od 400 lučnih sekundi. Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.39

na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

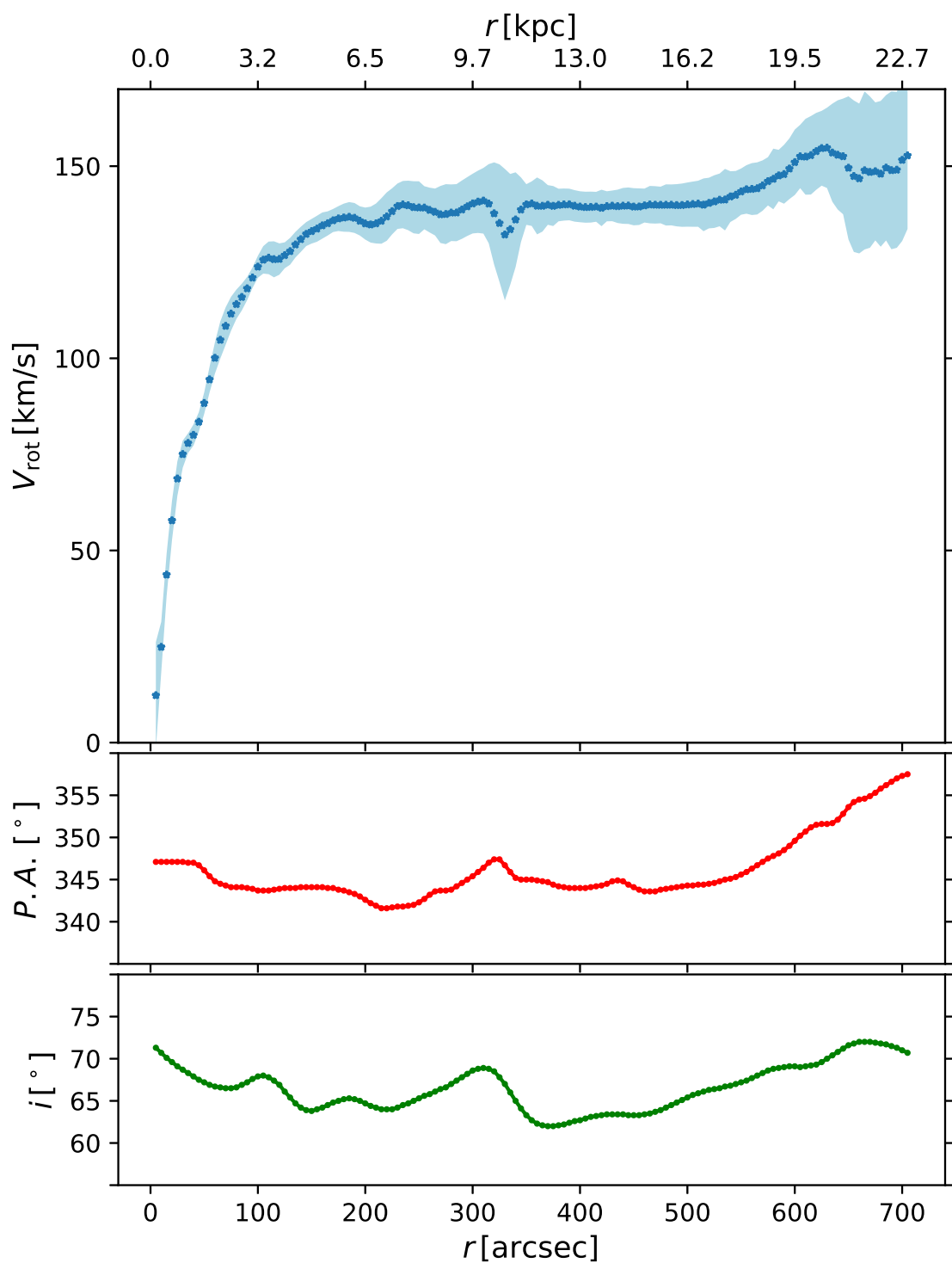


Slika 3.39: NGC 3521: oznake kao na 3.29.

**NGC 3621** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa sa uočljivom prečagom. Deo je SHA uzorka. Koristili smo *Level2* mozaike kao i kod drugih objekata iz ovog uzorka. Dobro je definisan profil površinskog sjaja, ali kao što smo već pomenuli ovi snimci nisu dovoljno duboki, tako da je radijus diska 150 lučnih sekundi (što odgovara 4.9 kpc sa usvojenom daljinom). Model GALFIT eksponencijalnim diskom iz 2D fita površinskog sjaja dobro se slaže sa 1D statistikom po koncentričnim elipsama dobijenom IRAF *ellipse* procedurom (prikazano na slici 3.15).

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i regularno je sa rotacionim kretanjem i prisutnim uvrtnjem u spoljašnjem delu, i to duž linije posmatranja (videti de Blok et al., 2008). Centar je fiksiran na najbolji centar na  $3.6 \mu\text{m}$  definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra pokazuje manje varijacije bez prisutnih trendova. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u širokoj oblasti do 580 lučnih sekundi i ona iznosi  $728.2 \pm 3.0 \text{ km s}^{-1}$ . Dobijena sistemska brzina veoma je bliska vrednosti  $728.5 \text{ km s}^{-1}$  iz rada de Blok et al. (2008), sa razlikama daleko manjim od  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici 3.40 na drugom i trećem panelu respektivno) su veoma bliski profilima koje dobijamo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Pozicioni ugao od  $\sim 600$  lučnih sekundi pokazuje veliki skok tj. značajno odstupanje od dobro definisane vrednosti. Globalna vrednost za pozicioni ugao  $P.A. = 346^\circ 7 \pm 4^\circ 4$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 750 lučnih sekundi koji uključuje i oblast sa skokom u pozicionim uglom. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali oscilacije koje odgovaraju manjim kolebanjima kao i uvrtnju, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u istoj oblasti do 750 lučnih sekundi,  $i = 66^\circ 7 \pm 2^\circ 7$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.40 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 3627** Poznata je i pod imenom M66 i klasifikovana je kao spiralna galaksija ranog tipa sa uočljivom prečagom. Takođe je u interakciji, što je čini asimetričnom.



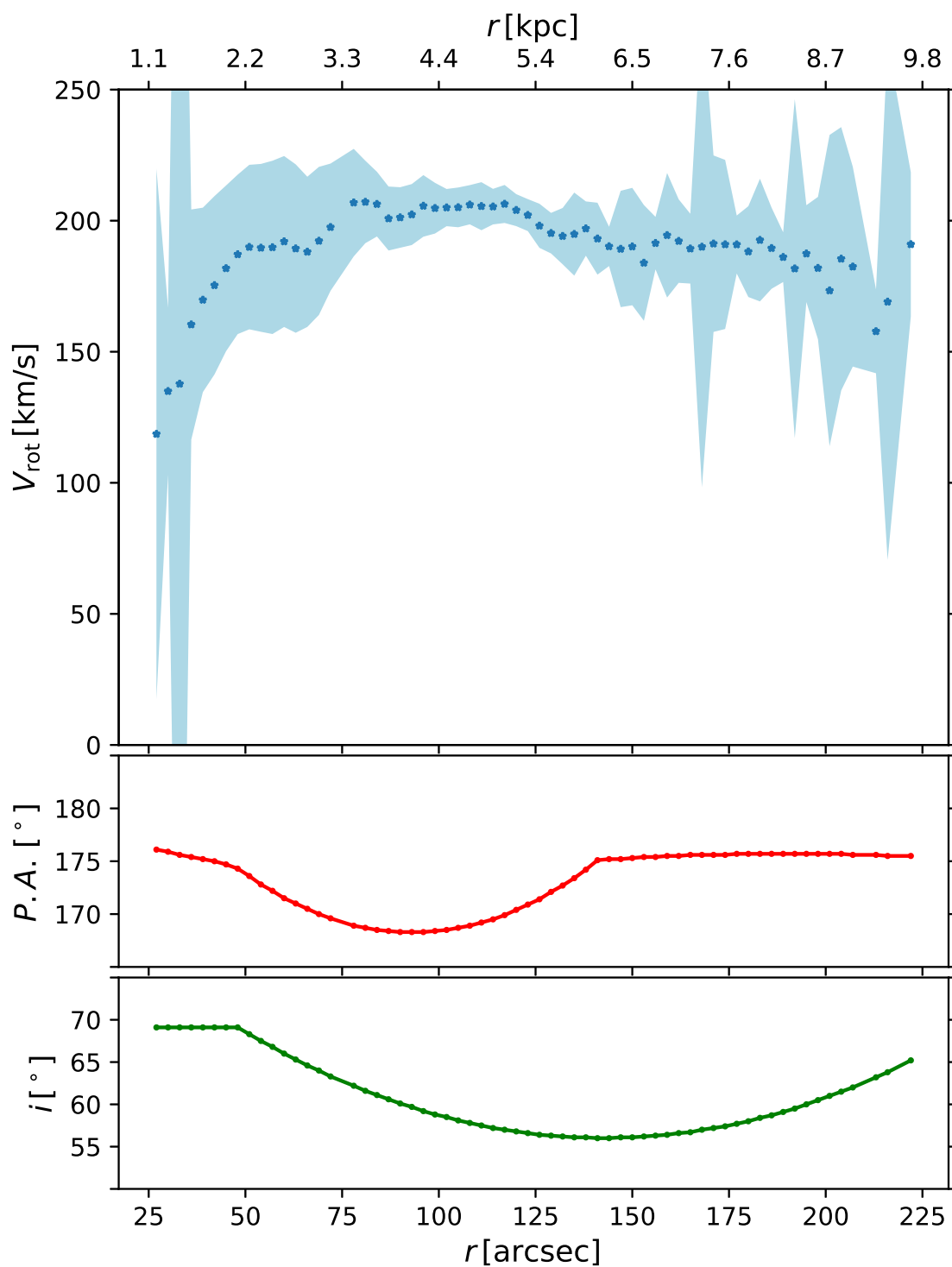
Slika 3.40: NGC 3621: oznake kao na 3.29.

Deo je S4G uzorka. Spiralne strukture nisu simetrične (de Blok et al., 2008), što čini težim analizu koja podrazumeva fitovanje eliptičnih prstenova. Ipak, dobro je definisan profil površinskog sjaja na  $3.6 \mu\text{m}$  do radijusa od 600 lučnih sekundi

(što odgovara  $\sim 24$  kpc sa usvojenom daljinom). Model GALFIT eksponencijalnim diskom iz 2D fita površinskog sjaja dobro se slaže sa 1D statistikom po koncentričnim elipsama dobijenom koristeći IRAF rutinu `ellipse`, što je prikazano na slici 3.16.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gauss-Ermitovih polinoma, i na njemu je vidljivo odsustvo osne simetrije kao i oblast u centralnom delu gde nema tačaka jer su ispod uslova za minimalni signal ( $3\sigma_{\text{chan}}$ ). Centar je fiksiran na najbolji centar iz radio-kontinuuma definisan u Trachternach et al. (2008). Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra pokazuje manje varijacije bez prisutnih trendova. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost iz oblasti od 75 do 165 lučnih sekundi i ona iznosi  $707.8 \pm 2.7 \text{ km s}^{-1}$ . Dobijena sistemska brzina veoma je bliska vrednosti iz de Blok et al. (2008),  $708.2 \text{ km s}^{-1}$ , sa razlikama duboko unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.41 na drugom i trećem panelu respektivno) su veoma bliski profilima koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom u oblasti do  $\sim 150 - 200$  lučnih sekundi. Na radijusima većim od toga prisutne su velike promene u pozicionom uglu i veće rasturanje oba parametra. Pozicioni ugao je u oblasti  $R > 140$  lučnih sekundi aproksimiran ravnijim profilom. Globalna vrednost za pozicioni ugao,  $P.A. = 173^{\circ}2 \pm 3^{\circ}1$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz bolje oblasti do 160 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali vidljiv trend, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u istoj oblasti do 160 lučnih sekundi,  $i = 61^{\circ}4 \pm 5^{\circ}5$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.41 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 4736** Klasifikovana je kao spiralna galaksija ranog tipa sa sjajnim unutrašnjim diskom i spiralnim granama vidljivim na  $3.6 \mu\text{m}$ . Deo je S4G uzorka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 800 lučnih sekundi (što odgovara  $\sim 17.8$  kpc sa usvojenom daljinom). Model GALFIT eksponencijalni disk + centralni oval iz 2D fita dobro se slaže sa 1D statistikom po koncentričnim elipsama dobijenom koristeći IRAF `ellipse` proceduru (prikazano na slici 3.17). Centralni oval u



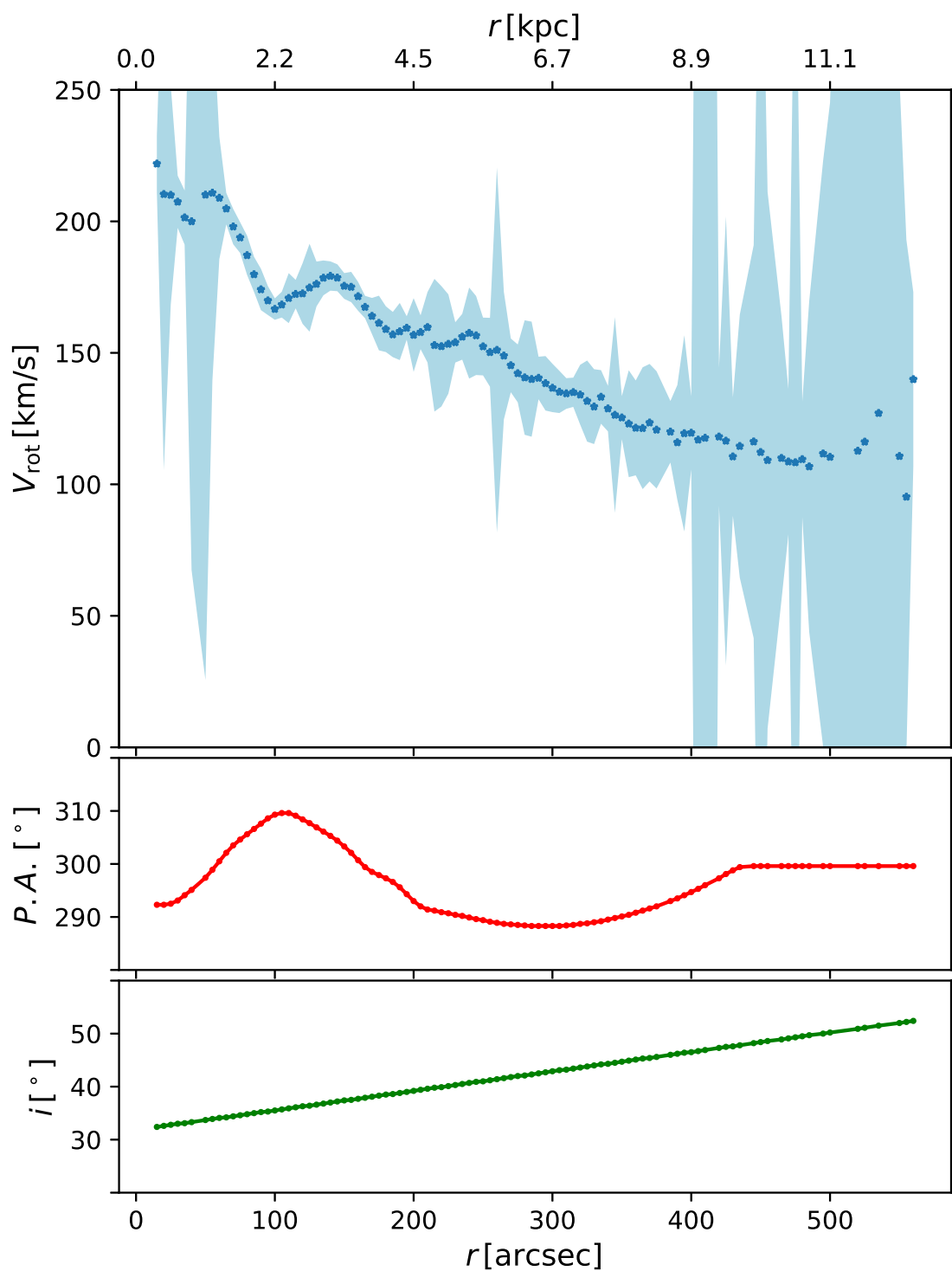
Slika 3.41: NGC 3627: oznake kao na 3.29.

ovom slučaju je proširen i odgovara vidljivom unutrašnjem disku.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i na njemu su u spoljašnjim delovima vidljive spiralne strukture. Centar je fiksiran na najbolji

centar iz radio-kontinuuma definisan u [Trachternach et al. \(2008\)](#). Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra pokazuje manje varijacije bez prisutnih trendova. Za globalnu vrednost sistemske brzine uzeli smo srednju vrednosti iz oblasti do 385 lučnih sekundi i ona iznosi  $307.6 \pm 4.8 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti  $306.7 \text{ km s}^{-1}$  iz [de Blok et al. \(2008\)](#) unutar su  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni finalni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljeni na slici [3.42](#) na drugom i trećem panelu respektivno) prate profile koje dobijemo fitujući sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom do radijusa  $\sim 500$  lučnih sekundi. Na radijusima većim od toga prisutno je veliko rasturanje i tu smo fiksirali pozicioni ugao na poslednju dobru vrednost, a za inklinaciju smo ekstrapolirali trend porasta prisutan na manjim radijusima. Sama rotaciona kriva postaje nestabilna i loše definisana nakon 550 lučnih sekundi i nije razmatrana na većim radijusima. Ovo je galaksija iz uzorka sa najvećim udelom nekružnog kretanja pored NGC 3627 ([de Blok et al., 2008](#)), naravno izuzimajući NGC 2366 i IC 2574. Takođe, njena rotaciona kriva pokazuje opadanje, što je zabeleženo u literaturi kroz više analiza i različite rotaciona krive (npr. [Sofue and Rubin, 2001](#)) i ukazuje na najmanju količinu tamne materije među galaksijama u uzorku. Pozicioni ugao je u oblasti izvan radijusa od 450 lučnih sekundi aproksimiran ravnijim profilom. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 295^{\circ}5 \pm 5^{\circ}5$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz bolje oblasti do 420 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadržali vidljiv trend, a za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u oblasti od 100 do 400 lučnih sekundi,  $i = 41^{\circ}1 \pm 4^{\circ}6$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici [3.42](#) na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli [3.4](#). U oblasti gde je  $i < 40^{\circ}$  veća je neodređenost u određivanju rotacione krive, pa tu oblast treba uzeti sa rezervom u daljoj analizi. Kao što smo već pomenuli rotaciona kriva galaksije NGC 4736 ukazuje na netipičnu raspodelu materije, kako vidljive tako i nevidljive, i zavređuje detaljniju analizu koja prevazilazi okvire ove disertacije.





Slika 3.42: NGC 4736: oznake kao na 3.29.

**DDO 154** Ovo je nepravilna galaksija koja nema jasno definisan centar. Podsetićemo da je procedura korišćena u ovoj disertaciji prvo testirana na dva tipična predstavnika svojih dinamičkih režima, velikoj spiralnoj galaksiji NGC 5055 i nepra-

vilnoj patuljastoj galaksiji DDO 154, u radu [Jovanović \(2017\)](#). DDO 154 je uzeta kao tipičan predstavnik nepravilnih galaksija, ako je uopšte moguće govoriti o kategoriji tipičnih nepravilnih galaksija. Detaljna analiza predstavljena ovde bazira se na pomenutom radu [Jovanović \(2017\)](#). Fotometrijski je deo S4G uzorka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 120 lučnih sekundi (što odgovara  $\sim 2.4$  kpc sa usvojenom daljinom). Fitovana je eksponencijalnim diskom, što je uobičajeno za ovakav tip objekata. Model GALFIT eksponencijalnog diska u odnosu na 1D statistiku po koncentričnim elipsama dobijenu koristeći IRAF `ellipse` rutinu prikazan je na slici [3.18](#). Slaganje je umereno, kada se uzme u obzir neodređenost centra na  $3.6 \mu\text{m}$ , kao i nepravilan oblik galaksije. Specifičnost zvezdanog diska ove galaksije, ili bolje rečeno gasnog diska, je to što je gasna komponenta značajno izraženija. Ova dva diska imaju različite inklinacije (tabela [3.3](#)), različitu debljinu (skala visine gasnog diska  $z_0^{\text{gas}}$  je znatno veća) i pretpostavka je da gasna komponenta doprinosi dinamičkoj masi u većoj meri (videti modele na slikama [4.17](#)).

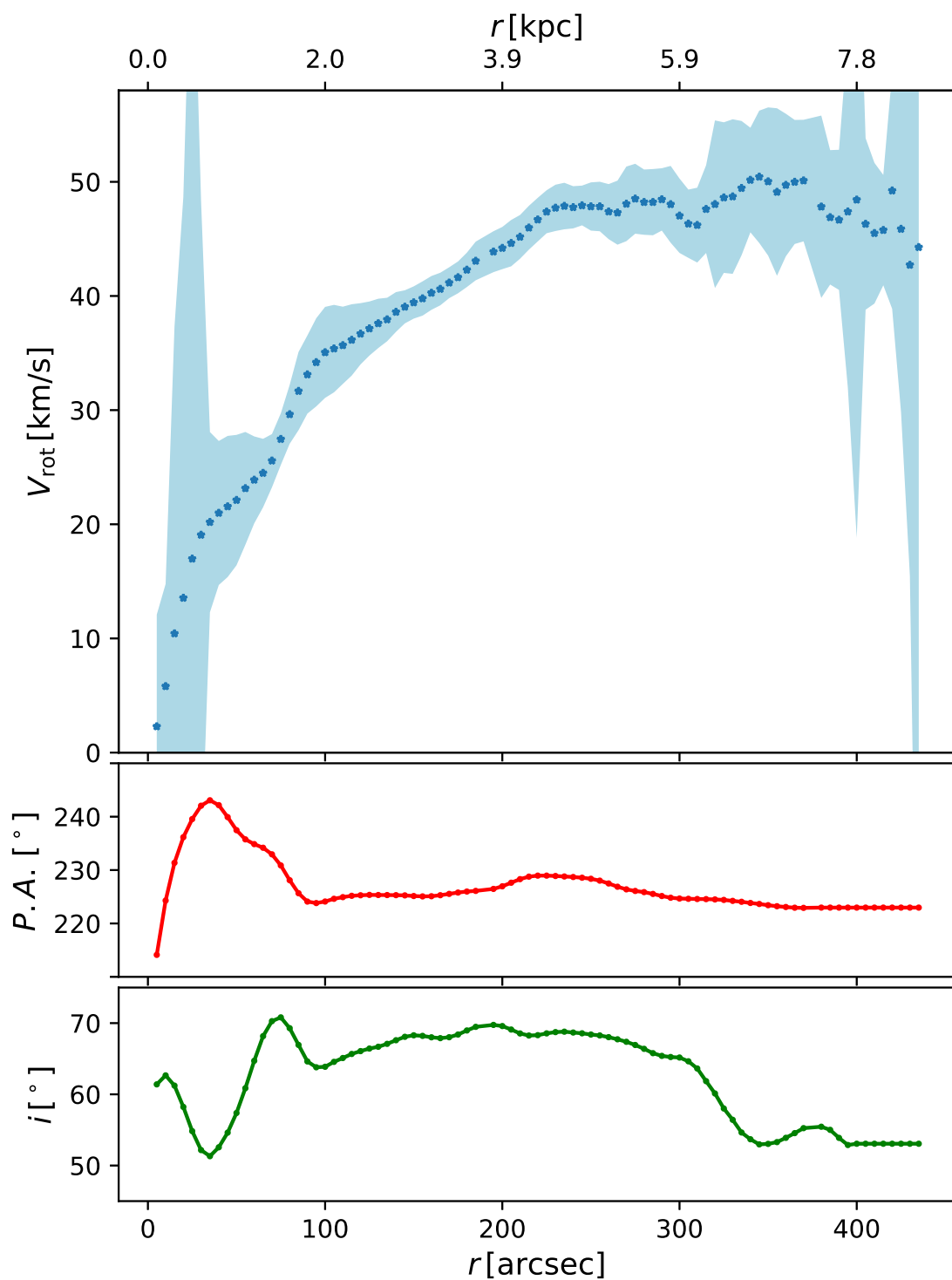
Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma, i na njemu je u spoljašnjim delovima primetan efekat uvrtnja. DDO 154 nema centar koji zrači u radio-kontinuumu ili centralnu koncentraciju sjaja koja pomaže u određivanju, tako da je centar određen samo dinamički koristeći `rotcur` proceduru, i mi preuzimamo vrednost iz [Trachternach et al. \(2008\)](#) kao i u drugim slučajevima (naveden u tabeli [3.1](#)). Naš dinamički centar je jako blizak centru određenom u radu [Trachternach et al. \(2008\)](#). Nakon fiksiranja centra na ovu vrednost sistemska brzina pokazuje manje varijacije i jasno grupisanje. Za globalnu vrednost koju fiksiramo u narednim fitovima uzeli smo sistemska brzinu iz oblasti do 250 lučnih sekundi,  $V_{\text{sys}} = 375.5 \pm 5.5 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti  $375.9 \text{ km s}^{-1}$  iz rada [de Blok et al. \(2008\)](#) znatno su manje od  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici [3.43](#) na drugom i trećem panelu respektivno) prate profile koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Oba pokazuju varijacije unutar centralnih 100 lučnih sekundi. Pozicioni ugao je van toga dobro definisan. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 225^{\circ}5 \pm 2^{\circ}5$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz spoljašnje oblasti iza 100 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije smo u finalnom profilu zadr-

žali centralne oscilacije, kao i opadanje povezano sa uvrtnjem, iako je u oblastima uvrtnja znatno manja popunjenost i sjaj HI, pa su te tačke i manje pouzdane. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u oblasti od 100 do 300 lučnih sekundi,  $i = 65^{\circ}0 \pm 4^{\circ}6$ , izuzimajući oblast uvrtnja. Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.43 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 4826 (M 64)** Klasifikovana je kao spiralna galaksija ranog tipa sa prečagom vidljivom na  $3.6 \mu\text{m}$ . Ima veoma nisku linijsku gustinu, naročito u spoljašnjem delu HI diska, najnižu u ovom uzorku (de Blok et al., 2008). Fotometrijski je deo S4G uzorka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od skoro 700 lučnih sekundi (što odgovara  $\sim 18$  kpc sa usvojenom daljinom). Dvodimenzionalni model površinskog sjaja, opisan sa komponentama eksponencijalni disk + centralni oval, dobro se slaže sa 1D statistikom po koncentričnim elipsama do 450 lučnih sekundi, a nakon toga imamo višak sjaja koji model ne opisuje. Poređenje korišćenog GALFIT modela i statistike dobijene koristeći IRAF `ellipse` proceduru prikazano je na slici 3.19.

Zbog odsustva zračenja u centralnim delovima ovu galaksiju još nazivaju i *Black Eye* ili *Evil Eye*. Smatra se da je u centralnim delovima ekstremno prisustvo prašine, dok je u disku praktično nema (Fabricius et al., 2012). Neobične je morfologije u B i V filterima, i neki je klasifikuju i kao S0 galaksiju koja je pretrpela skorašnju jaku interakciju tj. spajanje (eng. *merger*).

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma. Samo mali broj profila linije HI ima vrh iznad praga od  $3\sigma$  koji smo koristili kao filter za amplitudu. Ipak, polje brzina pokazuje veoma regularnu kinematiku pa je i sa relativno malim brojem tačaka bilo moguće izvesti pouzdanu rotacionu krivu do velikih radijusa. Prisutno je i kontrarotirajuće jezgro, i te oblasti su izostavljene pri izvođenju rotacione krive (do 85 lučnih sekundi) i dinamičkom modelovanju (do 125 lučnih sekundi). Centar je fiksiran na najbolji centar iz radio-kontinuuma definisan u Trachternach



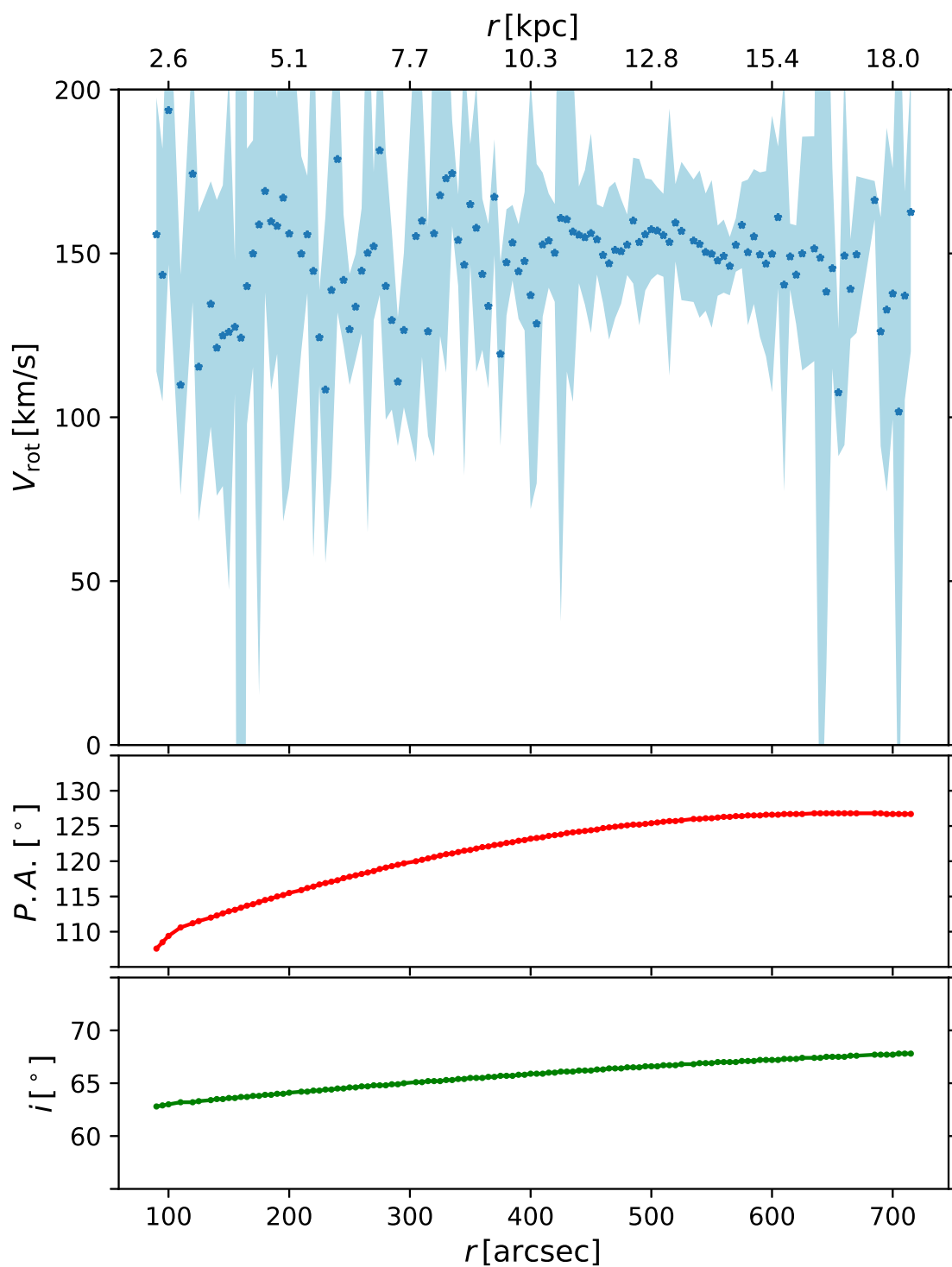
Slika 3.43: DDO 154: oznake kao na 3.29.

et al. (2008) i naveden u tabeli 3.1. Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra pokazuje sistemsku promenu tj. porast je dobro definisan i bez prisutnih trendova. Za globalnu vrednost smo uzeli sistemska brzinu iz oblasti od 150 do 675 lučnih

sekundi i ona iznosi  $409.8 \pm 6.5 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti  $407.4 \text{ km s}^{-1}$  iz rada [de Blok et al. \(2008\)](#) unutar su  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici [3.44](#) na drugom i trećem panelu respektivno) grubo prate profile koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Oba parametra kada su ostavljeni slobodnim su loše definisani: pokazuju varijacije u centralnom delu (posledica kontrarotirajućeg jezgra i izostavljeno je iz finalnih profila), značajan globalni trend, i veliko rasturanje, naročito nakon 600 lučnih sekundi. Ekstrapolirali smo postojeće trendove na radijuse veće od 600 lučnih sekundi za oba parametra, s tim što kod pozicionog ugla ekstrapolacija donekle prati slobodne vrednosti dok se inklinacija značajno razlikuje od usvojene vrednosti. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 121^{\circ}6 \pm 6^{\circ}02$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz bolje oblasti od 100 do 700 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost u istoj oblasti od 100 do 700 lučnih sekundi,  $i = 65^{\circ}7 \pm 3^{\circ}1$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog korišćenog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici [3.44](#) na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli [3.4](#).

**NGC 5055** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa sa regularnom strukturom i dobro definisanim ali fragmentisanim spiralnim granama na  $3.6 \mu\text{m}$ . Galaksija je razmatrana kao predstavnik dinamičkog režima velikih spiralnih galaksija i detaljno je analizirana u [Jovanović \(2017\)](#). Rezultati predstavljeni u ovoj disertaciji oslanjaju se na pomenuti rad. Fotometrijski je deo S4G uzorka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 700 lučnih sekundi (što odgovara 30.5 kpc sa usvojenom daljinom). Površinski sjaj modelovan je eksponencijalnim diskom + centralnim ovalom, što je uobičajeno za ovakav tip objekata. GALFIT model u odnosu na 1D statistiku po koncentričnim elipsama dobijenom koristeći IRAF rutinu `ellipse` prikazan je na slici [3.20](#). Slaganje je vrlo dobro.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gauss-Ermitovih polinoma. Kinematički, centar je pokazivao različite trendove koji su vidljivi na HI disku i polju brzina kao



Slika 3.44: NGC 4826: oznake kao na 3.29.

izdvojene različite oblasti. Naime, za ovu galaksiju važi pretpostavka da joj je spoljašnji deo kinematički odvojen (dekuplovan) od unutrašnjeg kompaktnog jezgra. Oslanjajući se na analizu datu u radu Battaglia et al. (2006), koja se bazira na

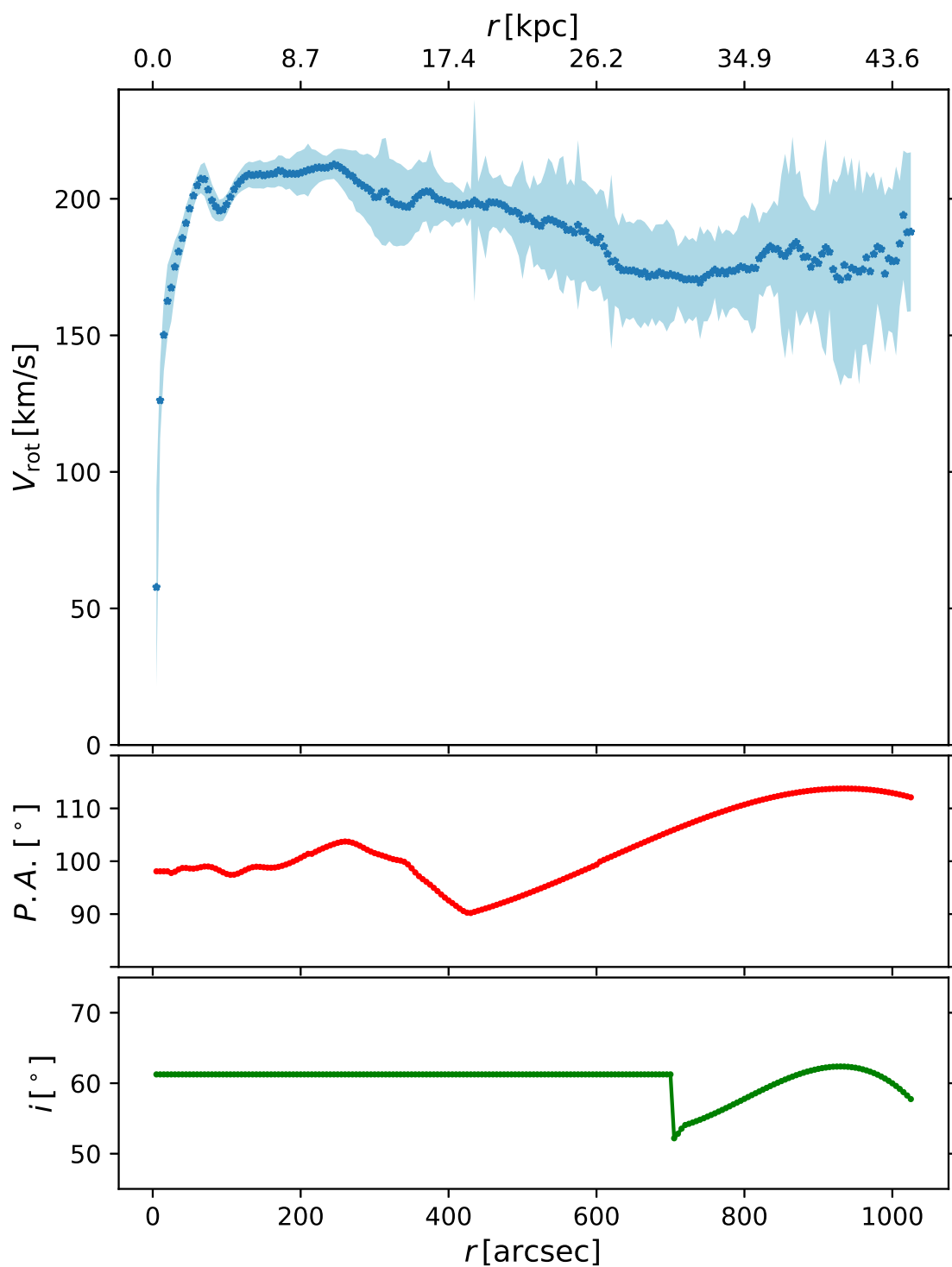
podacima slične rezolucije pokušali smo da uvedemo tzv. „pokretni” centar. Osim poboljšanja u simetričnosti, to nije dovelo do veće stabilnosti drugih parametara niti je mnogo uticalo na ukupnu rotacionu krivu. Pošto ne vidimo mnogo argumenata u prilog „pokretnog” centra fiksirali smo ga na najbolji centar iz radio-kontinuuuma definisan u radu [Trachternach et al. \(2008\)](#) koji je i naveden u tabeli 3.1. Naša centralna vrednost kinematičkog centra veoma je bliska centru iz rada [Trachternach et al. \(2008\)](#). Nakon fiksiranja centra sistemska brzina je i dalje pokazivala dve odvojene oblasti. Slično je uočeno i kod drugih autora, npr. u radovima [de Blok et al. \(2008\)](#); [Battaglia et al. \(2006\)](#). Za dalju analizu usvojili smo sistemske brzine  $V_{\text{sys}} = 496.0 \text{ km s}^{-1}$  za unutrašnjih 210 lučnih sekundi, i  $V_{\text{sys}} = 504 \text{ km s}^{-1}$  za ostatak galaksije. Ovo je jedina galaksija gde ostavljamo dve vrednosti za sistemske brzine iz razloga što je ovde teško zanemariti prisutan trend, a takođe i zbog konzistentnosti sa našom prethodnom analizom u [Jovanović \(2017\)](#). Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti iz rada [de Blok et al. \(2008\)](#),  $496.7 \text{ km s}^{-1}$  i  $510 \text{ km s}^{-1}$  unutar su  $1\sigma$  neodređenosti. U tabeli 3.4 navodimo vrednost iz unutrašnje oblasti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.45 na drugom i trećem panelu respektivno) donekle prate profile koje dobijemo sa slobodnim pozicionim uglom i inklinacijom. Oba su dobro definisana za unutrašnji disk ( $\sim 250$  lučnih sekundi), a van toga pokazuju velike razlike za dve strane galaksije. Naročito je promena u inklinaciji drastična, čak i unutar optičkog diska. Ne postoje dokazi za postojanje uvrtnja na ovim radijusima, ali ono jeste vidljivo na većim radijusima. Uvrtnje je ranije zabeleženo u literaturi od strane [de Blok et al. \(2008\)](#) i [Battaglia et al. \(2006\)](#). Zbog toga smo za unutrašnjih 700 lučnih sekundi usvojili konstantnu vrednost od  $i = 61.25^\circ$ . Spoljašnji deo inklinacije je, kao i pozicioni ugao, tretiran kao i ostali profili u uzorku: očišćen od statističkih izuzetaka, zaglađen i fitovan polinomskim funkcijama po potrebi, da bi dobili glatkije, pravilnije i stabilnije raspodele. Globalna vrednost za pozicioni ugao,  $P.A. = 100^\circ 9 \pm 2^\circ 5$ , je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz oblasti do 700 lučnih sekundi. Za globalnu vrednost inklinacije smo uzeli  $i = 60^\circ 0 \pm 4^\circ 6$ , izuzimajući oblast većeg uvrtnja nakon 500 lučnih sekundi. Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći ovako izvedene parametre dobijena je rotaci-

ona kriva prikazana na slici 3.45 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4. Unutrašnje delove poredili smo sa rotacionom krivom izvedenom iz  $H\alpha$  posmatranja (Blais-Ouellette et al., 2004) do radijusa za koji su se posmatranja preklapala, i našli izvrsno slaganje.

**NGC 6946** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa sa uočljivom prečagom. Deo je SHA uzorka pa fotometrija nije tako duboka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 150 lučnih sekundi (što odgovara 5.3 kpc sa usvojenom daljinom). Dvodimenzionalni model površinskog sjaja opisan sa eksponencijalnim diskom pokazuje veliko odstupanje u oblasti do 75 lučnih sekundi, a parametar kvaliteta fita  $\bar{\chi}^2$  u ovom slučaju nije mnogo koristan jer sigma-slika i konzervativna maska (videti potpoglavlje 3.2) proizvode jako velike greške tj. neodređenosti. Iz tog razloga smo kod ove galaksije probali i model dva eksponencijalna diska, i oba su predstavljena i korišćena u dinamičkom modelovanju. Poređenje dva GALFIT modela i statistike dobijene koristeći IRAF rutinu `ellipse` prikazano je na slikama 3.21 i 3.22.

Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma i regularno je naročito u oblasti do  $\sim 500$  lučnih sekundi. Centar je fiksiran na najbolji centar iz radio-kontinuumu definisan u radu Trachternach et al. (2008) i naveden u tabeli 3.1. Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra je dobro definisan i bez prisutnih trendova. Za globalnu vrednost uzeli smo sistemsku brzinu iz oblasti od 120 do 460 lučnih sekundi i ona iznosi  $42.1 \pm 4.5$  km s<sup>-1</sup>. Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti 43.7 km s<sup>-1</sup> iz rada de Blok et al. (2008) unutar su  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.46 na drugom i trećem panelu respektivno), gde pozicioni ugao prati profil dobijen sa slobodnim vrednostima a inklinacija ne u većoj meri. Globalna vrednost pozicionog ugla  $P.A. = 241^{\circ}3 \pm 4^{\circ}9$  je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz bolje oblasti 70 - 516 lučnih sekundi. U slučaju inklinacije rasturanje je jako veliko a inklinacija niska pa je kinematičko određivanje manje pouzdano. Iz tog razloga smo za globalni profil uzeli linearni fit koji oslikava globalni trend blagog pada i u skladu





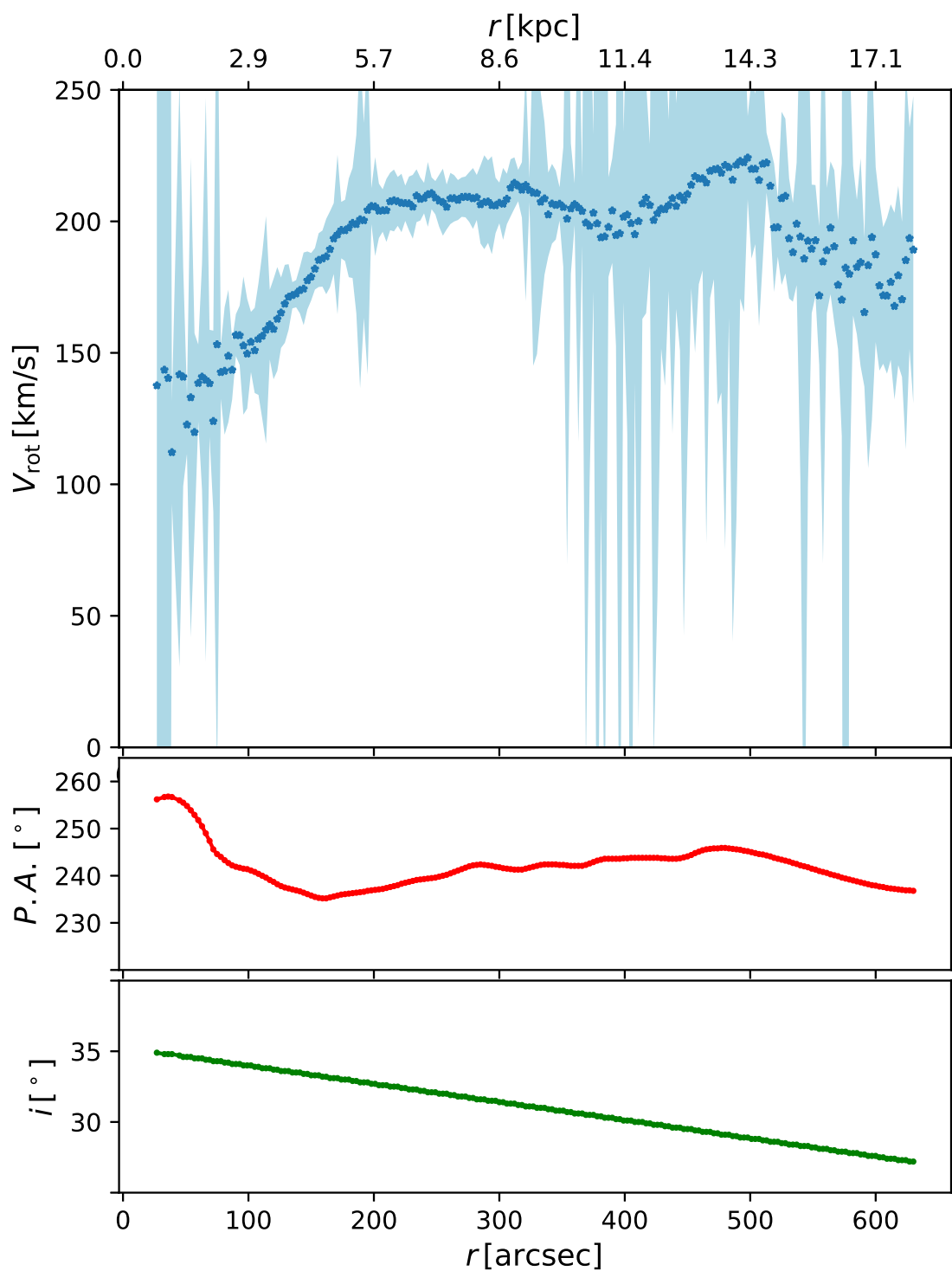
Slika 3.45: NGC 5055: oznake kao na 3.29.

je sa vrednostima na drugim talasnim dužinama (npr. *HyperLeda* citirana u tabeli 3.3). Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost dobijenog profila na istoj oblasti do 510 lučnih sekundi,  $i = 32^{\circ}0 \pm 1^{\circ}9$ . Ovako dobijena inklinacija na granici

je pouzdanosti za određivanje rotacione krive čak i sa našom manje konzervativnom selekcijom. Rotaciona kriva pokazuje velike greške i sa rezervom je treba uzeti za radijuse veće od 14 kpc (pomenutih  $\sim 500$  lučnih sekundi). Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.46 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

**NGC 7331** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa sa vidljivom spiralnom strukturom. Deo je SHA uzorka ali je u ovom slučaju vidno polje znatno veće pa je bilo moguće pratiti raspodelu sjaja dublje. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 300 lučnih sekundi (što odgovara  $\sim 14.5$  kpc sa usvojenom daljinom). Dvodimenzionalni model površinskog sjaja opisan je sa Sersic funkcijom uz velike greške, objašnjene kod sličnih objekata. Poređenje dva GALFIT modela i statistike dobijene koristeći IRAF rutinu `ellipse` je zadovoljavajuće i prikazano je na slici 3.23.

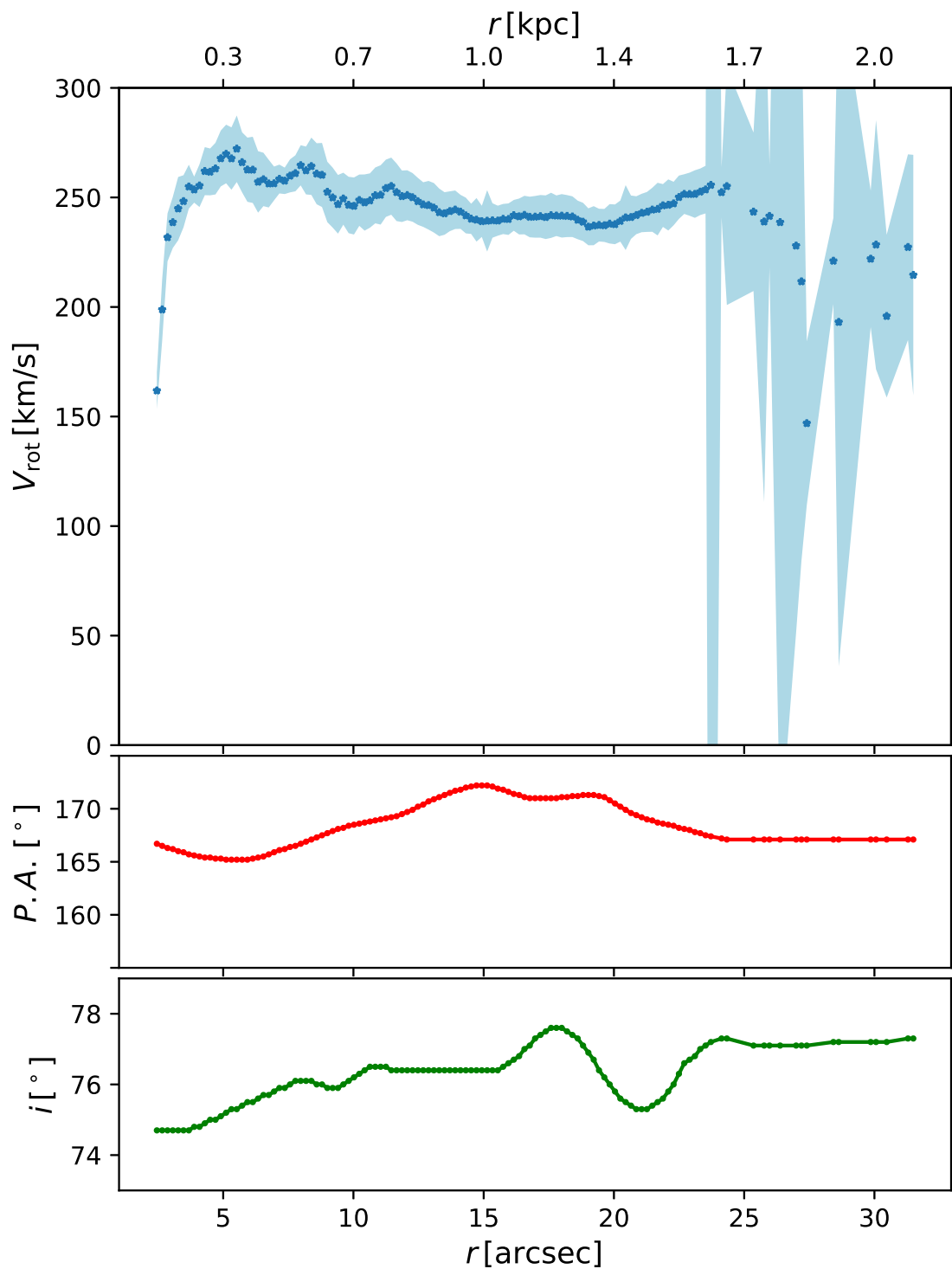
Polje brzina je dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma i regularno je na velikim skalama, ali lokalno pokazuje dosta varijacija koje se povezuju sa spiralnim strukturama i usmerenim kretanjem duž njih. Centar je fiksiran na najbolji centar na  $3.6 \mu\text{m}$  definisan u radu Trachternach et al. (2008) i naveden u tabeli 3.1. Profil systemske brzine nakon fiksiranja centra ne pokazuje značajne sistematske trendove ali je veoma nedefinisan u centralnim delovima. Za globalnu vrednost systemske brzine koristili smo oblast od 60 do 390 lučnih sekundi i ona iznosi  $817.5 \pm 8.3 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike između dobijene systemske brzine i vrednosti  $818.3 \text{ km s}^{-1}$  iz rada de Blok et al. (2008), duboko su unutar  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.47 na drugom i trećem panelu respektivno) prate profile dobijene sa slobodnim vrednostima za pozicioni ugao i inklinaciju do 400 lučnih sekundi. Pozicioni ugao ne pokazuje velike oscilacije, a za globalnu vrednost uzeta je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz široke oblasti do 680 lučnih sekundi,  $P.A. = 168^\circ 8 \pm 2^\circ 2$ . Kod inklinacije prisutna je velika promena u oblasti od 250 do 350 lučnih sekundi, a zatim i veliko rasturanje. Ova skokovita promena povezuje se sa kretanjem duž spiralne grane, ali smo mi ipak odlučili da je zadržimo u



Slika 3.46: NGC 6946: oznake kao na 3.29.

finalnom profilu. Za globalnu vrednost smo uzeli srednju vrednost dobijenog profila u oblasti do 370 lučnih sekundi,  $i = 76^{\circ}0 \pm 0^{\circ}8$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog modelovanog HI diska. Koristeći izvedene parametre dobijena

je rotaciona kriva prikazana na slici 3.47 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

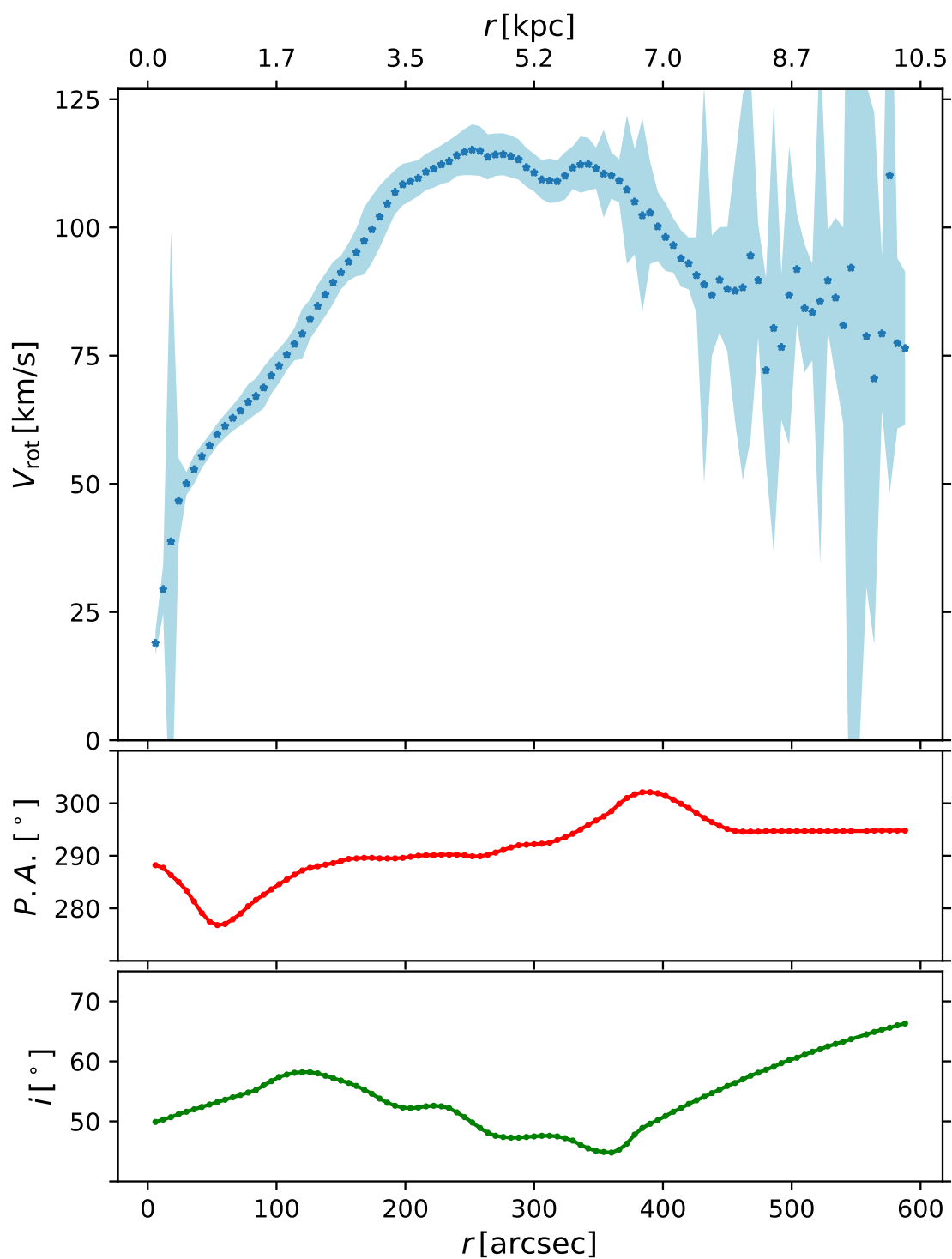


Slika 3.47: NGC 7331: oznake kao na 3.29.

**NGC 7793** Klasifikovana je kao spiralna galaksija kasnog tipa. Deo je S4G uzorka. Profil površinskog sjaja prostire se do radijusa od 700 lučnih sekundi (što odgovara  $\sim 12$  kpc sa usvojenom daljinom). Dvodimenzionalni model površinskog sjaja opisan je eksponencijalnim diskom. Poređenje GALFIT modela i statistike dobijene koristeći IRAF proceduru `ellipse` je zadovoljavajuće uz manja odstupanja (prikazano na slici 3.24).

Polje brzina dobijeno fitovanjem  $h_3$  Gaus-Ermitovih polinoma je regularno uz prisustvo manjeg uvrtnja i slabijih lokalnih nekružnih kretanja (de Blok et al., 2008). Centar je fiksiran na najbolji centar na  $3.6 \mu\text{m}$  definisan u radu Trachternach et al. (2008) i naveden u tabeli 3.1. Profil sistemske brzine nakon fiksiranja centra je dobro definisan. Za globalnu vrednost smo uzeli sistemska brzinu iz oblasti do 600 lučnih sekundi i ona iznosi  $227.2 \pm 6.6 \text{ km s}^{-1}$ . Razlike između dobijene sistemske brzine i vrednosti  $226.2 \text{ km s}^{-1}$  iz rada de Blok et al. (2008), znatno su manje od  $1\sigma$  neodređenosti. Usvojeni profili za pozicioni ugao i inklinaciju (predstavljani na slici 3.48 na drugom i trećem panelu respektivno) prate profile dobijene sa slobodnim vrednostima za pozicioni ugao i inklinaciju koji su dobro definisani. Pozicioni ugao pokazuje manje oscilacije u centralnim delovima, kao i posledice uvrtnja za radijuse između  $380 < R < 420$  lučnih sekundi. Za globalnu vrednost uzeta je srednja vrednost finalnog radijalnog profila iz oblasti od 150 do 360 lučnih sekundi,  $P.A. = 291^{\circ}6 \pm 5^{\circ}0$ . U slučaju inklinacije efekti uvrtnja su izraženiji, naročito u istoj oblasti od 380 do 420 lučnih sekundi, i zadržali smo ih u finalnom profilu. Za globalnu vrednost uzeta je srednja vrednost dobijenog profila u oblasti do 360 lučnih sekundi,  $i = 51^{\circ}9 \pm 3^{\circ}9$ . Neodređenosti uključuju posmatrane varijacije duž celog korišćenog HI diska. Koristeći izvedene parametre dobijena je rotaciona kriva prikazana na slici 3.48 na prvom panelu, zajedno sa profilima za pozicioni ugao i inklinaciju (drugi i treći panel, respektivno), dok su odgovarajuće vrednosti navedene u tabeli 3.4.

Izvedene su **rotacione krive za svih 20 galaksija** iz uzorka, i predstavljene su zajedno sa radijalnim profilima za pozicioni ugao i inklinaciju, od kojih najviše i zavise izvedene rotacione krive. Za **18 galaksija** rotacione krive izvedene su koristeći  $h_3$  polje brzina, dok je za **dve galaksije, NGC 2366 i IC 2574**, korišćena naša procedura koju smo nazvali **dominantno rotaciono polje brzine**. Razvijena



Slika 3.48: NGC 7793: oznake kao na 3.29.

procedura opisana je u potpoglavlju 3.3.2 koristi se za galaksije kod kojih je značajno kretanje koje se ne može pripisati rotaciji u disku.

Velika većina rotacionih krivih je veoma **velike dubine** (2-5 veća od optičkog

diska) i **rezolucije**. Prosečan broj tačaka (jedna tačka odgovara jednom iskošenom prstenu za koji je fit konvergirao sa smislenim parametrima) koje su uzete kao pouzdane, je veći od 50, a za velike spiralne galaksije kao što je NGC 2841, dostiže čak i preko 200. Uobičajen broj tačaka iz kojih se izvode rotacione krive u literaturi najčešće ne prelazi 20. Prilikom izvođenja povremeno smo naše rezultate poredili sa rezultatima iz [de Blok et al. \(2008\)](#), ali se nismo nužno rukovodili njihovim rezultatima. Naprotiv, trudili smo se da koristimo i spoljašnje delove galaksija za koje je procedura fitovanja imala veće greške. Time smo dobili rotacione krive dubine koja je u proseku veća za 20 % od izvedenih u [de Blok et al. \(2008\)](#). Ovo ne menja masene modele koji proizlaze iz kasnijeg dinamičkog modelovanja, ali zato menja ukupne procenjene mase (zavise od poslednjeg radijusa).

Galaksije velikih i srednjih  $V_{\text{circ}}$  (većinom **oko 200 km s<sup>-1</sup>**, a NGC 2841 dostiže čak i brzinu blizu 300 km s<sup>-1</sup>) očekivano imaju rotacione krive koje ulaze u **ravan režim** na većim radijusima. Opadanje je primećeno kod dve neobične galaksije iz uzorka, **NGC 4736 koja se smatra galaksijom sa vrlo malo tamne materije**, i kod NGC 3351 za koju je bilo teško odrediti inklinaciju unutar optičkog diska, pa postoji mogućnost da je ovo opadanje artefakt profila koji smo usvojili za inklinaciju (slika 3.38). Za sve **male galaksije**, uključujući i one specifično klasifikovane kao **patuljaste**, iz uzorka, s manjim brzinama u disku ( $V_{\text{circ}} < 100 \text{ km s}^{-1}$ ) primećen je **blagi porast rotacione krive** sve do poslednjeg dobrog radijusa. To su galaksije NGC 925, NGC 2976, IC 2574, DDO 154, NGC 7793 i u manjoj meri NGC 2366. Isto ponašanje zapaženo je npr. kod SPARC<sup>16</sup> uzorka galaksija ([Lelli et al., 2016](#)) i mi ovde potvrđujemo njihove rezultate. Galaksija **NGC 4826 ima daleko najmanju linijsku gustinu** posmatranog HI diska, i njena rotaciona kriva je zato lošije popunjena, sa „rupom” u centralnom regionu do 100 lučnih sekundi. Ipak, ova galaksija pokazuje prilično regularno kretanje u gasnom disku tako da smatramo da je njena rotaciona kriva izvedena sa velikom pouzdanošću.

Kod nekih galaksija izvedena **rotaciona kriva data je sa veoma velikom neodređenošću** (ekstreman slučaj je **NGC 2366**, koje je po mnogo čemu izuzetak u našem uzorku). To je posledica samog veoma konzervativnog načina za procenu

---

<sup>16</sup>Dostupan na <http://astroweb.cwru.edu/SPARC/>.

greške, koji ne potiče samo od greške fita već odražava **asimetričnost ukupnog polja brzine**. Veoma nepravilna patuljasta galaksija NGC 2366 pokazuje veoma velike razlike između polja brzine u delu koji se udaljava od nas i u delu koji se nama približava. Postizanje konvergencije fita kod dinamičkog modelovanja sa rotacionim krivama sa velikim greškama je time otežano, jer je previše veliki prostor dozvoljenih parametara.

Kao što smo već naveli, sa većim stepenom nesigurnosti **izvedena je i rotaciona kriva za galaksiju NGC 3351** koja nije izvedena u originalnom THINGS radu (de Blok et al., 2008), ali jeste u kasnijoj analizi istih podataka (Ponomareva et al., 2016).<sup>17</sup> Ovde izvedena rotaciona kriva iz HI dvostruko je dublja od prisutnih u literaturi, npr. izvedenih iz H $\alpha$  (Dicaire et al., 2008). Unutar radijusa od 200 lučnih sekundi je loše slaganje naše izvedene rotacione krive i dve pomenute iz literature; naša opada dok ostale rastu ali se ponašaju slično na većim radijusima i dostižu sličnu maksimalnu brzinu u disku  $V_{\text{circ}}^{\text{max}} \approx 160 - 180 \text{ km s}^{-1}$ . Zaključujemo da se modeli mase, a najviše procene mase za pojedinačne komponente ne bi umnogome promenile prilikom eventualnog revidiranja vrednosti i procedure koju smo primenili za ovu galaksiju. Ipak, to ostaje kao mogućnost za budući rad autora.

---

<sup>17</sup>Prilikom inicijalnog izvođenja parametra za ovu galaksiju nismo znali za analizu u radu Ponomareve i saradnika (Ponomareva et al., 2016).



# Poglavlje 4

## Dinamičko modelovanje

Predstavljamo rezultate dinamičkog modelovanja izvedenih rotacionih krivih (vidi potpoglavlje 3.3.2) koristeći posmatrani sjaj pojedinačnih zvezdanih komponenti i gasnog diska zajedno sa teorijskim profilima tamne materije zasnovanim na pseudo-izotermalnom sfernom modelu (dalje ISO, Jimenez et al., 2003) i na Navaro-Frenk-Vajt modelu (dalje NFW, Navarro et al., 1997).

U svim izračunavanjima korišćena je konstantna vrednost za daljinu do galaksija zasnovana na najnovijim merenjima koja su data u EDD<sup>1</sup> bazi (eng. *Extragalactic Distance Database*), osim gde je drugačije naznačeno. Galaktocentrični radijusi u lučnim sekundama (arcsec) preračunati su u kiloparseke (kpc) za usvojenu daljinu svake od galaksija. Rezolucija rotacione krive (najmanje rastojanje između dve tačke) data je u tabeli 3.4 i u lučnim sekundama i u kiloparsecima, što nam pruža uvid u prostorne skale u galaksijama.

U svim našim modelima uračunat je doprinos bariona od zvezdane materije i gasa kao:

$$V_{\text{rot,bar}}^2 = V_*^2 + V_{\text{gas}}^2, \quad (4.1)$$

gde je  $V_{\text{rot,bar}}$  ukupna rotaciona brzina pod dejstvom isključivo barionske materije.

Posmatrani površinski sjaj zvezda predstavljen je jednostavnim modelima ekspencijalnog diska, centralnog ovala (opisan Sersic funkcijom) ili kombinacijom ove dve komponente (videti potpoglavlje 3.2 za detalje). Da bismo dobili ukupnu ro-

---

<sup>1</sup><http://edd.ifa.hawaii.edu/dfirst.php>.

tacionu brzinu pod uticajem zvezdane komponente potrebno je sabrati pojedinačne brzine svih činilaca:

$$V_*^2 = V_{\text{disk}}^2 (+V_{\text{bulge}}^2 + V_{\text{bar}}^2 + \dots), \quad (4.2)$$

gde su  $V_*$ ,  $V_{\text{disk}}$ ,  $V_{\text{bulge}}$  i  $V_{\text{bar}}$  rotacione brzine u galaksiji koje potiču od gravitacionog delovanja celokupne zvezdane komponente: zvezdanog diska, centralnog ovala i prečage, respektivno. Deo u zagradi je opcioni jer nije prisutan u svakoj galaksiji za razliku od eksponencijalnog diska.<sup>2</sup> Model prečage nije korišćen za opis površinskog sjaja galaksija iz uzorka, iako je u nekim od galaksija prisutna. Razlog je upravo procedura dinamičkog modelovanja: sve zvezdane komponente skaliraju se sa faktorom  $M/L$ , koji je ostavljen slobodnim (osim  $M/L$  za zvezdani disk kod SPS skupa modela), što otežava postizanje konvergencije fita rotacione krive. Dodatno, iako su na pojedinim snimcima (naročito u vizuelnom delu spektra) prečaga i spiralne grane naročito uočljive, njihov doprinos ukupnoj masi zvezdane komponente nije veliki.

U tabeli 3.2 navedeni su parametri koji opisuju zvezdane komponente dobijene dekompozicijom posmatranog površinskog sjaja, a to je takođe predstavljeno i na slikama od 3.3 do 3.24.

Površinski sjaj aproksimiran modelima eksponencijalnog diska i centralnog ovala,  $\Sigma_b$  (eng. *surface brightness*), transformisan je u površinsku gustinu mase  $S_d$  (eng. *surface density*) u jedinicama solarnih masa po kvadratnom parseku koristeći formulu:

$$S_d [\text{M}_{\odot} \text{ pc}^{-2}] = \Upsilon_{\lambda} \times 10^{0.4 \times (M_{\odot, \text{abs}, \lambda} + M_c - \Sigma_b [\text{AB mag arcsec}^{-2}] + \Delta_{\text{AB-Vega}, \lambda})}. \quad (4.3)$$

Ovde je  $\Upsilon_{\lambda}$  isto što i odnos masa-sjaj ili  $M/L$  na određenoj talasnoj dužini za zvezdanu komponentu. U našem slučaju  $\lambda = 3.6 \mu\text{m}$ . Prilikom računanja površinske gustine,  $\Upsilon_{3.6}$  je ostavljen jednak jedinici, da bi u proceduri dinamičkog modelovanja bio određen (na dva različita načina za dva skupa dinamičkih modela). Faktor  $M_{\odot, \text{abs}, \lambda}$  je bolometrijska (apsolutna) magnituda Sunca, i na Spicerovoj talasnoj dužini posmatranja od  $3.6 \mu\text{m}$  iznosi 3.24 (Oh et al., 2008). Konstanta  $M_c$  računa se

<sup>2</sup>U par slučajeva je jedina prisutna komponenta opisana proširenim centralnim ovalom, ali to nije od prevelikog značaja.

kao  $5 \times \log_{10}\left(\frac{360 \times 60 \times 60}{2 \times \pi}\right) - 5.0$  što je  $\approx 21.57$ . Ova formula važi za Vega magnitude,<sup>3</sup> a naš površinski sjaj je u AB magnitudi. Potrebna konverzija na  $3.6 \mu\text{m}$  iznosi  $\Delta_{\text{AB-Vega},\lambda} = 2.777$ , bazirana na vrednostima iz IRAC priručnika.<sup>4</sup>

Doprinos rotacionoj krivi galaksija, a samim time i ukupnoj masi galaksija koji potiče od eksponencijalnog diska i sfernog centralnog ovala sračunati su koristeći programski paket GIPSY i rutinu `rotmod` koja kao ulaz koristi profil površinske gustine mase date u jedinicama Sunčevih masa po kvadratnom parseku ( $M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ ). Izračunavanje rotacione brzine skraćenog diska (od eng. *truncated exponential disc*) u ovoj rutini zasnovano je na radu Casertano (1983). Umesto nerealističnog beskonačno tankog eksponencijalnog diska korišćen je disk konačne debljine i to koristeći  $\text{sech}^2$  zakonitost za raspodelu mase po vertikalnoj  $z$ -komponenti (van der Kruit and Searle, 1981):

$$\Sigma \propto \frac{\text{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right)}{z_0}. \quad (4.4)$$

Doprinos ovakvog diska računat je uz pomoć navedenog `rotmod` paketa. Modeliranjem površinskog sjaja dobili smo procene karakteristične dužine eksponencijalnog diska, a iz nje je karakteristična debljina zvezdanog diska aproksimirana sa  $0.2 R_s$  (ista aproksimacija korišćena u Samurović et al., 2015; Jovanović, 2017). Tačne vrednosti koje smo koristili za karakteristične dužine i debljine diska date su u tabeli 4.1. Karakteristična dužina eksponencijalnog diska  $R_s$  odgovara vrednosti  $r_s$  datoj u tabeli 3.2, preračunatoj iz lučnih sekundi u kiloparseke za odgovarajuću daljinu galaksije.

Koristeći ponovo `rotmod` iz površinskih gustina mase (dobijene koristeći softver GALFIT za aproksimaciju posmatranja na  $3.6 \mu\text{m}$ ) sračunali smo i doprinos ukupnoj rotaciji od strane zvezdanog centralnog ovala.

Analogno proceduri za zvezdani disk i centralni oval, koristeći `rotmod` računamo i doprinos gasnog diska, što smo opisali u potpoglavlju 2.2.2. Površinska gustina mase za HI disk računa se direktno iz posmatranja, i to iz prvog momenta, tj. integrisa-

---

<sup>3</sup>Pod Vega i AB magnitude misli se na merila sjaja astronomskih objekata zasnovana na različitim istoimenim fotometrijskim sistemima. Za definicije videti npr. <http://astroweb.case.edu/ssm/ASTR620/mags.html>.

<sup>4</sup><https://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER>.

Tabela 4.1: Karakteristična dužina zvezdanog eksponencijalnog diska iz GALFIT preračunata koristeći daljinu datu u tabeli 3.1 –  $R_s$ ; usvojena karakteristična skala visine (debljine) zvezdanog eksponencijalnog diska –  $z_0$ ; i usvojena karakteristična skala visine (debljine) gasnog eksponencijalnog diska –  $z_0^{\text{gas}}$ . Debljine zvezdanog i gasnog diska su procenjene na način opisan u tekstu.

ID galaksije	$R_s$ [kpc]	$z_0$ [kpc]	$z_0^{\text{gas}}$ [kpc]
NGC 925	2.20	0.44	0.10
NGC 2366	1.75	0.35	0.1
NGC 2403	1.32	0.26	0.1
NGC 2841	3.45	0.69	0.2
NGC 2903	2.45	0.49	0.2
NGC 2976	0.73	0.15	0.1
NGC 3031 <sup>1k</sup>	2.23	0.45	0.2
NGC 3031 <sup>2k</sup>	2.36	0.47	0.2
NGC 3198	3.14	0.63	0.2
IC 2574	3.16	0.63	0.2
NGC 3351 <sup>d1</sup>	2.31	0.46	0.2
NGC 3351 <sup>d2</sup>	0.23	0.05	0.2
NGC 3521	-	-	0.2
NGC 3621	1.56	0.31	0.2
NGC 3627	2.54	0.51	0.1
NGC 4736	3.32	0.70	0.2
DDO 154	0.52	0.10	0.7
NGC 4826	1.28	0.26	0.1
NGC 5055	4.59	0.92	0.2
NGC 6946 <sup>1k</sup>	2.26	0.45	0.2
NGC 6946 <sup>2k,d1</sup>	3.09	0.62	0.2
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	0.72	0.15	0.2
NGC 7331	-	-	-
NGC 7793	1.25	0.25	0.1

nih HI THINGS mapa. Prilikom transformacije iz površinskog sjaja u površinsku gustinu mase uzet je u obzir i doprinos helijuma prostim skaliranjem sa faktorom 1.36. Ovim smo uključili sve značajne vrste neutralnog atomskog gasa, a zanemarili doprinos molekulskih vrsta, kao i jonizovanog gasa, za koji smatramo da nije veliki. Vertikalnu komponentu svuda opisujemo eksponencijalnim diskom kao i radijalnu (tzv. dvostruki eksponencijalni disk). Iz posmatranih raspodela površinskog sjaja gasa nije moguće dobiti pouzdane karakteristične skale dužine i debljine gasnog diska, tako da je u najvećem broju slučajeva korišćena vrednost od 0.1 kpc kod manjih

galaksija i 0.2 kpc kod većih. Razlog za ovu aproksimaciju je to što očekujemo da rotacija neutralnog diska bude najuređenija, a time da ovaj disk bude i najtanji. Ova aproksimacija je neodrživa kod par objekata uključenih u našu analizu, za koje je poznato da je prisutan izraženiji gasni disk. To je slučaj kod galaksije DDO 154 za koju je više autora našlo da ima gasni disk nezanemarljive debljine, pa čak i veće debljine od zvezdanog<sup>5</sup> (Stilp et al., 2013; Banerjee et al., 2011), i tu je korišćena odgovarajuća vrednost navedena u tabeli 4.1. Na više primera izračunali smo kolika razlika se javlja u rotacionoj brzini za dve ekstremne vrednosti debljine gasnog diska, disk nulte debljine i debljine 0.5 kpc, i dobili da je najveća razlika maksimalno par procenata vrednosti  $V_{\text{rot}}$ , tako da model vertikalne komponente nije od velikog uticaja na dobijene parametre najboljih modela, ali doprinosi realističnosti korišćenih modela.

## 4.1 Njutnovski dinamički modeli sa tamnom materijom

Za njutnovske dinamičke modele sa tamnom materijom, uopšteno računamo rotacionu brzinu kao:

$$V_c^2(r) = V_{\text{rot,bar}}^2 + V_{\text{DM}}^2, \quad (4.5)$$

gde  $V_c(r)$  označava ukupnu rotacionu tj. kružnu brzinu u disku na radijusu  $r$ ,  $V_{\text{rot,bar}}$  je isto kao i ranije doprinos barionske komponente rotacionoj brzini, a  $V_{\text{DM}}$  označava doprinos tamne materije. Korišćena su dva najpopularnija modela tamne materije: izotermalni sferni model, ISO (Jimenez et al., 2003), i Navarro, Frenk i Vajt model, NFW (Navarro et al., 1997) hladne tamne materije. Ovi modeli se tradicionalno koriste jer predstavljaju dva pravca, dve klase modela: utemeljene u posmatranjima

---

<sup>5</sup>Problem sa debljinom gasnog diska nađen je za uzorak FIGGS (Begum et al., 2008; Roychowdhury et al., 2010). Patuljasta nepravilna galaksija DDO 154 je čak opisivana i kao „tamna galaksija” zbog malog sjaja, ali sa značajnim količinama gasa, uporedivim sa doprinosom zvezda. Za njen gasni disk vrednost  $z_0$  određena je u radu Stilp et al. (2013) i iznosi 0.708 kpc. Stilp et al. (2013) su izveli debljinu gasnog diska galaksije DDO 154 po metodi diskutovanoj u Ott et al. (2001). Ova vrednost je uporediva sa izračunatom od autora Angus et al. (2012) u okviru MOND teorije. Slična, samo manje drastična, je situacija i kod patuljastih galaksija NGC 2366 i IC 2574.

sa centralnim jezgrom gustine (ISO), i proizašle iz teorije N tela (*N-body*), sa oštrijim nagibom gustine u centralnim delovima (NFW).

**Izotermalni sferni model (ISO)** Za izotermalni model računamo rotacionu brzinu kao:

$$V_c^2(r) = V_{\text{rot,bar}}^2 + V_{\text{ISO}}^2, \quad (4.6)$$

gde je  $V_{\text{ISO}}^2$  doprinos haloa tamne materije.

U tom slučaju koristimo profil gustine pseudo-izotermalne sfere tamne materije (Jimenez et al., 2003):

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \left( \frac{R}{R_c} \right)^2 \right]^{-1}, \quad (4.7)$$

gde  $\rho_0$  predstavlja konačnu centralnu gustinu, a  $R_c$  je radijus jezgra (eng. *core radius*). Ovaj profil se na velikim udaljenostima ponaša kao osnovni izotermalni profil  $\propto R^{-2}$ , a unutar  $R_c$  je „smekšan” da bi se izbegli problemi sa centralnim singularitetom. Može se pokazati da je za ovaj profil odgovarajuća rotaciona kriva u obliku:

$$V_{\text{ISO}}^2 = 4\pi G \rho_0 R_c^2 \left[ 1 - \frac{R_c}{R} \arctan \left( \frac{R}{R_c} \right) \right]. \quad (4.8)$$

Tamni izotermalni halo dodat je barionskoj materiji u proceduri dinamičkog modelovanja, a najbolji modeli iz fita predstavljeni su u potpoglavljima 4.2 i 4.3. Parametri koji opisuju ISO model,  $\rho_0$  and  $R_c$ , ostavljeni su kao slobodni tokom procedure fitovanja za oba skupa modela u najvećem broju slučajeva, gde god je to bilo moguće.

**Navaro-Frenk-Vajt model (NFW)** Za NFW model tamna materija dodata je kao:

$$V_{\text{DM}}^2(R) = V_{\text{CDM}}^2(R) = GM_{\text{CDM}}(R)/R, \quad (4.9)$$

gde  $M_{\text{CDM}}(R)$  predstavlja masu hladne tamne materije (eng. *Cold Dark Matter*, CDM) unutar radijusa  $R$ .

Korišćenje simulacija visoke rezolucije za N tela koja se ne sudaraju (eng. *high-resolution collisionless N-body simulations*) za formiranje struktura unutar kosmološkog okvira svemira sa hladnom tamnom materijom dale su tzv. Navaro-Frenk-Vajt

oblik profila gustine:

$$\rho(R) = \rho_{\text{crit}} \frac{\delta_0}{(R/R_s)(1 + R/R_s)^2}. \quad (4.10)$$

Ovde je  $\rho_{\text{crit}}$  kritična gustina ( $\rho_{\text{crit}} = 277.3 h^2 M_{\odot} \text{ kpc}^{-3}$ , [Navarro et al., 1997](#)),  $\delta_0$  je karakteristično zgušnjenje, a  $R_s$  je radijus skale (daljina na kojoj se nagib profila promeni od  $-1$  do  $-3$ ). Logaritamski nagib novog NFW profila na radijusu  $R \sim R_s$  sličan je kao kod izotermalne sfere ([Mo et al., 2010](#)), što olakšava normalizaciju. Parametar koncentracije,  $C$ , definisan je kao  $C = R_{200}/R_s$ , gde je  $R_{200} = (M_{200}/(4\pi/3 \times 200\rho_{\text{crit}}))^{1/3}$  a  $M_{200}$  je virijalna masa.<sup>6</sup> Masa tamne materije unutar radijusa  $R$  (izraženog kao  $x \equiv R/R_s$ ) je:

$$M_{\text{CDM}}(x) = 4\pi\rho_s R_s^3 \left[ \ln(1+x) + \frac{x}{1+x} \right], \quad (4.11)$$

gde je  $\rho_s$  gustina na  $R_s$ . Uočimo da ova masa veoma sporo (logaritamski) divergira kad  $x \rightarrow \infty$ , znatno sporije nego kod izotermalnog profila. Kao i kod pojedinih politropa koje opisuju strukturu zvezda, ova formalna singularnost nema realan fizički značaj. NFW halo dodat je čisto barionskoj masi dobijenoj iz posmatranja zvezdane i gasne komponente galaksije. Intuitivno je jasno da NFW profil opisuje materiju koja je koncentrisanija unutar  $R_s$ , a daleko brže opada na većim udaljenostima, čime se umanjuje potreba za skraćivanjem kada se radi o realističnim galaksijama.

U svim našim modelima sa NFW profilom, kao i kod ISO modela, najbolji modeli su predstavljeni u potpoglavlju 4.2 gde su, slično,  $C$  i  $R_{200}$  ostavljeni kao slobodni parametri u proceduri fitovanja. U sekciji 4.3 predstavljeni su maseni modeli sa fiksnim  $M/L$  odnosom, a svi parametri NFW modela su opet ostavljeni slobodnim.

### 4.1.1 Postupak modelovanja

Procedura nalaženja najboljeg dinamičkog modela podrazumeva nalaženje najboljeg fita između posmatrane rotacione brzine i zbira kvadrata ostalih komponenta. Najbolji fit za različite modele i njihove parametre dobijen je minimizacijom

---

<sup>6</sup>U NFW modelu može se definisati masa  $M_{200}$  unutar radijusa  $R_{200}$ , u okviru koga srednja gustina dostigne vrednost 200 puta veću od kritične. Ima indicija da je ovo radijus unutar koga se nalazi sva virijalizovana masa (na primer [White, 2001](#)).

veliĉine  $\chi^2$ :

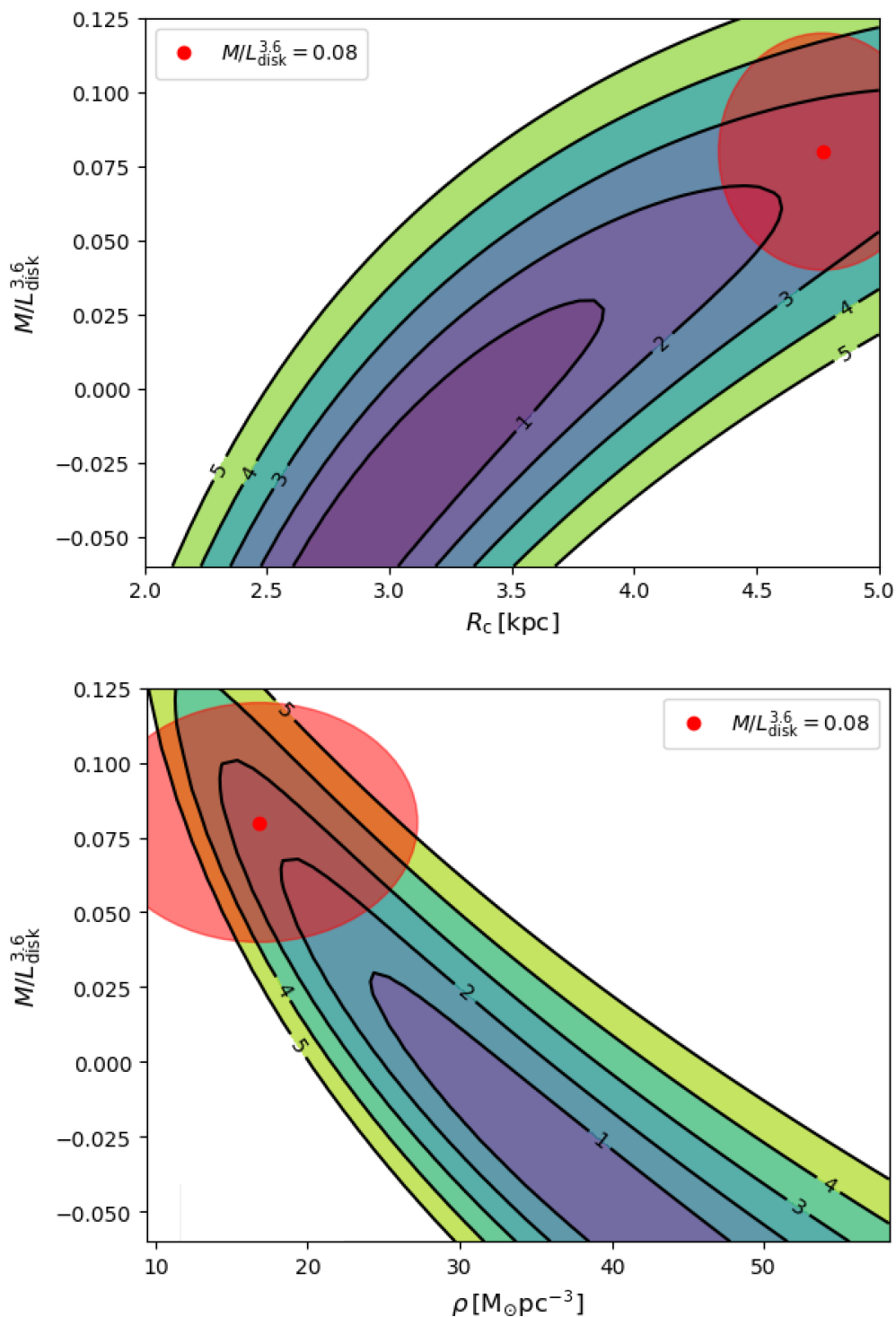
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{p_i^{\text{obs}} - p_i^{\text{mod}}}{\Delta p_i^{\text{obs}}} \right]^2, \quad (4.12)$$

gde je  $N$  broj posmatranja,  $p_i^{\text{obs}}$  su posmatrane vrednosti (na slikama od 3.45 gornji paneli), vrednosti modela su  $p_i^{\text{mod}}$ , i  $\Delta p_i^{\text{obs}}$  su neodreĉenosti posmatranih vrednosti brzina na datim radijusima. Minimizacija je Metod najmanjih kvadrata (MNK), koristeći programski paket `rotmas` iz softvera GIPSY.

Kod jednog broja modela „best-fit” parametri imali su nefiziĉke ili besmislene vrednosti (na primer negativne). U tom sluĉaju ispitali smo raspodelu  $\chi^2$  vrednosti za najbolji fit u prostoru slobodnih parametara. To znaĉi da smo posmatrali oblik  $\chi^2$  funkcije na projekcijama u ravni koja je odreĉena sa dva slobodna parametra. Na takvim projekcijama ucrtane su i konture koje prate stepene poverenja (eng. *confidence levels*) i koje oznaĉavaju kolika je udaljenost od „best-fit” modela izraĉena u standardnim odstupanjima, takozvanim sigma vrednostima. U velikoj veĉini modela parametarski prostor je višedimenzionalan (3 ili 4 dimenzije) jer ga odreĉuju parametri koji opisuju tamnu materiju, odnos masa-sjaj za centralni oval (tamo gde je prisutan), kao i odnos masa-sjaj za zvezdani disk u prvom skupu modela. Posmatrajući projekcije ( $\sigma$  konturu u parametarskim ravnima, na primer slika 4.1) izabrali bismo najbolju taĉku sa površi koja se odlikuje smislenim vrednostima slobodnih parametara, a koji je unutar  $3\sigma$  konture od najboljeg fita (odgovara stepenu poverenja od 99.73 %). Na slici 4.1 moĉe se videti primer raspodele  $\chi^2$  na  $M/L_{\text{disk}} - C$  i  $M/L_{\text{disk}} - R_{200}$  površima, zajedno sa izabranom vrednošću koja predstavlja model. Opisana procedura otklanja problem koji imamo sa inicijalnim *best-fit* vrednostima za parametre. Ovakvi modeli su takodje dobijeni sa svim parametrima fita slobodnim, osim u malom broju sluĉajeva gde je drugaĉije naznaĉeno. Za najbolji model nije izabran onaj koji odlikuje minimalna  $\chi^2$  vrednost, ali je oblik  $\chi^2$  funkcije i dalje korišćen za odlučivanje o modelu koji najbolje reprezentuje fit sa slobodnim parametrima za datu galaksiju. Kvalitet fita za svaki od dinamiĉkih modela dobijen koristeći vrednosti i statistiku  $\chi^2$  dat je u tabelama 4.2 i 4.3 u koloni oznaĉenoj sa „flag”.

Odnos mase i sjaja za gasnu komponentu je fiksiran na 1 u svim sluĉajevima





Slika 4.1: Dinamičko modelovanje galaksije NGC 925 sa slobodnim  $M/L_{\text{disk}}$  i ISO haloom tamne materije: intervali poverenja na  $\chi^2$  površi u prostoru slobodnih parametara, projekcija na  $R_c - M/L_{\text{disk}}$  ravan (gore) i  $\rho - M/L_{\text{disk}}$  (dole). Parametri izabranog optimalnog modela su ucrtani sa neodređenostima (crveno).

kod oba skupa modela (nakon što je uračunat doprinos helijuma sa faktorom od 1.36, kao što je gore pomenuto). Za neke od budućih analiza vidimo mogućnost dubljeg istraživanja pomenutog odnosa posmatranog neutralnog vodonika i ukupnog sadržaja gasa, neutralnog i molekularnog, i kako detaljnije tretiranje gasa utiče na dinamičko modelovanje.

Za prvi skup modela (slike 4.2 - 4.23),  $M/L^{3.6}$  parameter za zvezdanu komponentu (i za disk i za centralni oval) ostavljen je kao slobodan, pored dva slobodna parametra koji opisuju model tamne materije ( $(\rho_0, R_c)$  i  $(\rho_s, R_s)$ ), za ISO i NFW, respektivno. Takođe, gde god je prisutna druga zvezdana komponenta (centralni oval ili drugi eksponencijalni disk),  $M/L$  sa kojim se ona skalira je slobodan u proceduri fitovanja. Iz ove vrste analize dobijamo jednu vrednost za  $M/L^{3.6}$  koja globalno opisuje određenu komponentu (disk ili centralni oval) za datu galaksiju na svim radijusima.

Kod drugog skupa modela (slike 4.26 - 4.43) istraživali smo kakvi dinamički modeli se dobijaju kada uzmemo ograničenja za  $M/L^{3.6}$  iz modela sinteze zvezdanih populacija, tzv. SPS modela. Odnos masa-sjaj za prvu komponentu (u najvećem broju slučajeva eksponencijalni disk) je dobijen iz ovih evolucionih modela i fiksiran na tu vrednost, dok su ostali ulazni parametri fita slobodni, sa već pomenutim izuzetkom gasa.

## 4.2 Dinamički modeli sa slobodnim odnosom masa-sjaj

Predstavljamo dinamičke modele koji su rezultat procedure fitovanja rotacionih krivih koristeći posmatrane profile zvezdane i gasne komponente zajedno sa teorijskim potencijalom tamne materije. Korišćena su dva najrasprostranjenija modela za komponentu tamne materije, čiji opisi su dati u sekciji 4.1. Slobodni parametri kod ISO modela su  $R_c$  i  $\rho_0$ , a  $C$  i  $R_{200}$  kod NFW modela. U ovom prvom skupu modela zvezdani odnos mase i sjaja za komponentu diska ( $M/L_{\text{disk}}$ ) je slobodan parametar u proceduri fitovanja, a zvezdani za komponentu centralnog ovala ( $M/L_{\text{bulge}}$ ) je slobodan parametar kod svih modela gde je to bilo moguće. Kao što je već pomenuto,

tamo gde je *best-fit* model imao nerealne vrednosti izabran je drugi najoptimalniji model unutar  $3\sigma$  odstupanja od *best-fit* kada se analizira oblik  $\chi^2$  u prostoru slobodnih parametara modela.

U tabelama 4.2 i 4.3 dajemo  $\bar{\chi}^2$  vrednosti za najbolje modele za sve galaksije za oba profila tamne materije, zajedno sa odnosom masa-sjaj. Izračunate odgovarajuće mase različitih komponenti date su u tabelama 5.1 i 5.2. Kolona 7 „*flag*” označava modele gde nije izabran „best-fit” set parametara već neka od kombinacija smislenih vrednosti parametara sa stepenom poverenja unutar naznačene  $\sigma$  konture.

Tabela 4.2: ISO modeli:

Kolona (1): ID galaksije.

Kolona (2): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za zvezdanu komponentu disk na  $3.6 \mu\text{m}$ .

Kolona (3): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za centralni oval na  $3.6 \mu\text{m}$ . Kada je druga komponenta takođe eksponencijalni disk prisutna je oznaka „d2”.

Kolona (4): Radijus jezgra (*core radius*)  $R_c$  u jedinicama kpc.

Kolona (5): Gustina  $\rho_0$  u jedinicama  $10^{-3} M_\odot \text{pc}^{-3}$ .

Kolona (6): Redukovana srednja  $\bar{\chi}^2$  vrednost za najbolji/izabrani model.

Kolona (7): Kada izabrani model nije najbolji fit (sa minimalnim  $\bar{\chi}^2$ ) označeno je unutar koje  $\sigma$  konture u  $\chi^2$  prostoru se nalazi model.

U koloni (1) prisutna je oznaka 1k ili 2k kad su za datu galaksiju korišćena oba (dva različita) modela dekompozicije zvezdane komponente (videti tekst za detalje). N/A vrednost stoji kod greški koje su u proceduri fitovanja bile nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M/L_{\text{disk}}^{3.6}$	$M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$	$R_c$ [kpc]	$\rho_0$ [ $10^{-3} M_\odot \text{pc}^{-3}$ ]	$\bar{\chi}^2$	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NGC 925	$0.08 \pm 0.08$	–	$4.8 \pm 0.8$	$17 \pm 21$	0.28	3-sigma
NGC 2366	$0.50 \pm 0.08$	–	$3.1 \pm 1.0$	$7.3 \pm 3.4$	0.02	–
NGC 2403	$0.44 \pm 0.02$	–	$3.6 \pm 0.2$	$29.9 \pm 3.1$	0.69	–
NGC 2841	$0.35 \pm 0.06$	$0.27 \pm 0.50$	$2.4 \pm 2.5$	$228 \pm 484$	0.17	–
NGC 2903	$0.24 \pm 0.04$	$0.45 \pm 0.10$	$3.6 \pm 1.6$	$42 \pm 36$	0.23	–
NGC 2976	$0.13 \pm 0.04$	–	$1.7 \pm 0.5$	$100 \pm 31$	0.80	–
NGC 3031 <sup>1k</sup>	$0.50 \pm 0.20$	–	$3 \pm 12$	$30 \pm 210$	0.80	–
NGC 3031 <sup>2k</sup>	$0.51 \pm 0.22$	$0.16 \pm 0.18$	$3 \pm 21$	$30 \pm 130$	0.78	3-sigma
NGC 3198	$0.28 \pm 0.06$	–	$4.2 \pm 1.9$	$22 \pm 18$	0.44	–
IC 2574	$0.13 \pm 0.06$	–	$6.1 \pm 0.6$	$5.7 \pm 0.8$	0.09	–
NGC 3351 <sup>d2</sup>	$0.72 \pm 0.70$	$1.41^{\text{d2}} \pm 0.22$	$3 \pm 26$	$20 \pm 260$	0.44	–
NGC 3521	–	$0.22 \pm 0.08$	$2.3 \pm 3.0$	$100 \pm 260$	0.38	–
NGC 3621	$0.17 \pm 0.01$	–	$3.1 \pm 0.2$	$42 \pm 4$	0.23	–
NGC 3627	$0.28 \pm 0.12$	–	$1.3 \pm \text{N/A}$	$148 \pm \text{N/A}$	0.82	3-sigma
NGC 4736	$0.92 \pm 2.80$	$0.40 \pm 0.02$	$4.8 \pm \text{N/A}$	0.0	0.82	–
DDO 154	$0.25 \pm 0.20$	–	$1.5 \pm 0.1$	$26 \pm 3$	0.16	–
NGC 4826	$0.25 \pm 0.19$	$0.10 \pm 0.96$	$7.8 \pm 2.0$	$10 \pm 110$	0.44	3-sigma
NGC 5055	$0.53 \pm 0.13$	$0.36 \pm 0.01$	$7.3 \pm 5.2$	$8 \pm 11$	0.38	–
NGC 6946 <sup>1k</sup>	$0.47 \pm 0.18$	–	$3.3 \pm 2.6$	$70 \pm 100$	0.34	–
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	$0.74 \pm 1.01$	$0.16^{\text{d2}} \pm 0.23$	$5 \pm 29$	$20 \pm 240$	0.22	–
NGC 7331	–	$0.19 \pm 0.06$	$2.5 \pm 1.8$	$120 \pm 470$	1.01	1-sigma
NGC 7793	$0.41 \pm 0.08$	–	$2.3 \pm 1.1$	$44 \pm 35$	3.11	–

Tabela 4.3: NFW modeli:

Kolona (1): ID galaksije.

 Kolona (2): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za zvezdanu komponentu disk na  $3.6 \mu\text{m}$ .

 Kolona (3): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za centralni oval na  $3.6 \mu\text{m}$ . Kada je druga komponenta takođe eksponencijalni disk prisutna je oznaka „d2”.

 Kolona (4):  $C$  parameter koncentracije.

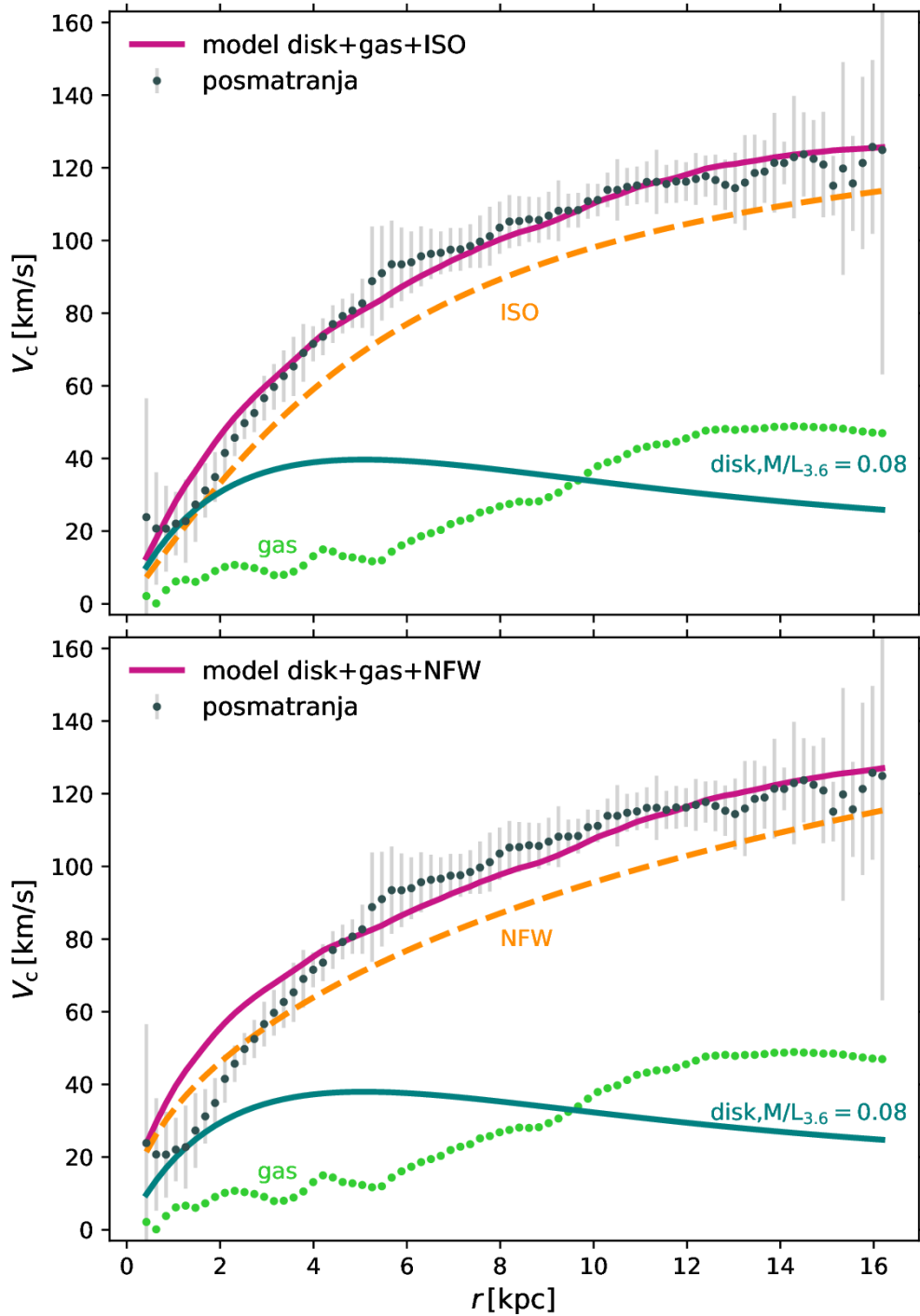
 Kolona (5): Radijus  $R_{200}$  u kpc.

 Kolona (6): Redukovana srednja  $\bar{\chi}^2$  vrednost za najbolji/izabrani model.

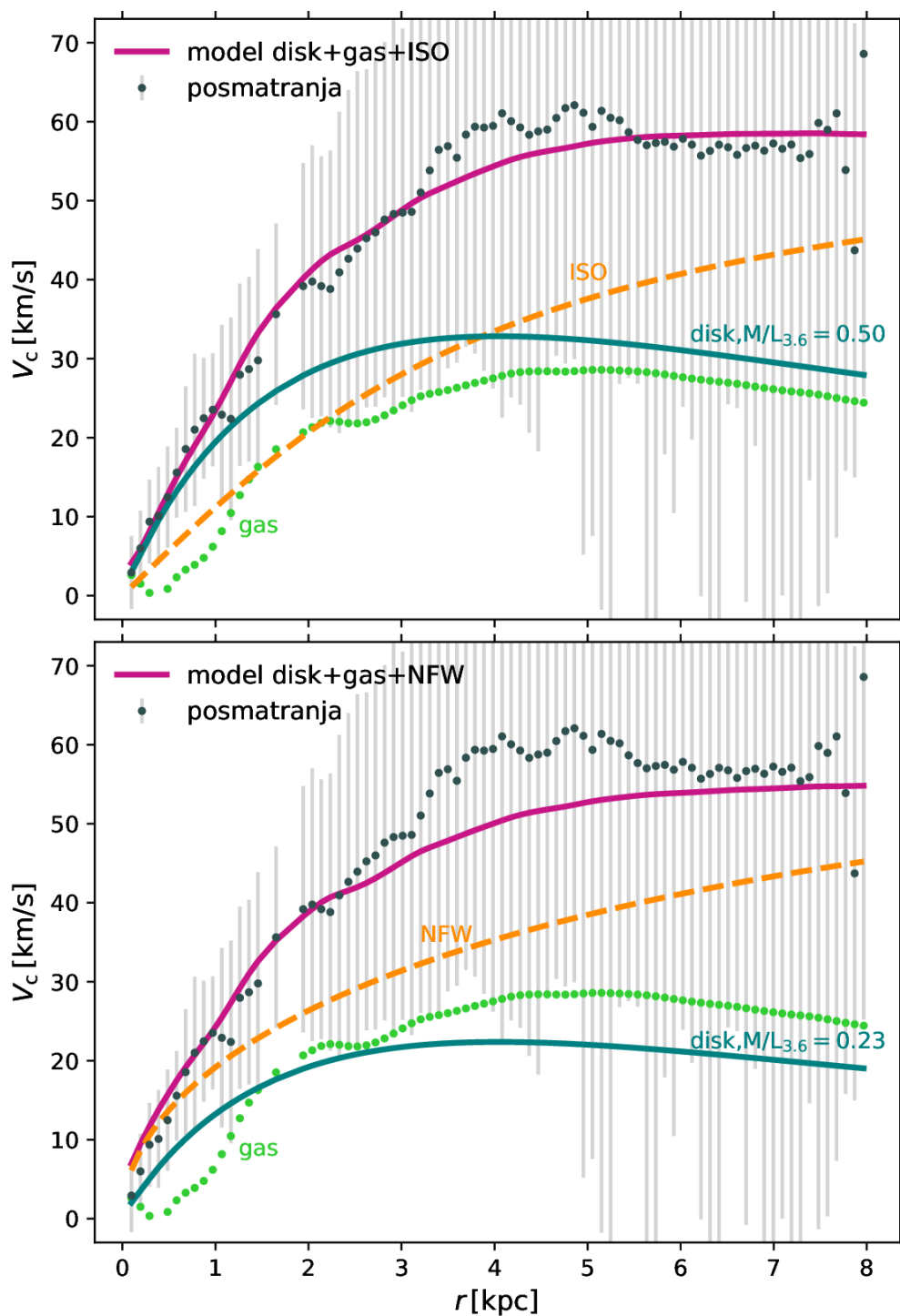
 Kolona (7): Kada izabrani model nije najbolji fit (sa minimalnim  $\bar{\chi}^2$ ) označeno je unutar koje  $\sigma$  konture u  $\chi^2$  prostoru se nalazi model.

U koloni (1) prisutna je oznaka 1k ili 2k kad su za datu galaksiju korišćena oba modela dekompozicije zvezdane komponente (videti tekst za detalje). N/A vrednost stoji kod greški koje su u proceduri fitovanja bile nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

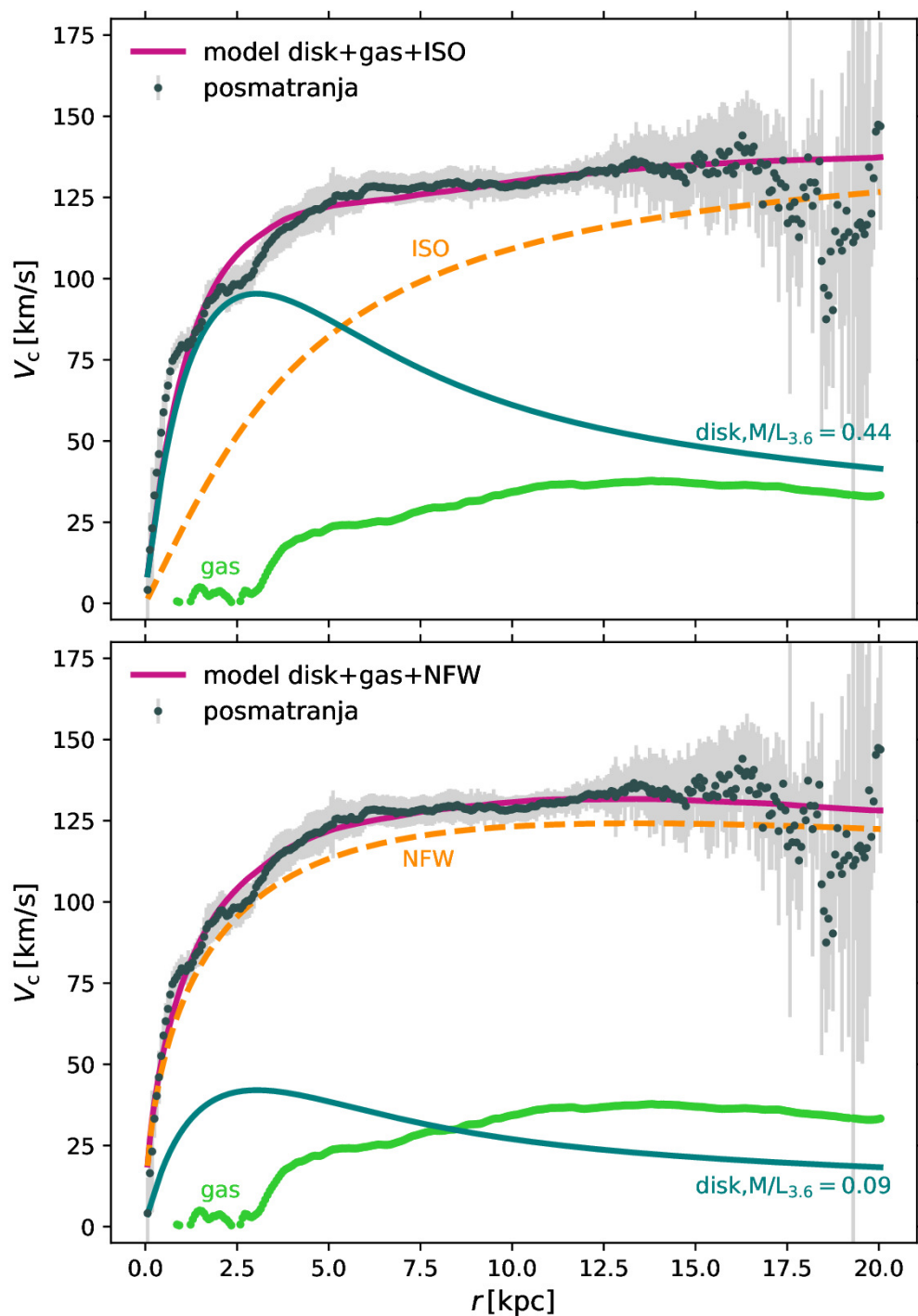
ID galaksije	$M/L_{\text{disk}}^{3.6}$	$M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$	$C$	$R_{200}$ [kpc]	$\bar{\chi}^2$	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NGC 925	$0.08 \pm 0.10$	–	$2.0 \pm 2.1$	$129 \pm 19$	1.09	3-sigma
NGC 2366	$0.23 \pm 0.09$	–	$2 \pm 375$	$44 \pm \text{N/A}$	0.06	1-sigma
NGC 2403	$0.08 \pm 0.02$	–	$11.7 \pm 0.5$	$72.5 \pm 0.3$	0.30	3-sigma
NGC 2841	$0.36 \pm 0.02$	$0.46 \pm 0.08$	$8.0 \pm 0.4$	$157.2 \pm 1.4$	0.14	–
NGC 2903	$0.20 \pm 0.02$	$0.41 \pm 0.08$	$7.8 \pm 1.0$	$102 \pm 2$	0.21	–
NGC 2976	$0.06 \pm 0.13$	–	$3.4 \pm 7.3$	$150 \pm 347$	2.03	3-sigma
NGC 3031 <sup>1k</sup>	$0.45 \pm 0.15$	–	$10 \pm 17$	$76 \pm 15$	0.81	–
NGC 3031 <sup>2k</sup>	$0.47 \pm 0.05$	$0.15 \pm 0.13$	$8.6 \pm 6.3$	$73 \pm \text{N/A}$	0.80	3-sigma
NGC 3198	$0.23 \pm 0.03$	–	$4.9 \pm 0.8$	$93 \pm 2$	0.83	–
IC 2574	$0.14 \pm 0.17$	–	$1.0 \pm 6.0$	$89 \pm \text{N/A}$	0.56	3-sigma
NGC 3351 <sup>d2</sup>	$0.79 \pm 0.76$	$1.05^{\text{d2}} \pm 2.40$	$6 \pm 150$	$59 \pm 9$	0.45	1-sigma
NGC 3521	–	$0.20 \pm 0.46$	$10 \pm 50$	$98 \pm 17$	0.32	3-sigma
NGC 3621	$0.14 \pm 0.01$	–	$5.2 \pm 0.7$	$96 \pm 2$	0.51	3-sigma
NGC 3627	$0.35 \pm 0.01$	–	$2.9 \pm 2.6$	$34 \pm \text{N/A}$	0.67	3-sigma
NGC 4736	$0.90 \pm 0.43$	$0.40 \pm 0.62$	$4 \pm \text{N/A}$	$1 \pm \text{N/A}$	0.83	–
DDO 154	$0.17 \pm 0.21$	–	$3.5 \pm 0.4$	$39.9 \pm 0.9$	0.27	1-sigma
NGC 4826	$0.21 \pm 0.15$	$0.10 \pm 0.86$	$2.1 \pm 3.4$	$169 \pm 7$	0.43	3-sigma
NGC 5055	$0.42 \pm 0.09$	$0.33 \pm 0.01$	$4.8 \pm 2.2$	$96 \pm 4$	0.38	–
NGC 6946 <sup>1k</sup>	$0.28 \pm 0.10$	–	$11 \pm 3$	$111 \pm 6$	0.39	–
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	$0.69 \pm 0.53$	$0.13^{\text{d2}} \pm 0.41$	$4 \pm 21$	$103 \pm 43$	0.24	1-sigma
NGC 7331	–	$0.19 \pm 0.11$	$8 \pm 15$	$116 \pm 2$	1.10	1-sigma
NGC 7793	$0.13 \pm 0.09$	–	$9.0 \pm 2.1$	$67.6 \pm 4.8$	2.92	–



Slika 4.2: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 925 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$ , koji je naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz *rotmas* predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa jednom zvezdanom komponentom - eksponencijalnim diskom. Videti tekst za detalje.

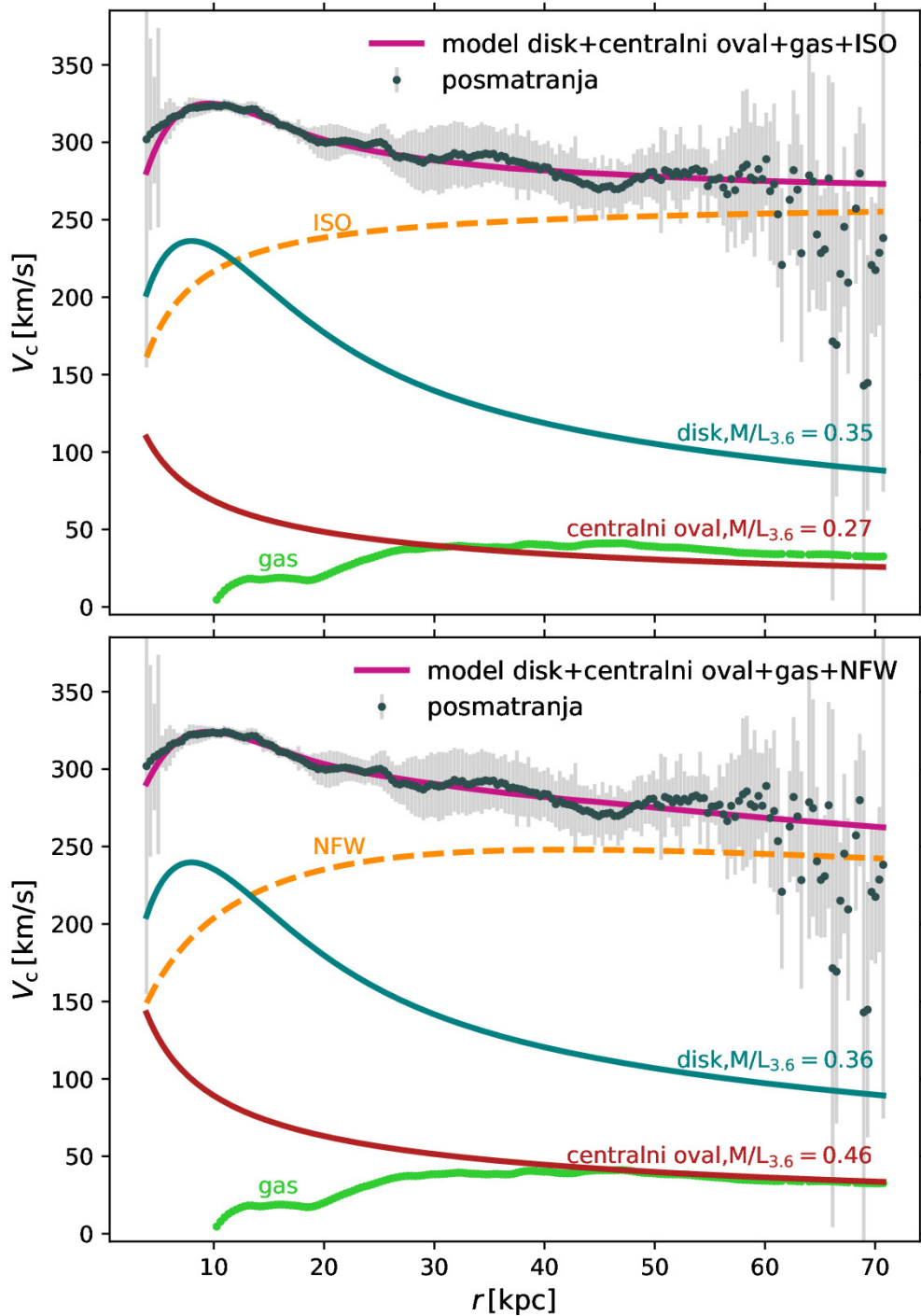


Slika 4.3: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2366 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.

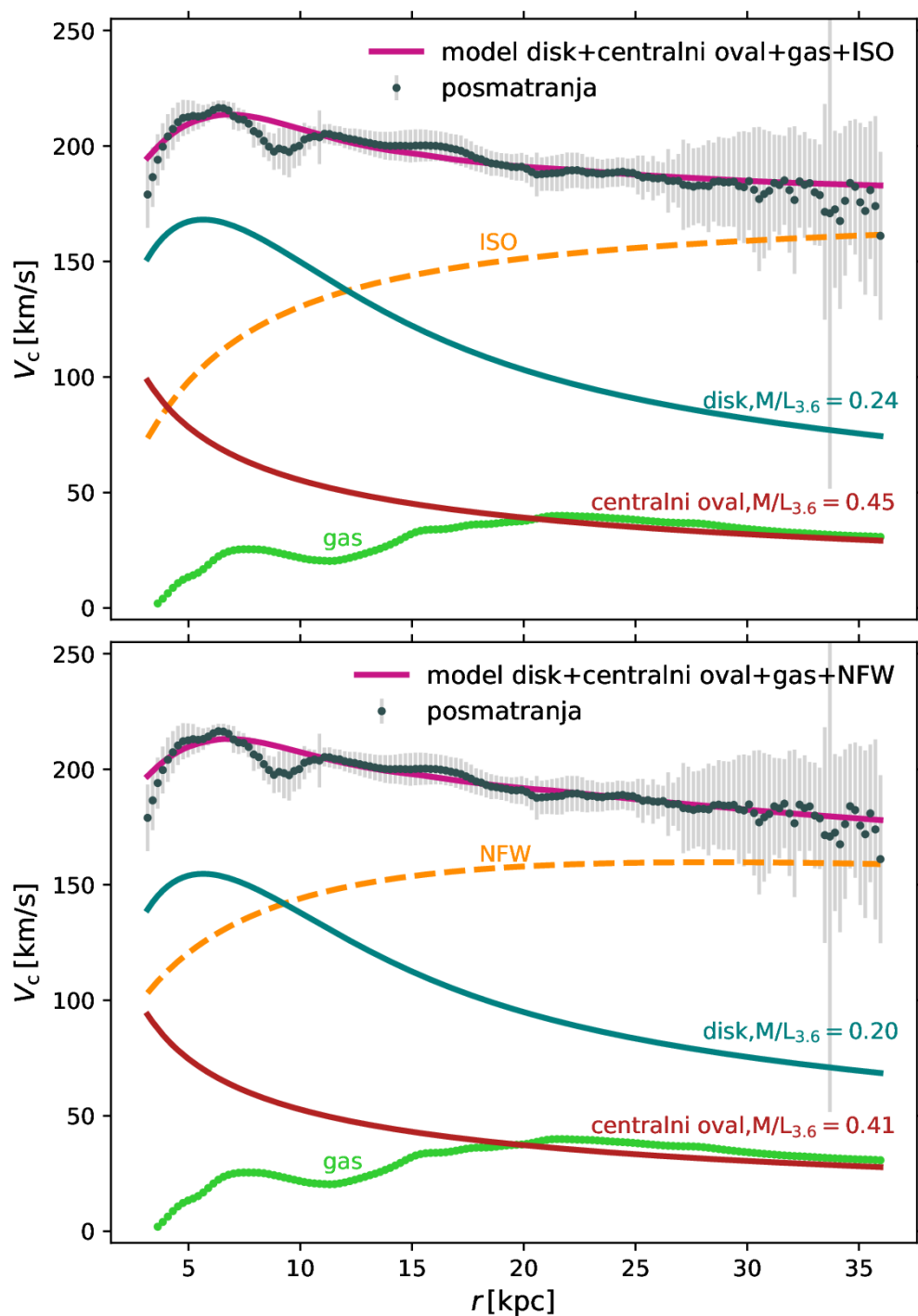


Slika 4.4: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2403 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.

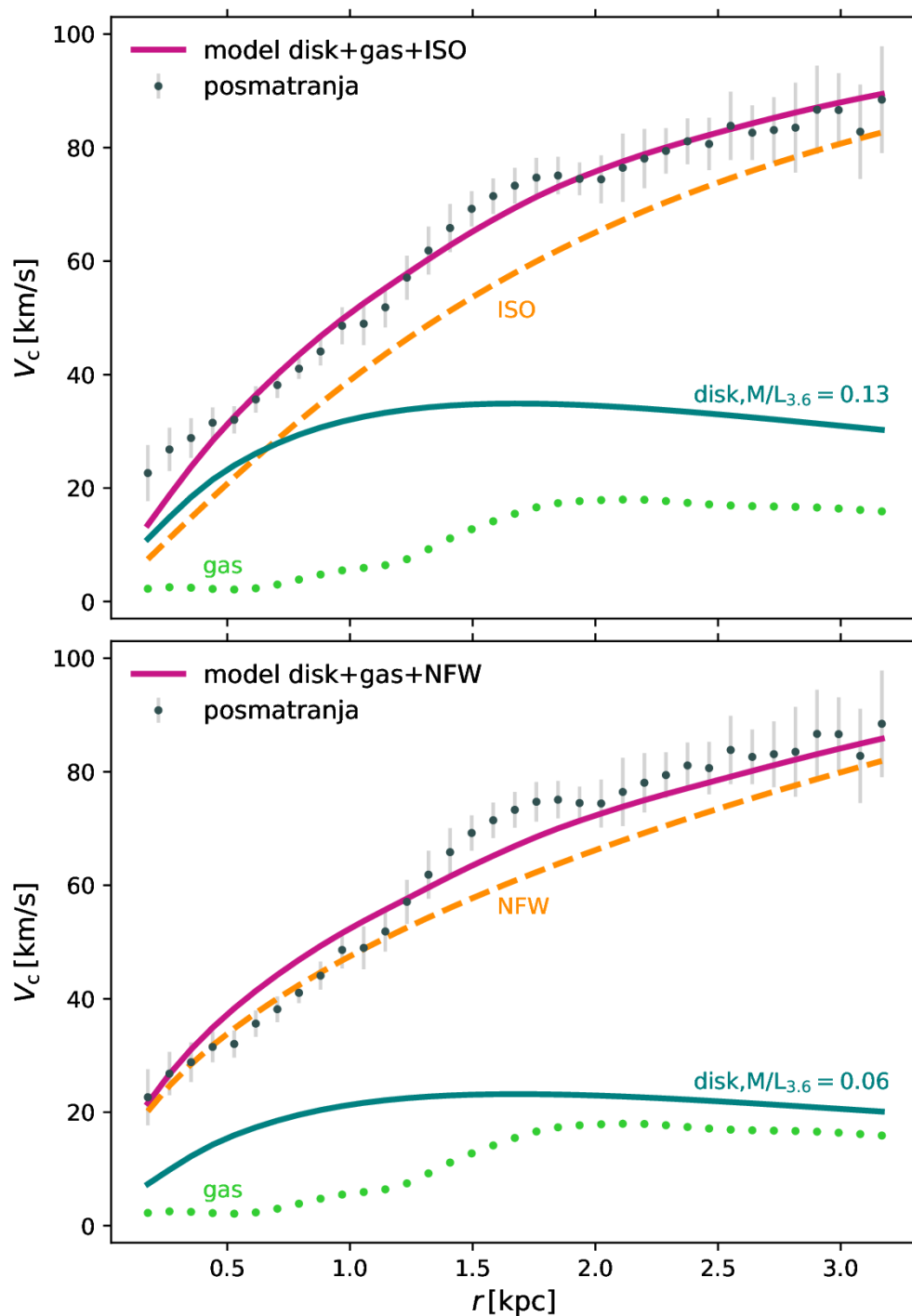




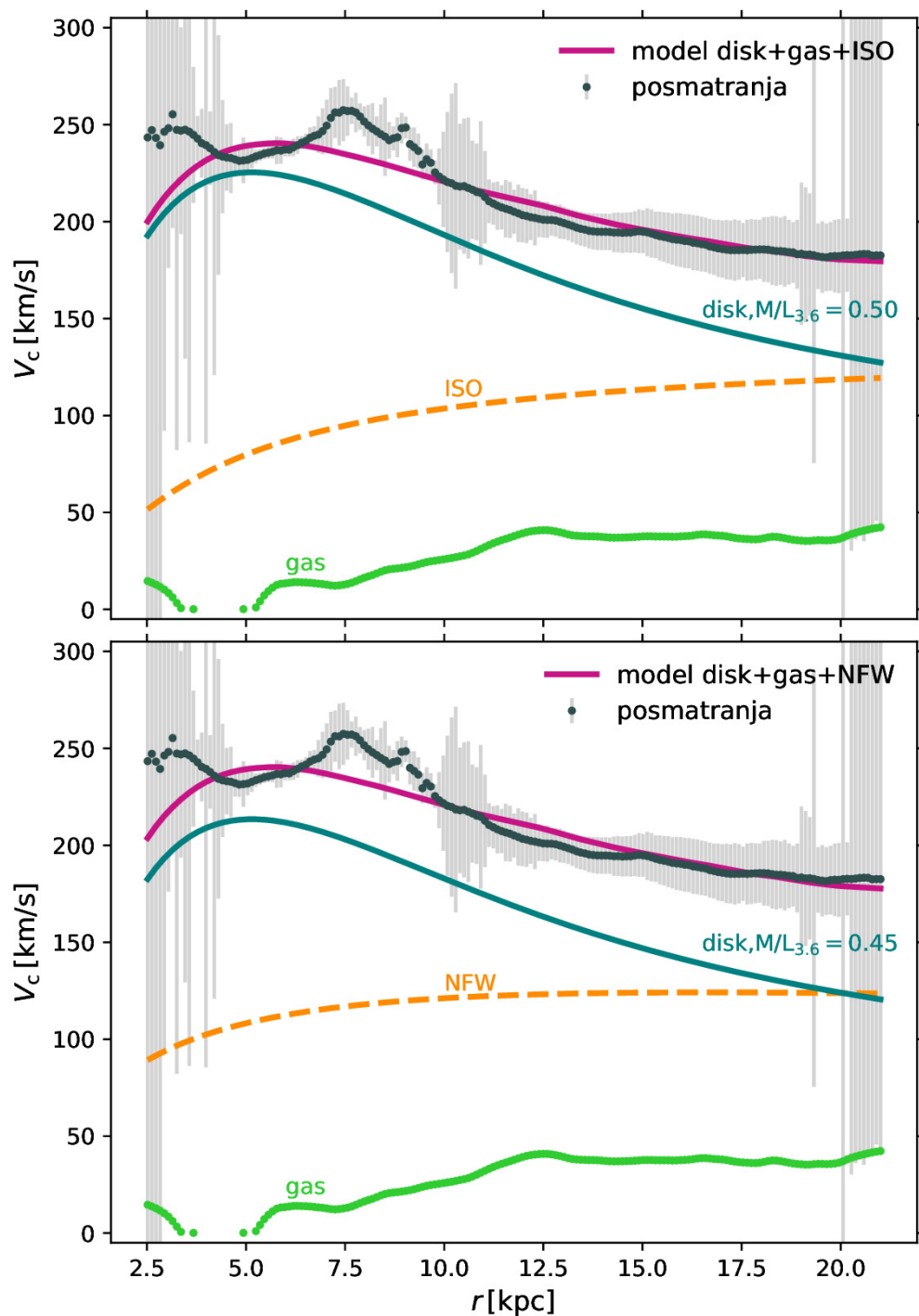
Slika 4.5: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2841 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$ , koji je naznačen na liniji. Crvena linija je doprinos zvezdanog centralnog ovala skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$ , koji je takođe naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz *rotmas* predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa dve zvezdane komponente - eksponencijalnim diskom i centralnim ovalom. Videti tekst za detalje.



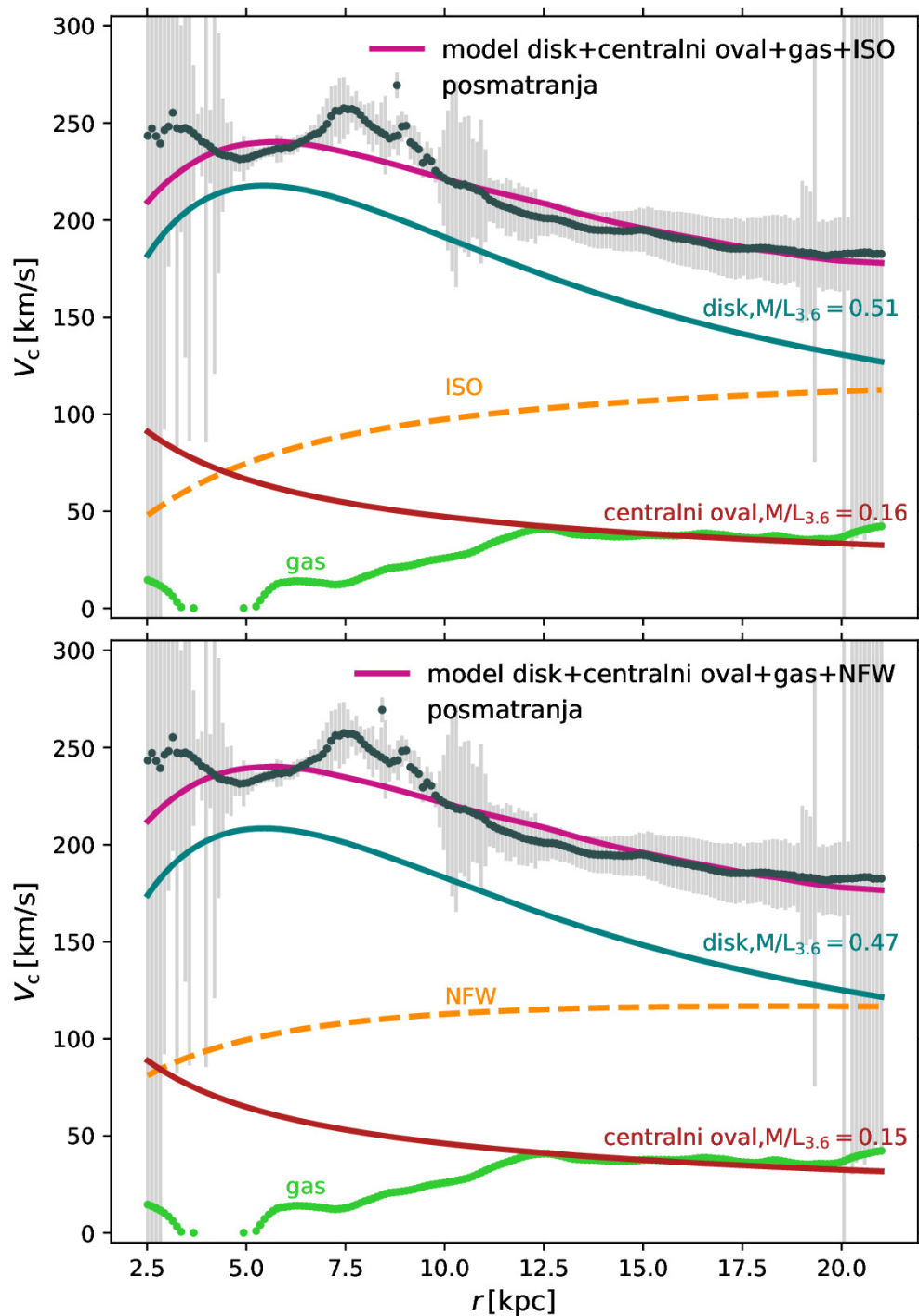
Slika 4.6: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2903 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.5. Videti tekst za detalje.



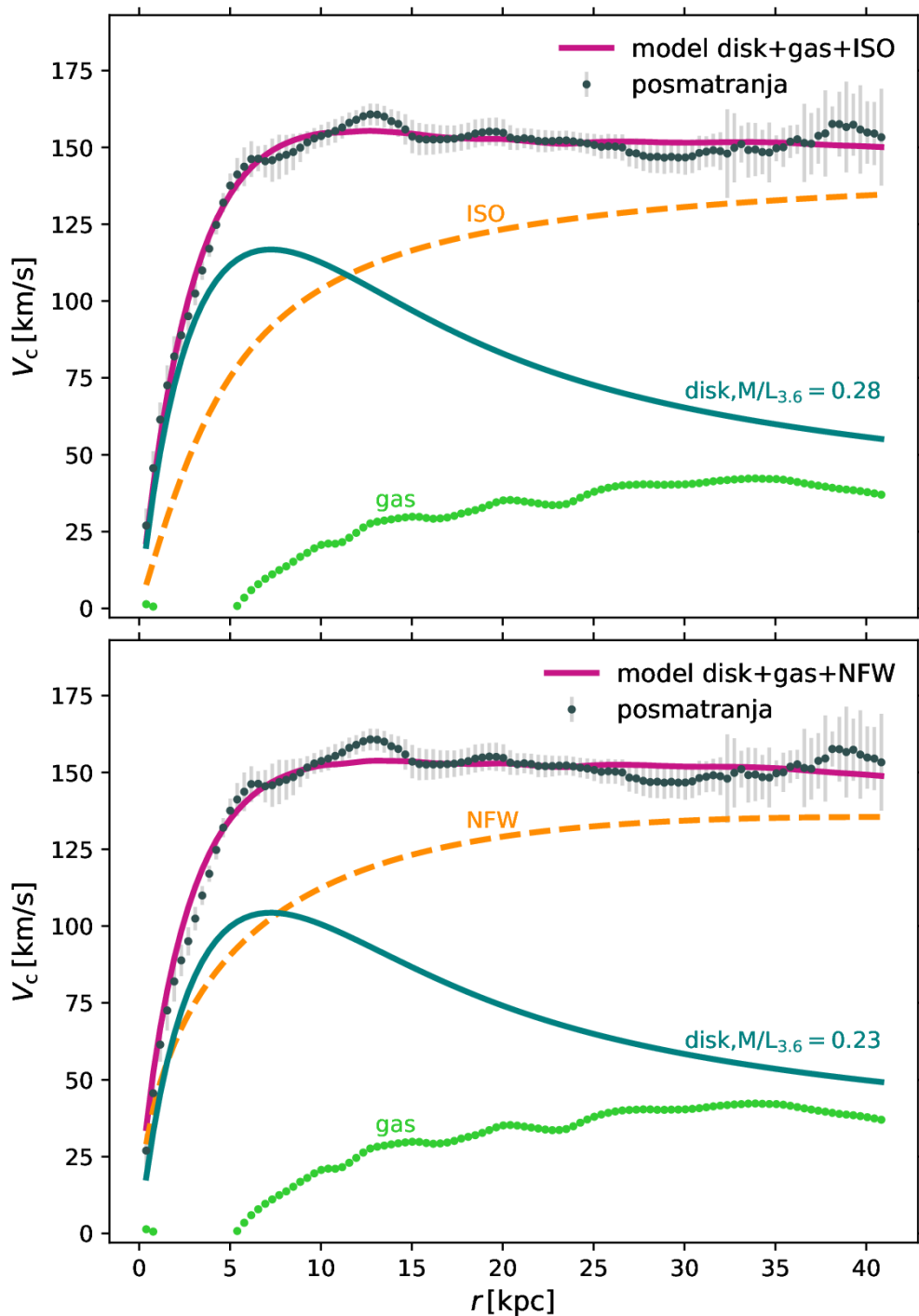
Slika 4.7: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2976 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.



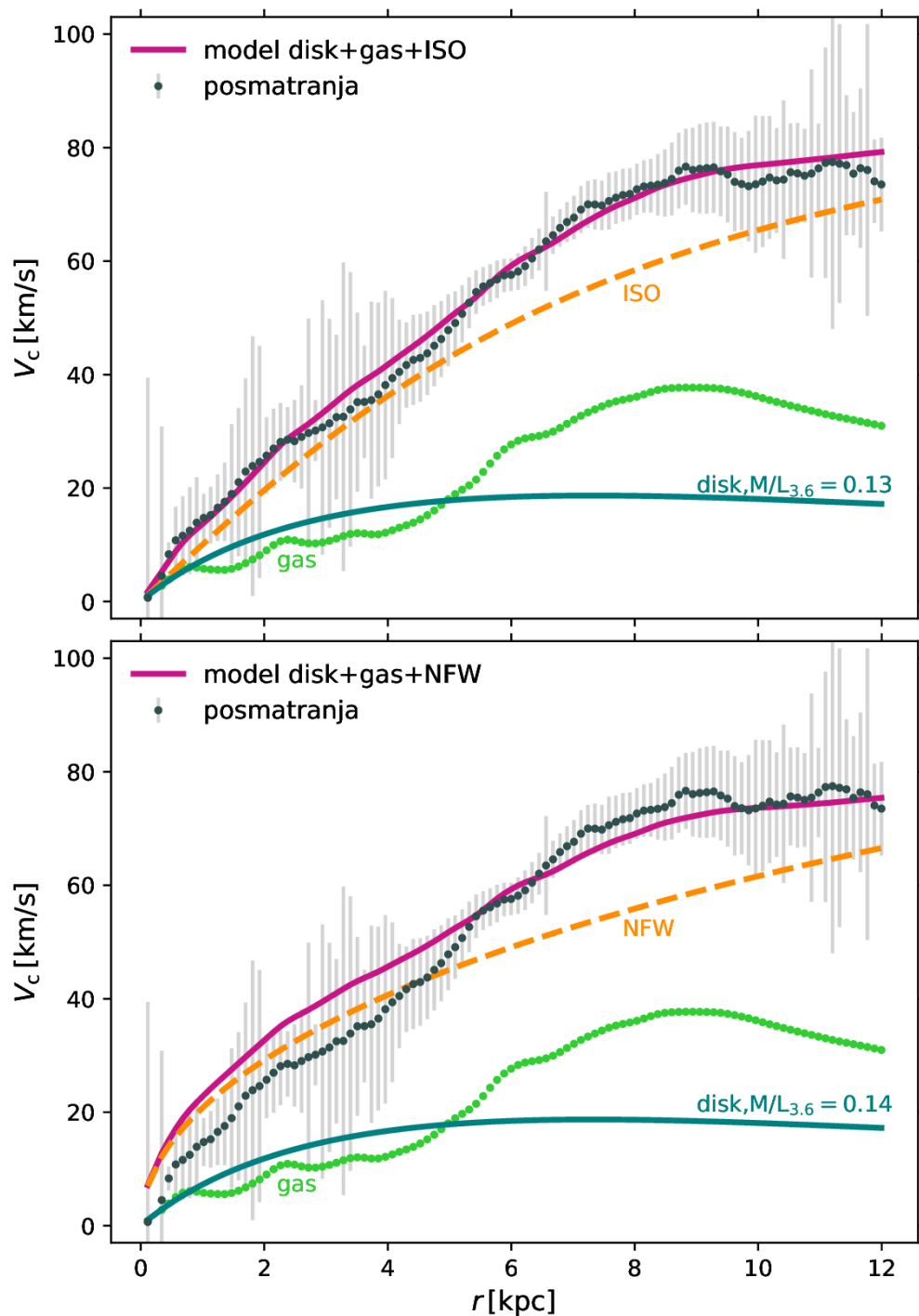
Slika 4.8: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3031 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Za ovu galaksiju data su oba modela i ovo je model sa jednom komponentom, eksponencijalnim diskom. Videti tekst za detalje.



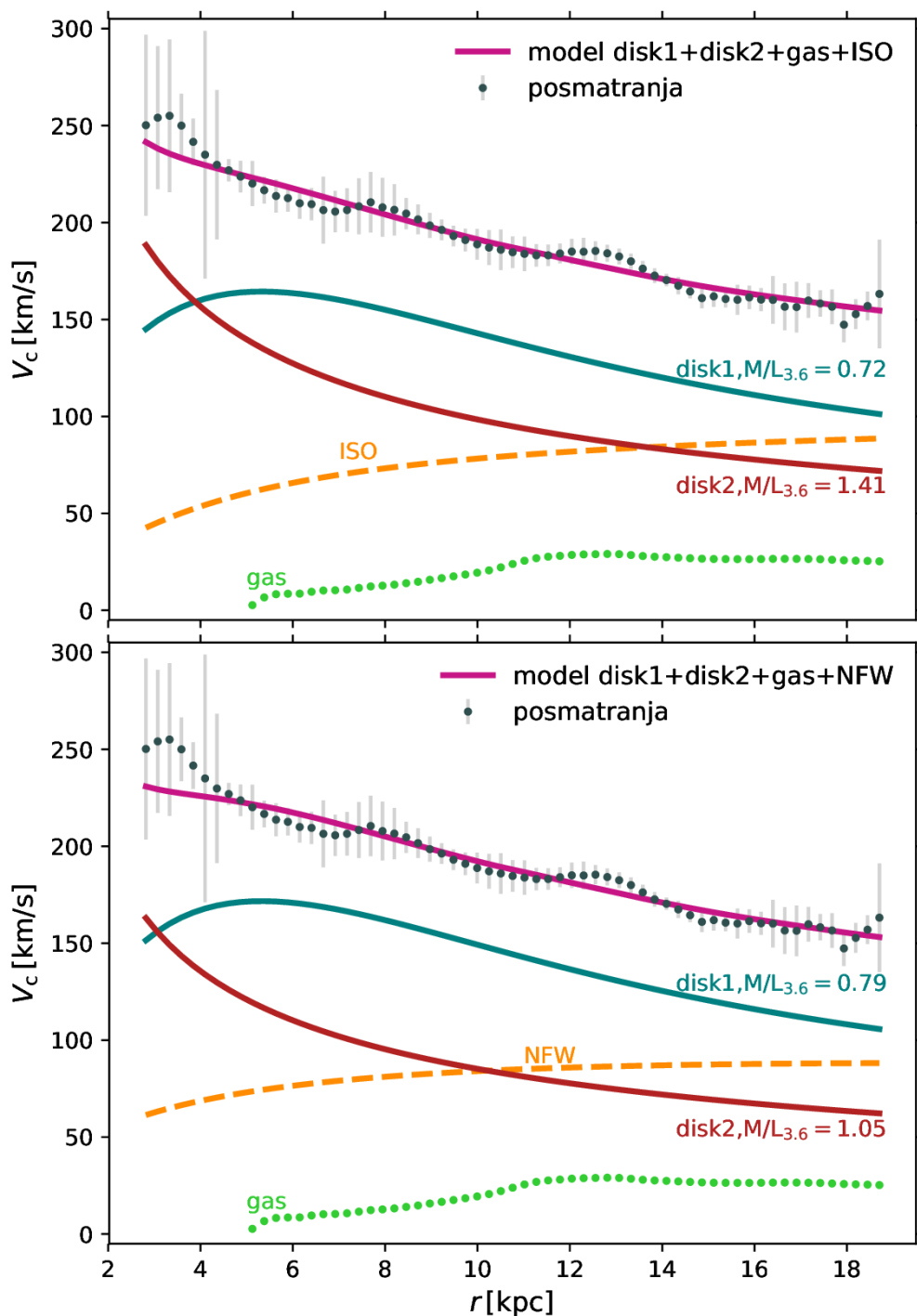
Slika 4.9: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3031 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.5. Za ovu galaksiju data su oba modela i ovo je model sa dve komponente, eksponencijalnim diskom i centralnim ovalom. Videti tekst za detalje.



Slika 4.10: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3198 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.

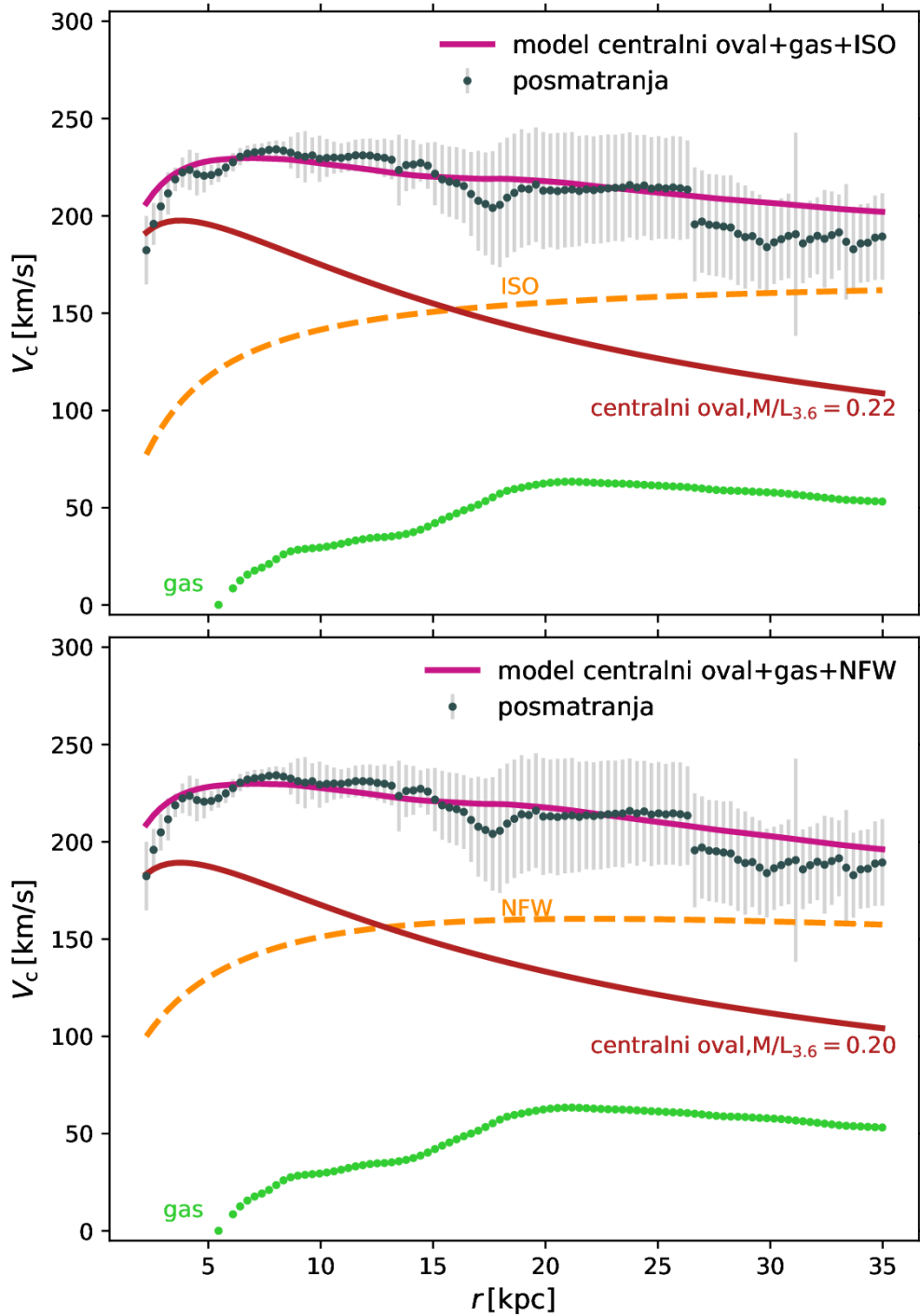


Slika 4.11: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju IC 2574 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.

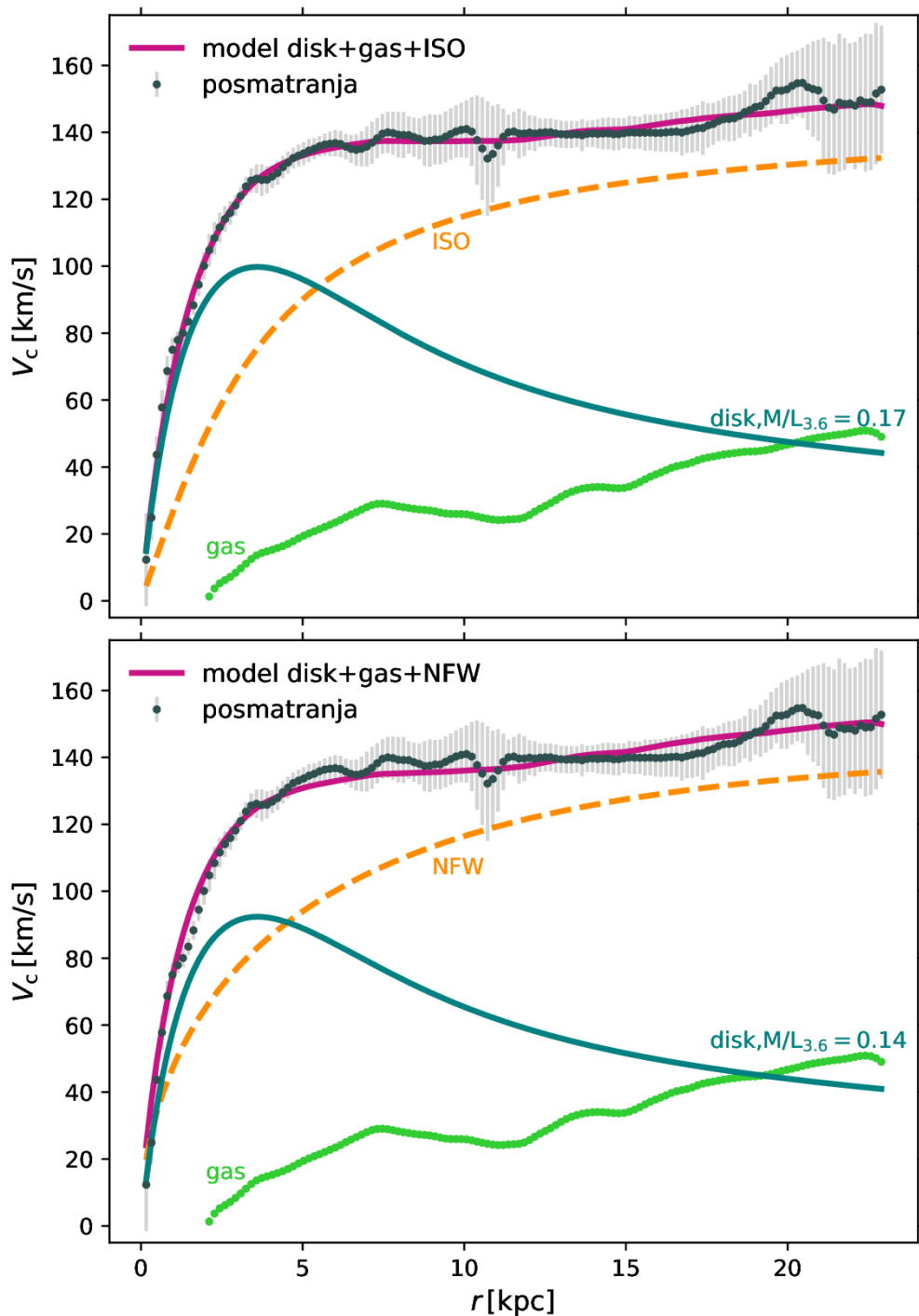


Slika 4.12: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3351 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{disk}}^{3,6}$ , koji je naznačen na liniji. Crvena linija je doprinos drugog zvezdanog eksponencijalnog diska skaliran sa fitovanim  $M/L_{3,6}^{\text{disk}2}$ , koji je takođe naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz *rotmas* predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa dve zvezdane komponente - dva eksponencijalna diska. Videti tekst za detalje.

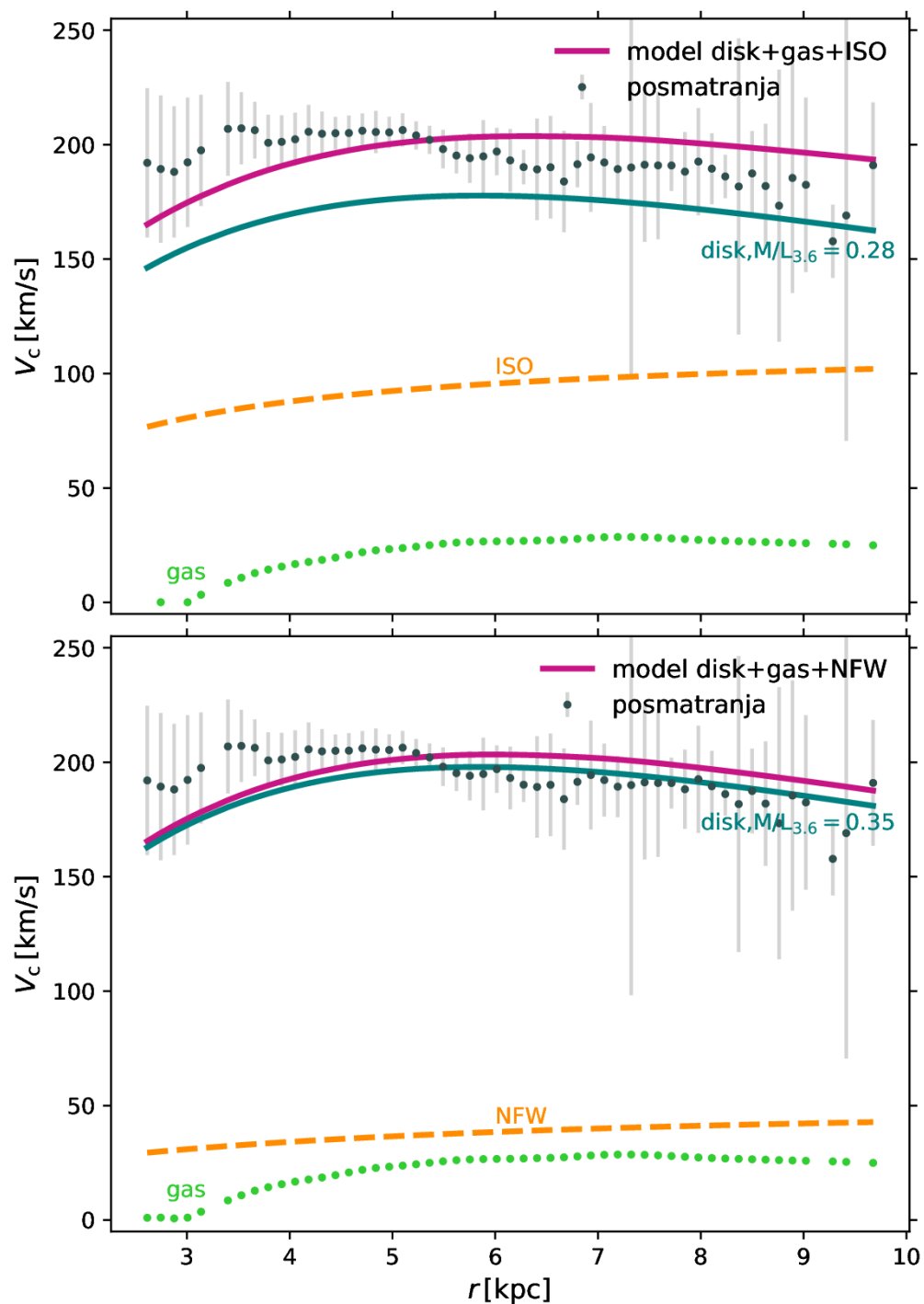




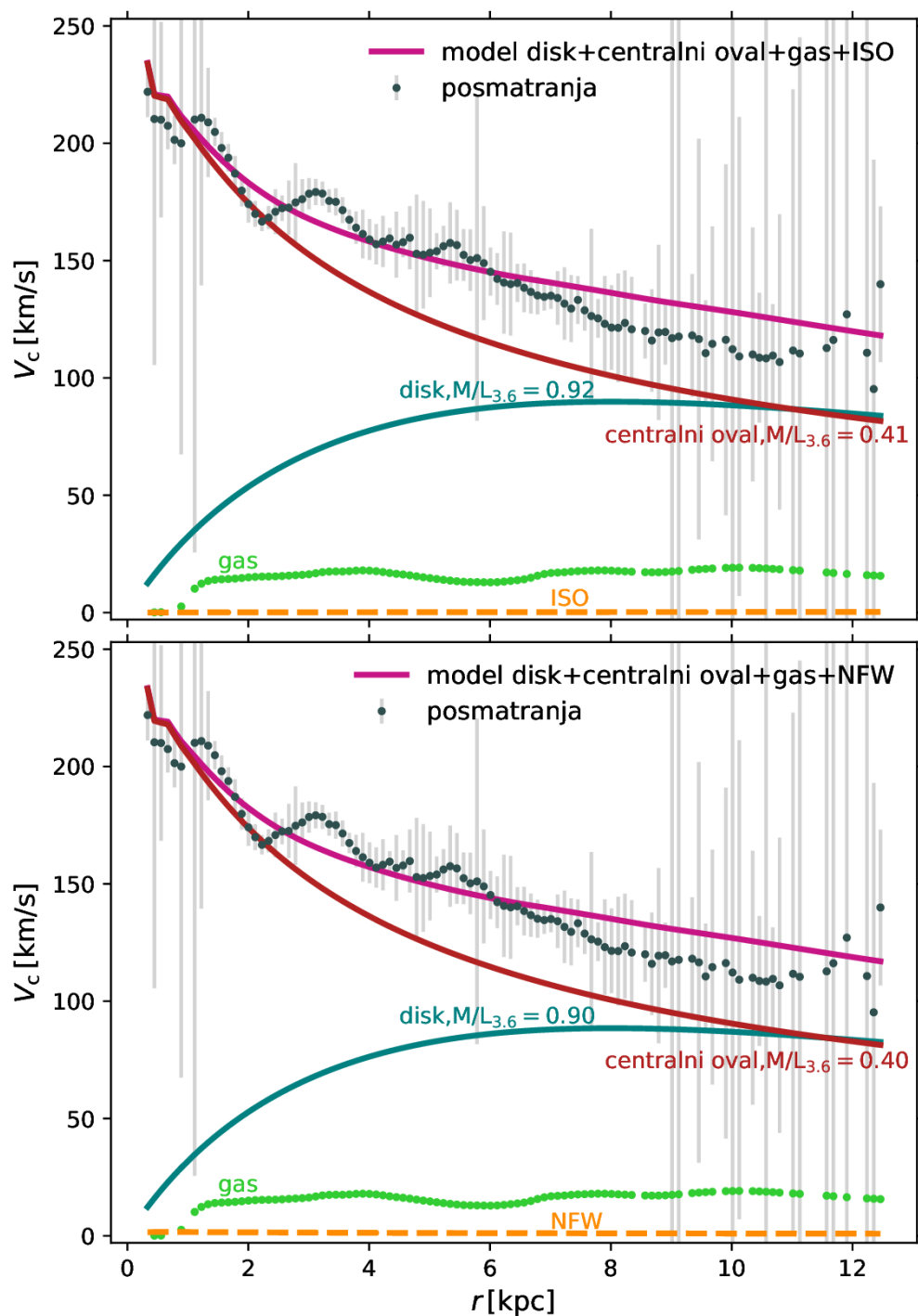
Slika 4.13: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3521 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Crvena linija predstavlja doprinos zvezdanog centralnog ovala skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$ , koji je naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz `rotmas` predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa jednom zvezdanom komponentom - centralnim ovalom. Videti tekst za detalje.



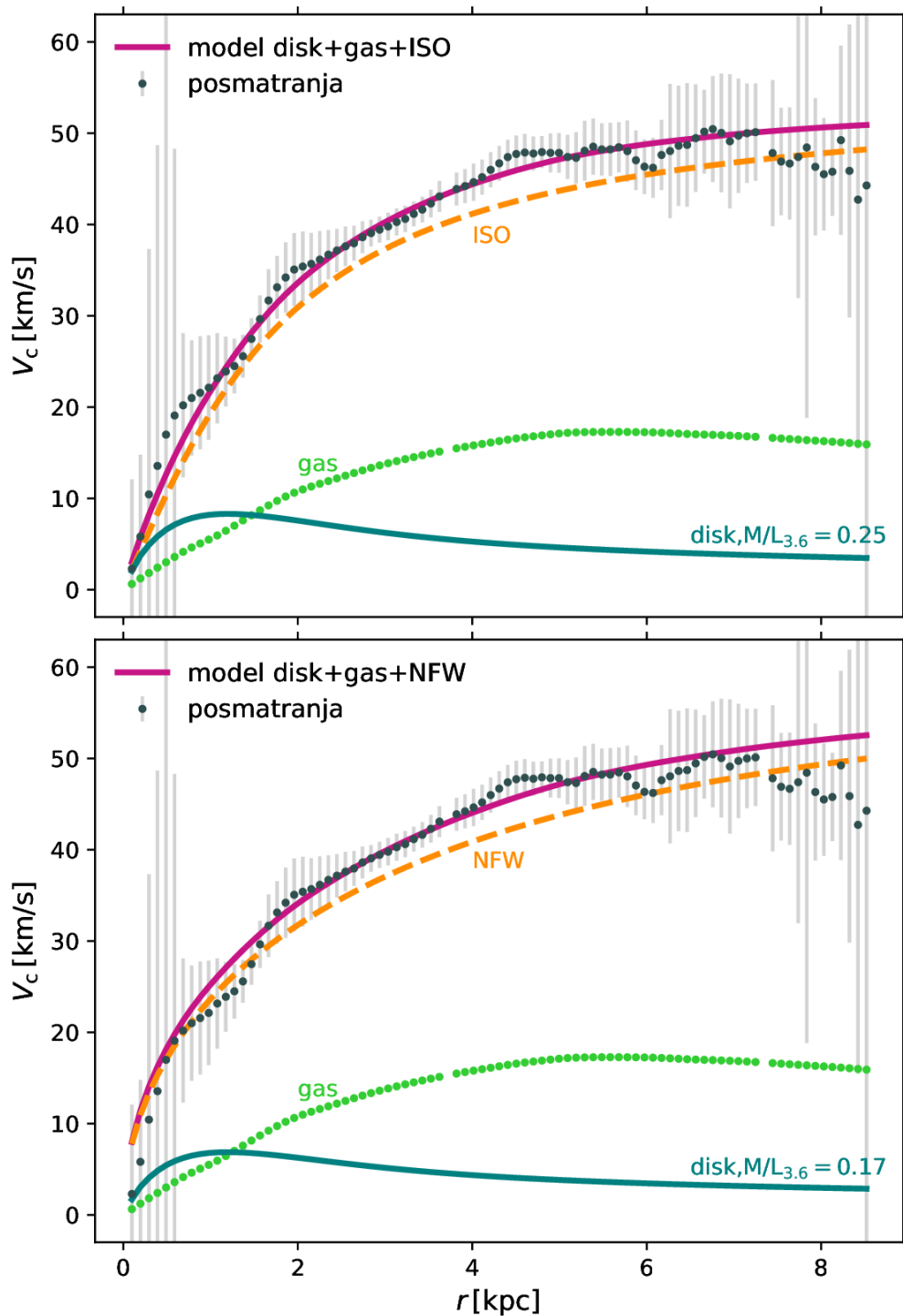
Slika 4.14: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3621 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.



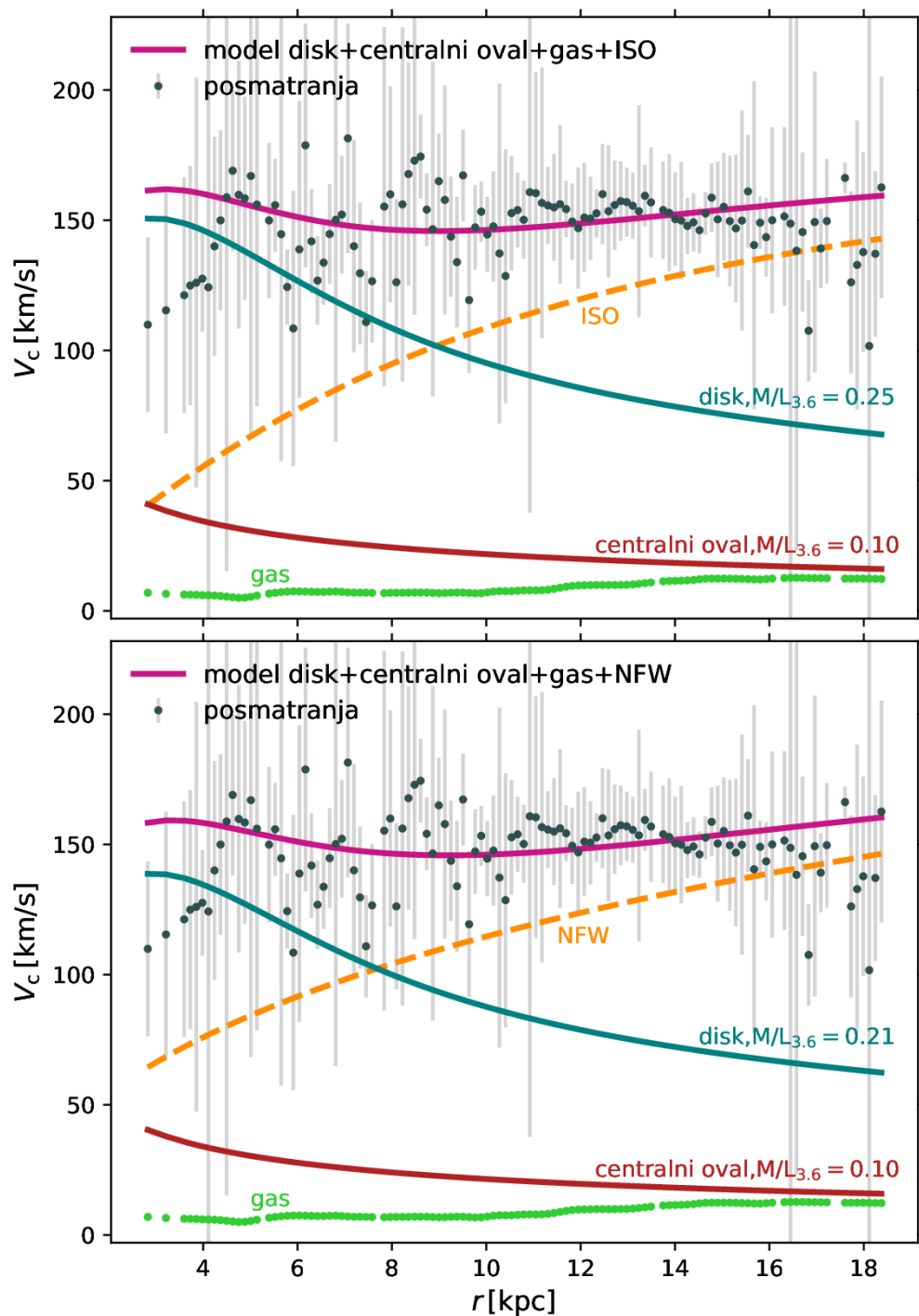
Slika 4.15: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3627 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.



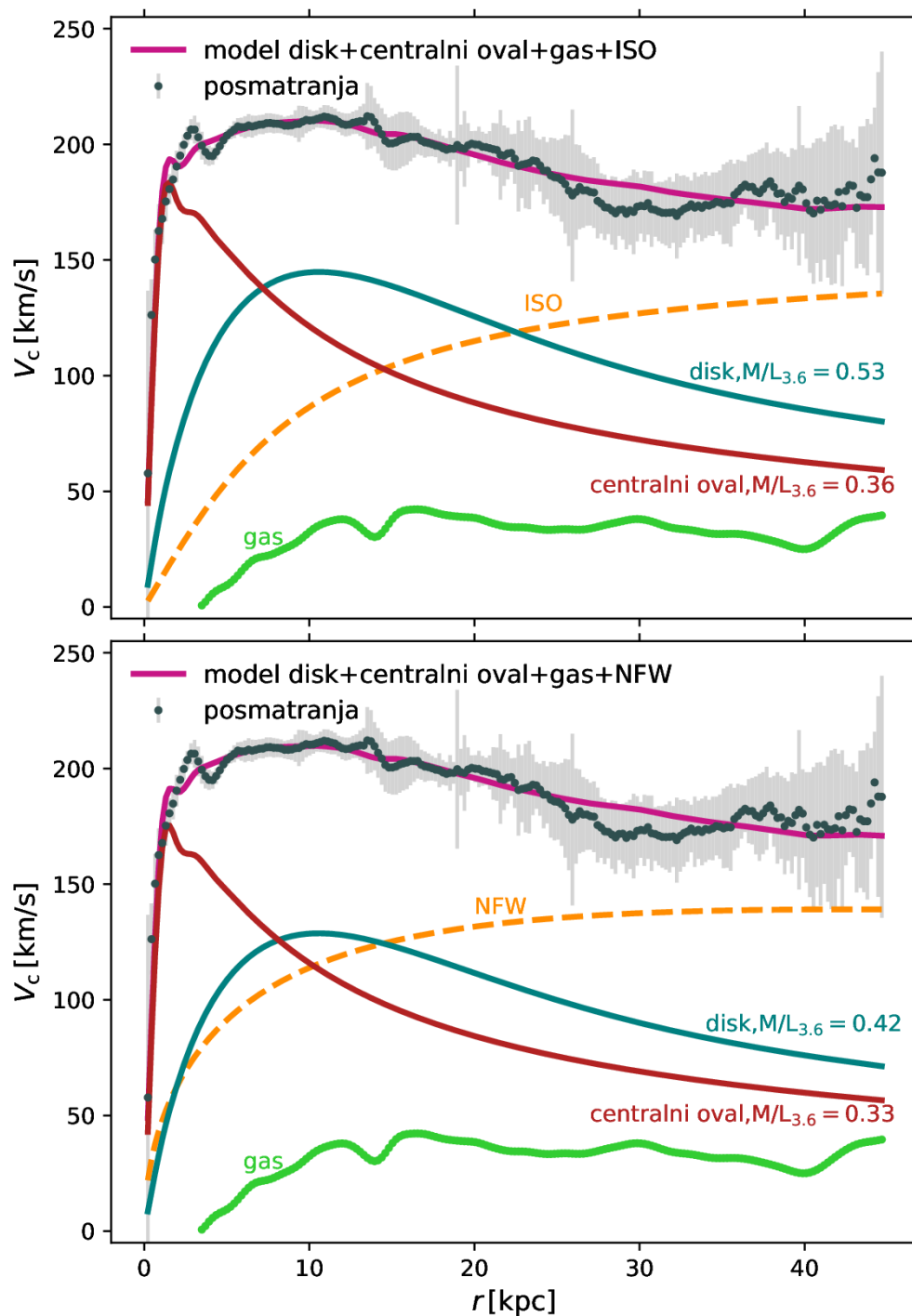
Slika 4.16: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 4736 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.5. Videti tekst za detalje.



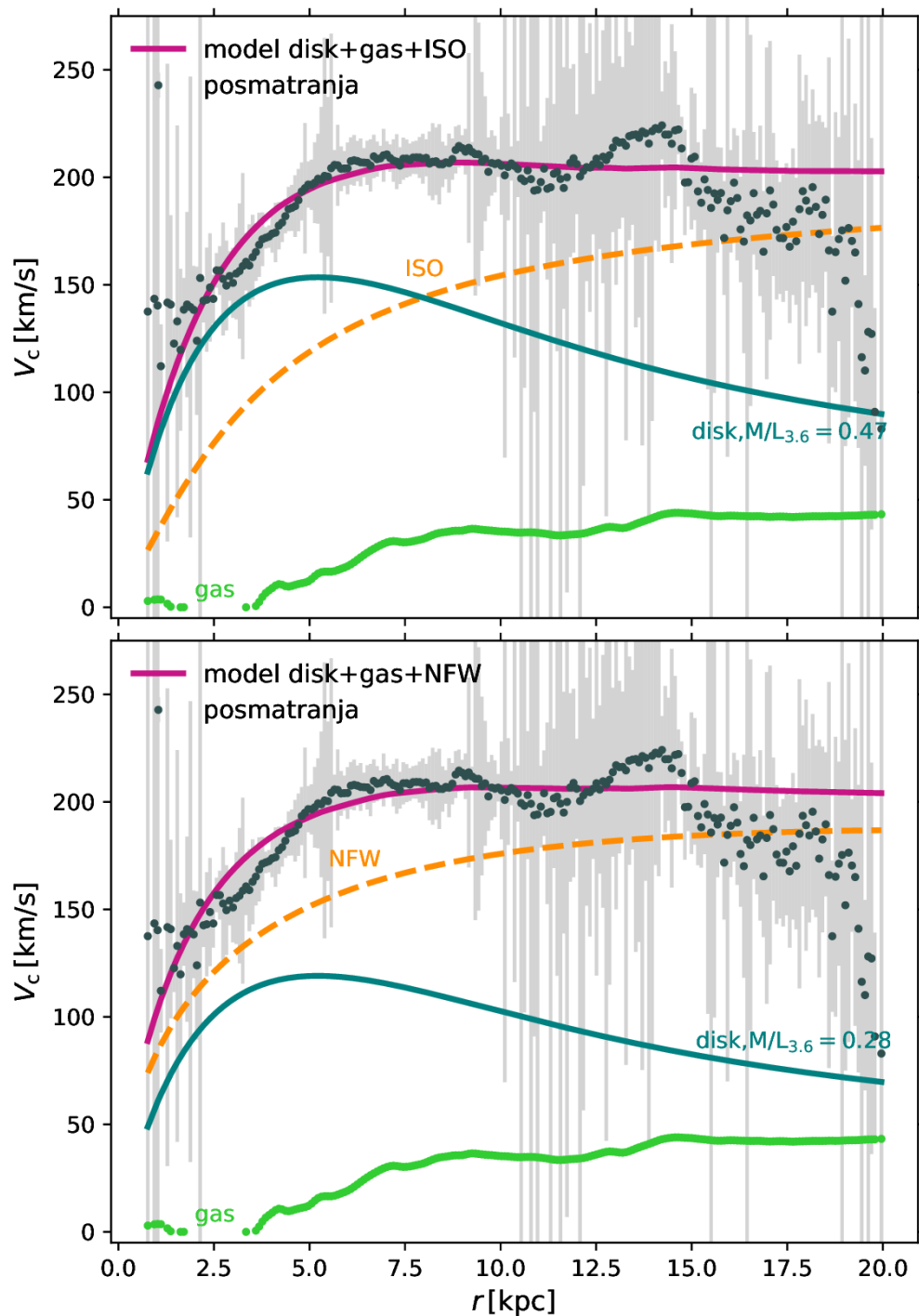
Slika 4.17: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju DDO 154 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.



Slika 4.18: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 4826 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.5. Videti tekst za detalje.

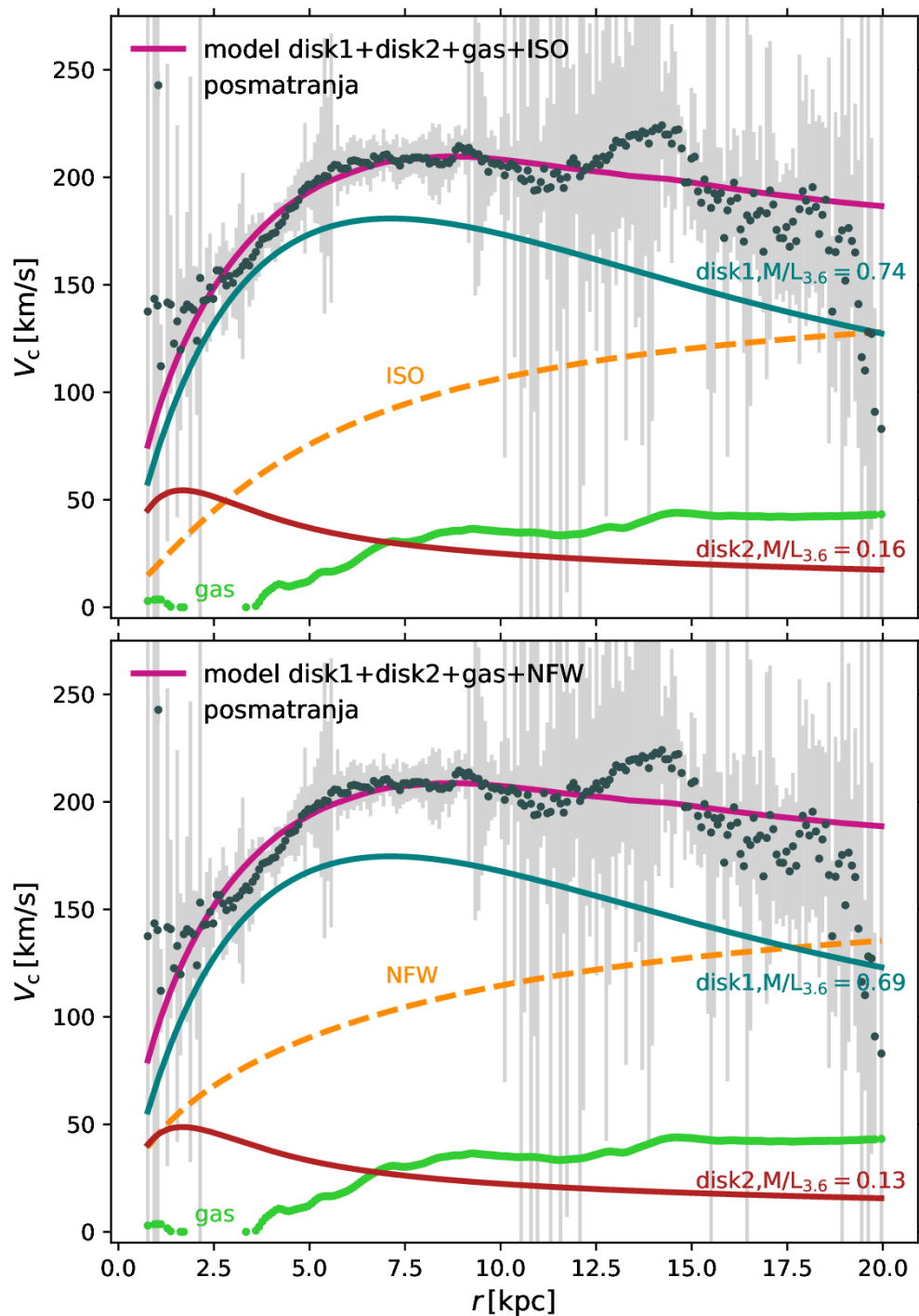


Slika 4.19: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 5055 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.5. Videti tekst za detalje.

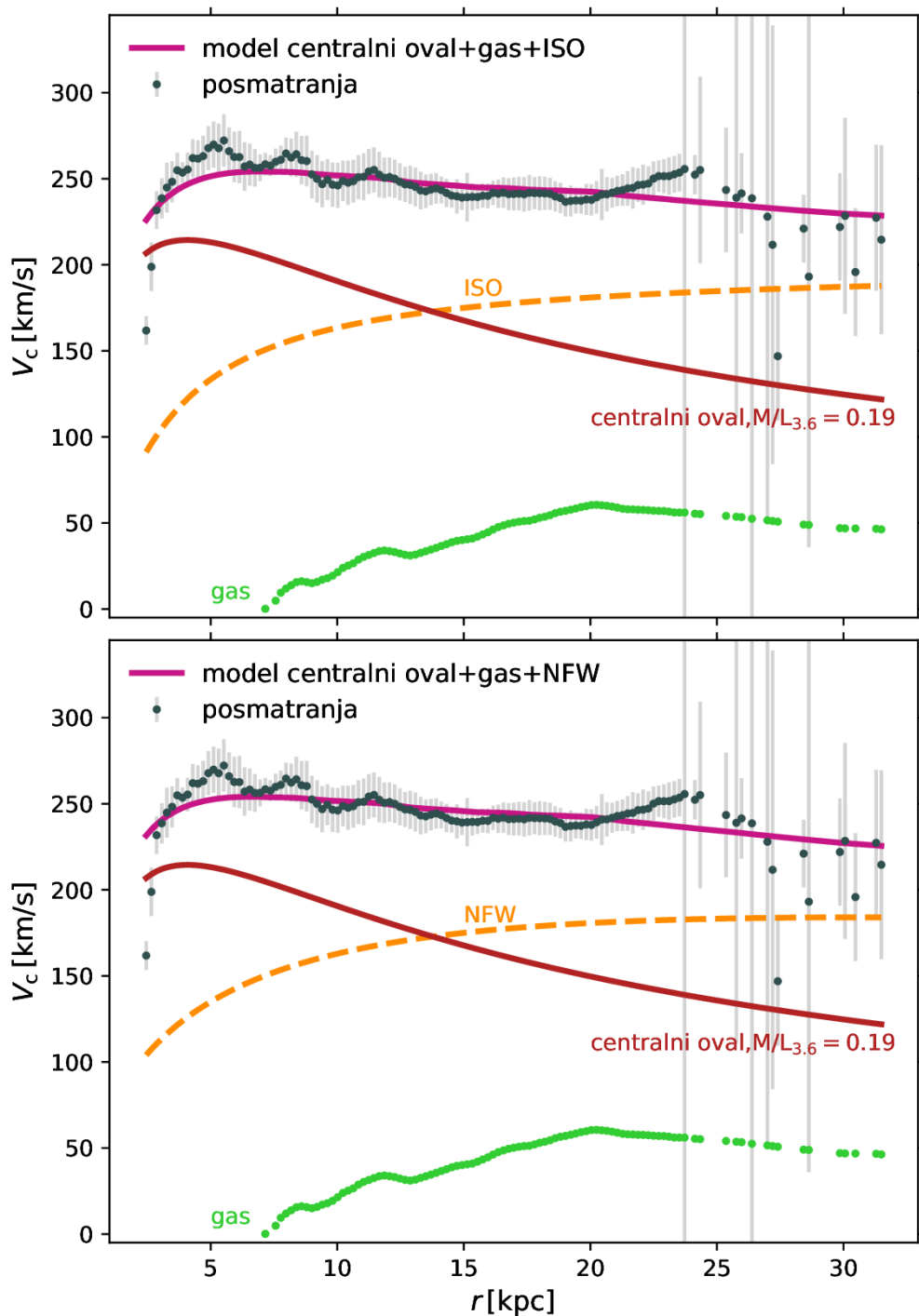


Slika 4.20: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 6946 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Za ovu galaksiju data su oba modela i ovo je model sa jednom komponentom, eksponencijalnim diskom. Videti tekst za detalje.

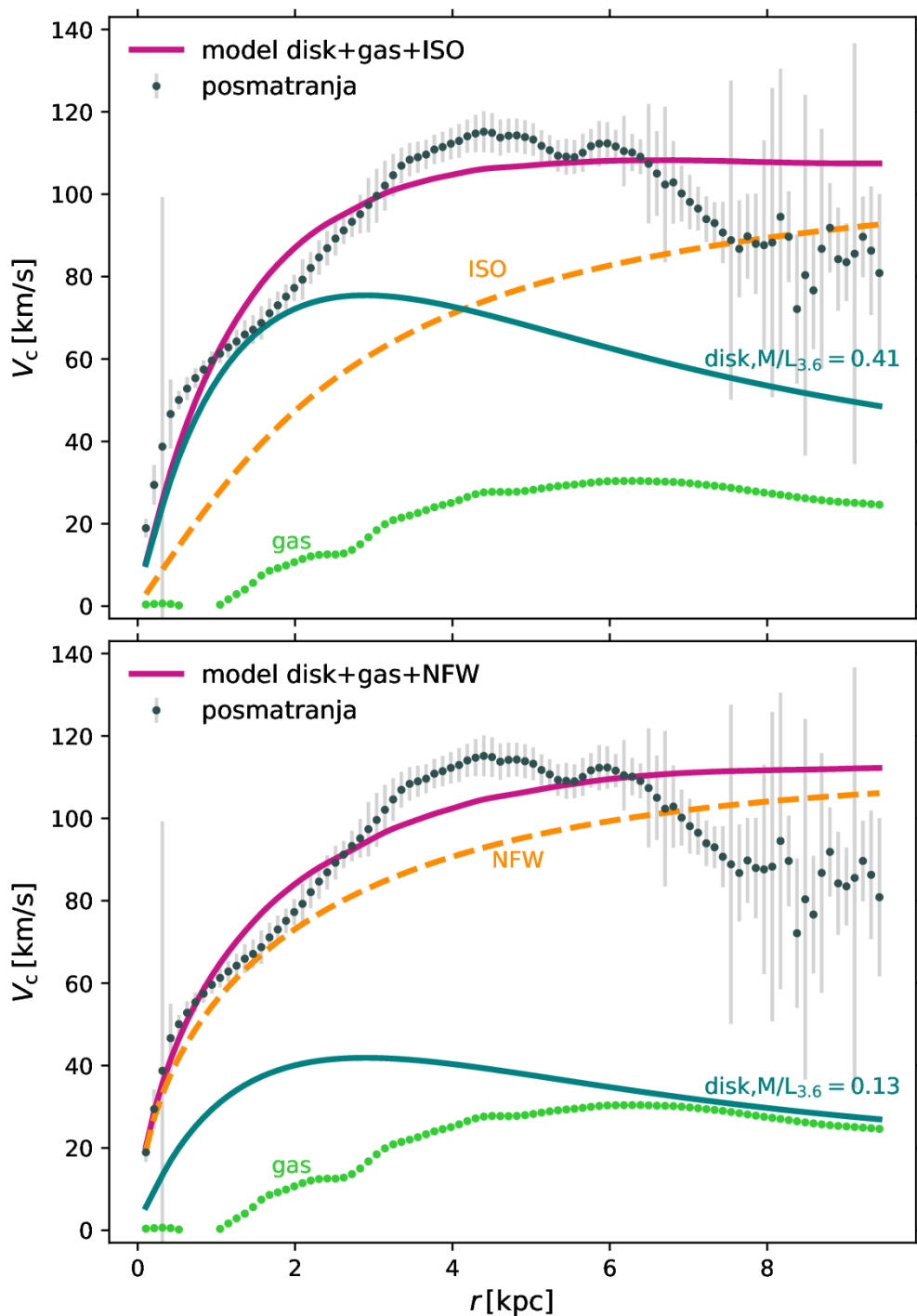




Slika 4.21: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 6946 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.12. Za ovu galaksiju data su oba modela i ovo je model sa dve komponente, i to dva eksponencijalna diska. Videti tekst za detalje.



Slika 4.22: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 7331 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.13. Videti tekst za detalje.



Slika 4.23: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 7793 sa doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.2. Videti tekst za detalje.

### 4.3 Dinamički modeli sa fiksiranim odnosom masa-sjaj

Druga grupa dinamičkih modela je takođe rezultat procedure fitovanja rotacionih krivih koristeći posmatrane profile zvezdane i gasne komponente zajedno sa teorijskim potencijalom tamne materije. Kao i u prvoj grupi modela, korišćena su dva najrasprostranjenija modela za komponentu tamne materije, čiji opisi su dati u potpoglavlju 4.1. Slobodni parametri su  $R_c$  i  $\rho_0$  za ISO model tamne materije, a  $C$  i  $R_{200}$  za NFW model. Za razliku od prve grupe modela gde je zvezdani odnos mase i sjaja za komponentu diska slobodan parametar u proceduri fitovanja, ovde je  $M/L_{\text{disk}}$  fiksiran na vrednosti proizašle iz SPS modela. Odnos masa-sjaj za drugu zvezdanu komponentu, centralni oval ili drugi eksponencijalni disk, ( $M/L_{\text{bulge}}$ ), i kod ovog skupa modela je slobodan parametar u proceduri fitovanje, gde je to bilo moguće. Izuzetak je NFW model za NGC 2841, gde je odnos masa-sjaj druge komponente, centralnog ovala, fiksiran jer u suprotnom parametri fita nemaju fizički smisao. Kao i kod modela sa slobodnim parametrom odnos masa-sjaj, nađen je drugi optimalan model tamo gde je *best-fit* model imao nerealne vrednosti parametara. Izabran je model unutar  $3\sigma$  odstupanja od najbolje tj. minimalne vrednosti  $\chi^2$ , i to tako što se analizira oblik  $\chi^2$  funkcije u prostoru slobodnih parametara modela. Kod svakog od na ovaj način izabranih modela, u tabelama 4.2 i 4.3, u koloni „flag” stoji oznaka unutar koliko  $\sigma$  odstupanja leži izabrani model. Ostali parametri fita (osim  $M/L_{\text{disk}}$ ) su slobodni, a ova grupa modela nosi oznaku „SPS”.

Kao i u radovima Samurović et al. (2015) i Jovanović (2017),  $M/L$  je izračunat iz SPS modela predstavljenih u Bell and de Jong (2001) i Into and Portinari (2013). Korišćeni SPS modeli na osnovu boja galaksije i grube procene njene metaličnosti daju odnos masa-sjaj za zvezdanu komponentu date starosti. Najveći broj boja (tj. kolor indeksa) bilo je moguće izračunati na osnovu merenja magnituda iz Muñoz-Mateos et al. (2009) i Moustakas et al. (2010), a u manjem broju slučajeva je od istih autora direktno preuzeto merenje boje.

### 4.3.1 Određivanje odnosa masa-sjaj iz SPS modela

Iz Bell and de Jong (2001) su iskorišćeni svi raspoloživi modeli sa različitim inicijalnim funkcijama mase, što uključuje Bruzual and Charlot (2003) model sa Salpeterovom (Salpeter, 1955), skaliranom Salpeterovom i modifikovanom Salpeterovom inicijalnom funkcijom mase (IMF), Bruzual i Šarlot (Bruzual and Charlot, 1993) model sa Skaloovom IMF (Scalo, 1986), Kodama (Kodama and Arimoto, 1997) i Šulc (Schulz et al., 2002) modeli sa Salpeterovom, kao i PEGASE2 (Fioc and Rocca-Volmerange, 1999) model sa sve tri varijante Salpeterove IMF. Svi ovi modeli baziraju se na zvezdanim populacijama jedinstvene starosti (eng. *single-age stellar populations*, SSP). Noviji modeli iz Into i Portinari (Into and Portinari, 2013) koriste relacije između boje i odnosa masa-sjaj koje na detaljan način tretiraju fazu termalnih pulsacija na grani asimptotskih džinova (eng. *thermally pulsating asymptotic giant branch*, TPGb) i uticaj međuzvezdane prašine; u njima se razmatraju realistični modeli hemijske evolucije kao i uloga odnosa masa-metaličnost na disko-like galaksije. Procene  $M/L$  u filteru na 3.6 mikrona u Into and Portinari (2013) zasnivaju se na kompozitnim zvezdanim populacijama (eng. *composite stellar populations*, CSP), što znači da su u pitanju konvoluirane jednostavne zvezdane populacije različite metaličnosti i starosti sa odabranim modelom formiranja zvezda i hemijske evolucije. U Into and Portinari (2013) predstavljen je **eksponencijalni model** (eksponencijalna funkcija opisuje istoriju formiranja zvezda, SFH) sa Kroupa IMF (Kroupa, 2001) i **model diska** u kombinaciji sa obe IMF: Kroupinom i Salpeterovom. Takođe je predstavljen **model spiralne galaksije sa slabljenjem (atenuacijom) zračenja usled međuzvezdane prašine**. Sve četiri kombinacije modela i IMF iz Into i Portinari su korišćene za računanje  $M/L$ , što zajedno sa modelima iz Bel i de Jong čini ukupno 13 modela.

Koristili smo sedam različitih boja,  $B - V$ ,  $g - r$ ,  $g - i$ ,  $g - z$ ,  $r - i$ ,  $r - z$  i  $B - K_s$ , koje pokrivaju široki opseg spektra. Magnitude iz pretrage SDSS<sup>7</sup> (*Sloan Digital Sky Survey*), koja koristi sopstveni fotometrijski sistem sa magnitudama  $u, g, r, i, z$ , korigovane za ekstinkciju, preuzete su iz Muñoz-Mateos et al. (2009), kao i magnituda u  $K_S$  području. Magnituda i neodređenost u  $B$  opsegu spektra, kao i

---

<sup>7</sup>Dostupna na <https://www.sdss.org/>.

$B - V$  boja preuzete su iz [Moustakas et al. \(2010\)](#).

Za izvođenje  $M/L^{3.6}$  bile su potrebne dodatne transformacije; osim za nekoliko boja i modela iz [Into and Portinari \(2013\)](#), za ostale nisu raspoložive direktne relacije između  $M/L^{3.6}$  i boja. Spicerovom filteru na  $3.6 \mu\text{m}$  najbliži su 2MASS  $K_S$  filter i Džonsonov  $K$  filter, pa konverzije iz njih unose najmanje greške (procedura korišćena u [Samurović et al., 2015](#); [Jovanović, 2017](#)). Faktori konverzije iz  $3.6 \mu\text{m}$  u dva  $K$  filtera izračunati su koristeći flukseve za svaku od galaksija u datim filterima iz [Dale et al. \(2007\)](#). Potrebna je i transformacija između dva  $K$  filtera, koja se može izvesti samo indirektno jer su standardne zvezde iz Džonsonovog sistema saturisane u pretrazi 2MASS, i u tu svrhu koristimo indirektnu relaciju iz [Carpenter \(2001\)](#).

Za korišćenje modela zvezdanih populacija uz boje potrebna je i procena metaličnosti. Za procenu metaličnosti korišćeno je nekoliko indikatora. Jedan je indeks jačine  $\text{Mg}_2$  linije, preuzet iz HyperLeda<sup>8</sup> i SDSS kataloga, a metaličnost je dobijena na osnovu vrednosti ovog indeksa i njegove evolucije sa starošću galaksije iz [Casuso et al. \(1996\)](#). Za par galaksija dostupna je procena zvezdane metaličnosti iz SDSS DR4 kataloga ([Gallazzi et al., 2005](#)). Koristili smo i procenu prisustva kiseonika  $[\text{O}/\text{H}]$  ([Moustakas et al., 2010](#)), uz relaciju koja povezuje gasnu i zvezdanu metaličnost. Za galaksije gde je bilo prisutno više vrednosti uzimali smo vrednost koja je bliža metodi preko  $\text{Mg}_2$  indeksa ili idealno, vrednosti iz DR4. Modeli koje koristimo ne zavise presudno od metaličnosti: za modele iz [Bell and de Jong \(2001\)](#) postoje samo tri opsega metaličnosti (0.001, 0.008 i 0.002) između kojih je relativno lako odlučiti koji koristimo, dok je za [Into and Portinari \(2013\)](#) situacija još jednostavnija u smislu zavisnosti od metaličnosti. Samo kod eksponencijalnog modela sa Kroupinom IMF preko minimalne metaličnosti data je granica primenjivosti relacija između boje i  $M/L$ , u ostalim slučajevima i granica je definisana preko boje, pa metaličnost ima malo uticaja na [Into and Portinari \(2013\)](#) modele. Iz toga razloga smo odlučili da prihvatimo i galaksije koje imaju metaličnost ispod minimalne, da bismo videli da li se dobijaju vrednosti iz modela koje su uporedive sa onim iz modela nezavisnih

---

<sup>8</sup><http://leda.univ-lyon1.fr/>.

Tabela 4.4: Procena metaličnosti zvezdane komponente za galaksije iz uzorka na osnovu nekoliko indikatora: indeksa Mg<sub>2</sub> linije iz *HyperLeda* i SDSS kataloga (Casuso et al., 1996), SDSS DR4 kataloga (Gallazzi et al., 2005) i prisustva kiseonika u gasnoj komponenti (Moustakas et al., 2010). Vrednosti su informativnog karaktera. Oznaka „N/A” stoji tamo gde podaci iz literature nisu bili dostupni.

ID Galaksije	$Z$
NGC 925	0.0041
NGC 2366	N/A
NGC 2403	0.005
NGC 2841	0.015
NGC 2903	N/A
NGC 2976	0.001
NGC 3031	0.008
NGC 3198	0.005
IC 2574	N/A
NGC 3351	0.01
NGC 3521	0.01
NGC 3621	0.005
NGC 3627	0.0041
NGC 4736	0.008
DDO 154	0.0041
NGC 4826	0.015
NGC 5055	0.01
NGC 6946	0.0041
NGC 7331	0.009
NGC 7793	0.006

od metaličnosti.<sup>9</sup>

Uzimajući u obzir ovako određenu metaličnost svake pojedinačne galaksije iskorisćeni su odgovarajući SPS modeli. Sedam boja u kombinaciji sa 13 modela tipično je rezultovalo sa 15-30 vrednosti za  $M/L$  (adaptirane za potreban opseg od 3.6  $\mu\text{m}$ ). Od dobijenih vrednosti  $M/L$  konstruisali bismo histogram (sa 5 do 7 binova) odakle bismo dobili našu najverovatniju vrednost  $M/L$ . Imali smo u vidu da je najpouzdanije određena boja  $B - V$ , što je i očekivano zbog domena koji je najbolje istražen, ali po našoj proceni nije bilo potrebno dodatno otežavanje za ovu boju, jer je svaki

<sup>9</sup>Galaksiju DDO 154 u našem ranijem radu (Jovanović, 2017) nismo analizirali na ovaj način, jer se ona smatra galaksijom sa izuzetno niskom metaličnošću. U međuvremenu se pojavila procena po kojoj je njena metaličnost blizu granice primenjivosti Bell and de Jong (2001) modela. Iz tog razloga njenu metaličnost smo „podigli” na vrednost prihvatljivu za sve modele, ali uz oprez i posmatranje kako se ponašaju dobijene vrednosti  $M/L$  u odnosu na druge pouzdanije. Našli smo da je sasvim opravdano bilo prihvatanje i DDO 154 za ovakvu vrstu analize.

od modela kombinovan sa ovom bojom, pa je  $M/L$  određen preko nje i najbrojniji unutar svakog od histograma. Takođe, najverovatnija vrednost sa histograma je najčešće „padala” unutar vrednosti dobijenih sa ovom bojom, u okviru neodređenosti. Na isti način su modeli sa originalnom Salpeterovom IMF uključeni u konstrukciju histograma, ali samo kao kontrolni; u svim slučajevima su  $M/L$  dobijeni sa ovom IMF (kao i 1.85 Peg) bile prevelike i padale van opsega sa najvećim brojem vrednosti, pa samim tim nikad nisu uticale na izabrani  $M/L$ .

Primer vrednosti  $M/L$  dobijenih za sve SPS modele za galaksiju NGC 5055 dat je u tabeli 4.5, a histogram konstruisan od odgovarajućih vrednosti zajedno sa izabranom vrednošću  $M/L$  prikazan je na slici 4.24. Vrednosti  $M/L^{3.6}$  dobijene iz SPS modela uvek smo pripisali komponenti diska, tj. izjednačili sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za veliku većinu modela gde je dominantna komponenta disk, i sa  $M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$  tamo gde je prihvaćena proširena Sersic komponenta kao dominantni model za opis posmatranog sjaja (kod galaksija NGC 3521 i NGC 7331).

Pošto smo se galaksijom NGC 5055 detaljnije bavili u okviru studije slučaja (Jovanović, 2017), na grafikonu 4.25 vidimo histogram sa vrednostima odnosa masa-sjaj za tri SPS modela izdvojena iz Into and Portinari (2013). Takođe, vidimo kako se oni porede sa prihvaćenom najboljom vrednošću iz SPS modela, kao i iz modela sa slobodnim  $M/L$  (ISO, NFW). Vidimo da sve tri procene za  $M/L$  padaju najbliže modelu diska sa Kroupa IMF (Into and Portinari, 2013).



Tabela 4.5:  $M/L^{3.6}$  dobijeni za galaksiju NGC 5055 kombinujući evolucione modele. Modeli iz [Bell and de Jong \(2001\)](#):

Bruzual i Šarlot ([Bruzual and Charlot, 2003](#)) model sa Salpeterovom ([Salpeter, 1955](#)) - „B&C,S”,

skaliranom Salpeterovom - „B&C,skalS” i

modifikovanom Salpeterovom - „B&C,modS” inicijalnom funkcijom mase;

Bruzual i Šarlot model ([Bruzual and Charlot, 1993](#)) sa Skalo IMF ([Scalo, 1986](#)) - „B&C93,Skalo”,

Kodama ([Kodama and Arimoto, 1997](#)) - „Kodama,S” i

Šulc ([Schulz et al., 2002](#)) model sa Salpeterovom - „Šulc,S”, kao i

PEGASE2 ([Fioc and Rocca-Volmerange, 1999](#)) model sa tri varijante Salpeterove IMF sa kojima je računat - „Peg”, „Peg,-1.85” i „Peg,-0.85”.

Iz [Into and Portinari \(2013\)](#) predstavljen je eksponencijalni model („eksp”) sa Kroupa IMF ([Kroupa, 2001](#)) - „eksp,Kr”,

model diska u kombinaciji sa Kroupinom i Salpeterovom IMF - „disk,Kr” i „disk,S”, i

model spiralne galaksije sa slabljenjem (atenuacijom) zračenja usled međuzvezdane prašine - „+ praš”.

Modeli su dati u kombinaciji sa dostupnim bojama,  $B - V$ ,  $g - r$ ,  $g - i$ ,  $g - z$ ,  $r - i$ ,  $r - z$  i  $B - K_S$ .

SPS model	boja						
	$B - V$	$g - r$	$g - i$	$g - z$	$r - i$	$r - z$	$B - K_S$
B&C,S	0.669576	–	–	–	–	–	–
B&C,skalS	0.474024	–	–	–	–	–	–
B&C,modS	0.353346	–	–	–	–	–	–
B&C93,Skalo	0.369318	–	–	–	–	–	–
Kodama,S	0.728786	–	–	–	–	–	–
Šhulc,S	0.480618	–	–	–	–	–	–
Peg,S	0.743019	–	–	–	–	–	–
Peg,-1.85	1.30317	–	–	–	–	–	–
Peg,-0.85	0.530396	–	–	–	–	–	–
eksp,Kr	0.385834	0.415934	0.473576	0.419321	–	0.389946	0.300987
disk,Kr	0.428193	0.469021	0.551271	0.501015	–	0.566177	0.40592
disk,S	0.652589	0.70663	0.819153	0.729207	–	0.74465	0.53634
+ praš	0.382613	–	–	–	–	–	–

Tabela 4.6: ISO modeli:

Kolona (1): ID galaksije.

 Kolona (2): Odnos masa-sjaj iz SPS modela za zvezdanu komponentu diska na  $3.6 \mu\text{m}$ .

 Kolona (3): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za centralni oval na  $3.6 \mu\text{m}$ . Kada je druga komponenta takođe eksponencijalni disk prisutna je oznaka „d2”. Kada ovaj parametar nije ostavljen slobodan u proceduri fitovanja stoji oznaka „fix”.

 Kolona (4): Radijus jezgra (*core radius*)  $R_c$  u jedinicama kpc.

 Kolona (5): Gustina  $\rho_0$  u jedinicama  $10^{-3} M_\odot \text{pc}^{-3}$ .

 Kolona (6): Redukovana srednja  $\bar{\chi}^2$  vrednost za najbolji/izabrani model.

 Kolona (7): Kada izabrani model nije najbolji fit (sa minimalnim  $\bar{\chi}^2$ ) označeno je unutar koje  $\sigma$  konture u  $\chi^2$  prostoru se nalazi model.

U koloni (1) prisutna je oznaka „1k” ili „2k” kad su za datu galaksiju korišćena oba modela dekompozicije zvezdane komponente (videti tekst za detalje). N/A vrednost stoji kod greški koje su u proceduri fitovanja bile nefizički velike, što je pojašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M/L_{\text{disk}}^{3.6}$	$M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$	$R_c$ [kpc]	$\rho_0$ [ $10^{-3} M_\odot \text{pc}^{-3}$ ]	$\bar{\chi}^2$	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NGC 925	0.22	–	$9.4 \pm 1.3$	$6.6 \pm 0.7$	1.02	–
NGC 2366	–	–	–	–	–	–
NGC 2403	0.22	–	$1.29 \pm 0.04$	$187.9 \pm 9.7$	0.85	–
NGC 2841	0.59	$0.13 \pm 0.04$	$10.7 \pm 0.3$	$13.2 \pm 1.3$	0.38	3-sigma
NGC 2903	0.08	$1.28 \pm 0.01$	$1.5 \pm 0.1$	$250 \pm 850$	0.47	3-sigma
NGC 2976	0.32	–	$7.5 \pm \text{N/A}$	$32.8 \pm 2.8$	2.77	1-sigma
NGC 3031 <sup>1k</sup>	0.53	–	$5.4 \pm 0.7$	$12.5 \pm 2.1$	0.82	–
NGC 3031 <sup>2k</sup>	0.53	$0.16 \pm 0.48$	$4.0 \pm 4.1$	$18 \pm \text{N/A}$	0.78	3-sigma
NGC 3198	0.29	–	$4.4 \pm 0.1$	$20 \pm 1$	0.44	–
IC 2574	0.05	–	$5.4 \pm 0.2$	$6.7 \pm 0.2$	0.09	–
NGC 3351 <sup>d2</sup>	0.58	$1.63^{\text{d2}} \pm 0.41$	$1.7 \pm 3.1$	$70 \pm 230$	0.45	–
NGC 3521	–	–	–	–	–	–
NGC 3621	0.20	–	$4.3 \pm 0.1$	$23.9 \pm 0.8$	0.33	–
NGC 3627	0.36	–	$2 \pm 12$	$7 \pm \text{N/A}$	0.66	1-sigma
NGC 4736	0.48	$0.40 \pm 0.04$	$1.1 \pm 1.5$	$68 \pm 995$	0.80	1-sigma
DDO 154	0.17	–	$1.42 \pm 0.04$	$27.5 \pm 1.1$	0.16	–
NGC 4826	–	–	–	–	–	–
NGC 5055	0.46	$0.37 \pm 0.01$	$5.2 \pm 0.4$	$15.3 \pm 1.9$	0.31	–
NGC 6946 <sup>1k</sup>	0.32	–	$2.1 \pm 0.1$	$177 \pm 13$	0.37	–
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	0.32	$0.32^{\text{d2}} \pm 0.12$	$2.0 \pm 0.1$	$172 \pm \text{N/A}$	0.36	1-sigma
NGC 7331	–	–	–	–	–	–
NGC 7793	0.26	–	$1.3 \pm 0.1$	$130 \pm 16$	3.30	–

Tabela 4.7: NFW modeli:

Kolona (1): ID galaksije.

 Kolona (2): Odnos masa-sjaj iz SPS modela za zvezdanu komponentu diska na  $3.6 \mu\text{m}$ .

 Kolona (3): Najbolji fit parametra odnos masa-sjaj za centralni oval na  $3.6 \mu\text{m}$ . Kada je druga komponenta takođe eksponencijalni disk prisutna je oznaka „d2”. Kada ovaj parametar nije ostavljen slobodan u proceduri fitovanja stoji oznaka „fix”.

 Kolona (4):  $C$  parameter koncentracije.

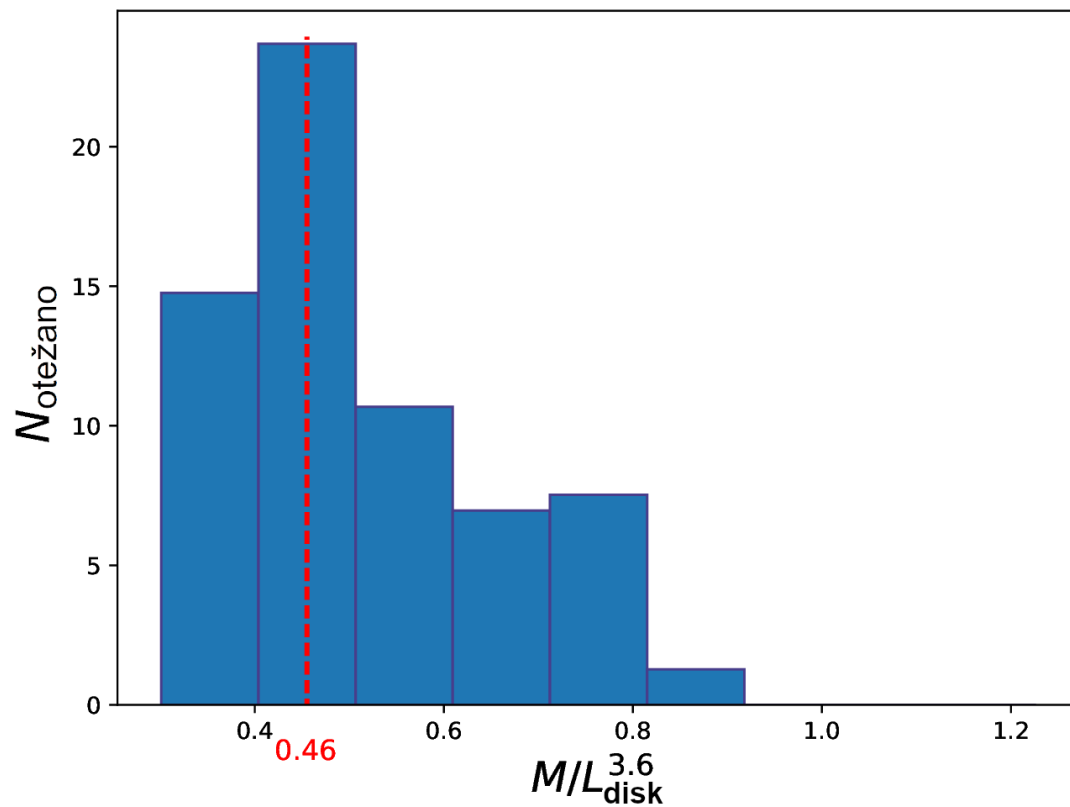
 Kolona (5): Radijus  $R_{200}$  u kpc.

 Kolona (6): Redukovana srednja  $\bar{\chi}^2$  vrednost za najbolji/izabrani model.

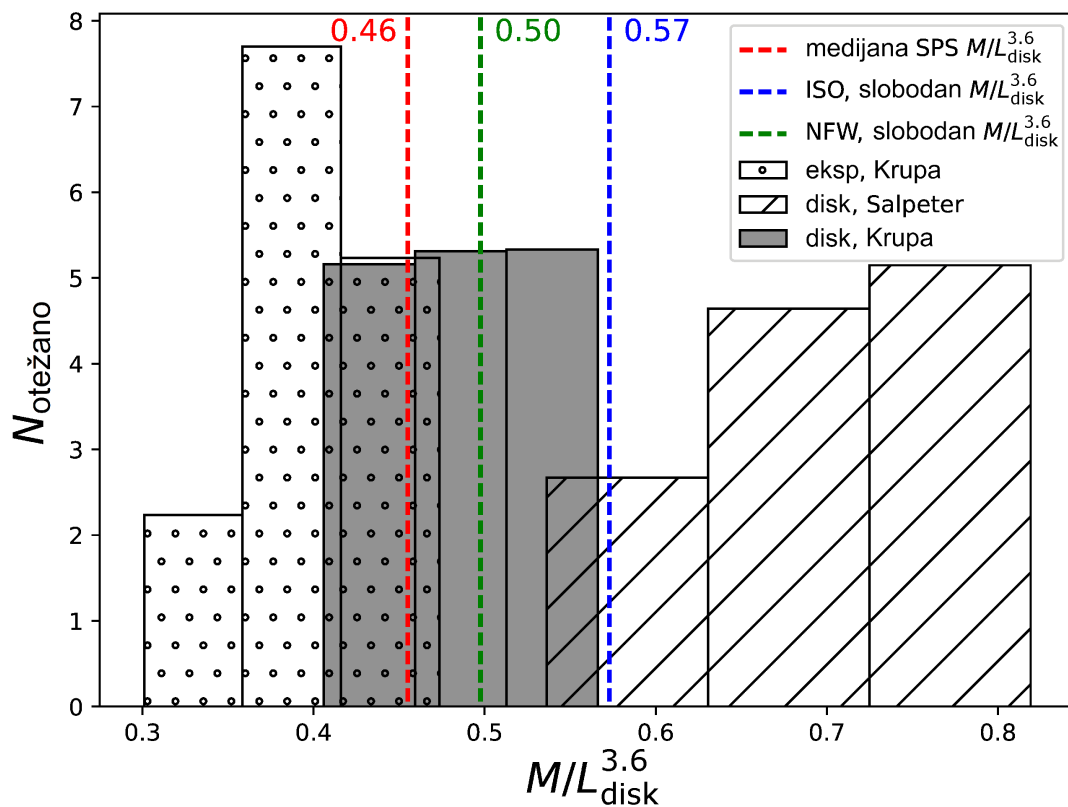
 Kolona (7): Kada izabrani model nije najbolji fit (sa minimalnim  $\bar{\chi}^2$ ) označeno je unutar koje  $\sigma$  konture u  $\chi^2$  prostoru se nalazi model.

U koloni (1) prisutna je oznaka „1k” ili „2k” kad su za datu galaksiju korišćena oba modela dekompozicije zvezdane komponente (videti tekst za detalje). N/A vrednost stoji kod greški koje su u proceduri fitovanja bile nefizički velike, što je pojašnjeno u tekstu.

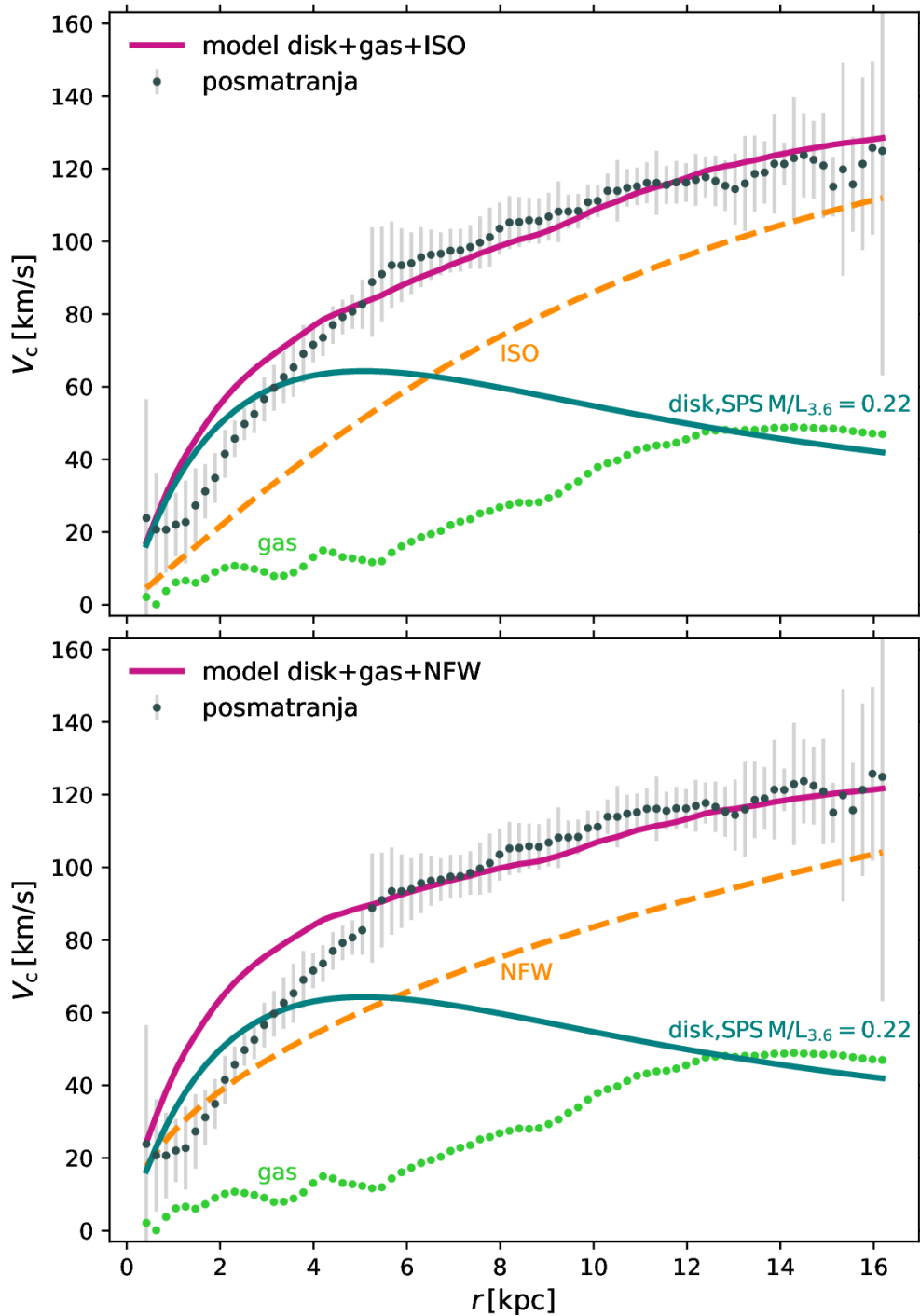
ID galaksije	$M/L_{\text{disk}}^{3.6}$	$M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$	$C$	$R_{200}$ [kpc]	$\bar{\chi}^2$	flag
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
NGC 925	0.22	–	$1 \pm 73$	$167 \pm \text{N/A}$	2.54	3-sigma
NGC 2366	–	–	–	–	–	–
NGC 2403	0.22	–	$8.1 \pm 0.1$	$78.7 \pm 0.6$	0.39	–
NGC 2841	0.59	$0.16^{\text{fix}}$	$2.3 \pm 0.1$	$210 \pm 6$	0.86	–
NGC 2903	0.08	$0.53 \pm 0.09$	$17 \pm 1$	$94.4 \pm 0.6$	0.24	–
NGC 2976	0.32	–	$1 \pm 46$	$180 \pm \text{N/A}$	6.93	1-sigma
NGC 3031 <sup>1k</sup>	0.53	–	$1.8 \pm 0.6$	$119 \pm 24$	0.88	–
NGC 3031 <sup>2k</sup>	0.53	$0.14 \pm 0.79$	$3 \pm 93$	$93 \pm 3$	0.81	3-sigma
NGC 3198	0.29	–	$3.4 \pm 0.2$	$99 \pm 2$	0.94	–
IC 2574	0.05	–	$1.3 \pm 5.1$	$84 \pm \text{N/A}$	0.57	3-sigma
NGC 3351 <sup>d2</sup>	0.58	$1.42^{\text{d2}} \pm 0.29$	$8.7 \pm 8.3$	$63 \pm 2$	0.44	1-sigma
NGC 3521	–	–	–	–	–	–
NGC 3621	0.20	–	$2.3 \pm 0.2$	$136 \pm 9$	1.15	–
NGC 3627	0.36	–	$2.9 \pm 0.0$	$13 \pm 15$	0.62	1-sigma
NGC 4736	0.48	$0.40 \pm 0.12$	$7 \pm 81$	$40.3 \pm 3.0$	0.80	3-sigma
DDO 154	0.17	–	$3.5 \pm 0.2$	$39.6 \pm 1.3$	0.26	–
NGC 4826	–	–	–	–	–	–
NGC 5055	0.46	$0.35 \pm 0.01$	$3.6 \pm 0.3$	$98.3 \pm 2.3$	0.31	–
NGC 6946 <sup>1k</sup>	0.32	–	$9.8 \pm 0.4$	$113 \pm 3$	0.39	–
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	0.32	$0.22^{\text{d2}} \pm 0.08$	$11.2 \pm 1.4$	$104.0 \pm 1.8$	0.35	–
NGC 7331	–	–	–	–	–	–
NGC 7793	0.26	–	$6.4 \pm 0.8$	$72.8 \pm 6.2$	3.02	–



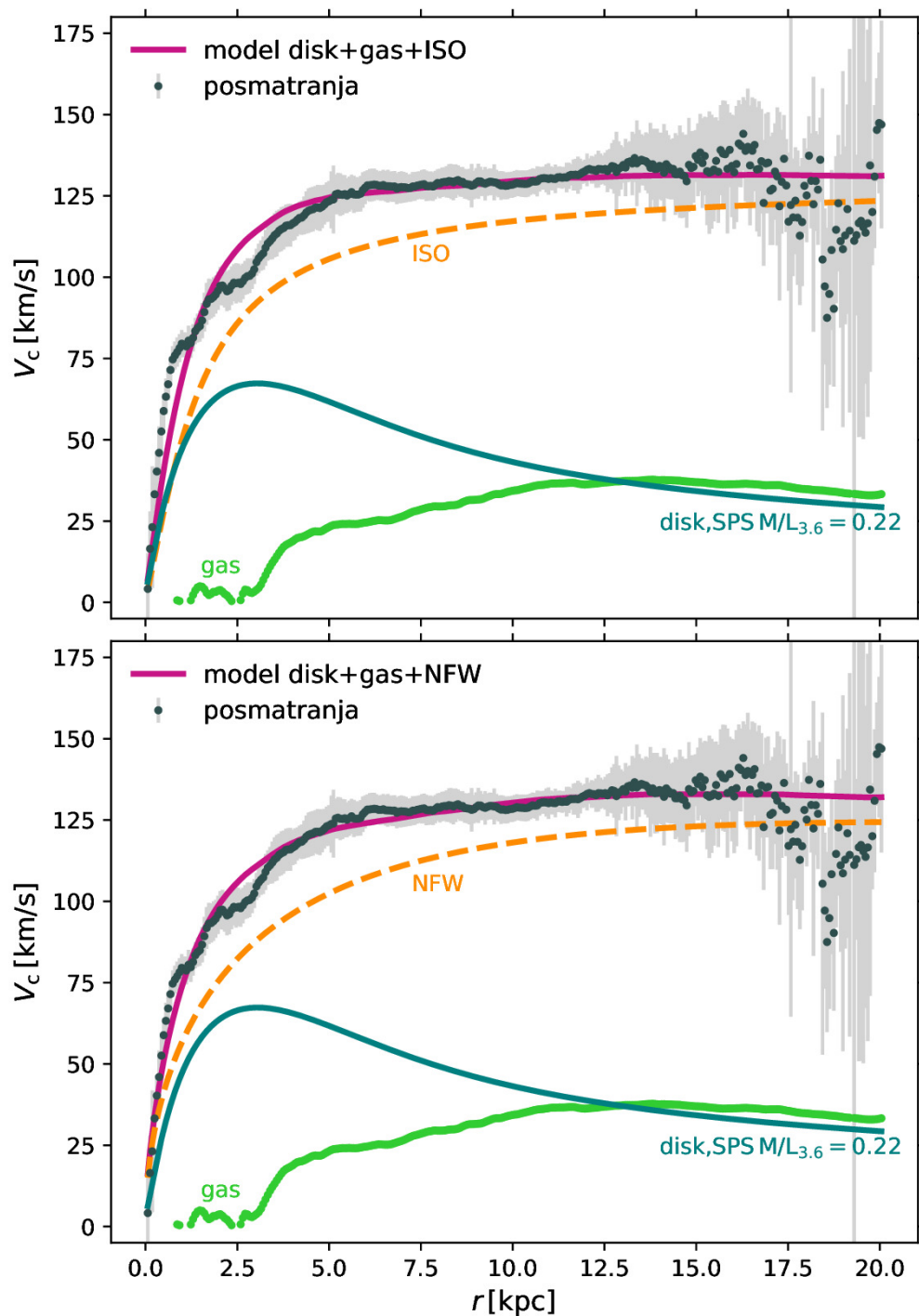
Slika 4.24: Histogram konstruisan od svih  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  vrednosti za NGC 5055 određenih koristeći dostupne SPS modele (Jovanović, 2017). Označena je izabrana vrednost na koju je fiksiran odnos masa-sjaj zvezdanog diska u modelima koji su deo ovog potpoglavlja (4.3).



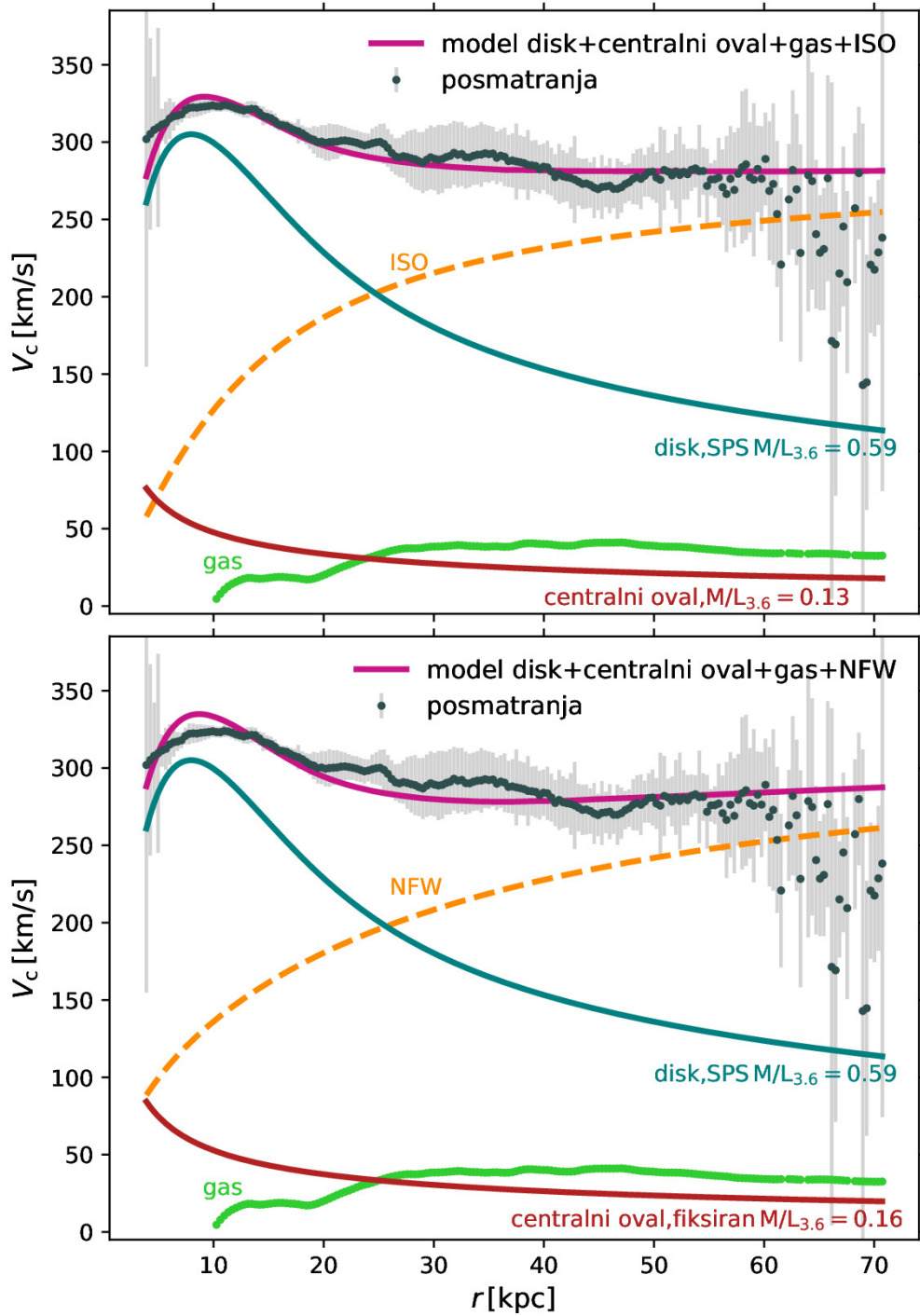
Slika 4.25: Tri SPS modela bazirana na [Into and Portinari \(2013\)](#) koja u kombinaciji sa svim dostupnim bojama za galaksiju NGC 5055 čine 68 % svih generisanih  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  vrednosti: eksponencijalni model sa Kroupinom IMF, model diska sa Kroupinom i model diska sa Salpeterovom IMF ([Jovanović, 2017](#)). Označene su i finalna izabrana (najčešća otežana) SPS vrednost za odnos  $M/L$  (crveno), kao i odnos  $M/L$  dobijen pri fitovanju sa ISO (plavo) i NFW modelom (zeleno).



Slika 4.26: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 925 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koji proizlazi iz SPS modela i naznačen je na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz `rotmas` predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa jednom zvezdanom komponentom - eksponencijalni disk. Videti tekst za detalje.

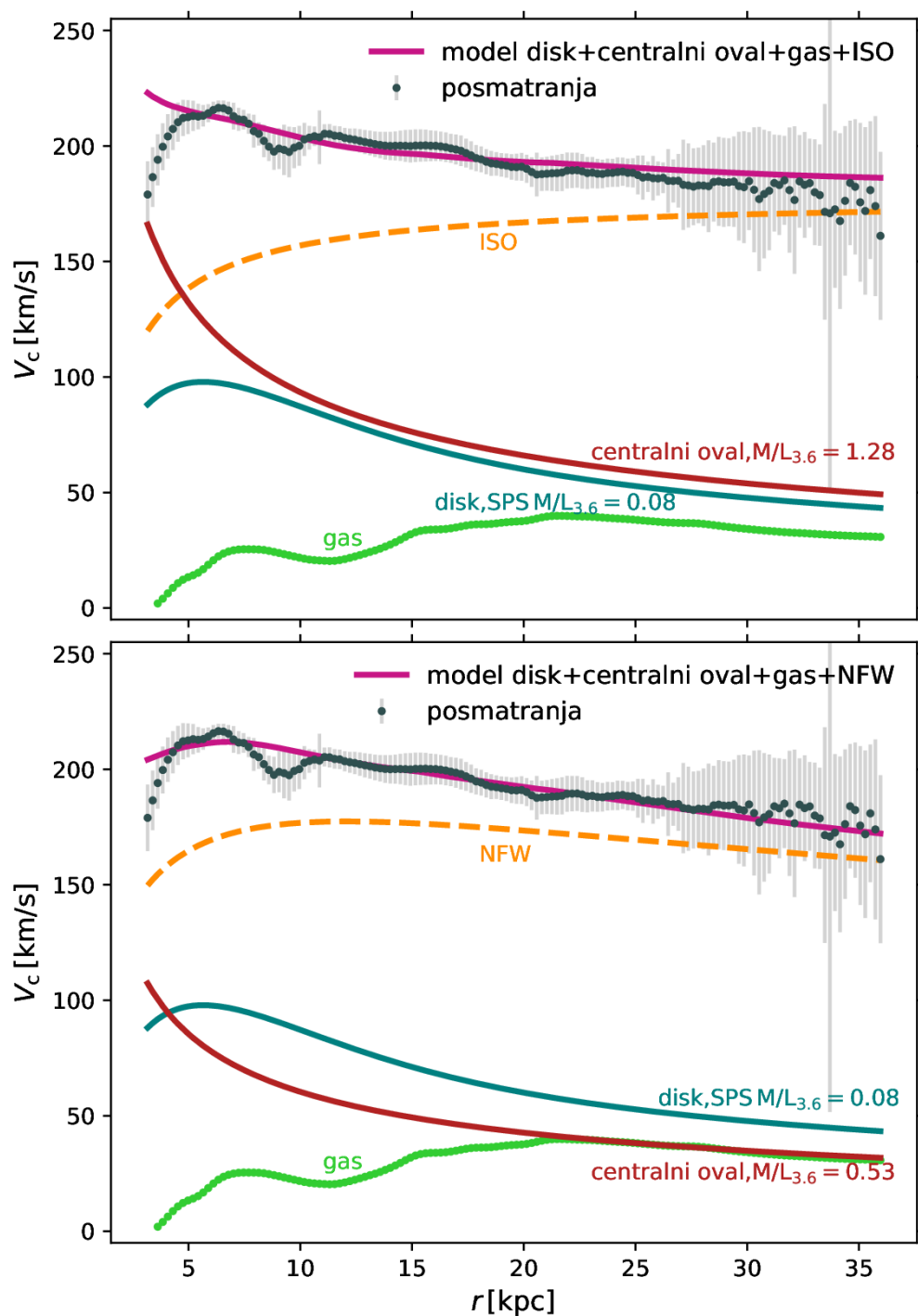


Slika 4.27: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2403 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.

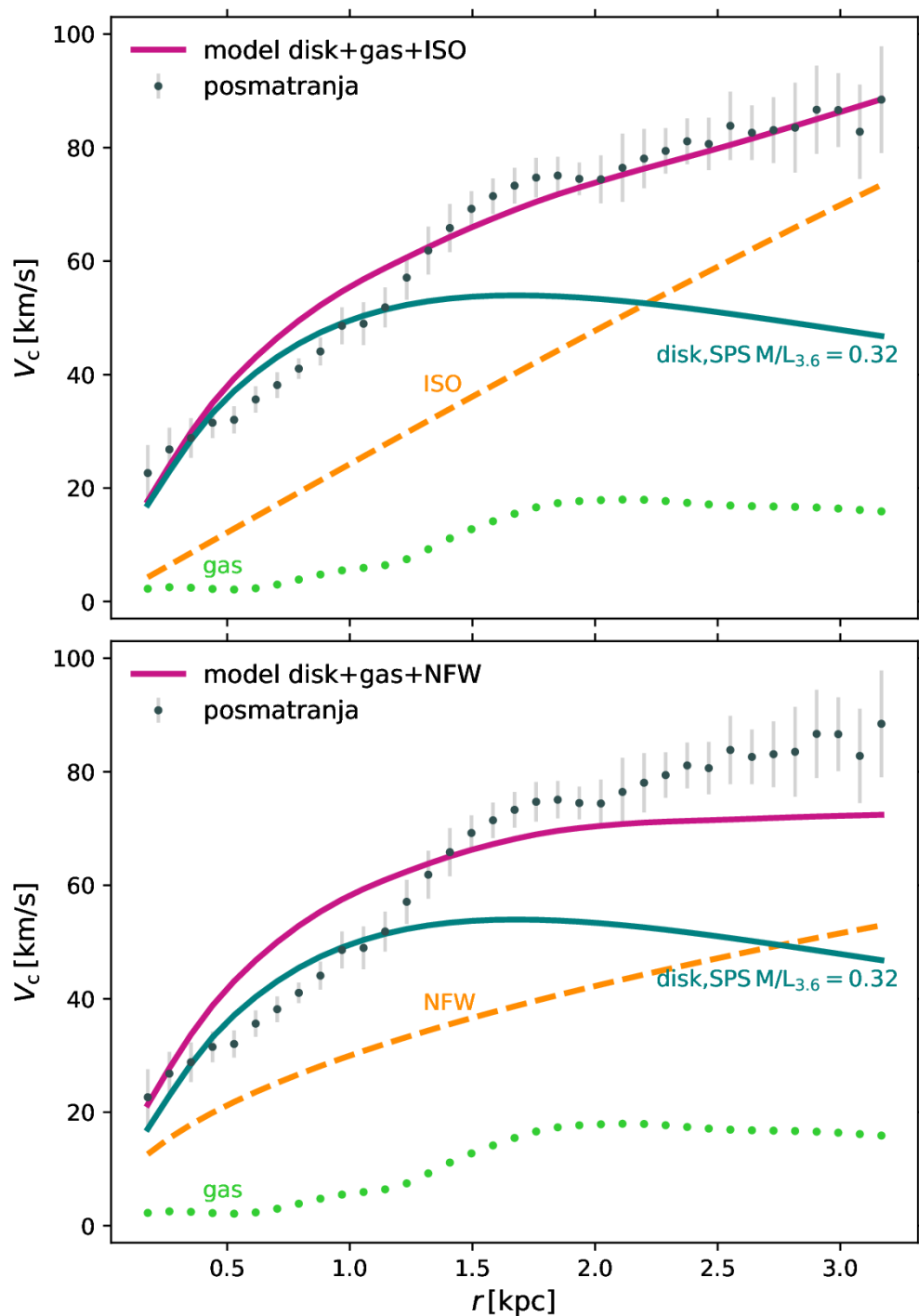


Slika 4.28: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2841 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koji proizlazi iz SPS modela i naznačen je na liniji. Crvena linija je doprinos zvezdanog centralnog ovala skaliran sa fitovanim  $M/L_{\text{bulge}}^{3.6}$ , koji je takođe naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz *rotmas* predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa dve zvezdane komponente - eksponencijalni disk i centralni oval. Videti tekst za detalje.

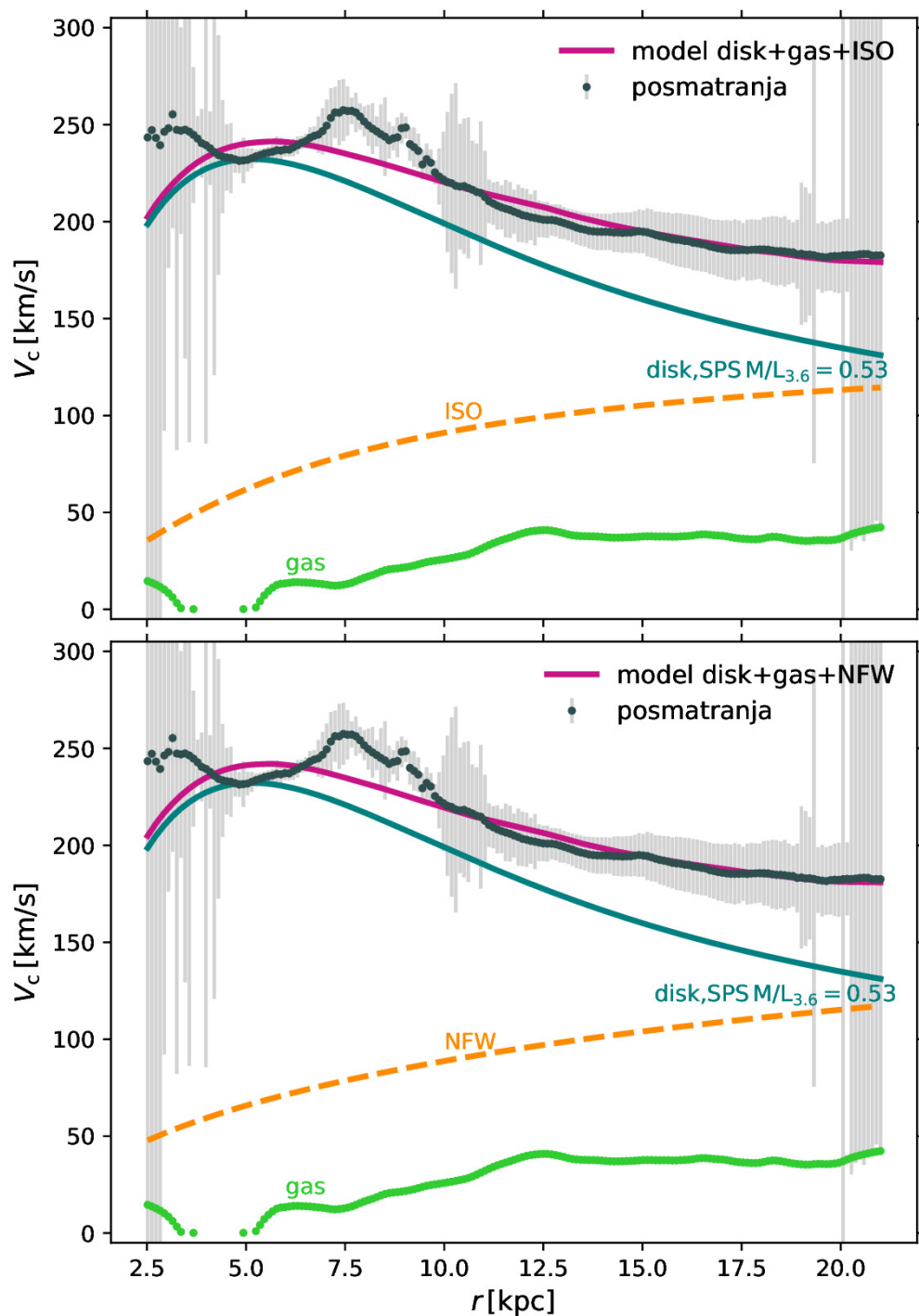




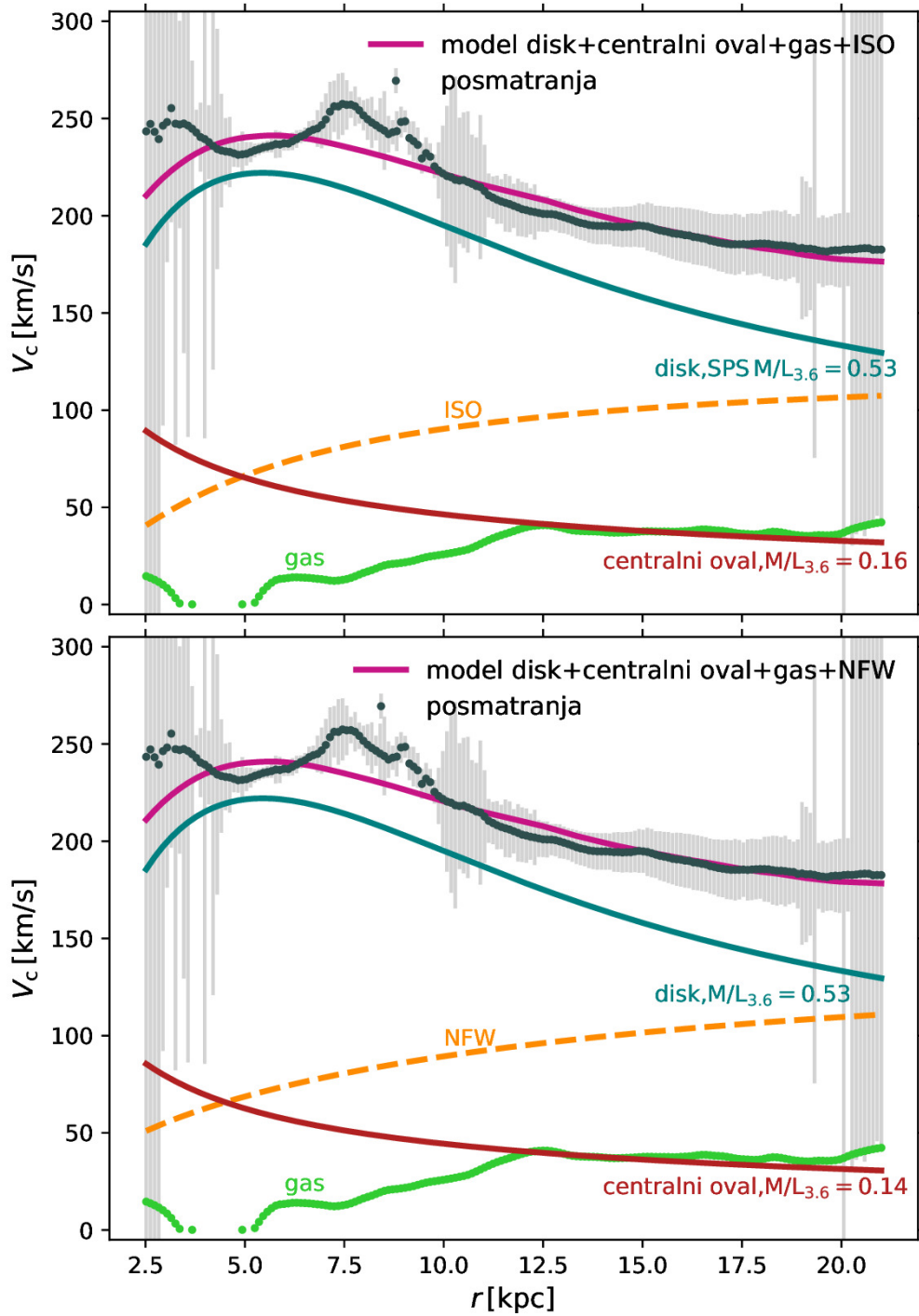
Slika 4.29: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2903 sa fiksnim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.28. Videti tekst za detalje.



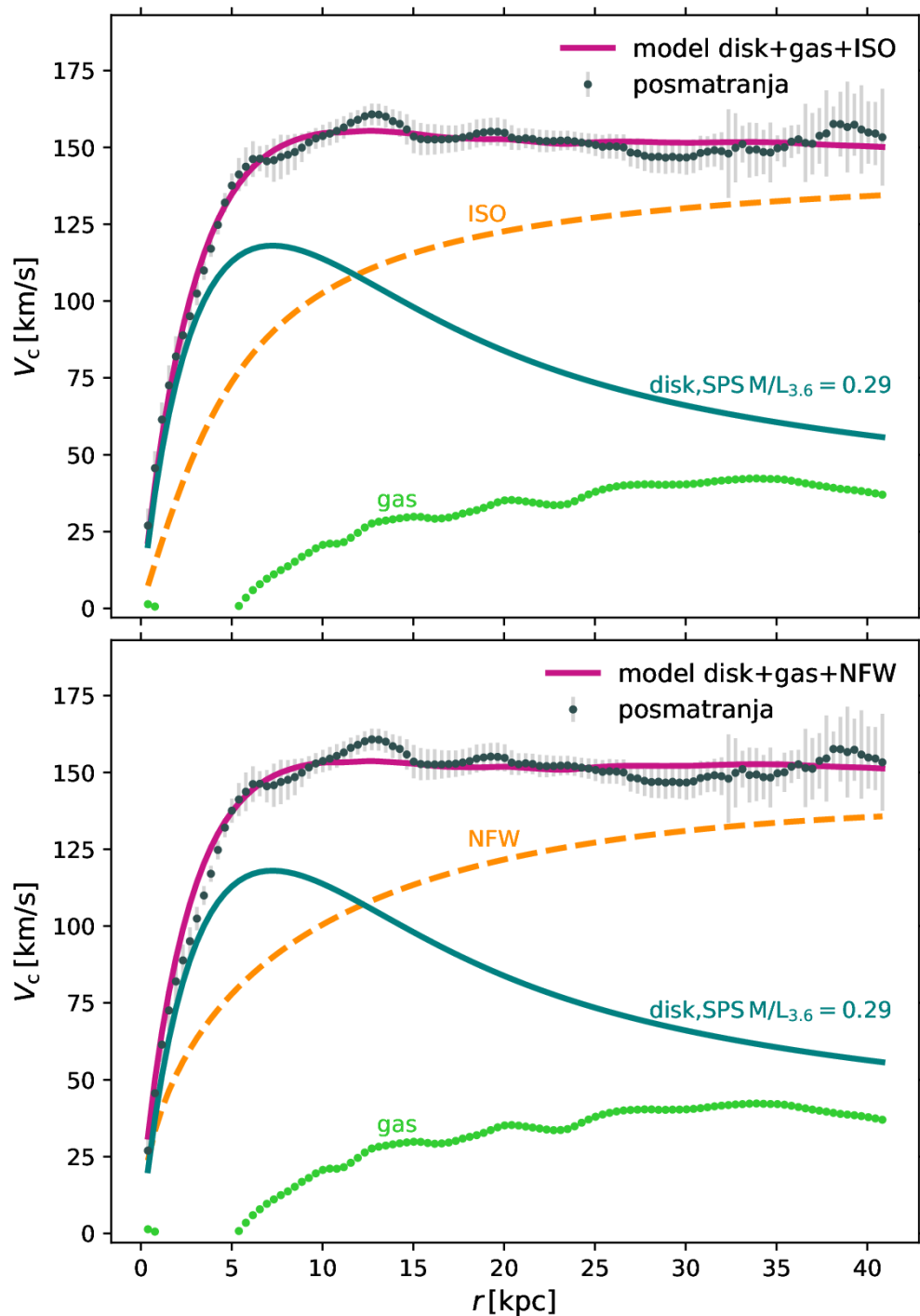
Slika 4.30: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 2976 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.



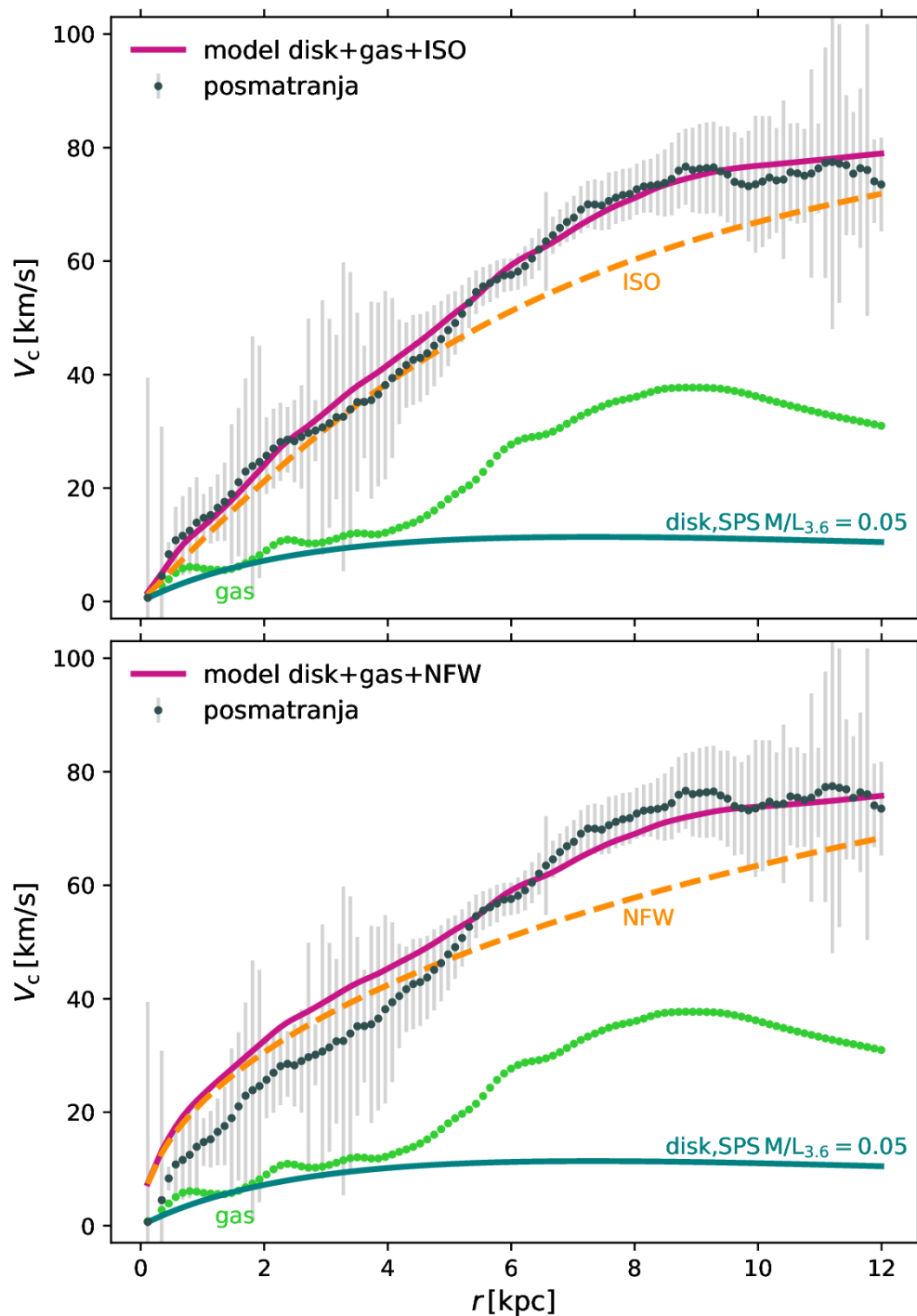
Slika 4.31: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3031 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Za ovu galaksiju dajemo model sa jednom i sa dve komponente. Na slici je prikazan model sa jednom komponentom, eksponencijalnim diskom. Videti tekst za detalje.



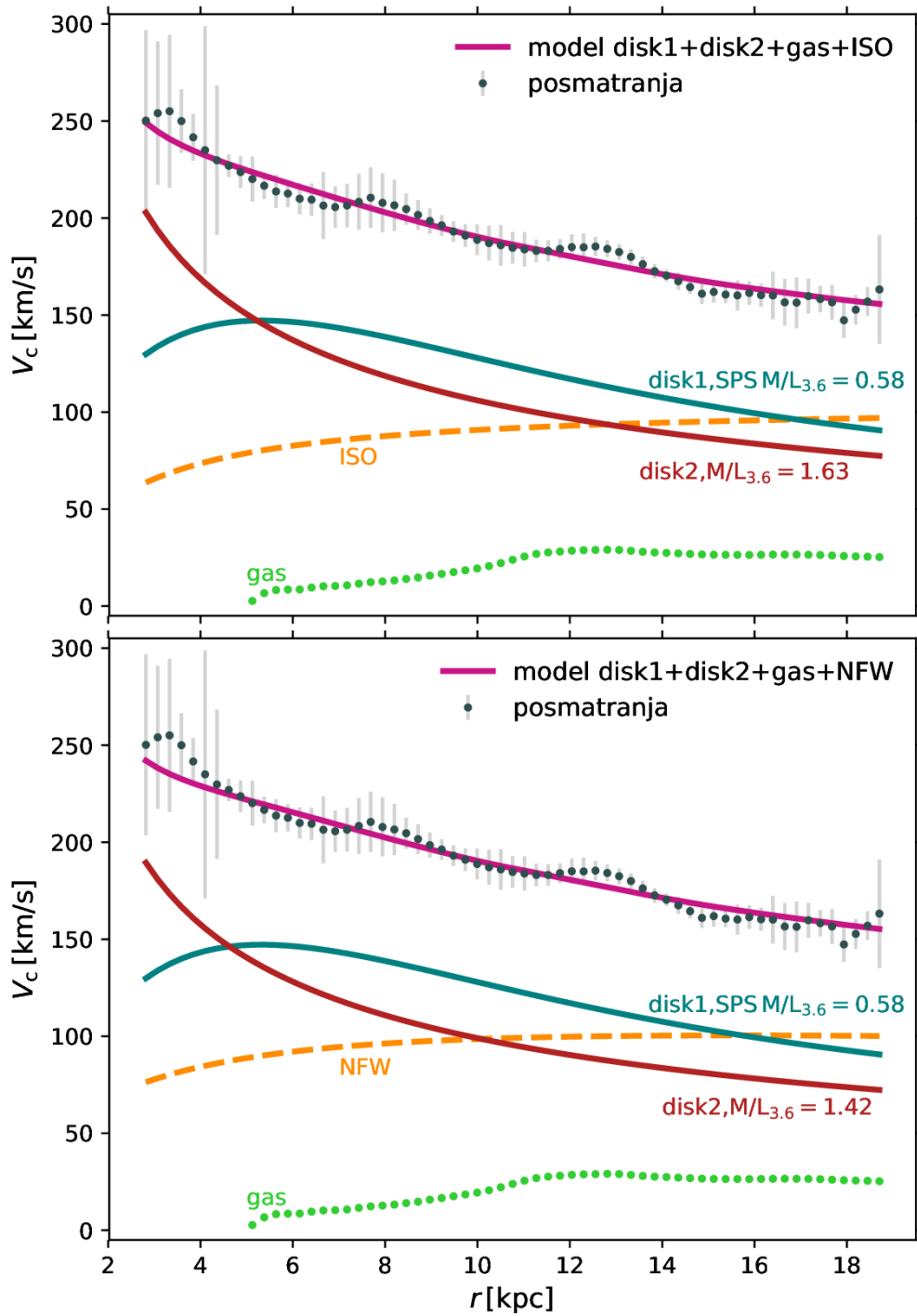
Slika 4.32: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3031 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.28. Za ovu galaksiju dajemo model sa jednom i sa dve komponente. Na slici je prikazan model sa dve komponente, eksponencijalnim diskom + centralnim ovalom. Videti tekst za detalje.



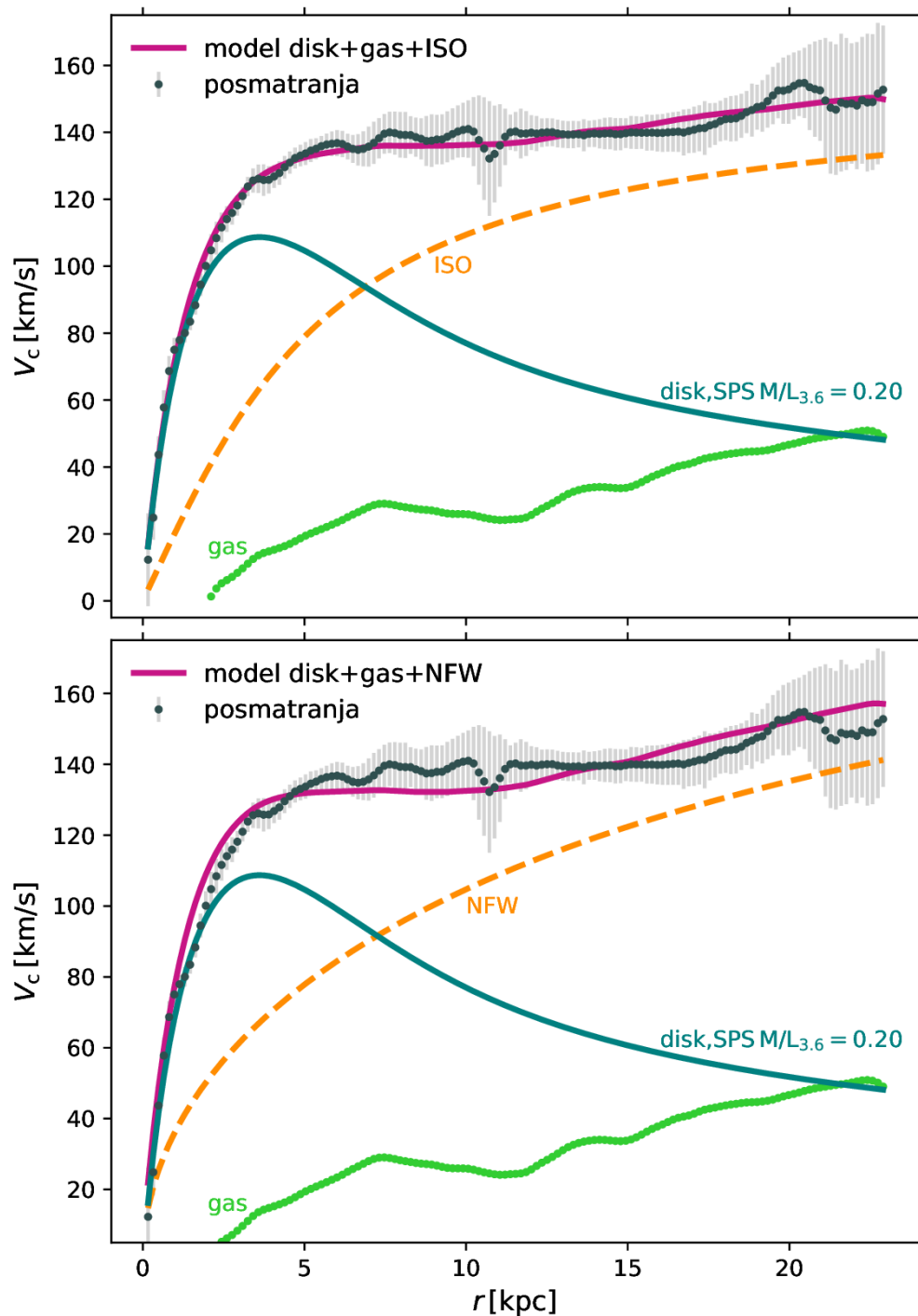
Slika 4.33: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3198 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.



Slika 4.34: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju IC 2574 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.

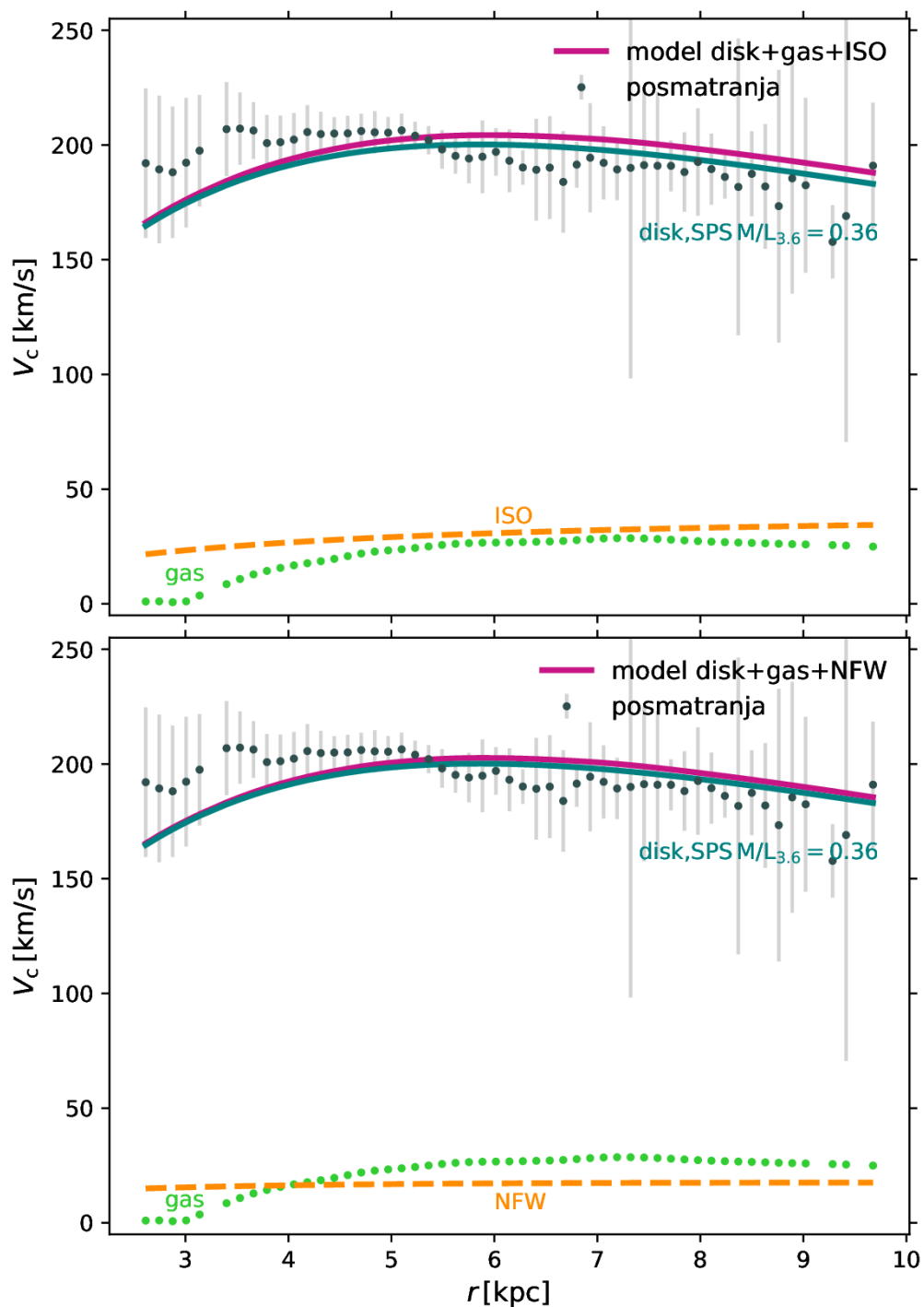


Slika 4.35: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3351 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Tamno tirkizna linija predstavlja doprinos zvezdanog diska skaliran sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koji proizlazi iz SPS modela i naznačen je na liniji. Crvena linija je doprinos drugog zvezdanog eksponencijalnog diska skaliran sa fitovanim  $M/L_{3.6}^{\text{disk}2}$ , koji je takođe naznačen na liniji. Zeleni kružići predstavljaju doprinos gasa izveden iz posmatranja HI. Teorijski doprinos haloa tamne materije označen je isprekidanom narandžastom linijom. Najbolji fit ukupne rotacione krive iz `rotmas` predstavljen je ljubičastom linijom, a posmatrana rotaciona kriva tamno sivim tačkama sa odgovarajućim neodređenostima kao sivim linijama. Ovo je primer modela sa dve zvezdane komponente - dva eksponencijalna diska. Videti tekst za detalje.

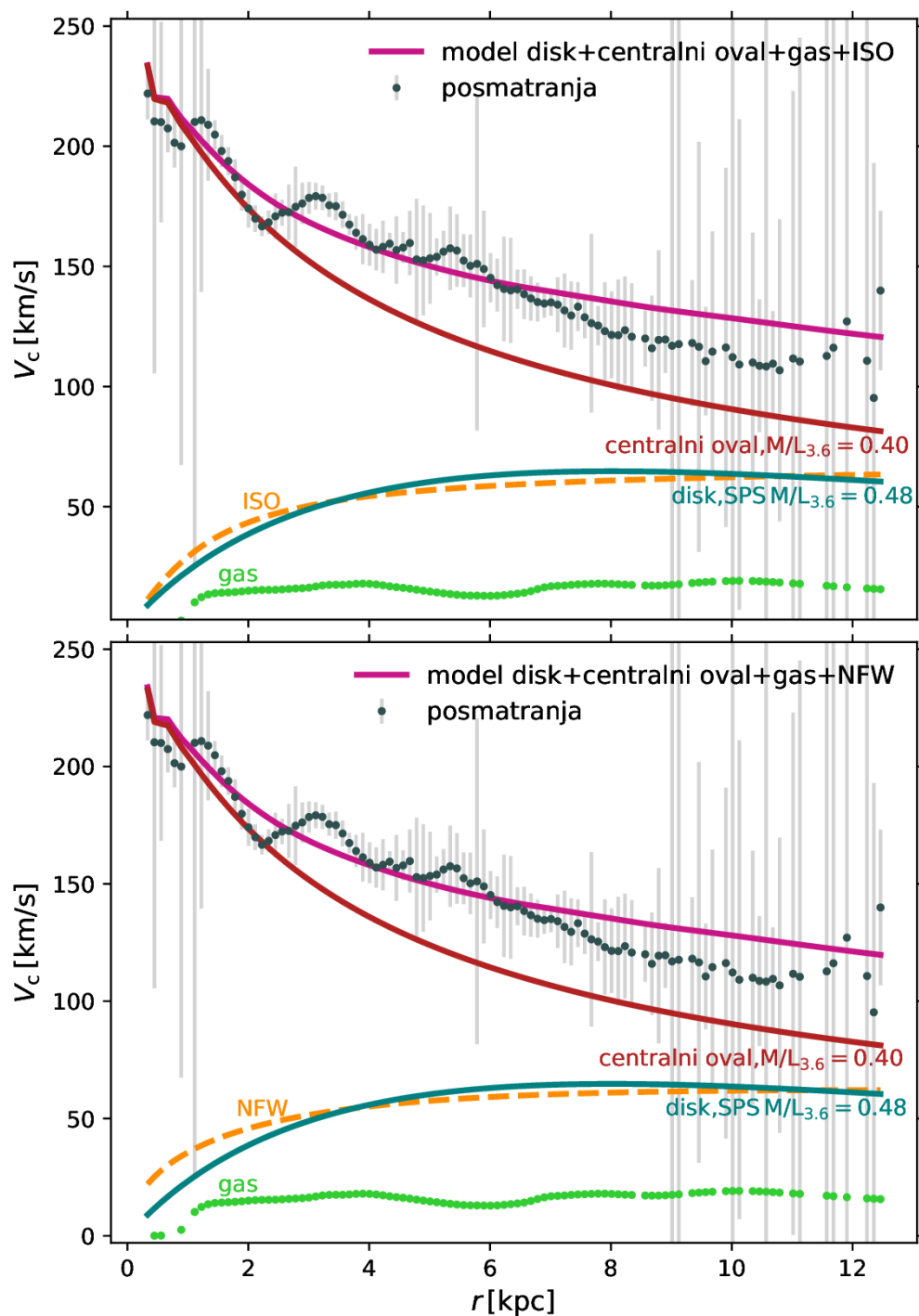


Slika 4.36: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3621 sa fiksnim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.

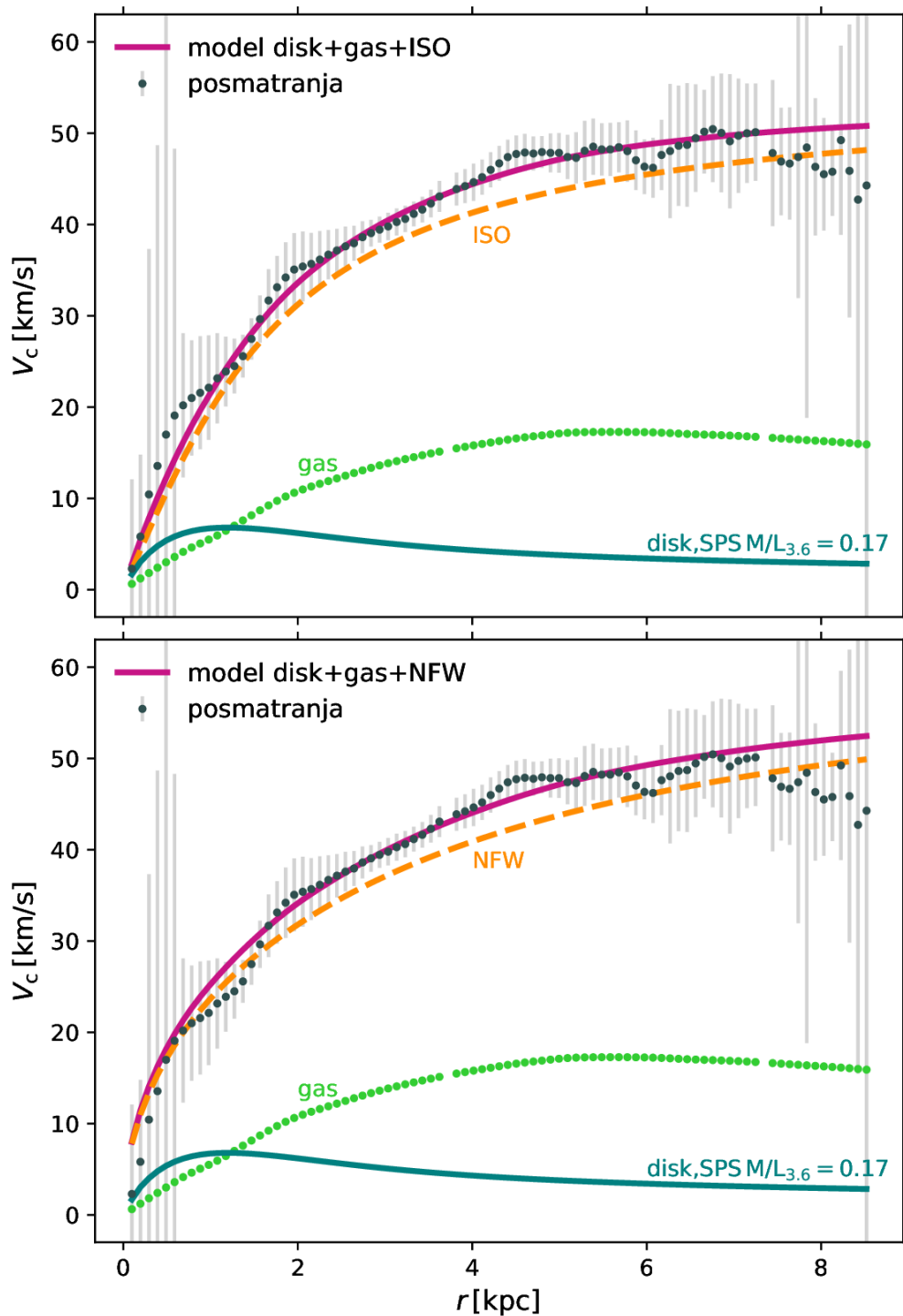




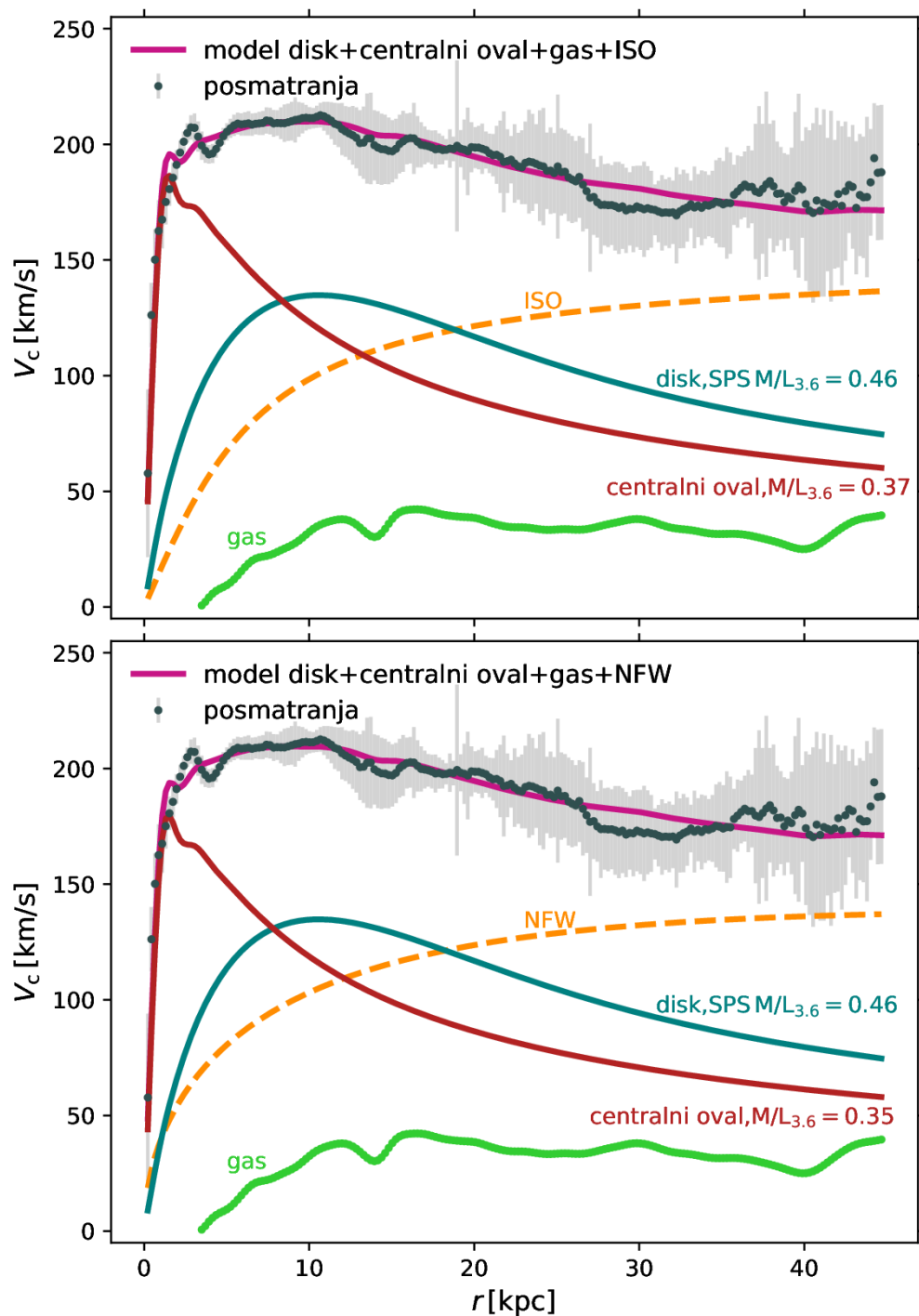
Slika 4.37: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 3627 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.



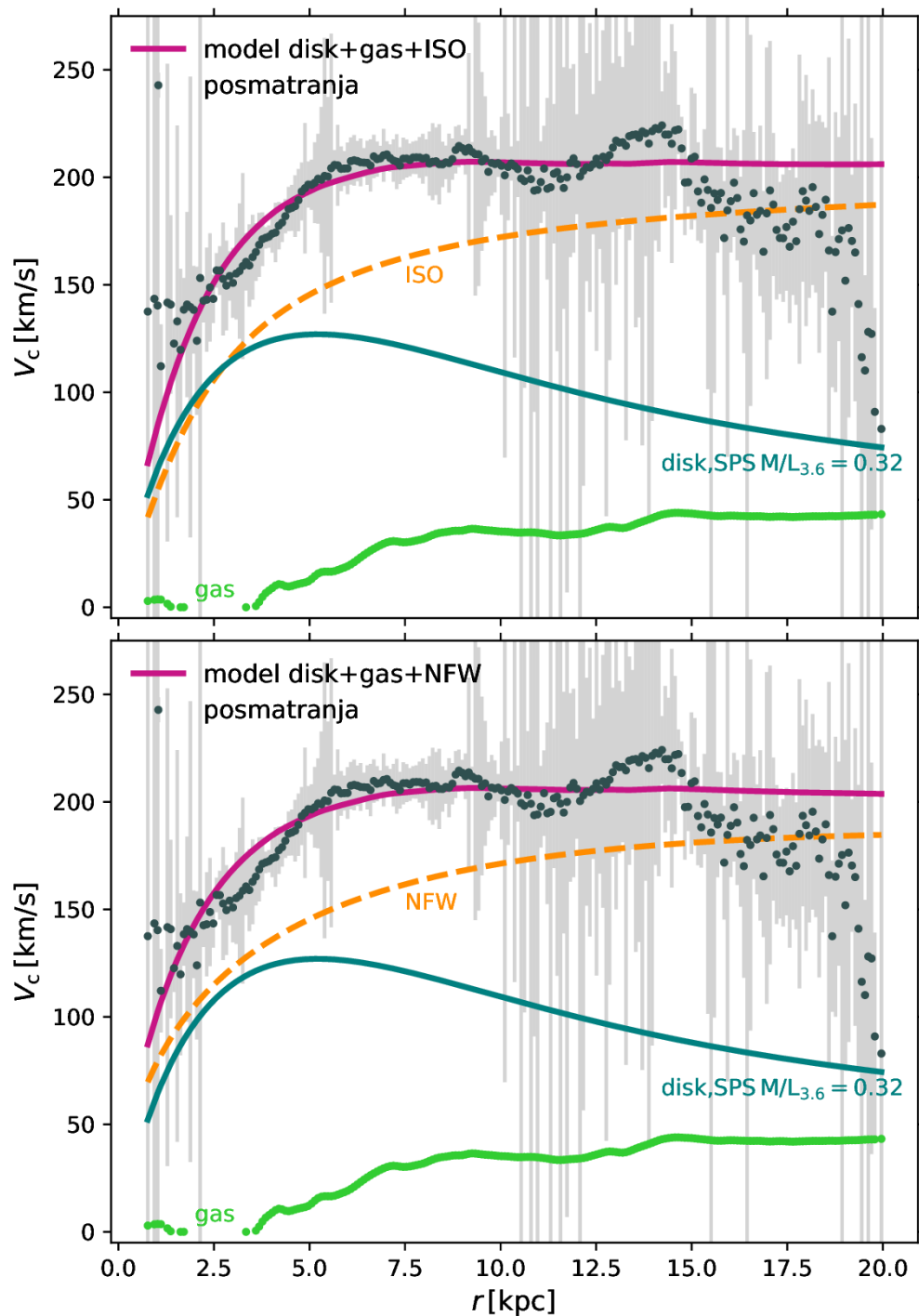
Slika 4.38: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 4736 sa fiksnim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.28. Videti tekst za detalje.



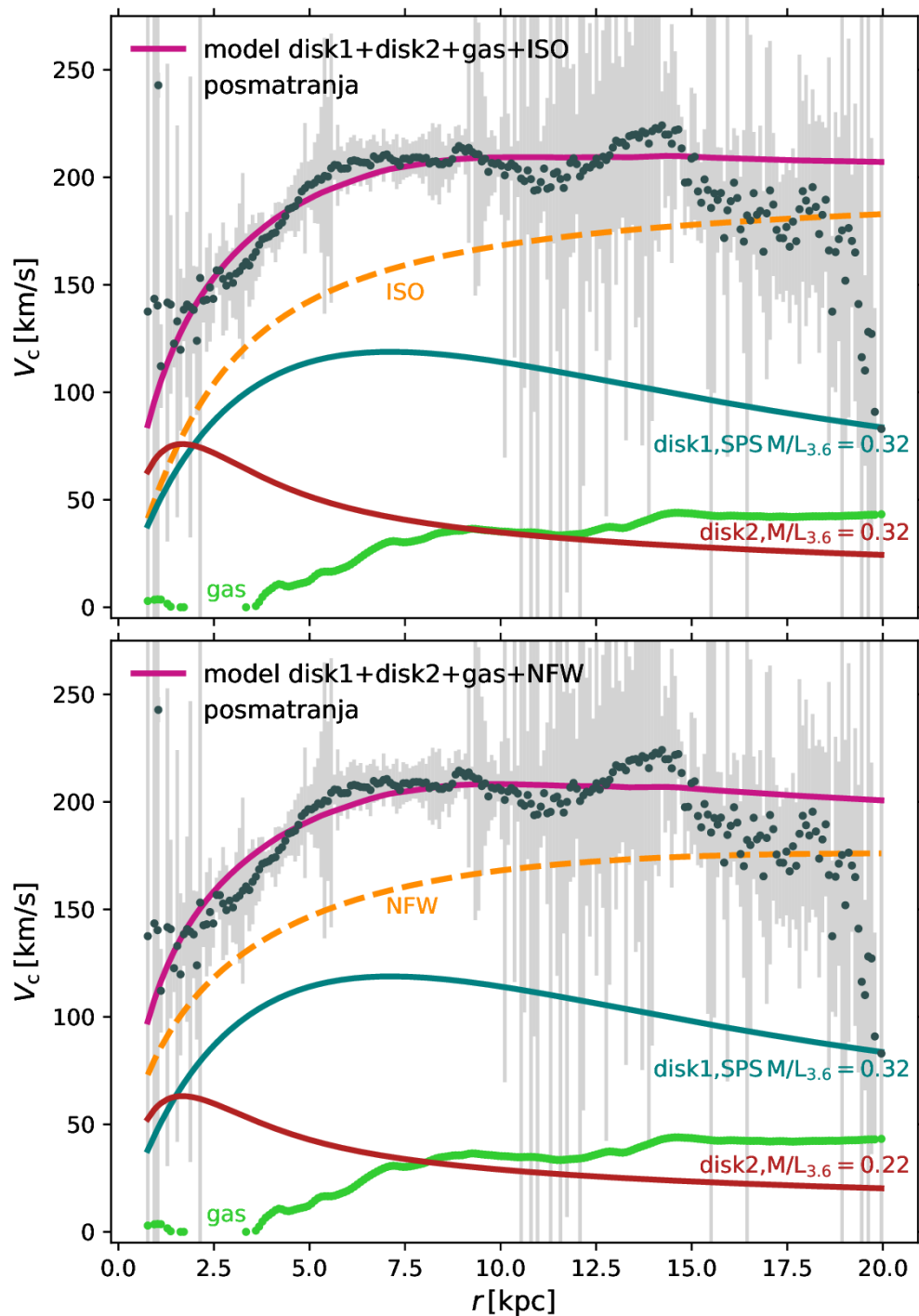
Slika 4.39: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju DDO 154 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.



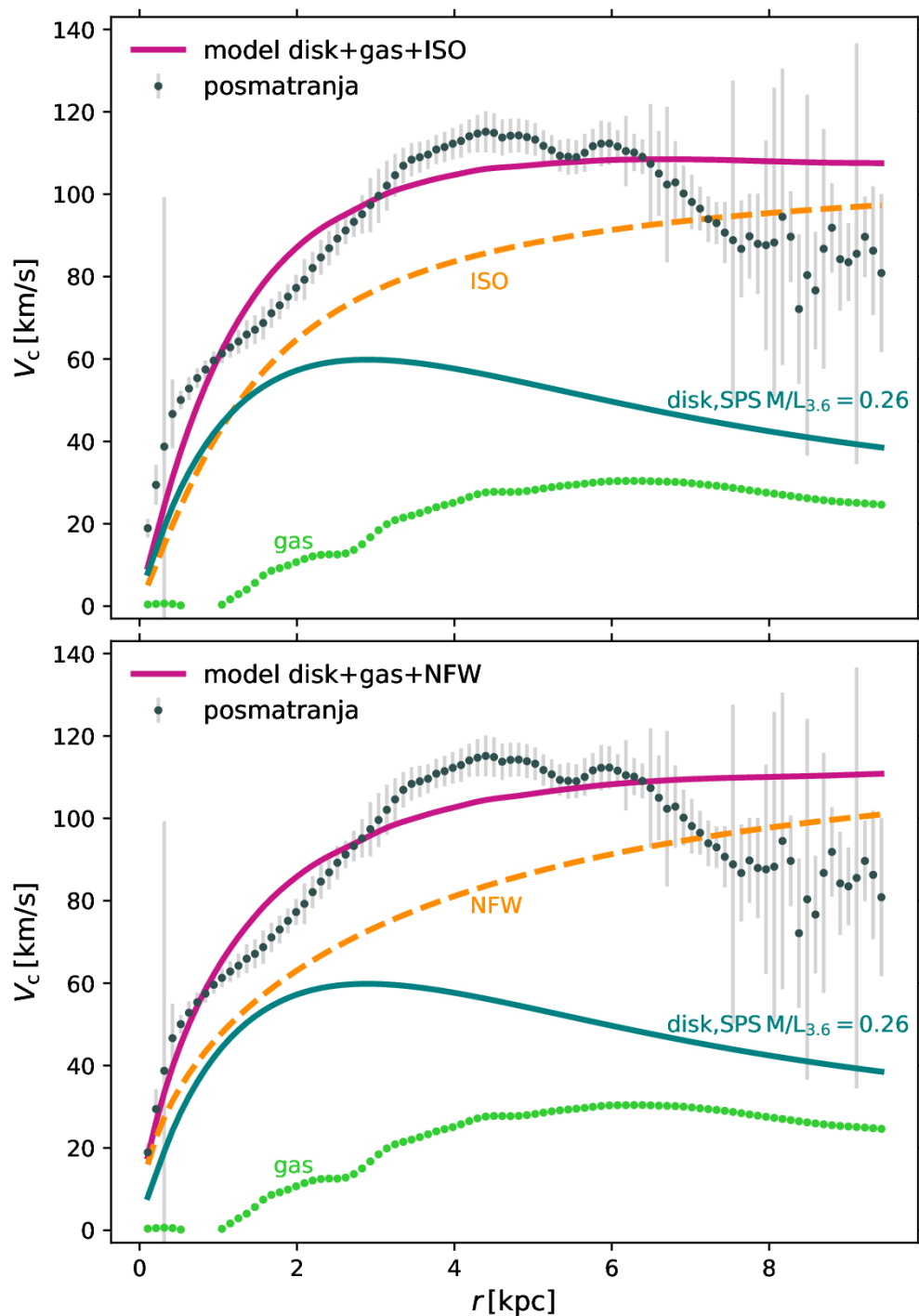
Slika 4.40: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 5055 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.28. Videti tekst za detalje.



Slika 4.41: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 6946 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Za ovu galaksiju dajemo model sa jednom i sa dve komponente. Ovo je model sa jednom komponentom, eksponencijalnim diskom. Videti tekst za detalje.



Slika 4.42: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 6946 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.35. Za ovu galaksiju dajemo model sa jednom i sa dve komponente. Ovo je model sa dve komponente, i to dva eksponencijalna diska. Videti tekst za detalje.



Slika 4.43: Najbolji fitovani dinamički modeli za galaksiju NGC 7793 sa fiksiranim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS modela i doprinosom tamne materije koristeći: gore - ISO; dole - NFW model. Oznake su kao na slici 4.26. Videti tekst za detalje.

## 4.4 Rezultati dinamičkih modela

Svi korišćeni dinamički modeli su u velikoj većini slučajeva **uspešno fitovali posmatrane rotacione krive**, i to u sve četiri kombinacije: modeli sa slobodnim  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  sa ISO i NFW profilima gustine tamne materije, i modeli sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koji proizlazi iz SPS, opet sa ISO i NFW profilima gustine tamne materije. Kao reprezentativan izabran je „best-fit” model u najvećem broju slučajeva. Kada su „best-fit” parametri imali nefizičke vrednosti ispitivali smo raspodelu  $\chi^2$  u prostoru slobodnih parametara, kao pokazatelja kvaliteta fita. Sa kontura koje predstavljaju standardna odstupanja od „best-fit” modela, u tim slučajevima izabrali bismo tačku koja je najbliža minimumu  $\chi^2$  funkcije i istovremeno se nalazi u oblasti gde parametri imaju smislene vrednosti (primer slika 4.1). Izabrana tačka (koja odgovara jednom skupu parametara) je ne samo najbliža minimumu, već se takođe nalazi i unutar  $3\sigma$  konture od najboljeg fita (odgovara stepenu poverenja od 99.73 %). U 33 od ukupno 80 procedura fitovanja je upotrebljen ovaj metod.

**Dinamički modeli sa slobodnim  $M/L$  su za sve galaksije uspešno opisali posmatranja**, s tim što je kod slobodnog NFW modela „best-fit” najviše puta bilo nemoguće koristiti već se rešenje moralo tražiti unutar 3-sigma prostora. Kod **SPS modela dinamičko modelovanje za 4 galaksije nije bilo moguće**. Za galaksiju NGC 2366, koja je i inače izuzetak u ovom uzorku kao veoma nepravilna patuljasta galaksija, nije bilo moguće proceniti  $M/L$  jer su kolor-indeksi za ovu galaksiju van opsega u kojima se mogu koristiti SPS modeli. Za tri galaksije iz uzorka, NGC 3521, NGC 4826 i NGC 7331, SPS modeli daju vrednost  $M/L$  koja je kontradiktorna rotacionoj krivi, u smislu da je dinamička masa i rotacija takve zvezdane komponente prevazilazila ukupnu dinamičku masu i „visinu” rotacione krive. Pošto su u dva slučaja (NGC 3521 i NGC 7331) u pitanju galaksije gde je površinski sjaj najbolje opisan Sersic funkcijom, zaključujemo da je u pitanju raspodela zvezdanih populacija i masa dosta drugačija nego što je uobičajeno za disk, i da je i SPS modeliranje neadekvatno opisalo ovakve galaksije (u oba slučaja imamo veliki stepen poverenja u izvedenu rotacionu krivu i dinamičku masu). Četvrta galaksija za koju SPS modeli nisu bili uspešni je NGC 4826, koja ima najmanju linijsku gustinu u



posmatranom HI disku. Uprkos tome, rotacija izgleda uređeno pa smatramo da problem nije u izvednoj rotacionoj krivi već u ulaznim parametrima za SPS modele. Naša pretpostavka je da zbog ekstremnog prisustva prašine u centralnim delovima (Fabricius et al., 2012) korišćene magnitude, i stoga ni SPS modeli, ne opisuju ovu galaksiju adekvatno.

Da bi kvantifikovali sveukupan kvalitet fitova za četiri skupa dinamičkih modela, koristili smo medijanu originalnih  $\chi^2$  vrednosti fitova ( $m$ ) i medijanu 3 *sigma-clipped*  $\chi^2$  vrednosti ( $m_{3\sigma}$ ). **Dinamički modeli sa slobodnim odnosom masa-sjaj i ISO profilom za tamnu materiju najbolje reprodukuju posmatrane rotacione krive** ( $m = 0.41$ ,  $m_{3\sigma} = 0.38$ ). Slobodan odnos  $M/L$  u kombinaciji sa NFW profilom, kao i SPS  $M/L$  sa ISO profilom imaju fitove sličnog kvaliteta ( $m = 0.48$ ,  $m_{3\sigma} = 0.44$  i  $m = 0.46$ ,  $m_{3\sigma} = 0.44$ , respektivno). **Modeli sa odnosom masa-sjaj iz SPS analize i NFW profilom za tamnu materiju najlošije opisuju posmatranja**, sa kvalitetom fita opisanim sa  $m = 0.71$ ,  $m_{3\sigma} = 0.59$ .

Treba imati u vidu da je kod SPS modela jedan parametar više fiksiran ( $M/L$ ), što poboljšava konvergenciju fita sa smislenim vrednostima parametara, te je manji broj puta bilo potrebno birati reprezentativni model koji nije „best-fit”.

Kada uporedimo profile tamne materije, jasno je da **pseudo-izotermalni model bolje fituje posmatrane rotacione krive** od NFW. U literaturi je poznat problem NFW profila da opiše centralne delove patuljastih galaksija, što smo i mi zapazili u ovom radu (videti npr. sliku 4.7). Ekstreman takav slučaj je fit za galaksiju NGC 2976 (donji grafikon na slici 4.7), koja ima jednu od najmanjih rotacionih brzina u uzorku i najmanji dijametar diska. U njenom slučaju je NFW fit besmislen, ali ga prezentujemo zbog poređenja. Osim kod patuljastih galaksija gde je NFW sistematski lošiji (ili čak neodrživ), primećujemo da za radijuse do kojih dosežu THINGS merenja prestaju da budu značajni efekti gustine u centru i oba profila haloa daju slične vrednosti za parametar  $M/L$ . Rezultati sa Einasto profilom (Einasto, 1965) za tamnu materiju na istim podacima (Chemin et al., 2011) dali su nešto bolje slaganje sa posmatranim rotacionim krivama, ali ne i značajne razlike za npr. parametar virijalizovane mase  $M_{200}$ . Ovo dodatno potkrepljuje našu tezu da je i pored degenerisanosti  $M/L$  i parametara tamne materije moguće sa određenom

sigurnošću govoriti o masi barionske komponente unutar poslednjeg posmatranog radijusa.

Iako je THINGS pregled inicijalno dizajniran za razrešenje „jezgro ili nagib” debate, to se nije nedvosmisleno dogodilo ni uz pomoć naših modela mada oni ukazuju na preferenciju modela sa centralnim jezgrom gustine profila tamne materije. Odstupanja ISO i NFW profila od rezultata koje daju analize rotacionih krivih prevazilazi okvir ove disertacije ali je deo planova za budući rad autora.

Što se tiče korišćenih **SPS modela** i njima odgovarajućih IMF, izabrani najverovatniji odnos  $M/L$  u velikoj većini slučajeva (81 %) odgovara modelima koji su predstavljeni u [Into and Portinari \(2013\)](#). Između modela predstavljenih u ovom radu za SPS  $M/L$ , skoro uvek je izabrana vrednost zasnovana na **Kroupinoj IMF** (75 % od svih modelovanih), i to najčešće u kombinaciji **sa modelom diska** (56 % od svih SPS modela), a na drugom mestu **sa eksponencijalnim modelom** (25 % od svih galaksija uspešno opisanih sa SPS modelima). Ostali modeli, sa odgovarajućim IMF, pojavljuju se samo sporadično. Takođe, najčešće je izabrana vrednost dobijena sa SPS modelima koristeći  $B - V$  boju, i ponekad  $g - r$  i  $B - K_S$ , što odlično odgovara činjenici da je najpouzdanije određivanje magnituda (i boja) iz vizuelnog dela spektra. Najbolji fitovani **slobodni odnosi**  $M/L$  takođe su najbliži SPS modelima opisanim u [Into and Portinari \(2013\)](#), i to **eksponencijalnom modelu sa Kroupinom IMF** koji se najbolje slaže sa 43 % fitova. Pošto su  $M/L$  odnosi dobijeni sa slobodnim modelovanjem nešto viši od onih iz SPS analize, jednom broju fitova najbliže su vrednosti  $M/L$  dobijene sa modelom diska i Pegasus modelom sa Salpeterovom IMF. Zaključak je, ipak, sličan onom koji smo dobili u [Jovanović \(2017\)](#) detaljnom analizom SPS modela za galaksiju NGC 5055: **najbolji izbor za opis odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za galaksije iz uzorka je model diska, a zatim eksponencijalni model, oba sa Kroupinom IMF, bazirani na radu [Into and Portinari \(2013\)](#)**. To ne iznenađuje jer su ovi modeli (kao što ime ukazuje) upravo dizajnirani za galaksije sa diskom ili eksponencijalnim diskom. Takođe, za razliku od starijih modela, [Into and Portinari \(2013\)](#) obezbeđuju direktno odnos  $M/L$  na 3.6 mikrona pa se transformacijom ne unose dodatne greške.

# Poglavlje 5

## Mase komponenti i funkcije mase

Za sve galaksije iz uzorka izračunali smo masu pojedinačnih komponenti koristeći dinamičke modele predstavljene u Poglavlju 4. Mase su računane po jednostavnoj formuli 2.6. Komponente za koje smo računali masu su zvezdani disk i centralni oval ( $M_{\text{disk}}$ ,  $M_{\text{bulge}}$ ), neutralni gas ( $M_{\text{gas}}$ ), tamna materija  $M_{\text{DM}}$ , kao i odgovarajuća barionska i ukupna dinamička masa ( $M_{\text{bar}}$ ,  $M_{\text{dyn}}$ ). Takođe, od interesa su i odnosi pojedinih komponenti, pa smo računali i barionsku frakciju ( $f_{\text{b}} \equiv \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$ ), kao i odnos barionske mase i mase tamne materije<sup>1</sup>. Sve mase su izračunate unutar poslednjeg radijusa na kom su dostupna posmatranja (misli se na poslednji radijus koji smo uzeli kao pouzdan na odgovarajućoj rotacionoj krivoj). Kada su neodređenosti parametara u proceduri dinamičkog modelovanja bile nefizički velike, takve greške se propagiraju i pri određivanju mase komponentata. Takve greške ne navodimo, što je adekvatno označeno u tabelama 5.1 - 5.4. Masa tamne materije  $M_{\text{DM}}$  unutar poslednjeg radijusa posmatranja predstavlja samo deo ukupne mase haloa tamne materije, iako se ukupna masa haloa može bez dodatnih pretpostavki izračunati. Komponenta tamne materije opisana je analitičkim profilima koje poznamo i van poslednjeg radijusa posmatranja. Naravno, ostale komponente mase nisu ekstrapolirane već su takođe date unutar ovog radijusa. Sa određenom sigurnošću možemo tvrditi da su ukupne mase galaksija značajno veće od datih vrednosti, što govore i metode za određivanje mase na velikim skalama (Kaiser and Squires, 1993; Bolton

---

<sup>1</sup>Srodan je pojmu „sposobnosti zadržavanja bariona” (eng. *baryon retention fraction*) koji se definiše kao  $\eta_{\text{b}} \equiv (M_{\text{bar}}/M_{\text{halo}})/f_{\text{b}}$ .

et al., 2008; Evans et al., 2003; Lin et al., 2012; David et al., 1990). Ovo dovodi do potcenjivanja predstavljenih frakcija, jer se i one odnose na poslednji pouzdan radijus, a razumna je pretpostavka da se nakon ovog radijusa odnosi menjaju u korist tamne materije i ukupne mase u odnosu na barionsku. Ovo ne znači da nakon pomenutog radijusa nema značajnog doprinosa bariona, naprotiv, pretpostavka je da se upravo najveće količine bariona vezanih za galaksiju nalaze u tamnom halou u vidu vrelog koronalnog gasa. Ipak, imajući u vidu veličine tamnih haloa, može se pokazati da u spoljašnjim delovima gustinom materije dominira tamna materija.

Svi korišćeni modeli daju mase koje su razlikuju u okviru očekivanih varijacija (tabele 5.1 - 5.4).

Razlike u ukupnoj masi za skup modela sa slobodnim  $M/L$  kreću se 1-13 %, sa najverovatnijim odstupanjem od 2 % između ISO i NFW skupa modela. Za barionsku masu odstupanje je nešto veće (očekivano, zbog razlika u odnosu  $M/L$ ), i ide i do 55 %, sa najverovatnijom razlikom od 4 %. Velike razlike u barionskoj masi potiču od nekoliko galaksija, gde je fitovana vrednost odnosa  $M/L$  između ISO i NFW modela znatna. U pitanju su galaksije NGC 2366, NGC 2403, NGC 2976, NGC 6946 i NGC 7793 ( $M/L$  dostupan u tabelama 4.2 i 4.3).

SPS modeli između sebe daju vrlo slične rezultate, opet očekivano, zbog odnosa  $M/L$  koji je za oba skupa (ISO i NFW) fiksiran na istu vrednost. Odstupanja je maksimalno 33 % za ukupnu dinamičku masu, odnosno 27 % za barionsku (minimalna razlika je 0 u ovom slučaju), sa najverovatnijom vrednošću od 2 % za ukupnu i 1 % za barionsku masu.

Posebno izdvajamo galaksiju NGC 2976 za koju je SPS model sa NFW profilom za tamnu materiju posebno neuspešan u fitovanju spoljašnjih delova rotacione krive (slika 4.30) i tako određene dinamička masa znatno odstupa od ukupne dinamičke mase određene iz drugih modela. Takođe, i varijacije između slobodnog  $M/L$  (0.09 iz ISO modela i 0.05 iz NFW modela) i SPS vrednosti (0.18) su znatne. Ovu galaksiju (kao jedinu sa razlikama u masi koje znatno odstupaju od srednjih) smo zato isključili iz poređenja mase.

Ukupna dinamička masa određena iz skupa modela sa slobodnim  $M/L$  i masa iz SPS modela sa fiksiranim  $M/L$  razlikuju se maksimalno  $\sim 20$  %, sa najverovatni-

Tabela 5.1: Mase pojedinačnih komponentni galaksija za dinamičke modele koji uključuju masu zvezdane komponente skaliranu sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  kao slobodnim parametrom. Za komponentu tamne materije primenjen je izotermalni (ISO) profil. Kolone su  $M_{\text{disk}}$  – masa modelovanog zvezdanog diska,  $M_{\text{bulge}}$  – masa modelovanog zvezdanog centralnog ovala (tamo gde stoji oznaka „d2” u pitanju je masa drugog zvezdanog diska);  $M_{\text{gas}}$  – masa neutralnog gasa;  $M_{\text{DM}}$  – masa tamne materije;  $M_{\text{dyn}}$  – ukupna dinamička masa svih komponenti  $M_{\text{bar}} + M_{\text{DM}}$ ;  $f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$  – barionska frakcija do poslednjeg posmatranog radijusa i  $\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$  – odnos dve glavne komponente u modelovanoj masi galaksije, barionske i tamne materije. Oznaka „lk”, odnosno „2k” stoji kod galaksija gde su korišćena dva modela za dekompoziciju zvezdanog sjaja i samim tim i dva dinamička modela sa odgovarajućim masama. N/A vrednost stoji umesto greški koje su nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M_{\text{disk}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bulge}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{gas}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bar}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{DM}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{dyn}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$	$\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NGC 925	2.52 ± 2.59	–	83.0 ± 23.2	1.08 ± 0.30	4.86 ± 6.88	5.94 ± 2.94	0.18 ± 0.14	0.22 ± 0.38
NGC 2366	1.45 ± 0.28	–	11.1 ± 3.6	0.26 ± 0.08	0.38 ± 0.30	0.63 ± 0.40	0.40 ± 0.39	0.68 ± 0.77
NGC 2403	8.01 ± 0.54	–	51.6 ± 7.8	1.32 ± 0.20	7.48 ± 1.27	8.80 ± 1.91	0.15 ± 0.06	0.18 ± 0.06
NGC 2841	127.4 ± 23.4	10.92 ± 20.33	175.2 ± 74.3	15.58 ± 6.61	107.08 ± 341.78	122.66 ± 84.36	0.13 ± 0.14	0.15 ± 0.53
NGC 2903	46.33 ± 9.00	7.12 ± 1.65	79.2 ± 26.0	6.14 ± 2.02	21.83 ± 28.06	27.96 ± 6.31	0.22 ± 0.12	0.28 ± 0.45
NGC 2976	0.67 ± 0.23	–	1.9 ± 1.1	0.09 ± 0.05	0.50 ± 0.30	0.59 ± 0.06	0.15 ± 0.10	0.17 ± 0.20
NGC 3031 <sup>lk</sup>	79.12 ± 34.37	–	87.4 ± 14.5	8.79 ± 1.46	6.96 ± 74.43	15.74 ± 12.22	0.56 ± 0.53	1.26 ± 13.73
NGC 3031 <sup>2k</sup>	78.79 ± 36.75	5.19 ± 6.08	87.4 ± 14.5	9.27 ± 1.54	6.18 ± 68.52	15.46 ± 12.00	0.60 ± 0.57	1.50 ± 16.87
NGC 3198	28.85 ± 6.66	–	129.9 ± 39.7	4.18 ± 1.28	17.20 ± 22.17	21.39 ± 2.20	0.20 ± 0.08	0.24 ± 0.39
IC 2574	0.83 ± 0.40	–	26.8 ± 14.5	0.35 ± 0.19	1.40 ± 0.34	1.75 ± 0.20	0.20 ± 0.13	0.25 ± 0.20
NGC 3351 <sup>d2</sup>	44.55 ± 43.76	22.49 <sup>d2</sup> ± 3.83	27.8 ± 7.5	6.98 ± 1.89	3.41 ± 77.62	10.40 ± 1.78	0.67 ± 0.30	2.05 ± 47.05
NGC 3521	–	96.25 ± 34.45	229.9 ± 70.6	11.92 ± 3.66	21.29 ± 82.05	33.21 ± 3.89	0.36 ± 0.15	0.56 ± 2.33
NGC 3621	10.41 ± 0.52	–	128.0 ± 30.4	2.32 ± 0.55	9.33 ± 1.57	11.65 ± 1.46	0.20 ± 0.07	0.25 ± 0.10
NGC 3627	59.41 ± 26.08	–	14.0 ± 5.2	6.08 ± 2.25	2.34 ± N/A	8.42 ± 1.21	0.72 ± 0.37	2.60 ± N/A
NGC 4736	20.39 ± 62.42	19.31 ± 1.71	7.1 ± 1.3	4.04 ± 0.72	0.00 ± 34.85	4.04 ± 0.96	1.00 ± 0.42	N/A
DDO 154	0.02 ± 0.02	–	5.0 ± 1.0	0.05 ± 0.01	0.46 ± 0.09	0.51 ± 0.92	0.10 ± 0.20	0.11 ± 0.04
NGC 4826	19.59 ± 15.63	1.10 ± 10.29	6.4 ± 1.7	2.13 ± 0.58	8.72 ± 83.46	10.85 ± 2.84	0.20 ± 0.10	0.24 ± 2.41
NGC 5055	66.82 ± 19.67	36.48 ± 2.86	163.1 ± 47.6	11.96 ± 3.49	19.07 ± 38.29	31.03 ± 8.64	0.39 ± 0.22	0.63 ± 1.44
NGC 6946 <sup>lk</sup>	37.55 ± 15.34	–	87.0 ± 5.2	4.62 ± 0.27	14.47 ± 32.54	19.09 ± 81.99	0.24 ± 1.05	0.32 ± 0.74
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	75.38 ± 104.29	1.42 <sup>d2</sup> ± 2.08	87.0 ± 5.2	8.55 ± 0.51	7.62 ± 136.12	16.17 ± 69.42	0.53 ± 2.30	1.12 ± 20.14
NGC 7331	–	108.64 ± 36.59	156.8 ± 19.9	12.43 ± 1.58	25.83 ± 123.47	38.26 ± 9.79	0.32 ± 0.12	0.48 ± 2.36
NGC 7793	5.17 ± 1.26	–	13.3 ± 2.8	0.65 ± 0.14	1.88 ± 2.42	2.53 ± 0.60	0.26 ± 0.12	0.35 ± 0.52

Tabela 5.2: Mase pojedinačnih komponentni galaksija za različite dinamičke modele koji uključuju masu zvezdane komponente skaliranu sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  kao slobodnim parametrom. Za komponentu u tamne materije primenjen je Navaro-Frenk-Vajt (NFW) profil. Kolone su  $M_{\text{disk}}$  – masa modelovanog zvezdanog diska;  $M_{\text{bulge}}$  – masa modelovanog zvezdanog centralnog ovala (tamo gde stoji oznaka „d2” u pitanju je masa drugog zvezdanog diska);  $M_{\text{gas}}$  – masa neutralnog gasa;  $M_{\text{DM}}$  – masa tamne materije;  $M_{\text{dyn}}$  – ukupna dinamička masa svih komponenti  $M_{\text{bar}} + M_{\text{DM}}$ ;  $f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$  – barionska frakcija do poslednjeg posmatranog radijusa i  $\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$  – odnos dve glavne komponente u modelovanoj masi galaksije, barionske i tamne materije. Oznaka „1k”, odnosno „2k” stoji kod galaksija gde su korišćena dva modela za dekompoziciju zvezdanog sjaja i samim tim i dva dinamička modela sa odgovarajućim masama. N/A vrednost stoji umesto greški koje su nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M_{\text{disk}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bulge}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{gas}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bar}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{DM}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{dyn}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$	$\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NGC 925	2.31 ± 2.99	–	83.0 ± 23.2	1.06 ± 0.30	5.01 ± 6.00	6.07 ± 3.00	0.17 ± 0.14	0.21 ± 0.31
NGC 2366	0.67 ± 0.30	–	11.1 ± 3.6	0.18 ± 0.06	0.38 ± N/A	0.56 ± 0.35	0.32 ± 0.31	0.47 ± N/A
NGC 2403	1.56 ± 0.39	–	51.6 ± 7.8	0.67 ± 0.10	6.99 ± 0.32	7.66 ± 1.66	0.09 ± 0.03	0.10 ± 0.02
NGC 2841	131.12 ± 7.07	18.48 ± 3.14	175.2 ± 74.3	16.71 ± 7.09	96.49 ± 6.00	113.20 ± 77.85	0.15 ± 0.16	0.17 ± 0.08
NGC 2903	39.24 ± 4.28	6.46 ± 1.47	79.2 ± 26.0	5.36 ± 1.76	21.13 ± 3.03	26.49 ± 5.97	0.20 ± 0.11	0.25 ± 0.12
NGC 2976	0.30 ± 0.65	–	1.9 ± 1.1	0.05 ± 0.03	0.49 ± 2.20	0.54 ± 0.06	0.09 ± 0.06	0.10 ± 0.49
NGC 3031 <sup>1k</sup>	70.95 ± 25.52	–	87.4 ± 14.5	7.97 ± 1.32	7.45 ± 14.60	15.42 ± 11.97	0.52 ± 0.49	1.07 ± 2.27
NGC 3031 <sup>2k</sup>	72.14 ± 9.60	4.93 ± 4.22	87.4 ± 14.5	8.58 ± 1.43	6.64 ± 124.71	15.22 ± 11.82	0.56 ± 0.53	1.29 ± 24.48
NGC 3198	23.04 ± 2.98	–	129.9 ± 39.7	3.60 ± 1.10	17.43 ± 3.11	21.03 ± 2.16	0.17 ± 0.07	0.21 ± 0.10
IC 2574	0.83 ± 1.07	–	26.8 ± 14.5	0.35 ± 0.19	1.24 ± 59.46	1.59 ± 0.18	0.22 ± 0.14	0.28 ± 13.82
NGC 3351 <sup>d2</sup>	48.60 ± 47.47	16.85 <sup>d2</sup> ± 38.55	27.8 ± 7.5	6.82 ± 1.84	3.38 ± 81.18	10.20 ± 1.75	0.67 ± 0.30	2.02 ± 49.04
NGC 3521	–	88.32 ± 202.49	229.9 ± 70.6	11.13 ± 3.42	20.16 ± 109.09	31.29 ± 3.66	0.36 ± 0.15	0.55 ± 3.16
NGC 3621	8.92 ± 0.84	–	128.0 ± 30.4	2.17 ± 0.52	9.81 ± 1.51	11.98 ± 1.50	0.18 ± 0.07	0.22 ± 0.09
NGC 3627	73.68 ± 3.60	–	14.0 ± 5.2	7.51 ± 2.78	0.41 ± N/A	7.92 ± 1.14	0.95 ± 0.49	18.23 ± N/A
NGC 4736	19.77 ± 10.24	19.18 ± 30.12	7.1 ± 1.3	3.97 ± 0.71	0.00	3.97 ± 0.94	1.00 ± 0.42	N/A
DDO 154	0.02 ± 0.02	–	5.0 ± 1.0	0.05 ± 0.01	0.50 ± 0.07	0.55 ± 0.98	0.09 ± 0.19	0.10 ± 0.04
NGC 4826	16.61 ± 11.81	1.07 ± 9.28	6.4 ± 1.7	1.83 ± 0.50	9.15 ± 15.25	10.98 ± 2.87	0.17 ± 0.09	0.20 ± 0.39
NGC 5055	52.82 ± 13.96	33.29 ± 2.92	163.1 ± 47.6	10.24 ± 2.99	20.10 ± 9.95	30.35 ± 8.45	0.34 ± 0.19	0.51 ± 0.40
NGC 6946 <sup>1k</sup>	22.60 ± 8.28	–	87.0 ± 5.2	3.13 ± 0.19	16.21 ± 5.48	19.34 ± 83.04	0.16 ± 0.70	0.19 ± 0.08
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	70.34 ± 55.47	1.14 <sup>d2</sup> ± 3.60	87.0 ± 5.2	8.02 ± 0.48	8.51 ± 44.62	16.53 ± 71.00	0.49 ± 2.11	0.94 ± 4.99
NGC 7331	–	108.75 ± 65.01	156.8 ± 19.9	12.44 ± 1.58	24.80 ± 45.78	37.24 ± 9.53	0.33 ± 0.13	0.50 ± 0.99
NGC 7793	1.59 ± 1.23	–	13.3 ± 2.8	0.29 ± 0.06	2.47 ± 0.76	2.76 ± 0.65	0.11 ± 0.05	0.12 ± 0.06

Tabela 5.3: Mase pojedinačnih komponentni galaksija za dinamičke modele koji uključuju masu zvezdane komponente skaliranu sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  fiksiranim na vrednost iz SPS modela. Za komponentu tamne materije primenjen je izotermalni (ISO) profil. Kolone su  $M_{\text{disk}}$  – masa modelovanog zvezdanog diska;  $M_{\text{bulge}}$  – masa modelovanog zvezdanog centralnog ovala (tamo gde stoji oznaka „d2” u pitanju je masa drugog zvezdanog diska);  $M_{\text{gas}}$  – masa neutralnog gasa;  $M_{\text{DM}}$  – masa tamne materije;  $M_{\text{dyn}}$  – ukupna dinamička masa svih komponenti  $M_{\text{bar}} + M_{\text{DM}}$ ;  $f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$  – barionska frakcija do poslednjeg posmatranog radijusa i  $\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$  – odnos dve glavne komponente u modelovanoj masi galaksije, barionske i tamne materije. Oznaka „1k”, odnosno „2k” stoji kod galaksija gde su korišćena dva modela za dekompoziciju zvezdanog sjaja i samim tim i dva dinamička modela sa odgovarajućim masama. N/A vrednost stoji umesto greški koje su nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M_{\text{disk}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bulge}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{gas}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bar}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{DM}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{dyn}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$	$\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NGC 925	6.62	–	83.0 ± 23.2	1.49 ± 0.42	4.72 ± 1.18	6.21 ± 3.07	0.24 ± 0.19	0.32 ± 0.17
NGC 2366	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 2403	4.00	–	51.6 ± 7.8	0.92 ± 0.14	7.11 ± 0.58	8.02 ± 1.74	0.11 ± 0.04	0.13 ± 0.03
NGC 2841	212.24	5.27 ± 1.82	175.2 ± 74.3	23.50 ± 9.97	106.73 ± 14.06	130.23 ± 89.57	0.18 ± 0.20	0.22 ± 0.12
NGC 2903	15.70	20.27 ± 0.37	79.2 ± 26.0	4.39 ± 1.44	24.61 ± 86.28	29.00 ± 6.54	0.15 ± 0.08	0.18 ± 0.68
NGC 2976	1.61	–	1.9 ± 1.1	0.18 ± 0.10	0.40 ± N/A	0.58 ± 0.06	0.31 ± 0.21	0.45 ± N/A
NGC 3031 <sup>1k</sup>	83.97	–	87.4 ± 14.5	9.27 ± 1.54	6.39 ± 1.88	15.67 ± 12.16	0.59 ± 0.56	1.45 ± 0.67
NGC 3031 <sup>2k</sup>	81.93	5.00 ± 15.46	87.4 ± 14.5	9.57 ± 1.59	5.63 ± N/A	15.20 ± 11.80	0.63 ± 0.59	1.70 ± N/A
NGC 3198	29.48	–	129.9 ± 39.7	4.25 ± 1.30	17.15 ± 1.41	21.40 ± 2.20	0.20 ± 0.08	0.25 ± 0.10
IC 2574	0.31	–	26.8 ± 14.5	0.30 ± 0.16	1.44 ± 0.10	1.74 ± 0.20	0.17 ± 0.11	0.21 ± 0.13
NGC 3351 <sup>d2</sup>	35.72	26.08 <sup>d2</sup> ± 6.85	27.8 ± 7.5	6.46 ± 1.75	4.09 ± 21.45	10.54 ± 1.81	0.61 ± 0.27	1.58 ± 8.72
NGC 3521	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 3621	12.35	–	128.0 ± 30.4	2.52 ± 0.60	9.45 ± 0.54	11.97 ± 1.50	0.21 ± 0.08	0.27 ± 0.08
NGC 3627	75.39	–	14.0 ± 5.2	7.68 ± 2.84	0.27 ± N/A	7.95 ± 1.14	0.97 ± 0.50	28.85 ± N/A
NGC 4736	10.59	19.21 ± N/A	7.1 ± 1.3	3.05 ± 0.54	1.16 ± 18.52	4.22 ± 1.00	0.72 ± 0.30	2.62 ± 42.15
DDO 154	0.02	–	5.0 ± 1.0	0.05 ± 0.01	0.46 ± 0.03	0.51 ± 0.92	0.10 ± 0.20	0.11 ± 0.03
NGC 4826	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 5055	57.90	37.61 ± 2.41	163.1 ± 47.6	11.18 ± 3.27	19.35 ± 3.82	30.54 ± 4.73	0.37 ± 0.16	0.58 ± 0.28
NGC 6946 <sup>1k</sup>	25.70	–	87.0 ± 5.2	3.44 ± 0.20	16.28 ± 1.94	19.72 ± 84.67	0.17 ± 0.76	0.21 ± 0.04
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	32.55	2.77 <sup>d2</sup> ± 1.14	87.0 ± 5.2	4.40 ± 0.26	15.52 ± N/A	19.92 ± 85.56	0.22 ± 0.96	0.28 ± N/A
NGC 7331	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 7793	3.25	–	13.3 ± 2.8	0.46 ± 0.10	2.08 ± 0.45	2.53 ± 0.60	0.18 ± 0.08	0.22 ± 0.09

Tabela 5.4: Mase pojedinačnih komponentni galaksija za različite dinamičke modele koji uključuju masu zvezdane komponente skaliranu sa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  kao slobodnim parametrom. Za komponentu tamne materije primenjen je Navaro-Frenk-Vajt (NFW) profil. Kolone su  $M_{\text{disk}}$  – masa modelovanog zvezdanog diska;  $M_{\text{bulge}}$  – masa modelovanog zvezdanog centralnog ovala (tamo gde stoji oznaka „d2” u pitanju je masa drugog zvezdanog diska);  $M_{\text{gas}}$  – masa neutralnog gasa;  $M_{\text{DM}}$  – masa tamne materije;  $M_{\text{dyn}}$  – ukupna dinamička masa svih komponenti  $M_{\text{bar}} + M_{\text{DM}}$ ;  $f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$  – barionska frakcija do poslednjeg posmatranog radijusa i  $\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$  – odnos dve glavne komponente u modelovanoj masi galaksije, barionske i tamne materije. Oznaka „1k”, odnosno „2k” stoji kod galaksija gde su korišćena dva modela za dekompoziciju zvezdanog sjaja i samim tim i dva dinamička modela sa odgovarajućim masama. N/A vrednost stoji umesto greški koje su nefizički velike, što je objašnjeno u tekstu.

ID galaksije	$M_{\text{disk}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bulge}}$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{gas}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bar}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{DM}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$M_{\text{dyn}}$ [ $10^{10} M_{\odot}$ ]	$f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$	$\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
NGC 925	6.62	–	$83.0 \pm 23.2$	$1.49 \pm 0.42$	$4.08 \pm \text{N/A}$	$5.57 \pm 2.76$	$0.27 \pm 0.21$	$0.37 \pm \text{N/A}$
NGC 2366	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 2403	4.00	–	$51.6 \pm 7.8$	$0.92 \pm 0.14$	$7.21 \pm 0.19$	$8.12 \pm 1.77$	$0.11 \pm 0.04$	$0.13 \pm 0.02$
NGC 2841	212.24	$6.47 \pm 0.03$	$175.2 \pm 74.3$	$23.62 \pm 10.02$	$112.31 \pm 9.75$	$135.94 \pm 93.49$	$0.17 \pm 0.19$	$0.21 \pm 0.11$
NGC 2903	15.70	$8.47 \pm 1.66$	$79.2 \pm 26.0$	$3.21 \pm 1.06$	$21.58 \pm 1.37$	$24.79 \pm 5.59$	$0.13 \pm 0.07$	$0.15 \pm 0.06$
NGC 2976	1.61	–	$1.9 \pm 1.1$	$0.18 \pm 0.10$	$0.21 \pm 28.82$	$0.39 \pm 0.04$	$0.47 \pm 0.32$	$0.87 \pm \text{N/A}$
NGC 3031 <sup>1k</sup>	83.97	–	$87.4 \pm 14.5$	$9.27 \pm 1.54$	$6.70 \pm 3.71$	$15.97 \pm 12.40$	$0.58 \pm 0.55$	$1.38 \pm 1.00$
NGC 3031 <sup>2k</sup>	81.93	$4.58 \pm \text{N/A}$	$87.4 \pm 14.5$	$9.53 \pm 1.58$	$6.00 \pm \text{N/A}$	$15.52 \pm 12.05$	$0.61 \pm 0.58$	$1.59 \pm \text{N/A}$
NGC 3198	29.48	–	$129.9 \pm 39.7$	$4.25 \pm 1.30$	$17.48 \pm 1.15$	$21.73 \pm 2.23$	$0.20 \pm 0.08$	$0.24 \pm 0.09$
IC 2574	0.31	–	$26.8 \pm 14.5$	$0.30 \pm 0.16$	$1.30 \pm 58.21$	$1.60 \pm 0.18$	$0.19 \pm 0.12$	$0.23 \pm 10.36$
NGC 3351 <sup>d2</sup>	35.72	$22.76^{\text{d2}} \pm 4.92$	$27.8 \pm 7.5$	$6.12 \pm 1.66$	$4.36 \pm 4.32$	$10.48 \pm 1.80$	$0.58 \pm 0.26$	$1.40 \pm 1.77$
NGC 3521	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 3621	12.35	–	$128.0 \pm 30.4$	$2.52 \pm 0.60$	$10.62 \pm 1.74$	$13.14 \pm 1.64$	$0.19 \pm 0.07$	$0.24 \pm 0.10$
NGC 3627	75.34	–	$14.0 \pm 5.2$	$7.67 \pm 2.84$	$0.07 \pm 0.08$	$7.74 \pm 1.11$	$0.99 \pm 0.51$	$110.81 \pm \text{N/A}$
NGC 4736	10.59	$19.10 \pm 6.23$	$7.1 \pm 1.3$	$3.04 \pm 0.54$	$1.12 \pm 12.84$	$4.16 \pm 0.98$	$0.73 \pm 0.30$	$2.72 \pm \text{N/A}$
DDO 154	0.02	–	$5.0 \pm 1.0$	$0.05 \pm 0.01$	$0.49 \pm 0.04$	$0.54 \pm 0.98$	$0.09 \pm 0.19$	$0.10 \pm 0.03$
NGC 4826	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 5055	57.90	$34.94 \pm 2.29$	$163.1 \pm 47.6$	$10.92 \pm 3.19$	$19.50 \pm 1.97$	$30.42 \pm 4.71$	$0.36 \pm 0.16$	$0.56 \pm 0.22$
NGC 6946 <sup>1k</sup>	25.70	–	$87.0 \pm 5.2$	$3.44 \pm 0.20$	$15.83 \pm 1.09$	$19.27 \pm \text{N/A}$	$0.18 \pm 0.78$	$0.22 \pm 0.03$
NGC 6946 <sup>2k,d2</sup>	32.55	$1.91^{\text{d2}} \pm 0.74$	$87.0 \pm 5.2$	$4.32 \pm 0.26$	$14.39 \pm 2.04$	$18.71 \pm \text{N/A}$	$0.23 \pm 1.00$	$0.30 \pm 0.06$
NGC 7331	–	–	–	–	–	–	–	–
NGC 7793	3.25	–	$13.3 \pm 2.8$	$0.46 \pm 0.10$	$2.23 \pm 0.45$	$2.69 \pm 0.64$	$0.17 \pm 0.08$	$0.21 \pm 0.09$



jom vrednošću od 2 %, što je odlično slaganje, u okviru neodređenosti. Barionska masa razlikuje se maksimalno za 50 %, sa najverovatnijom vrednošću od oko 17 %. Najmanja razlika nije navedena jer iznosi 0, ili znatno manje od 1 % (za jedan broj modela ukupna i barionska masa određene na četiri pomenuta načina su veoma bliske ili identične).

Vredi napomenuti da iako pomenute razlike u dinamičkoj ili barionskoj masi dobijenoj za različite dinamičke modele deluju značajno, one su unutar neodređenosti za ovako izračunatu masu, sa par izuzetaka. Takođe, s obzirom na generalno slabo poznavanje mase galaksija, ovde izračunate mase prevazilaze po tačnosti druge metode, čak i kada se uzmu u obzir velike neodređenosti.

## 5.1 Barionska funkcija mase i diskusija

Od masa pojedinačnih komponenti za određeni dinamički model za sve galaksije (koje su uspešno opisane datim modelom) moguće je konstruisati funkcije mase. Funkcije mase, kao što smo već pomenuli u potpoglavlju 2.4, predstavljaju raspodelu mase unutar nekog uzorka, na primer udeo galaksija koje se nalaze u datom rasponu masa (u logaritamskoj skali). U najboljem slučaju uzorak je kompletan u određenom prostoru i predstavlja raspodelu materije u tom delu prostora. U našem slučaju taj uslov nije ispunjen jer je izvršena selekcija objekata na osnovu prisustva HI gasa i takođe prostor obuhvaćen uzorkom je mali. Ipak, smatramo da je u okviru klase galaksija sa gasnim diskom, kompletnost u parametarskom prostoru zadovoljena - uzorak pokriva veoma veliku skalu što se tiče morfologije, količine gasa, dinamike i masa. Dalje, ovako dobijene funkcije raspodele ukazuju na moguće specifičnosti našeg neposrednog okruženja i epohe.

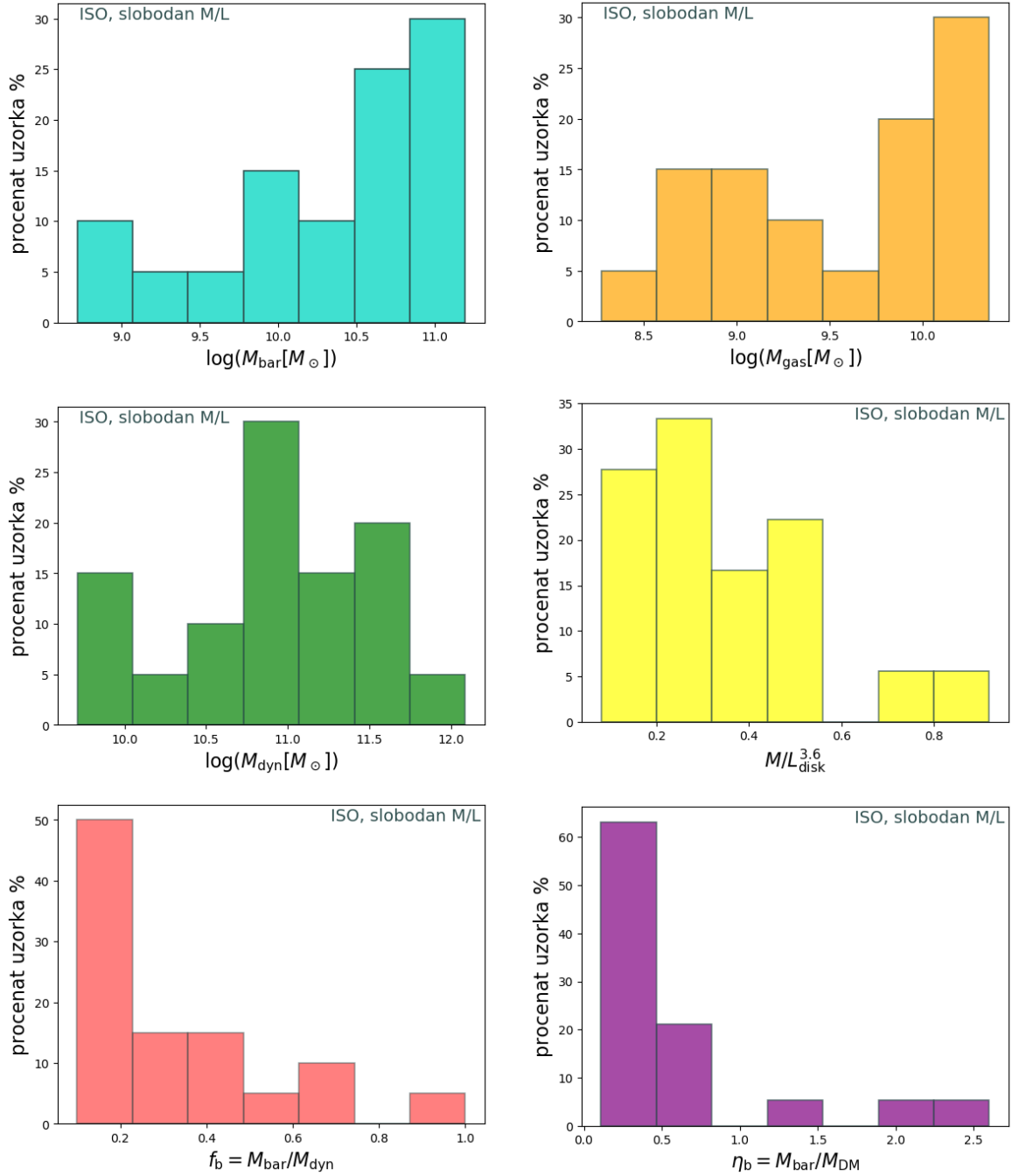
Računate funkcije mase obuhvataju barionsku funkciju mase (od najvećeg interesa), kao i funkcije mase: zvezdanog diska, neutralnog gasa, tamne materije i ukupne dinamičke mase. Kao što smo napomenuli, sve mase su računane unutar poslednjeg pouzdanog radijusa iz korišćenih posmatranja dinamike gasa.

Grafikoni su podeljeni u četiri grupe koje odgovaraju različitim vrstama dinamičkih modela i profila za tamnu materiju - dinamički model sa slobodnim odnosom

$M/L_{\text{disk}}$  i ISO profilom (funkcije raspodele prikazane su na slici 5.1), sa slobodnim odnosom  $M/L_{\text{disk}}$  i NFW profilom (funkcije raspodele prikazane su na slici 5.2), sa fiksnim SPS odnosom  $M/L_{\text{disk}}$  i ISO profilom (funkcije raspodele prikazane su na slici 5.3) i dinamički model sa fiksnim SPS odnosom  $M/L_{\text{disk}}$  i NFW profilom (funkcije raspodele prikazane su na slici 5.4).

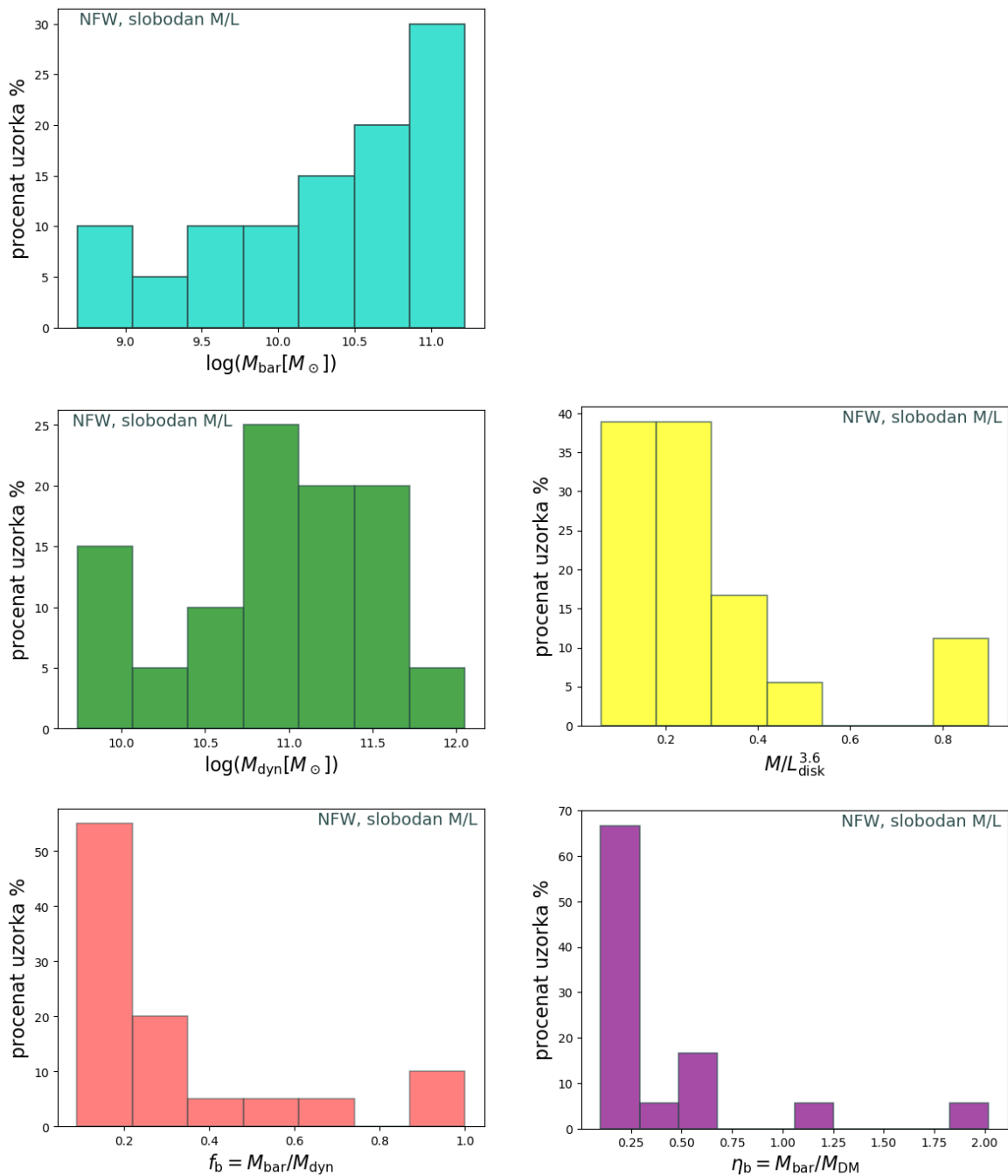
Kao što je već pomenuto, za dve galaksije, NGC 3031 i NGC 6946, dekompozicija zvezdanog sjaja je urađena na dva načina, na jednu i dve komponente. Dinamički modeli takođe predstavljaju oba modela. Ipak, u daljem razmatranju funkcija raspodele uzimali smo samo model sa jednom komponentom, bez značajnih posledica po oblik funkcija raspodele. U smislu doprinosa barionskoj i zvezdanoj masi, razlika između ova dva modela je zanemariva.

**Oblici BFM između različitih dinamičkih modela** ne razlikuju se znatno - za sve modele je ona rastuća ka velikim masama, s tim što za SPS modele ipak opada za najveće mase ( $> 10^{11} M_{\odot}$ ), dok za slobodne modele tu dostiže svoj maksimum (tirkizni histogram na slikama 5.1 - 5.4 gore levo). Da bismo stekli bolju predstavu šta ovako određena BFM znači u širem kontekstu, poredili smo je sa **funkcijama mase za barionske komponente iz uzorka iz Papastergis et al. (2012)**, baziranog na ALFALFA pregledu (daljem tekstu uzorak  $P$ ). Uzorak  $P$  zasniva se na HI i HALPHA-*blind* pregledu galaksija, s tim što smo mi poredili naše funkcije mase samo sa HI delom uzorka (razlike u funkcijama mase za HI i HALPHA nisu značajne prema rezultatima Papastergisa sa saradnicima (Papastergis et al., 2012)). Uzorak  $P$  se sastoji od 7618 galaksija sa  $z < 0.05$  i  $D > 10$  Mpc, i nema preklapanja sa galaksijama iz našeg uzorka. Razlike između BFM za naš i  $P$  uzorak su znatne, i da bi bile jasnije, predstavice ih odvojeno, kroz funkcije mase zvezda i neutralnog gasa (slike 5.5 - 5.6). Na slici 5.5 levo, koja poredi normalizovane raspodele zvezdane mase (iz slobodnog ISO modela u našem slučaju), uočljivo je značajno veće prisustvo velikih i veoma velikih spiralnih galaksija u našem uzorku ( $M_* > 10^{10} M_{\odot}$ ), kao i odsustvo galaksija sa diskom srednjih i naročito malih masa. Granica (eng. *cut-off*) na najmanjim masama je u našem uzorku već na  $3 \times 10^7 M_{\odot}$ , što znači da uopšte nema objekata sa masama manjim od te, dok se u uzorku  $P$  pojavljuju galaksije sa zvezdanom masom i do  $10^6 M_{\odot}$ . Uzrok tome je što nekoliko patuljastih galaksija iz



Slika 5.1: Funkcije mase i raspodele za dati uzorak dobijene iz dinamičkih modela sa slobodnim odnosom masa-sjaj i ISO modelom tamne materije: barionska funkcija mase (gore levo), funkcija mase gasa (gore desno), ukupna funkcija mase (u sredini levo), odnos masa-sjaj (u sredini desno), odnos barionske i ukupne mase (dole levo) i odnos barionske i mase tamnog haosa (dole desno).

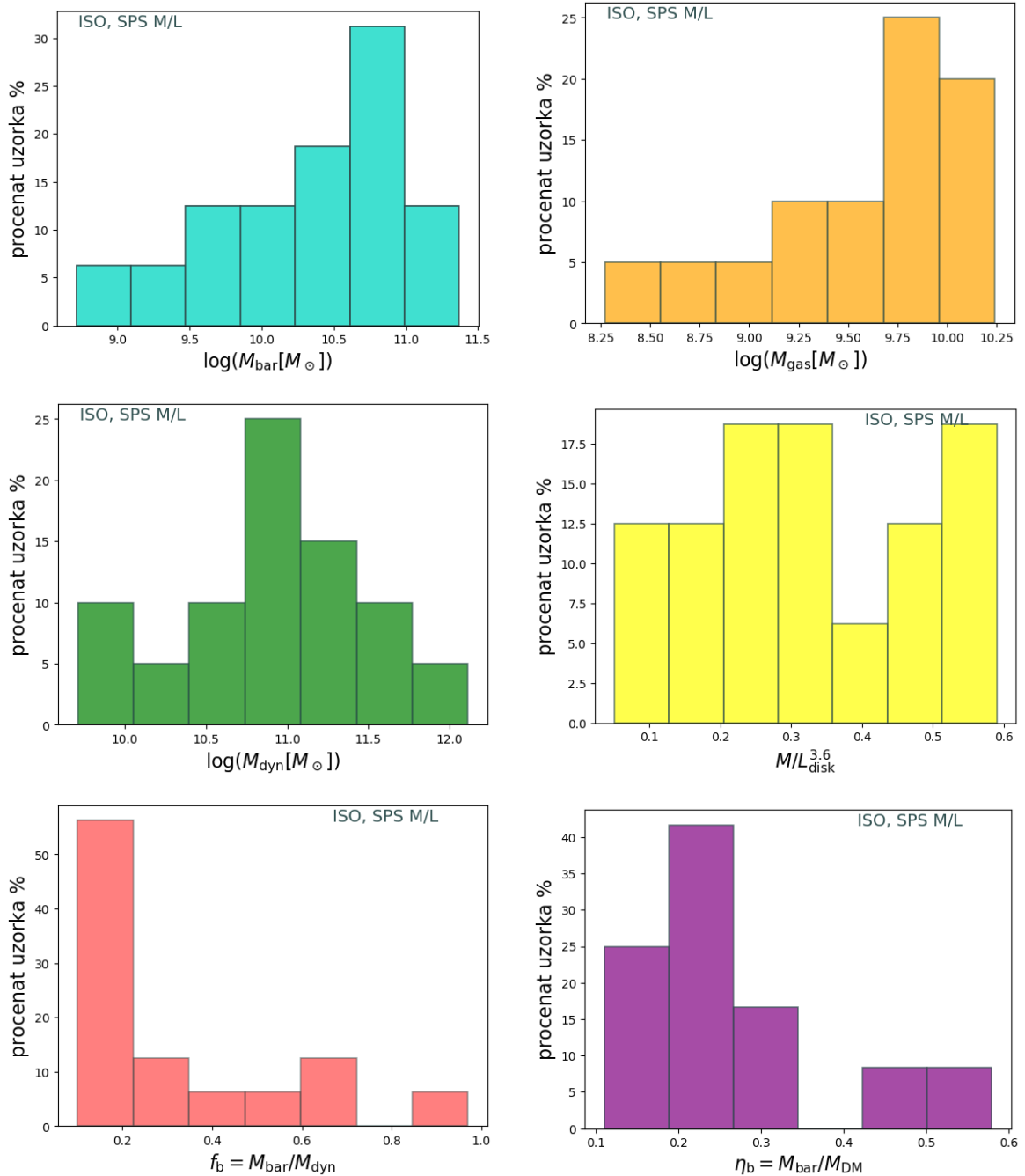
prvobitnog uzorka (Walter et al., 2008) nije ušlo u analizu rotacionih krivih jer su kod njih primećene znatne interakcije i nekružna kretanja gasa. Za ovako mali uzorak odstranjivanje i samo nekoliko patuljaka rezultiralo je deficitom na posmatranim



Slika 5.2: Funkcije mase i raspodele za dati uzorak dobijene iz dinamičkih modela sa slobodnim odnosom masa-sjaj i NFW modelom tamne materije: barionska funkcija mase (gore levo), ukupna funkcija mase (u sredini levo), odnos masa-sjaj (u sredini desno), odnos barionske i ukupne mase (dole levo) i odnos barionske i mase tamnog haosa (dole desno). Funkcija mase gasa ista je kao i na slici 5.1 (gore desno).

masama. Na slici 5.5 desno vidimo da je situacija slična za sve korišćene dinamičke modele.

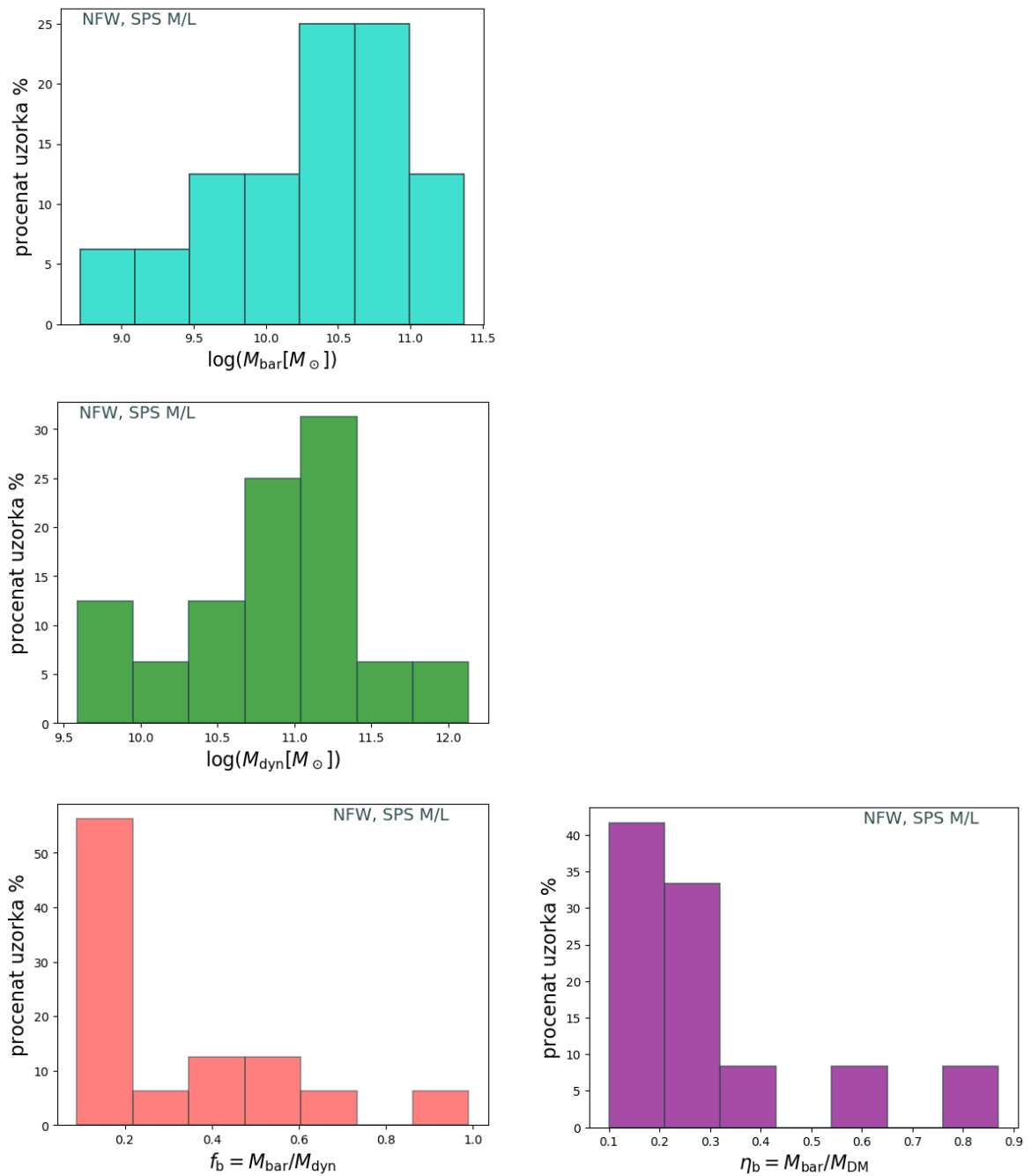
Ono što se može zapaziti je da je raspodela barionske i dinamičke mase različita



Slika 5.3: Funkcije mase i raspodele za dati uzorak dobijene iz dinamičkih modela sa odnosom masa-sjaj iz SPS modela i ISO modelom tamne materije: barionska funkcija mase (gore levo), funkcija mase gasa (gore desno), ukupna funkcija mase (u sredini levo), odnos masa-sjaj (u sredini desno), odnos barionske i ukupne mase (dole levo) i odnos barionske i mase tamnog haosa (dole desno).

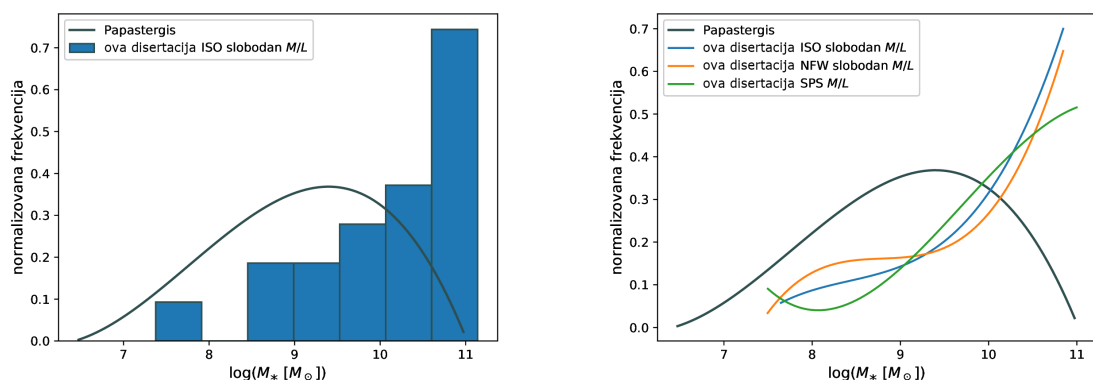
za sve korišćene dinamičke modele, i da je raspodela dinamičke materije mnogo bliža raspodeli barionske masu za  $P$  uzorak.

**Masa neutralnog gasa** izgleda nešto ravnomernije raspoređena unutar našeg



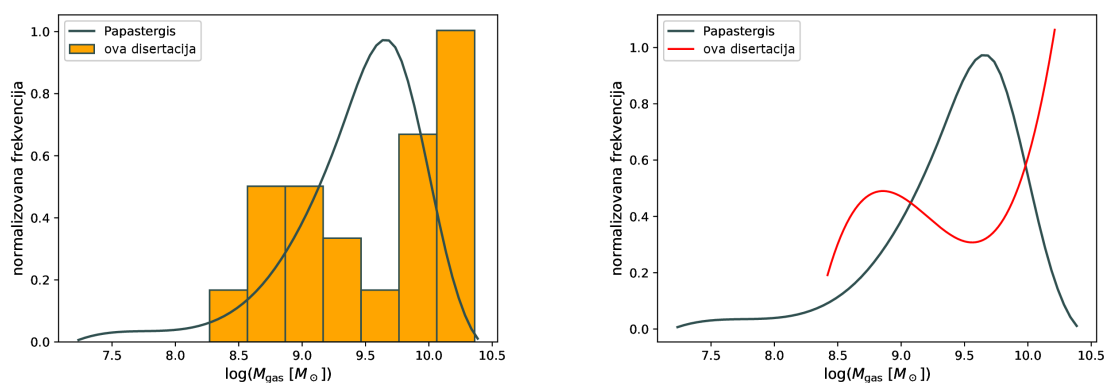
Slika 5.4: Funkcije mase i raspodele za dati uzorak dobijene iz dinamičkih modela sa odnosom masa-sjaj iz SPS modela i NFW modelom tamne materije: barionska funkcija mase (gore levo), ukupna funkcija mase (u sredini levo), odnos barionske i ukupne mase (dole levo) i odnos barionske i mase tamnog haosa (dole desno). Funkcije mase gasa i odnosa masa-sjaj iste su kao i na slici 5.3 (gore desno i u sredini desno, respektivno).

uzorka, ili bar bliže bimodalnoj, što opet može biti artefakt skromnog broja razmatranih objekata. Ipak zaključujemo da je i za raspodelu gasa prisutno više objekata koji imaju veće mase gasa  $> 10^{10} M_{\odot}$ , dok je uočljiv nedostatak objekata sa sred-



Slika 5.5: Poređenje funkcije zvezdane mase za naš uzorak sa istom raspodelom iz Papastergis et al. (2012): levo - izdvojena funkcija zvezdane mase za model sa slobodnim odnosom  $M/L$  i ISO profilom gustine tamne materije predstavljena je normiranim histogramom (plavo), a raspodela iz Papastergis et al. (2012) aproksimirana je normalizovanom glatkom raspodelom (tamno siva linija); desno - funkcije zvezdane mase za sve korišćene modele aproksimirane su normalizovanim glatkim raspodelama (plava, narandžasta i zelena) i date u poređenju sa Papastergis et al. (2012) (tamno siva linija).

njom količinom gasa ( $10^9 - 10^{10} M_{\odot}$ ). Ovakva raspodela gasa u najvećem prati zvezdanu raspodelu, osim što izgleda da postoji višak broja objekata sa manjim masama gasa u odnosu na one sa malom zvezdanom masom (i u odnosu na  $P$  raspodelu mase gasa).



Slika 5.6: Poređenje funkcije mase neutralnog gasa za naš uzorak sa istom raspodelom iz Papastergis et al. (2012): levo - funkcija mase neutralnog gasa predstavljena pomoću normiranog histograma (narandžasto) u poređenju sa normalizovanom glatkom raspodelom iz Papastergis et al. (2012) (tamno siva linija); desno - funkcija mase gasa aproksimirana glatkom normalizovanom raspodelom (crvena linija) data u poređenju sa istom raspodelom iz Papastergis et al. (2012) (tamno siva linija).

Naša neposredna okolina izgleda dosta atipično u odnosu na šire okruženje -

prvenstveno je čine velike galaksije sa diskom, sa znatno manjim udelom galaksija srednjih masa. U THINGS uzorku očekivano nisu dovoljno zastupljene patuljaste galaksije. Ovakav nedostatak nije primećen u drugim posmatranjima naše okoline (npr. Lokalne grupe) ili u uzorku prvobitno formiranom u okviru [Walter et al. \(2008\)](#), već je isključivo posledica selekcionih efekata pri analizi rotacionih krivih.

Analiza **raspodela odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$**  (žuti histogrami na slikama 5.1 - 5.4 desno u sredini) omogućila nam je poređenje između modela, kao i sa rezultatima iz literature. Za modele sa slobodnim odnosom  $M/L$  i ISO profilom, odnos masa-sjaj na talasnoj dužini od 3.6 mikrona za komponentu diska kreće se između 0.08 i 0.92 sa medijanom od 0.32. Raspodela odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za slobodni ISO model (slika 5.1) pokazuje grupisanje oko vrednosti 0.32, pa ćemo je smatrati kao reprezentativnu za odnos  $M/L$  dobijen sa ovim modelom. Modeli sa slobodnim odnosom  $M/L$  i NFW profilom rezultuju rasponom odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  od 0.06 do 0.90, sa medijanom 0.22, koja i u ovom slučaju dobro opisuje grupisanje prisutno na histogramu na slici 5.2. Za SPS modele raspodela odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  diska je identična za oba profila tamne materije jer je ovaj parametar fiksiran. Odnos  $M/L$  obuhvata vrednosti od 0.05 do 0.59, sa medijanom 0.31. Histogram koji odgovara ovoj raspodeli (na slici 5.3) ne pokazuje nikakvo grupisanje, te možemo reći da se sve vrednosti iz raspona javljaju sa sličnom verovatnoćom.

Dobijene **raspodele odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$**  za sve dinamičke modele **nisu pokazale nikakvo grupisanje po morfologiji** (na primer na nepravilne ili spiralne). Nije uočena zavisnost ili preferencija za vrednost  $M/L$  ni kada se posmatra veličina galaksija: kao pokazatelj prostornog rasprostiranja koristili smo **dimenzije gasnog diska** (tj. poslednji radijus za koji je bilo moguće izvesti rotacionu krivu), a **nije uočljiva pravilnost u promeni dinamičke mase sa promenom odnosa  $M/L$** . Ipak, **dinamička masa se očekivano skalira sa barionskom (i zvezdanom) masom** (slika 5.7), i tu je vidljivo odstupanje galaksija sa  $M/L > 0.40$  od odnosa koji je dobro definisan za ostale galaksije (slika 5.7 gore). Kada barionsku masu galaksija za koje je dobijen odnos  $M/L > 0.40$  transformišemo koristeći naš srednji odnos  $M/L$ , koji iznosi 0.28, većina njih „leži” na istom dobro definisanom pravcu (slika 5.7 dole). Odnos između dinamičke i barionske mase u tom slučaju je  $\sim 4$ , što



je poznata vrednost uz literature kada se koriste dinamički modeli sa tamnom materijom (Lelli et al., 2016, npr. ). Sa iste slike vidimo da i odnos masa Mlečnog puta leži na istom definisanom pravcu. Na slici 5.7 je prikazan odnos između dinamičke i barionske mase za model sa slobodnim odnosom  $M/L$  i ISO haloom, ali je situacija skoro identična i za ostale modele. Slično, kada za sve galaksije koristimo odnos  $M/L$  jednak 1, pojavljuje se dobro definisana relacija između barionske i dinamičke mase što u stvari ukazuje na **dobro definisan odnos između dinamičke mase i sjaja na  $3.6 \mu\text{m}$** . Ono što bi bilo očekivano je da postoji dobro definisan odnos između dinamičke i barionske mase, a da je relacija dinamička masa-sjaj posledica. Međutim, kao što smo objasnili, za objekte iz našeg uzorka i neposredne okoline Mlečnog puta deluje da je bolje definisana relacija dinamička masa-sjaj, tj. da postoji **preferirana vrednost za odnos  $M/L$** , za šta ne vidimo dublji fizički razlog.

**Prašina** zrači upravo u bliskoj infracrvenoj oblasti spektra, tako da jedan deo svetlosti na  $3.6$  mikrona potiče od nje. Procena prisustva prašine vrši se na osnovu boje  $[3.6]-[4.5]^2$  (Meidt et al., 2014). Za SHA deo uzorka merenja nisu dostupna zato što se rad Querejeta et al. (2015) bazira na pregledu SINGS, koji ne uključuje ove objekte. To je još jedan od razloga zbog kojih ovakava analiza nije mogla biti konzistentno primenjena u našem radu. Ipak, iznosimo neke zaključke do kojih smo došli posmatrajući objekte koji su obrađeni u Querejeta et al. (2015). Za 9 galaksija iz našeg uzorka bilo je moguće izmeriti  $[3.6]-[4.5]$  boju u Querejeta et al. (2015). **Doprinos zračenja prašine** ukupnom fluksu za ove objekte ide od 9 pa čak do 40 % za NGC 3521, a prosečno je **oko 25 %**. Za nekoliko (mahom većih) galaksije iz našeg uzorka, NGC 2841, NGC 3031 i NGC 5055,  $[3.6]-[4.5]$  boja manja je od nule, što ukazuje da nema značajnog prisustva prašine. Takođe, za dva nepravilna patuljka, IC 2574 i DDO 154,  $S/N$  bio je previše nizak da bi boja mogla da se izmeri. Kada za ostale galaksije uračunamo uticaj prašine, **dobijamo porast prosečnog odnosa  $M/L^{3.6}$  na 0.42**. Ova vrednost je bliža ali i dalje znatno manja od vrednosti iz literature od **0.50 do 0.60** (McGaugh and Schombert, 2015; Meidt et al., 2014, respektivno). Ovakva popravka nije smanjila raspon  $M/L^{3.6}$ , naprotiv, tj. nije se

---

<sup>2</sup>Boja tj. razlika u posmatranom sjaju galaksije između Spicerovog filtera na talasnoj dužini od  $3.6 \mu\text{m}$  i  $4.5 \mu\text{m}$ .

odnosila na galaksije koje su inače imale veoma nizak odnos masa-sjaj. Relacija skaliranja između dinamičke mase i ovako korigovanog sjaja ima veća odstupanja nego originalna relacija.

Bitno je istaći da korišćenje većeg odnosa  $M/L$  kod slobodnih dinamičkih modela **ne menja barionsku masu** ili raspodele masa drugih komponenti, osim samog odnosa  $M/L$ . Očekivano, fit bi konvergirao istom rešenju za bilo koji konstantan odnos  $M/L$ , koji dobijamo za ravnomerno i radijalno simetrično raspoređenu prašinu duž diska. S druge strane, kod **SPS dinamičkih modela bi ovakva popravka mogla da napravi razliku** u proceni zvezdane i barionske mase. Takođe, u oba slučaja mogao bi se proceniti i **doprinos mase prašine barionskoj masi**.

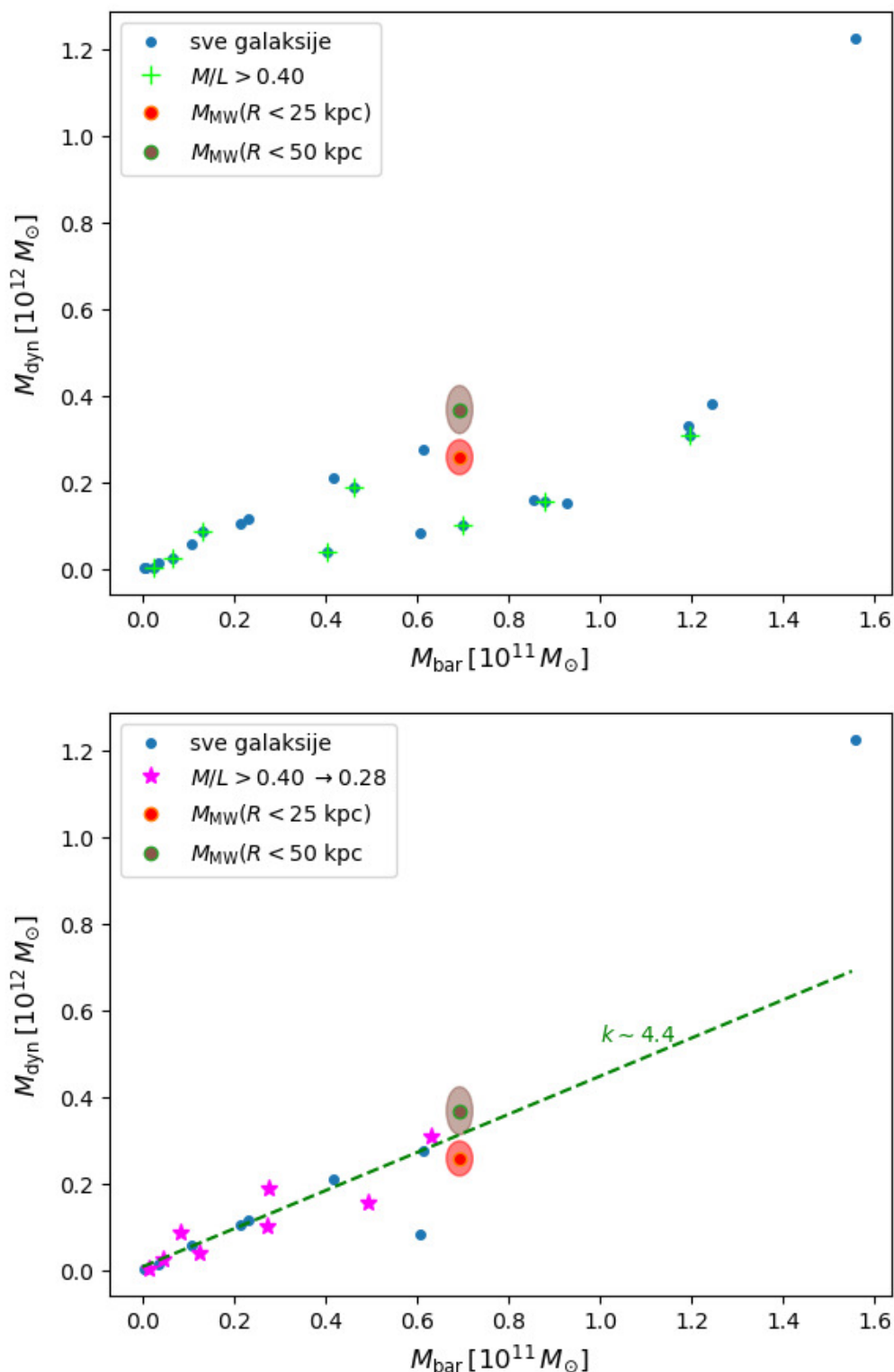
**Mlečni put** je što se tiče dinamičke, zvezdane i mase neutralnog gasa konzistentno u delu raspodele koji sadrži najviše galaksija i to sa najvećom masom (grafikoni na slici 5.8). Barionsku masu smo dobili samo sabirajući zvezdanu komponentu i HI iz kinematičkih modela (McMillan, 2011), a zanemarujući doprinos ostalih komponenti barionskoj masi Mlečnog puta (kao npr.  $H_2$ ), da bi poređenje bilo što utemeljenije. Primenjeno je skaliranje za prisustvo helijuma sa faktorom od 1.36 kao i za originalne THINGS podatke, opet zarad poređenja. **Mlečni put je uporediv sa najmasivnijim i istovremeno najprisutnijim galaksijama u THINGS uzorku**. Razlika između njegovog mesta na raspodeli neutralnog gasa i barionske materije možda se može pripisati preciznijim merenjima prisustva HI unutar naše Galaksije, ali svakako nije značajna.

Za dinamičku masu unutar radijusa gasnog diska kao što je to slučaj kod THINGS uzorka, kao dobru aproksimaciju koristili smo masu unutar 25 kpc ( $M(R < 25 \text{ kpc})$ ), bazirano na Wang et al., 2020, i referencama koje su tamo date). Ovo smešta Galaksiju u drugi bin po masivnosti, koji je takođe drugi po frekvenciji u uzorku. Moguće da je uzeta dinamička masa previše konzervativna, i da je trebalo koristiti  $M(R < 50 \text{ kpc})$ , što bi onda učinilo Mlečni put uporedivim sa najmasivnijim galaksijama u uzorku.

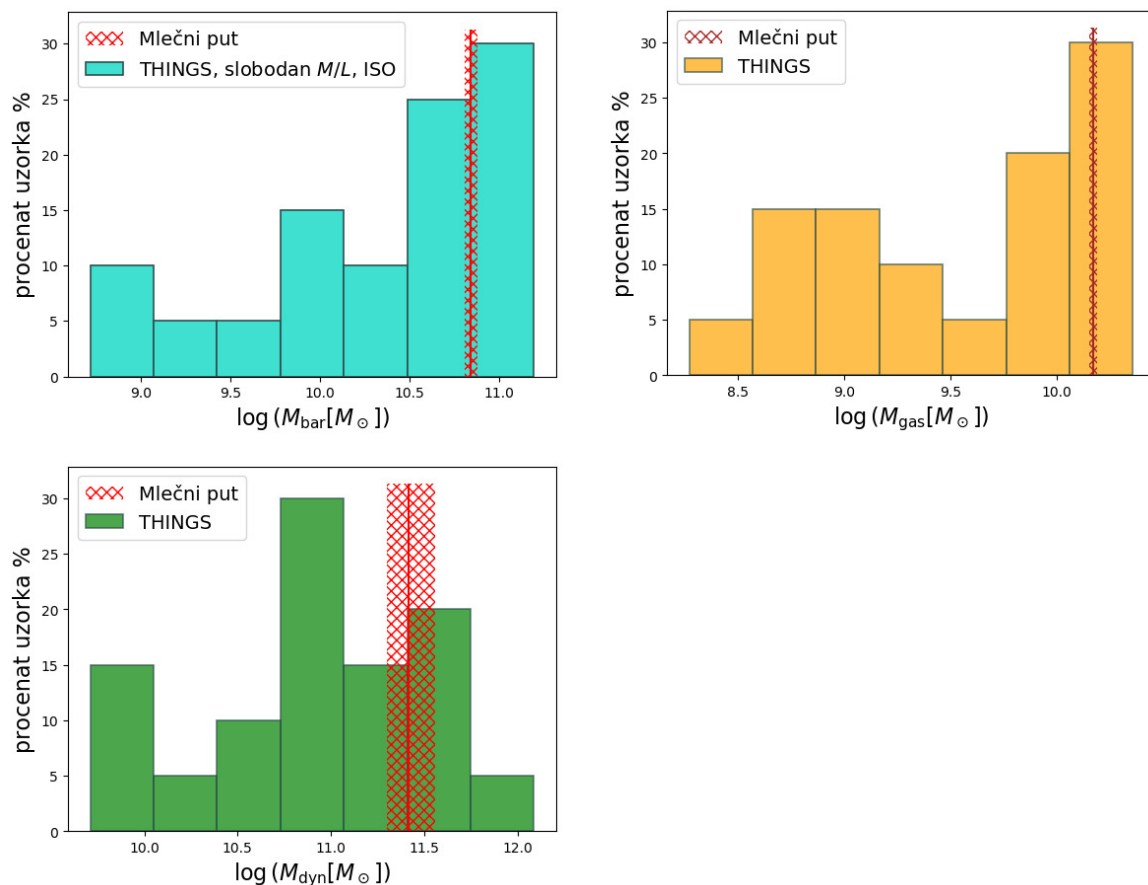
Dinamička masa unutar radijusa od 25 kpc u odnosu na korišćenu barionsku masu diska daje odnos od skoro tačno 4, koliko je i očekivano iz literature prilikom modelovanja tamnom materijom. Zato ona veoma lepo pada na pravac određen

istim odnosom i predstavljen na dijagramima 5.7. Da smo koristili dinamičku masu unutar 50 kpc,  $M (R < 50 \text{ kpc})$ , za poređenje sa barionskom masom, ovaj odnos bi bio znatno veći, bliži 6.

Iz prethodno navedenog možemo da zaključimo da je **Mlečni put tipičan za svoje najbliže okruženje, koje opet nije izrazito tipično za širu okolinu.** Ovu činjenicu treba uzimati u obzir prilikom daljih istraživanja koja se oslanjaju upravo na reprezentativnost naše galaksije.



Slika 5.7: Odnos između dinamičke i barionske mase za model sa slobodnim odnosom  $M/L$  i ISO haloom. Na slici gore su galaksije sa odnosom  $M/L_{\text{disk}}^{3.6} > 0.40$  označene zelenim krstićima, a na slici dole je kod istih galaksija originalan odnos masa-sjaj iz dinamičkog modelovanja zamenjen srednjom vrednošću od 0.28. Na obe slike predstavljen je Mlečni put sa dinamičkom masom iz rada Wang et al. (2020) unutar 25 kpc (crvena elipsa) i 50 kpc (braon elipsa). Barionska masa izvedena je iz rada McMillan (2011). Označen je odnos koji predstavlja linearni fit na donjoj slici (zeleno isprekidana linija).



Slika 5.8: Mesto Mlečnog puta na funkcijama raspodele THINGS galaksija: barionske mase (gore levo, podaci iz [McMillan, 2011](#)), mase neutralnog gasa (gore desno, podaci iz [McMillan, 2011](#)) i ukupne dinamičke mase unutar radijusa od 25 kpc ([Wang et al., 2020](#)). Šrafirana oblast predstavlja neodređenost date komponente mase.

# Poglavlje 6

## Sumiranje rezultata i zaključaka

U nastavku predstavljamo glavne rezultate i zaključke ove doktorske disertacije. Najznačajniji iskazi i zaključci su dati podebljanim slovima.

### 1. Dinamički modeli

Sve četiri kombinacije dinamičkih modela, slobodan i SPS fiksiran odnos masa-sjaj sa ISO i NFW profilima gustine tamne materije, u velikoj većini slučajeva uspešno su fitovali posmatrane rotacione krive. U 47 od 80 fitova kao reprezentativan izabran je „best-fit” dinamički model, a za ostale smo ispitivali raspodelu  $\chi^2$  (takođe za „best-fit” model) u prostoru slobodnih parametara. U tim slučajevima izabran je skup parametara najbliži minimumu, koji se nalazi unutar 3-sigma konture (detalji u potpoglavlju 4.1.1).

**Dinamički modeli sa slobodnim odnosom  $M/L$  su za sve galaksije uspešno fitovali posmatranu rotaciju gasa u disku, a za SPS vrednost odnosa  $M/L$  kod 4 galaksije dinamičko modelovanje nije bilo moguće.** Slobodan odnos  $M/L$  sa NFW profilom je najviše puta dao nezadovoljavajući „best-fit” skup parametara i zahtevao traženje rešenja unutar 3-sigma kontura. Četiri objekta koja nisu uspešno fitovana sa SPS vrednošću za odnos masa-sjaj su atipična u nekom smislu (detalji u potpoglavlju 4.4) pa ih verovatno SPS modeli ne opisuju adekvatno. Pošto dinamičke mase za te galaksije smatramo pouzdano određenim, one nisu uzrok neslaganja između SPS modela i rotacionih krivih.

Dalje, koristeći usrednjeno  $\chi^2$  odstupanje kroz ceo uzorak kao kriterijum, dobijamo da **dinamički modeli sa slobodnim odnosom masa-sjaj i ISO profilom za tamnu materiju najbolje opisuju posmatrane rotacione krive**. Slobodan odnos  $M/L$  u kombinaciji sa NFW profilom, kao i SPS odnos  $M/L$  sa ISO profilom su sličnog kvaliteta, a **parametar  $M/L$  iz SPS analize sa NFW profilom gustine tamne materije najlošije opisuje posmatranja**.

Između dva profila koji istovremeno predstavljaju i dva najznačajnija pristupa opisivanju tamne materije, empirijski zasnovanog modela sa jezgrom gustine ili teorijski motivisanog strmog rasta gustine u centru, **model pseudo-izotermalne sfere ima jasnu prednost u odnosu na NFW**. I ovde (kao i u [Jovanović, 2017](#)) zapažamo u literaturi poznat problem NFW profila da kvalitetno fituje centralne delove galaksija, naročito patuljastih. Preliminarna analiza odstupanja profila tamne materije od rotacionih krivih u našem radu ne upućuje na definitivno razrešenje „jezgro ili nagib”, mada jasno ukazuje u pravcu ISO modela.

## 2. Inicijalna funkcija mase i SPS modeli

Iz **SPS modela** (po proceduri opisanoj u potpoglavlju [4.3.1](#)) određena je **najverovatnija vrednost parametra  $M/L$** , i ona se daleko najčešće zasniva na **modelima iz [Into and Portinari \(2013\)](#)**. Skoro uvek je izabrana vrednost odnosa  $M/L$  dobijena sa **Kroupinom IMF (75 %)**, i to najčešće **sa modelom diska** i, na drugom mestu, **sa eksponencijalnim modelom**. Najverovatnije vrednosti odnosa  $M/L$  najčešće su dobijene koristeći  $B - V$  boju, i ponekad  $g - r$  i  $B - K_S$ , što oslikava činjenicu da su i najprisutnije vrednosti određene sa  $B - V$ , ali i da su magnitude (i boje) najpouzdanije određene u vizuelnom delu spektra. **Dinamički modeli sa slobodnim odnosom  $M/L$  takođe su najbliži SPS modelima opisanim u [Into and Portinari \(2013\)](#)**, i to **eksponencijalnom modelu sa Kroupinom IMF**. Zaključujemo da je **najbolji izbor za opis odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za galaksije iz uzorka model diska**, a zatim eksponencijalni model, oba sa Kroupinom IMF, izračunati u okviru

Into and Portinari (2013). Ovi modeli su upravo dizajnirani za galaksije sa diskom ili eksponencijalnim diskom i direktno izračunavaju odnos  $M/L$  na 3.6 mikrona, što znači da nisu potrebne konverzije koje unose dodatne greške. U međuvremenu su NIR fluksevi postali standard u određivanju zvezdane mase, pa su se pojavili SPS modeli zasnovani na bibliotekama empirijskih spektara koje uključuju infracrvene boje i daju procenu odnosa  $M/L$  u NIR oblasti spektra (Röck et al., 2016, 2015, na primer). Uključivanje ovakvih modela je predmet interesovanja autora i pravac za dalji rad.

### 3. Pouzdano određena masa za uzorak bliskih galaksija

Pouzdanost određivanja mase galaksija ostaje jedan od klasičnih astrofizičkih zadataka i izazova. U okviru ove disertacije **izmerili smo masu za uzorak galaksija koristeći dinamičke modele, i to na četiri načina: slobodan i fiksiran odnos masa-sjaj kombinovan je sa dva modela koji opisuju tamnu materiju**. Smatramo da je jedan od najpouzdanijih načina za određivanje mase (pored gravitacionih sočiva) dinamičko modelovanje sa slobodnim parametrom  $M/L$  zato što uključuje najmanje teorijskih pretpostavki. Dinamički modeli sa fiksiranim  $M/L$  odnosom nam takođe daju dobru procenu mase sadržane u galaksijama (naročito koristeći odnos  $M/L^{3.6}$  jer on ne podleže velikim varijacijama), a kroz poređenje sa slobodnim  $M/L$  parametrom pruža nam i uvid u granice za primenu SPS modela. Dalje, poređenje slobodnog i SPS  $M/L$  parametra omogućava nam dalje unapređenje SPS modela kroz detektovanje pojedinačnih objekata (i eventualno čitavih klasa objekata) za koje ovi modeli imaju problema da daju dobru i realističnu procenu. Kroz kalibrisanje relacija koje proizlaze iz SPS modela tj. poboljšanje samih SPS modela značajno bi se olakšalo određivanje zvezdane, i posledično ukupne barijonske mase. Prednost ovakvog određivanja mase samo na osnovu boja ili magnituda leži u mogućnosti obrade velikih uzoraka.

### 4. Masa galaksija iz različitih dinamičkih modela

**Svi korišćeni modeli daju mase koje su iste u okviru očekivanih varijacija** (tabele 5.1 - 5.4). Ukupna dinamička masa manje varira između ra-



zličitih modela, prosečno oko 2 % između galaksija u uzorku, dok se barionska razlikuje za 20 % u proseku. Ipak, iako odstupanje barionske mase izračunate iz različitih modela deluje znatno, ono je i dalje u granicama neodređenosti izračunatih masa. Još bitnije, neodređenost od 20 % predstavlja poboljšanje pri određivanju barionske mase galaksija. Različitim metodama u upotrebi (koje su međusobno često i neuporedive) dobijaju se mnogo veća neslaganja, te je dinamičko određivanje (naročito barionske) mase korak u smeru veće tačnosti. Dalje, zaključujemo da **dinamički modeli** uz pretpostavku njutnovske dinamike (i ne samo tada) **moгу sa određenom tačnošću odrediti barionsku masu sadržanu u galaksiji** (do poslednjeg posmatranog radijusa). Iz modela tamne materije koji uspešno opisuju posmatranu dinamičku masu možemo izračunati i ukupnu virijalizovanu masu galaksije (tj.  $M_{200}$ ) bez dodatnih pretpostavki, što nije detaljnije razmatrano u ovom radu.

Pored zaključka da razlike između četiri dinamička modela koja koristimo ne menjaju drastično naše rezultate, **prednost je ipak na strani modela sa slobodnim odnosom  $M/L$**  jer, kao što smo pomenuli, njihovo izvođenje uključuje manje pretpostavki od modela sa SPS vrednošću odnosa  $M/L$ . Modeli sa slobodnim parametrom  $M/L$  takođe bolje opisuju posmatranu dinamiku gasa, naročito u kombinaciji sa ISO profilom tamne materije.

Problem sa dinamičkim određivanjem mase po komponentama galaksije je što se (još uvek) ne može izvesti za veće uzorke galaksija. S druge strane, procena ukupne dinamičke mase iz maksimalne rotacione brzine već se rutinski radi za velike uzorke galaksija (na primer ALFALFA<sup>1</sup> pregled). Iz dinamičke mase koja je određena unutar jednog, po pretpostavci, velikog radijusa teško je zaključiti išta o prisutnoj barionskoj komponenti u unutrašnjim delovima. „Brzo” određivanje zvezdane (i time barionske) mase oslanja se na posmatranu svetlost i jedinstvenu vrednost odnosa  $M/L$ , sa granicama iz ukupne dinamičke mase. Već smo pomenuli da bolje poznavanje ovog parametra možemo postići poboljšanjem SPS modela ili empirijskim studijama detaljnih dinamičkih modela, što je i predmet ove disertacije. Istovremeno se razvijaju automatski

---

<sup>1</sup>Detalji na <http://egg.astro.cornell.edu/index.php/>.

algoritmi za dobijanje rotacionih krivih iz kinematičkih mapa, i sa porastom njihovog broja postaje racionalno automatizovati celu proceduru dinamičkog modelovanja i na taj način određivanja barionske mase. Pristup kroz analizu sa ljudskim nadzorom, kao ova koju smo predstavili, bi mogle naći svoje mesto pri kalibraciji ili čak treniranje algoritama koji bi se bavili dinamičkim modelovanjem galaksija u budućnosti. Sa dovoljno poznatih tačaka može se konstruisati model koji bi zamenio (ili komplementirao) SPS određivanje odnosa  $M/L$  tako što bi nekim numeričkim fitovanjem ili kroz mašinsko učenje (eng. *machine learning*) bio određen odnos  $M/L$  iz dinamičke mase, površinskog sjaja i boje.

Velike kinematičke studije spiralnih galaksija koristeći IFU instrumente, kao što je MaNGA<sup>2</sup> (*Mapping Nearby Galaxies at APO*), već omogućavaju karakterisanje rotacionih krivih, sadržaja gasa, okruženja i orijentacije hiljada galaksija. Treba pomenuti i pregled CALIFA<sup>3</sup> (*Calar Alto Legacy Integral Field Area Survey*) koji obezbeđuje 2D IFU mape za više od 600 obližnjih galaksija. Nedostatak ovakvih pretraga je njihova spektralna rezolucija, usled čega ne omogućavaju merenje disperzija brzina u disku. Ipak, značajno poboljšavaju naše poznavanje zvezdanih populacija. Očekuje se da nove HI dinamičke studije kao što je WALLABY<sup>4</sup> obezbede nove velike baze podataka. Ipak, precizno razdvajanje barionskog od profila tamne materije zahteva detaljno poznavanje odnosa  $M/L$  iz modela zvezdanih populacija i dinamičkih merenja, kao i precizna ograničenja iz formiranja struktura unutar, na primer, CDM teorije.

## 5. Funkcije mase i raspodele značajnih parametara

Koristeći masu dobijenu iz dinamičkih modela (tabele 5.1 - 5.4) **konstruisali smo funkcije raspodele za lokalni uzorak galaksija** ( $D < 15$  Mpc,  $z = 0$ ).

Konstruisali smo funkcije raspodele za:

- masu neutralnog gasa ( $M_{\text{gas}}$ ),
- barionsku masu ( $M_{\text{bar}}$ ),

---

<sup>2</sup>Pregled misije dostupan na <https://www.sdss.org/surveys/manga/>.

<sup>3</sup>Podaci dostupni na <https://califa.caha.es/>.

<sup>4</sup>Pregled misije dostupan na <https://wallaby-survey.org/>.

- odnosa masa-sjaj na 3.6 mikrona ( $M/L^{3.6}$ ),
- ukupnu dinamičku masu ( $M_{\text{dyn}}$ ),
- masu tamne materije<sup>5</sup> ( $M_{\text{DM}}$ ),
- barionsku frakciju ( $f_{\text{b}}$ ),
- odnosa vidljive i nevidljive materije ( $\eta_{\text{b}}$ ).

Iz naših podataka mogu se takođe izračunati i druge funkcije raspodele, koje ovde ne predstavljamo zbog konciznosti:

- mase diska ( $M_{\text{disk}}$ ),
- mase centralnog ovala ( $M_{\text{bulge}}$ ),
- mase zvezdane komponente ( $M_{*}$ ),
- mase haloa ( $M_{\text{halo}}$ ),
- virijalizovane mase ( $M_{\text{vir}}$ ),
- sjaja na 3.6 mikrona ( $L_{*}^{3.6}$ ),

i tako dalje.

Svaka od ovako određenih raspodela otvara mogućnost za poređenje sa većim uzorcima, izabranim sa drugačijim selekcionim efektima (npr. *H $\alpha$ -blind*) i sa galaksijama sa srednjeg crvenog pomaka. Dalje, svaka od ovih raspodela otvara mogućnost za dublju analizu koja prevazilazi okvire ove disertacije i uključuje poređenja sa drugačijim posmatrački ili numerički dobijenim vrednostima. Na primer, funkcija mase haloa može se porediti sa istom raspodelom dobijenom iz numeričkih simulacija. Sa druge strane, barionske mase galaksija na srednjem i visokom crvenom pomaku se određuju iz rezonantne Ly- $\alpha$  apsorpcije, sa čime bi takođe trebalo uporediti rezultate dobijene modelovanjem.

---

<sup>5</sup>Razlika između mase tamne materije koju dajemo ovde i mase tamnog haloa je u tome što se masa tamne materije odnosi na masu do poslednjeg posmatranog radijusa, dok je masa haloa ekstrapolirana na osnovu teorijskog profila tamne materije do nekog radijusa, na primer  $R_{200}$ . Slično je kad se radi o odnosu barionske i tamne materije, ovde dajemo veličinu  $M_{\text{bar}}/M_{\text{DM}}$  što je različito od  $M_{\text{bar}}/M_{\text{halo}}$  koji se takođe može izračunati iz predstavljenih modela (ovaj odnos nikada ne prelazi 1, za razliku od ovde datog  $M_{\text{bar}}/M_{\text{DM}}$ ).

**BFM za sve dinamičke modele raste ka velikim masama**, sa razlikom što je kod SPS modela ipak manje galaksija sa najvećim masama ( $> 10^{11} M_{\odot}$ ), a za slobodne modele baš tu raspodela dostiže svoj maksimum (tirkizni histogram na slikama 5.1 - 5.4 gore levo). Za poređenje smo koristili uzorak  $P$  iz rada Papastergis et al. (2012), i to raspodele zasnovane na delu uzorka izabranom na osnovu prisustva HI. Svi zaključci se odnose na kompletan  $P$  uzorak, zato što se funkcije mase za HI i  $H\alpha$  ne razlikuju znatno. Deo **P uzorka izabran na osnovu HI sadrži 7618 galaksija, sa  $z < 0.05$  i  $D > 10$  Mpc**. Poređenje raspodele bariona za naš i  $P$  uzorak ukazuje na znatne razlike - pri tome smo posebno razmatrali funkcije raspodele neutralnog gasa i zvezda (slike 5.5 - 5.6). Razmatrajući normalizovanu raspodelu zvezdane mase iz slobodnog ISO modela (na slici 5.5 levo) primećeno je značajno veće prisustvo velikih i veoma velikih spiralnih galaksija u našem uzorku ( $M_* > 10^{10} M_{\odot}$ ). Nagli kraj raspodele (eng. *cut-off*) na najmanjim masama je u našem uzorku već na  $3 \times 10^7 M_{\odot}$ , što znači da uopšte nema objekata sa masama manjim od te, dok se u uzorku  $P$  pojavljuju galaksije sa zvezdanom masom i do  $10^6 M_{\odot}$ . Ovo je posledica malog broja objekata u našem uzorku, kao i selekcionih efekata pri izvođenju rotacionih krivih. Situacija je **veoma slična** (slika 5.5 desno) za **sve korišćene dinamičke modele**, i isti zaključci važe.

**Raspodela mase neutralnog gasa generalno prati zvezdanu raspodelu**, sa određenim „viškom” u broju objekata sa manjim masama gasa u odnosu na one sa malom zvezdanom masom i u odnosu na  $P$  raspodelu mase gasa, tj. **gas je nešto ravnomernije raspoređen** u našem uzorku. Opet je **prisutno najviše objekata sa najvećim masama gasa  $> 10^{10} M_{\odot}$**  i primetan je **nedostatak objekata sa srednjom količinom gasa ( $10^9 - 10^{10} M_{\odot}$ )**. Ukoliko se radi o objektima iz kojih je gas izbačen iz diska/ovala u ranim fazama galaktičke evolucije zbog intenzivnog ranog pika formiranja zvezda i posledičnih eksplozija supernovih, onda bi njegovo hlađenje potencijalno bilo moguće, makar u načelu, detektovati u rendgenskom domenu. Čak i ako osetljivost i rezolucija dostupnih rendgenskih teleskopa ne omogućuju dobijanje bilo kakvih morfoloških detalja, **difuzna emisija ovih galaksija bi mogla**

**korelirati sa „nedostatkom” gasa iz zvezdanog diska/ovalna.**

Zapazili smo da je raspodela barionske i dinamičke mase različita za sve korišćene dinamičke modele. Zapravo, kad bismo uzeli u obzir očekivano skaliranje dinamičke mase sa barionskom od  $\approx 4$  (npr. [Lelli et al., 2016](#)), naše raspodele dinamičke mase mnogo su sličnije posmatranoj raspodeli barionske mase za  $P$  uzorak. Ovo je samo još jedna manifestacija činjenice da odnos  $M/L$  iz dinamičkih modela ne odgovara odnosu  $M/L$  korišćenim za velike pretrage (kao što je [Papastergis et al., 2012](#)), koji se najčešće baziraju na empirijskim relacijama sa bojom. Čak i kod SPS modela koji zavise od boja, dinamičko modelovanje postavlja stroge okvire za moguće vrednosti  $M/L$  parametra, i proizvodi različite oblike dinamičke i barionske funkcije mase (slike 5.3 i 5.4), sa ipak ublaženim razlikama između ove dve raspodele. Ovo je dodatan razlog da ozbiljnije proučimo upravo dinamičku vrednost parametra odnosa masa-sjaj, koja je dobijena uz minimalne teorijske pretpostavke. Ipak, čak i kada posmatramo samo izvedene slobodne dinamičke modele, zapaža se skaliranje dinamičke sa barionskom masom (slika 5.7), pa zaključujemo da ovo skaliranje ima dublje utemeljenje u interakciji barionske i nebarionske komponente, i nije samo artefakt izabranog odnosa  $M/L$ .

Iz svega prikazanog zaključujemo da naša neposredna okolina ne korelira sa širim okruženjem što se tiče raspodele mase. Atipičnost neposrednog okruženja Mlečnog puta oslikava se u činjenici da je nastanjeno velikim galaksijama sa diskom, sa znatno manjim udelom galaksija srednjih masa, dok se odsustvo većeg broja patuljaka može objasniti selekcionim efektima u originalnom uzorku.

## 6. Odnos masa-sjaj

**Odnos masa-sjaj na talasnoj dužini od 3.6 mikrona za komponentu diska kod galaksija bogatih gasom** opisan je raspodelama prikazanim na slikama 5.1-5.3 (žuti histogrami u sredini desno). Ako sumiramo rezultate sve tri raspodele, dobijamo da je raspon u kojem se nalazi odnos  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  od 0.06 do 0.56, sa **najverovatnijom vrednošću od 0.28**. Gornja granica ovog

opsega dobija se kada izuzmemo vrednosti koje „odskaku” na raspodelama kod slobodnih modela (bivaju odstranjene pri 2-sigma odsecanju). Naša analiza daje niže vrednosti za odnos  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  u odnosu na literaturu, gde nalazimo na primer 0.6 (Meidt et al., 2014) i 0.5 (McGaugh and Schombert, 2015), da pomenemo najbitnije.

Analiza raspodela odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za sve dinamičke modele ne pokazuje grupisanje po morfološkom tipu galaksija ni veličini: niti po dijametru korišćenog gasnog diska, niti po dinamičkoj masi do poslednjeg razmatranog radijusa. Već je pomenuto da dinamička masa pokazuje očekivano skaliranje sa barionskom (i zvezdanom) masom, sa faktorom  $\approx 4$ , i zaključili smo da za ovakvo skaliranje ima dubljeg razloga od uobičajenog usvajanja odnosa  $M/L$  iz empirijskih (i teorijskih, SPS) korelacija sa bojom. Još **bolje je definisano skaliranje dinamičke mase sa sjajem na 3.6 mikrona**, što smo primetili kada smo normirali naše modele sa odnosom  $M/L^{3.6}$ . Pošto za ovo skaliranje ne vidimo dublji fizički razlog, deluje kao da postoji **jedna preferirana vrednost za odnos  $M/L^{3.6}$**  u našoj neposrednoj okolini, koja je blizu našeg dobijenog odnosa  $M/L \sim 0.3$ . Ovakav zaključak odnosi se na sve korišćene dinamičke modele.

Jedan od rezultata Spitzer S4G pregleda su i „mape prašine”, koje su deo P5 procedure za obradu. Glavna namena je određivanje koliki deo emisije zvezdane komponente se zapravo može pripisati prašini, koja takođe zrači na bliskim infracrvenim talasnim dužinama i korelisana je sa [3.6]-[4.5] bojom (Meidt et al., 2014). Koristeći rezultate ove procedure (Querejeta et al., 2015), odredili smo kako bi uračunavanje prašine promenilo dobijene odnose  $M/L$  za deo našeg uzorka (P5 ne uključuje podatke za SHA poduzorak). Doprinos zračenja prašine ukupnom fluksu za THINGS galaksije (za 9 njih je uspešno izmerena prašina u Querejeta et al., 2015) prosečno je 25 %. Ovakva korekcija daje porast prosečnog odnosa  $M/L^{3.6}$  na **0.42**, što je bliže vrednostima iz literature (0.50 i 0.60, McGaugh and Schombert, 2015; Meidt et al., 2014, respektivno). Mogući raspon za odnos  $M/L^{3.6}$  se ovakvom korekcijom povećava, kao i odstupanje od relacije skaliranja između dinamičke mase i barionske

mase, a istovremeno korekcija ne povećava  $M/L^{3.6}$  galaksija sa zabeleženim izrazito niskim vrednostima ovog parametra. Korekcija za prašinu i rezultujući veći  $M/L^{3.6}$  parametar kod slobodnih dinamičkih modela **efektivno ne menjaju barionsku masu**, kao ni raspodele masa drugih komponenti osim samog odnosa  $M/L^{3.6}$ . Kod SPS modelovanja vredi istražiti kvalitet modela koji bismo dobili sa ovako korigovanim odnosom  $M/L^{3.6}$ , a u oba slučaja mogao bi se proceniti i doprinos mase prašine barionskoj masi, koji ne mora da bude zanemariv.

## 7. Mlečni put

Mlečni put je u pogledu dinamičke, zvezdane i mase neutralnog gasa, uporediv sa najmasivnijim i istovremeno najprisutnijim galaksijama u THINGS uzorku (za barionsku i gasnu masu korišćene vrednosti iz [McMillan, 2011](#)). Dinamička masa ( $M$  ( $R < 25$  kpc), bazirano na [Wang et al., 2020](#), i referencama koje su tamo date) Galaksije nalazi se u drugom „binu” po masivnosti, koji je takođe drugi po frekvenciji u uzorku. Povećanje procene dinamičke mase (koristeći vrednost unutar 50 umesto 25 kpc,  $M$  ( $R < 50$  kpc)), približava Mlečni put najmasivnijim galaksijama u uzorku. Ipak, smatramo da je za poređenje sa THINGS galaksijama, adekvatnija  $M$  ( $R < 25$  kpc) jer je bliža dimenzijama HI diska. Za ovako procenjenu dinamičku masu odnos sa barionskom masom leži na pravcu gde i ostale THINGS galaksije. Zaključujemo da je **Mlečni put što se tiče masa različitih komponenti izrazito reprezentativan za svoje okruženje, gde je većina galaksija bogatih gasom upravo slična njemu**. Ovo je i posledica isključivanja jednog broja patuljaka iz uzorka, ali svakako ne menja zaključak da **u našem okruženju nedostaje galaksija srednjih zvezdanih (i samim time barionskih) masa ( $10^8 M_{\odot} < M_{*} < 10^{10} M_{\odot}$ )**, koje su najprisutnije u široj okolini.

## 6.1 Pravci za budući rad

Ova disertacija je pregled dosadašnjeg rada autora i, osim što daje presek obrađene teme, takođe otvara moguće pravce za dalji rad koji se u načelu mogu podeliti u tri grupe:

1. Dobijanje novih informacija iz modelovanja i analize postojećih podataka (npr. pomenute relacije skaliranja kao što su barionska Tali-Fišer relacija (BTFR), Tali-Fišer (TF), skaliranje HI sa zvezdanom masom, skaliranje mase supermasivne crne rupe u centru (SMBH) sa masom centralnog ovala, da pomenemo samo neke).
2. Dodavanje novih posmatračkih i numeričkih podataka za povećanje kvaliteta fita i preciznosti parametara (i već pomenuto uključivanje molekuskog gasa, vrelog gasa i prašine u računanje barionske komponente galaksija); ovde spada pronalaženje analogona THINGS galaksijama u drugim pregledima, poređenje sa kosmološkim numeričkim simulacijama, te poređenje sa drugim posmatračkim indikatorima dinamičke mase (npr. gravitaciona sočiva, binarne galaksije) ili mase gasa (apsorpciona QSO spektroskopija) i sl.
3. Teorijska analiza koja se tiče kako poznatih empirijskih relacija, tako i drugih sistematskih faktora koji utiču na oblik i interpretaciju barionske funkcije mase (selekcioni efekti, kao što je problem patuljastih galaksija, ili LSB galaksija u uzorku), efekti metaličnosti, prašine, itd. U ovaj kontekst je takođe najsmislenije staviti svako buduće istraživanje tipičnosti Mlečnog puta, naročito imajući u vidu sve bolje razumevanje njegove istorije formiranja zvezda i hemijske evolucije. U teorijske analize spadalo bi i poređenje sa dinamičkom masom haloa iz direktnih merenja, kao i sa funkcijom mase haloa iz numeričkih simulacija u kontekstu  $\Lambda$ CDM paradigme, analiza barionske frakcije, i kako ona zavisi od ukupne mase haloa. To bi omogućilo dalje uvide koji bi pomogli rešavanju problema nedostajućih bariona, i na primer razmatranje modela u kome se priliv gasa dešava i u kasnijim epohama, što takođe može imati efekta na oblik BFM u kasnijim epohama, a nije do sada ozbiljnije proučavano u



literaturi, niti stavljeno u širi teorijski kontekst. Takođe, treba pomenuti i analizu odstupanja ISO i NFW profila od rezultata koje daju rotacione krive, što je deo istraživanja koja su u toku i osnov budućih rezultata inspirisanih ovom disertacijom.

# Dodatak A

## Radijalni profili

Za svaku od vrednosti parametra  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  dobijenu iz SPS modela (njih 31 ukupno; predstavljene na histogramu 4.24), ponovo je fitovana rotaciona kriva galaksije NGC 5055, sa fiksiranim SPS vrednostima za odnos masa-sjaj. Ovo je urađeno u pokušaju da se, analogno sa najverovatnijom vrednošću odnosa  $M/L$ , odrede i najverovatniji parametri profila tamne materije.

Za ISO modele jasna je bila preferencija što se tiče parametra  $R_c$  i njegova najverovatnija vrednost iznosi  $R_c = 7.6 \pm 5.2$  kpc. Otežani histogram raspodele  $R_c$  je prikazan na slici A.1. Za posmatranu rotacionu krivu, doprinos gasa, ISO model tamne materije sa parametrima fiksiranim na  $(R_c, \rho_0) = (7.6, 7.5)$ , i doprinos centralnog ovala sa „best-fit” vrednošću za odnos  $M/L_{\text{bulge}}^{3.6} = 0.37$  izveli smo radijalni profil za odnos  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koristeći:

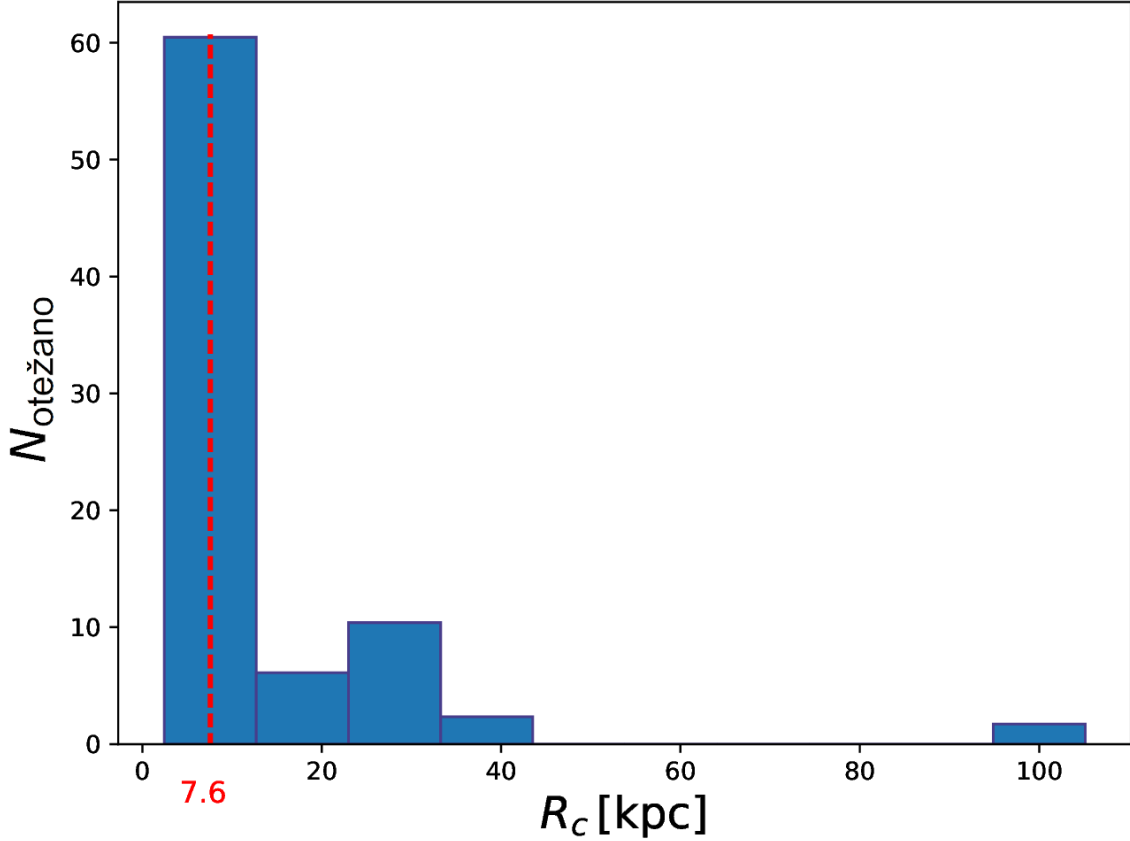
$$M/L_{\text{disk}}^{3.6} = \frac{V_{\text{disk,calc}}^2}{V_{\text{disk,obs}}^2}, \quad (\text{A.1})$$

gde:

$$V_{\text{disk,calc}}^2 = V_c^2 - V_{\text{bulge}}^2 - V_{\text{gas}}^2 - V_{\text{DM}}^2, \quad (\text{A.2})$$

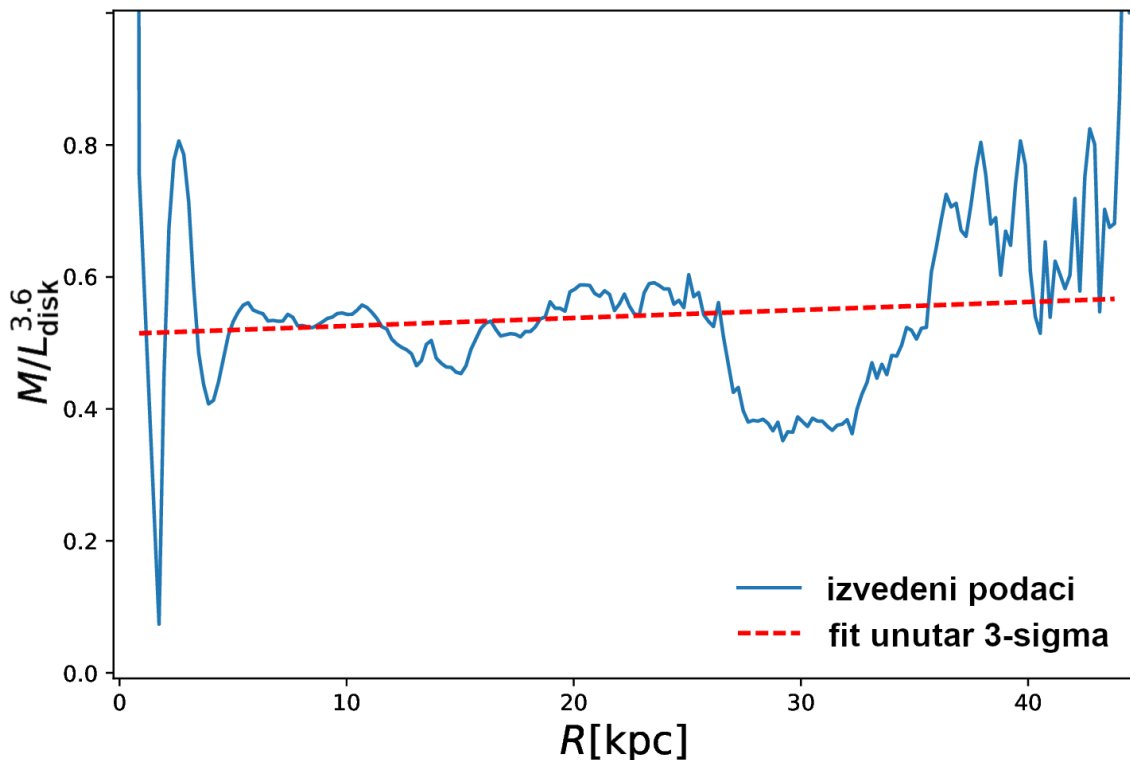
i  $V_{\text{disk,obs}}^2$  je rotaciona brzina koja potiče od mase sadržane unutar zvezdanog diska izračunate iz površinskog sjaja bez skaliranja (sa odnosom masa-sjaj jednakim 1). Radijalni profil odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  izveden na opisani način prikazan je na slici A.2 zajedno sa linearnim fitom na 3-sigma odstranjene vrednosti. Opravdanje za primenu proceduru nalazimo u činjenici da većina neodređenosti u određivanju mase

barionske komponente proizlazi iz nedoređenosti odnosa masa-sjaj zvezdanog diska, tako da npr. odnos masa-sjaj centralnog ovala može biti uzet kao konstantan za ovu analizu.



Slika A.1:  $\bar{\chi}^2$ -otežan histogram ISO parametra  $R_c$ , konstruisan za fiksirane odnose  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS analize za NGC 5055.

Kod NFW modela  $R_{200}$  otežani histogram ukazuje na najverovatniju vrednost od  $R_{200} = 95.0 \pm 2.3$  kpc (slika A.3). Analizirajući oblik funkcije  $\bar{\chi}^2 = f(R_{200})$  našli smo da njen minimum odgovara odabranoj vrednosti sa histograma unutar neodređenosti. Za model tamnog NFW haloa u daljoj analizi parametri su fiksirani na  $(C, R_{200}) = (4.8, 95.0)$ . Fiksiramo i odnos masa-sjaj za centralni oval, na  $M/L_{\text{bulge}}^{3.6} = 0.34$ , što je „best-fit” vrednost ovog parametra pri još jednom rotmas fitu sa fiksiranim usvojenim CDM parametrima. Kada fiksiramo sve druge doprinose na opisan način, iz posmatrane rotacione krive, doprinosa gasa, rotacione brzine koja potiče od mase centralnog ovala i izvedenih parametara za tamnu materiju, izvodimo radijalni profil odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  koristeći jednačine A.1 i A.2. Ovako dobijeni



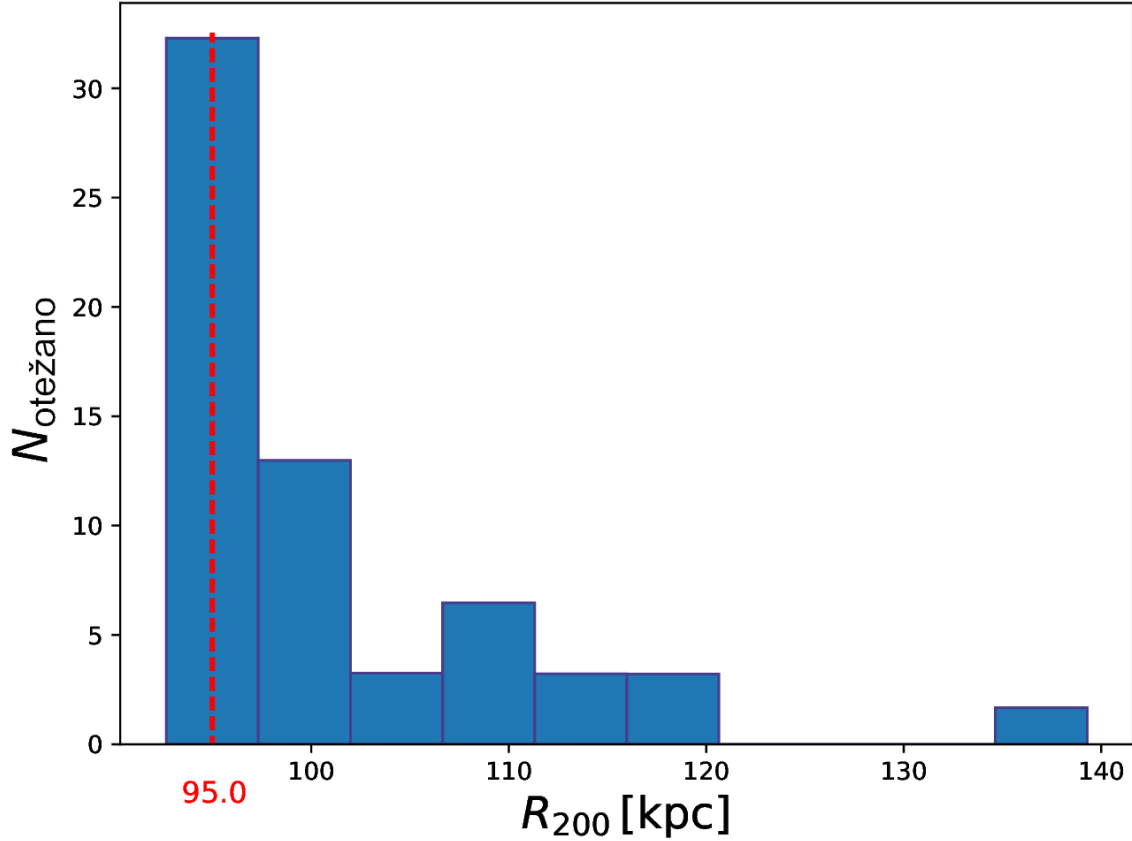
Slika A.2: Radijalni profil odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za NGC 5055 i ISO model: sve dobijene vrednosti odnosa  $M/L$  (plava linija), fit na 3-sigma odstranjenim vrednostima (crvena isprekidana linija).

radijalni profil za odnos  $M/L$  prikazan je na slici A.4, zajedno sa linernim fitom na 3-sigma odstranjenim vrednostima, isto kao za ISO model.

Kada posmatramo radijalne profile (slike A.2 i A.4) primetno su niže vrednosti odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  u oblasti od 26 do 34 kpc. Ovo je artefakt pada u rotacionoj krivi NGC 5055, koji verovatno potiče od manjkavosti posmatranja i procedure izvodjenja rotacione krive, a ne fizičkog opadanja kružne brzine u gasnom disku. U svim slučajevima su izvedene rotacione krive ostavljene u svojoj originalnoj izvedenoj formi, bez ikakvog naknadnog „zaglađivanja” i obrade.

Masa izračunata uz pomoć izvedenih radijalnih profila ne razikuje se značajno u odnosu na onu sa fiksiranim odnosom masa-sjaj (uporediti masu NGC 5055 datu u tabelama 5.1 - 5.4 sa ovde dobijenom masom datom u tabeli A.1).

Izvedeni radijalni profil (predstavljen u Jovanović, 2017), iako baziran na SPS analizi koja koristi boje, nakon fiksiranja najboljih parametara za opis tamne materije možemo smatrati nezavisnim od boje i stoga ga porediti sa radijalnim modelima

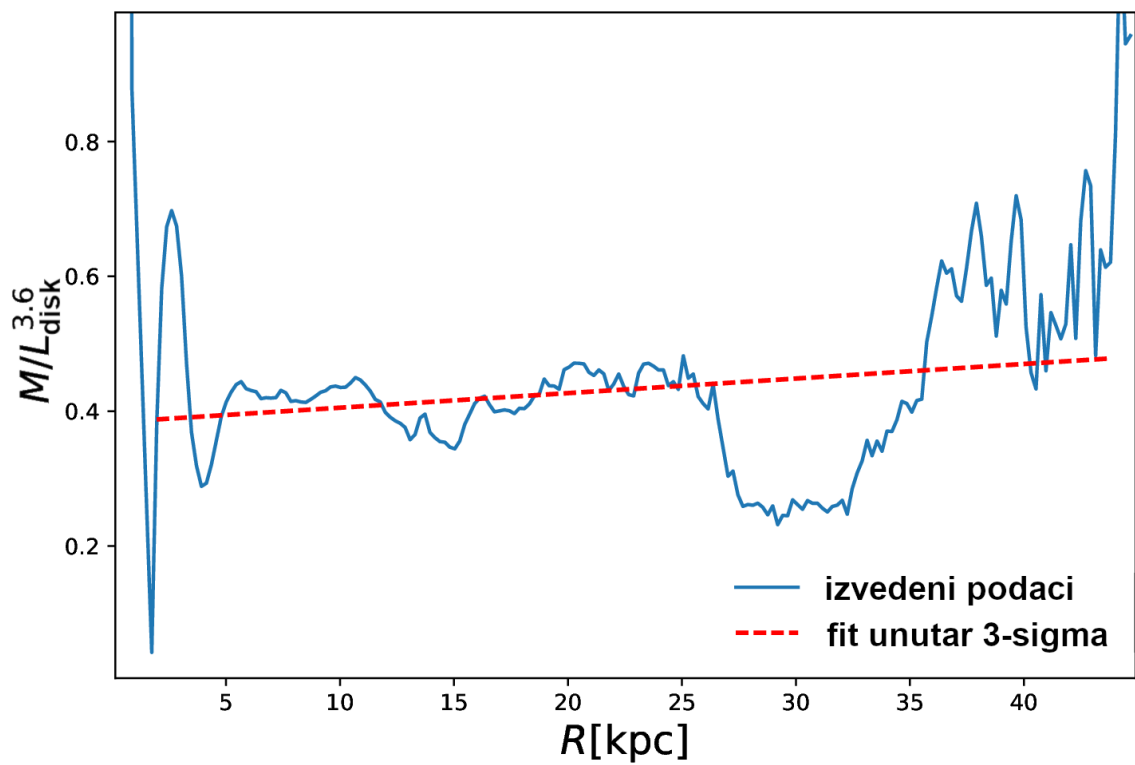


Slika A.3:  $\bar{\chi}^2$ -otežan histogram NFW parametra  $R_{200}$ , konstruisan za fiksirane odnose  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  iz SPS analize za NGC 5055.

Tabela A.1: Mase galaktičkih komponenti za NGC 5055 koristeći modele sa ISO ili NFW parametrima za tamnu materiju DM i radijalne profile za odnos  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$ :  $M_{\text{disk}}$  – masa modelovanog diska;  $M_{\text{bulge}}$  – masa modelovanog centralnog ovala;  $M_{\text{gas}}$  – masa neutralnog gasa;  $M_{\text{dyn}}$  – ukupna dinamička masa svih komponenti  $M_{\text{bar}} + M_{\text{DM}}$ ;  $\frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$  – barionska frakcija do poslednjeg posmatranog radijusa i  $\frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$  – odnos dve glavne komponente u modelovanoj masi galaksije, barionske i tamne materije. ”+” – doprinos gasne komponente je fiksiran i stoga dat bez neodređenosti.

Model	$M_{\text{disk}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{bulge}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{gas}}^+$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$M_{\text{dyn}}$ [ $10^8 M_{\odot}$ ]	$f_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{dyn}}}$	$\eta_b = \frac{M_{\text{bar}}}{M_{\text{DM}}}$
ISO	$752 \pm 12$	$375 \pm 0$	163	$3148 \pm 59$	$0.41 \pm 0.12$	$0.70 \pm 0.03$
NFW	$606 \pm 13$	$344 \pm 5$		$3069 \pm 88$	$0.36 \pm 0.02$	$0.57 \pm 0.03$

koji koreliraju promenu boje sa radijusom sa radijalnom varijacijom u odnosu masa-sjaj. Ovakva analiza može se proširiti na sve galaksije iz uzorka za koje SPS modeli daju smislene vrednosti odnosa  $M/L$ .



Slika A.4: Radijalni profil odnosa  $M/L_{\text{disk}}^{3.6}$  za NGC 5055 i NFW model: sve dobijene vrednosti odnosa  $M/L$  (plava linija), fit na 3-sigma odstranjenim vrednostima (crvena isprekidana linija).

# Bibliografija

Aalseth, C. E., Barbeau, P. S., Bowden, N. S., Cabrera-Palmer, B., Colaresi, J., Collar, J. I., Dazeley, S., de Lurgio, P., Fast, J. E., Fields, N., Greenberg, C. H., Hossbach, T. W., Keillor, M. E., Kephart, J. D., Marino, M. G., Miley, H. S., Miller, M. L., Orrell, J. L., Radford, D. C., Reyna, D., Tench, O., van Wechel, T. D., Wilkerson, J. F., and Yocum, K. M. (2011). Results from a Search for Light-Mass Dark Matter with a p-Type Point Contact Germanium Detector. *PhRvL*, 106(13):131301.

Alaghband-Zadeh, S., Chapman, S. C., Swinbank, A. M., Smail, I., Harrison, C. M., Alexander, D. M., Casey, C. M., Davé, R., Narayanan, D., Tamura, Y., and Umehata, H. (2012). Integral field spectroscopy of  $2.0 < z < 2.7$  submillimetre galaxies: gas morphologies and kinematics. *MNRAS*, 424(3):2232–2248.

Alpher, R. A., Bethe, H., and Gamow, G. (1948). The Origin of Chemical Elements. *Physical Review*, 73(7):803–804.

Angloher, G., Bauer, M., Bavykina, I., Bento, A., Bucci, C., Ciemniak, C., Deuter, G., von Feilitzsch, F., Hauff, D., Huff, P., Isaila, C., Jochum, J., Kiefer, M., Kimmerle, M., Lanfranchi, J.-C., Petricca, F., Pfister, S., Potzel, W., Pröbst, F., Reindl, F., Roth, S., Rottler, K., Sailer, C., Schöffner, K., Schmalzer, J., Scholl, S., Seidel, W., Sivers, M. v., Stodolsky, L., Strandhagen, C., Strauß, R., Tanzke, A., Usherov, I., Wawoczny, S., Willers, M., and Zöller, A. (2012). Results from 730 kg days of the CRESST-II Dark Matter search. *European Physical Journal C*, 72:1971.

- Angus, G. W., van der Heyden, K. J., Famaey, B., Gentile, G., McGaugh, S. S., and de Blok, W. J. G. (2012). A QUMOND galactic N-body code - I. Poisson solver and rotation curve fitting. *MNRAS*, 421:2598–2609.
- Baade, W. and Gaposchkin, C. H. P. (1963). *Evolution of stars and galaxies*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Baldry, I. K. and Glazebrook, K. (2003). Constraints on a Universal Stellar Initial Mass Function from Ultraviolet to Near-Infrared Galaxy Luminosity Densities. *ApJ*, 593(1):258–271.
- Banerjee, A., Jog, C. J., Brinks, E., and Bagetakos, I. (2011). Theoretical determination of H I vertical scale heights in the dwarf galaxies DDO 154, Ho II, IC 2574 and NGC 2366. *MNRAS*, 415:687–694.
- Battaglia, G., Fraternali, F., Oosterloo, T., and Sancisi, R. (2006). ion{H}{i} study of the warped spiral galaxy NGC 5055: a disk/dark matter halo offset? *A&A*, 447:49–62.
- Baugh, C. M. (2006). A primer on hierarchical galaxy formation: the semi-analytical approach. *Reports on Progress in Physics*, 69:3101–3156.
- Begeman, K. G. (1987). *HI rotation curves of spiral galaxies*. PhD thesis, Kapteyn Institute.
- Begum, A., Chengalur, J. N., Karachentsev, I. D., Sharina, M. E., and Kaisin, S. S. (2008). FIGGS: Faint Irregular Galaxies GMRT Survey - overview, observations and first results. *MNRAS*, 386:1667–1682.
- Behroozi, P. S., Wechsler, R. H., and Conroy, C. (2013). The Average Star Formation Histories of Galaxies in Dark Matter Halos from  $z = 0-8$ . *ApJ*, 770(1):57.
- Bell, E. F. and de Jong, R. S. (2001). Stellar Mass-to-Light Ratios and the Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 550:212–229.
- Bell, E. F., McIntosh, D. H., Katz, N., and Weinberg, M. D. (2003). A First Estimate of the Baryonic Mass Function of Galaxies. *ApJL*, 585:L117–L120.



- Bernabei, R., Belli, P., Cappella, F., Caracciolo, V., Castellano, S., Cerulli, R., Dai, C. J., d'Angelo, A., d'Angelo, S., Di Marco, A., He, H. L., Incicchitti, A., Kuang, H. H., Ma, X. H., Montecchia, F., Prosperi, D., Sheng, X. D., Wang, R. G., and Ye, Z. P. (2013). Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1. *European Physical Journal C*, 73:2648.
- Binney, J. and Tremaine, S. (2008). *Galactic Dynamics: Second Edition*. Princeton University Press, Princeton.
- Blais-Ouellette, S., Amram, P., Carignan, C., and Swaters, R. (2004). Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. III. Fabry-Perot imaging spectroscopy of 6 spiral galaxies. *A&A*, 420:147–161.
- Blumenthal, G. R., Faber, S. M., Primack, J. R., and Rees, M. J. (1984). Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature*, 311:517–525.
- Bolton, A. S., Burles, S., Koopmans, L. V. E., Treu, T., Gavazzi, R., Moustakas, L. A., Wayth, R., and Schlegel, D. J. (2008). The Sloan Lens ACS Survey. V. The Full ACS Strong-Lens Sample. *ApJ*, 682(2):964–984.
- Bosma, A. (1978). *The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types*. PhD thesis, -.
- Bosma, A. (1981a). 21-cm line studies of spiral galaxies. I. Observations of the galaxies NGC 5033, 3198, 5055, 2841, and 7331. *AJ*, 86:1791–1824.
- Bosma, A. (1981b). 21-cm line studies of spiral galaxies. II. The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types. *AJ*, 86:1825–1846.
- Bovy, J. (2021). *Dynamics and Astrophysics of Galaxies*. Princeton University Press, Princeton, NJ (in preparation).
- Bruzual, A. G. (1983). Spectral evolution of galaxies. I. Early-type systems. *ApJ*, 273:105–127.

- Bruzual, A. G. and Charlot, S. (1993). Spectral Evolution of Stellar Populations Using Isochrone Synthesis. *ApJ*, 405:538.
- Bruzual, G. and Charlot, S. (2003). Stellar population synthesis at the resolution of 2003. *MNRAS*, 344(4):1000–1028.
- Carpenter, J. M. (2001). Color Transformations for the 2MASS Second Incremental Data Release. *AJ*, 121:2851–2871.
- Casertano, S. (1983). Rotation curve of the edge-on spiral galaxy NGC 5907: disc and halo masses. *MNRAS*, 203:735–747.
- Casuso, E., Vazdekis, A., Peletier, R. F., and Beckman, J. E. (1996). The Revised Mg<sub>2</sub> Index as a Metallicity Indicator for Stellar Systems: Giant Elliptical Galaxies and Bulges. *ApJ*, 458:533.
- Chandrasekhar, S. (1989). *Stellar structure and stellar atmospheres*. University of Chicago Press, Chicago.
- Chemin, L., Carignan, C., Drouin, N., and Freeman, K. C. (2006). H I Studies of the Sculptor Group Galaxies. VIII. The Background Galaxies: NGC 24 and NGC 45. *AJ*, 132(6):2527–2538.
- Chemin, L., de Blok, W. J. G., and Mamon, G. A. (2011). Improved Modeling of the Mass Distribution of Disk Galaxies by the Einasto Halo Model. *AJ*, 142(4):109.
- Chevallard, J. and Charlot, S. (2016). Modelling and interpreting spectral energy distributions of galaxies with BEAGLE. *MNRAS*, 462(2):1415–1443.
- Churchill, C. W., Vander Vliet, J. R., Trujillo-Gomez, S., Kacprzak, G. G., and Klypin, A. (2015). Direct Insights Into Observational Absorption Line Analysis Methods of the Circumgalactic Medium Using Cosmological Simulations. *ApJ*, 802:10.
- Conroy, C. (2013). Modeling the Panchromatic Spectral Energy Distributions of Galaxies. *ARA&A*, 51(1):393–455.

- Courteau, S., Cappellari, M., de Jong, R. S., Dutton, A. A., Emsellem, E., Hoekstra, H., Koopmans, L. V. E., Mamon, G. A., Maraston, C., Treu, T., and Widrow, L. M. (2014). Galaxy masses. *Reviews of Modern Physics*, 86(1):47–119.
- Dale, D. A., Gil de Paz, A., Gordon, K. D., Hanson, H. M., Armus, L., Bendo, G. J., Bianchi, L., Block, M., Boissier, S., Boselli, A., Buckalew, B. A., Buat, V., Burgarella, D., Calzetti, D., Cannon, J. M., Engelbracht, C. W., Helou, G., Hollenbach, D. J., Jarrett, T. H., Kennicutt, R. C., Leitherer, C., Li, A., Madore, B. F., Martin, D. C., Meyer, M. J., Murphy, E. J., Regan, M. W., Roussel, H., Smith, J. D. T., Sosey, M. L., Thilker, D. A., and Walter, F. (2007). An Ultraviolet-to-Radio Broadband Spectral Atlas of Nearby Galaxies. *ApJ*, 655:863–884.
- David, L. P., Arnaud, K. A., Forman, W., and Jones, C. (1990). Einstein observations of the Hydra A cluster and the efficiency of galaxy formation in groups and clusters. *ApJ*, 356:32–40.
- de Blok, W. J. G., Walter, F., Brinks, E., Trachternach, C., Oh, S.-H., and Kennicutt, Jr., R. C. (2008). High-Resolution Rotation Curves and Galaxy Mass Models from THINGS. *AJ*, 136:2648–2719.
- de Jong, R. S. and Bell, E. F. (2007). Comparing Dynamical and Stellar Population Mass-To-Light Ratio Estimates. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 3:107.
- Dicaire, I., Carignan, C., Amram, P., Hernandez, O., Chemin, L., Daigle, O., de Denus-Baillargeon, M. M., Balkowski, C., Boselli, A., Fathi, K., and Kennicutt, R. C. (2008). H $\alpha$  kinematics of the Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey - II. *MNRAS*, 385(2):553–605.
- Djorgovski, S. and Davis, M. (1987). Fundamental properties of elliptical galaxies. *ApJ*, 313:59–68.
- Dodelson, S. (2011). The Real Problem with MOND. *International Journal of Modern Physics D*, 20(14):2749–2753.

- Draine, B. T. and Lee, H. M. (1984). Optical properties of interstellar graphite and silicate grains. *ApJ*, 285:89–108.
- Dressler, A., Faber, S. M., Burstein, D., Davies, R. L., Lynden-Bell, D., Terlevich, R. J., and Wegner, G. (1987). Spectroscopy and photometry of elliptical galaxies - A large-scale streaming motion in the local universe. *ApJL*, 313:L37–L42.
- Efstathiou, G., Sutherland, W. J., and Maddox, S. J. (1990). The cosmological constant and cold dark matter. *Nature*, 348(6303):705–707.
- Einasto, J. (1965). On the Construction of a Composite Model for the Galaxy and on the Determination of the System of Galactic Parameters. *Trudy Astrofizicheskogo Instituta Alma-Ata*, 5:87–100.
- Elmegreen, D. M. and Elmegreen, B. G. (1984). Blue and near-infrared surface photometry of spiral structure in 34 nonbarred grand design and flocculent galaxies. *ApJS*, 54:127–149.
- Evans, N. W., Wilkinson, M. I., Perrett, K. M., and Bridges, T. J. (2003). New Mass Estimators For Tracer Populations. *ApJ*, 583(2):752–757.
- Faber, S. M. and Gallagher, J. S. (1979). Masses and mass-to-light ratios of galaxies. *ARA&A*, 17:135–187.
- Fabricius, M. H., Saglia, R. P., Fisher, D. B., Drory, N., Bender, R., and Hopp, U. (2012). Kinematic Signatures of Bulges Correlate with Bulge Morphologies and Sérsic Index. *ApJ*, 754(1):67.
- Fioc, M. and Rocca-Volmerange, B. (1999). PEGASE.2, a metallicity-consistent spectral evolution model of galaxies: the documentation and the code. *arXiv e-prints*, pages astro-ph/9912179.
- Freeman, K. C. (1970). On the Disks of Spiral and S0 Galaxies. *ApJ*, 160:811.
- Fu, L., Semboloni, E., Hoekstra, H., Kilbinger, M., van Waerbeke, L., Tereno, I., Mellier, Y., Heymans, C., Coupon, J., Benabed, K., Benjamin, J., Bertin, E., Doré, O., Hudson, M. J., Ilbert, O., Maoli, R., Marmo, C., McCracken, H. J.,

- and Ménard, B. (2008). Very weak lensing in the CFHTLS wide: cosmology from cosmic shear in the linear regime. *A&A*, 479(1):9–25.
- Fukugita, M., Hogan, C. J., and Peebles, P. J. E. (1998). The Cosmic Baryon Budget. *ApJ*, 503:518–530.
- Fukugita, M. and Peebles, P. J. E. (2004). The Cosmic Energy Inventory. *ApJ*, 616(2):643–668.
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., White, S. D. M., and Tremonti, C. A. (2005). The ages and metallicities of galaxies in the local universe. *MNRAS*, 362(1):41–58.
- Grazian, A., Fontana, A., Santini, P., Dunlop, J. S., Ferguson, H. C., Castellano, M., Amorin, R., Ashby, M. L. N., Barro, G., Behroozi, P., Boutsia, K., Caputi, K. I., Chary, R. R., Dekel, A., Dickinson, M. E., Faber, S. M., Fazio, G. G., Finkelstein, S. L., Galametz, A., Giallongo, E., Giavalisco, M., Grogin, N. A., Guo, Y., Kocevski, D., Koekemoer, A. M., Koo, D. C., Lee, K. S., Lu, Y., Merlin, E., Mobasher, B., Nonino, M., Papovich, C., Paris, D., Pentericci, L., Reddy, N., Renzini, A., Salmon, B., Salvato, M., Sommariva, V., Song, M., and Vanzella, E. (2015). The galaxy stellar mass function at  $3.5 \leq z \leq 7.5$  in the CANDELS/UDS, GOODS-South, and HUDF fields. *A&A*, 575:A96.
- Hammer, F., Puech, M., Chemin, L., Flores, H., and Lehnert, M. D. (2007). The Milky Way, an Exceptionally Quiet Galaxy: Implications for the Formation of Spiral Galaxies. *ApJ*, 662(1):322–334.
- Heald, G., Józsa, G., Serra, P., Zschaechner, L., Rand, R., Fraternali, F., Oosterloo, T., Walterbos, R., Jütte, E., and Gentile, G. (2011). The Westerbork Hydrogen Accretion in LOcal GALaxieS (HALOGAS) survey. I. Survey description and pilot observations. *A&A*, 526:A118.
- Herwig, F. (2005). Evolution of Asymptotic Giant Branch Stars. *ARA&A*, 43(1):435–479.

- Into, T. and Portinari, L. (2013). New colour-mass-to-light relations: the role of the asymptotic giant branch phase and of interstellar dust. *MNRAS*, 430:2715–2731.
- Iyer, K. and Gawiser, E. (2017). Reconstruction of Galaxy Star Formation Histories through SED Fitting: The Dense Basis Approach. *ApJ*, 838(2):127.
- Jacobs, B. A., Rizzi, L., Tully, R. B., Shaya, E. J., Makarov, D. I., and Makarova, L. (2009). The Extragalactic Distance Database: Color-Magnitude Diagrams. *AJ*, 138(2):332–337.
- Jarrett, T. H., Chester, T., Cutri, R., Schneider, S. E., and Huchra, J. P. (2003). The 2MASS Large Galaxy Atlas. *AJ*, 125(2):525–554.
- Ji, L., Kamionkowski, M., and Inomata, K. (2021). Standard model prediction for cosmological 21 cm circular polarization. *PhRvD*, 103(2):023516.
- Jiang, T., Hogg, D. W., and Blanton, M. R. (2012). Galaxy Growth by Merging in the Nearby Universe. *ApJ*, 759(2):140.
- Jimenez, R., Verde, L., Treu, T., and Stern, D. (2003). Constraints on the Equation of State of Dark Energy and the Hubble Constant from Stellar Ages and the Cosmic Microwave Background. *ApJ*, 593:622–629.
- Jovanović, M. (2017). Two regimes of galaxy dynamics: mass models of NGC 5055 and DDO 154. *MNRAS*, 469(3):3564–3575.
- Jovanović, M., Vudragovic, A., and Samurovic, S. (2017). Mass estimation of the elliptical galaxy NGC 5846. *Publications de l’Observatoire Astronomique de Belgrade*, 96:245–250.
- Kaiser, N. and Squires, G. (1993). Mapping the Dark Matter with Weak Gravitational Lensing. *ApJ*, 404:441.
- Kalberla, P. M. W. and Kerp, J. (2009). The HI Distribution of the Milky Way. *ARA&A*, 47(1):27–61.
- Kapteyn, J. C. (1922). First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System. *ApJ*, 55:302.

- Karachentsev, I. D., Kaisina, E. I., and Makarov, D. I. (2014). Suites of Dwarfs around nearby Giant Galaxies. *AJ*, 147(1):13.
- Kennicutt, Robert C., J., Armus, L., Bendo, G., Calzetti, D., Dale, D. A., Draine, B. T., Engelbracht, C. W., Gordon, K. D., Grauer, A. D., Helou, G., Hollenbach, D. J., Jarrett, T. H., Kewley, L. J., Leitherer, C., Li, A., Malhotra, S., Regan, M. W., Rieke, G. H., Rieke, M. J., Roussel, H., Smith, J.-D. T., Thornley, M. D., and Walter, F. (2003). SINGS: The SIRTf Nearby Galaxies Survey. *PASP*, 115(810):928–952.
- Kim, S. Y., Peter, A. H. G., and Hargis, J. R. (2018). Missing Satellites Problem: Completeness Corrections to the Number of Satellite Galaxies in the Milky Way are Consistent with Cold Dark Matter Predictions. *PhRvL*, 121(21):211302.
- Kodama, T. and Arimoto, N. (1997). Origin of the colour-magnitude relation of elliptical galaxies. *A&A*, 320:41–53.
- Koribalski, B. S., Wang, J., Kamphuis, P., Westmeier, T., Staveley-Smith, L., Oh, S. H., López-Sánchez, Á. R., Wong, O. I., Ott, J., de Blok, W. J. G., and Shao, L. (2018). The Local Volume H I Survey (LVHIS). *MNRAS*, 478(2):1611–1648.
- Kroupa, P. (2001). On the variation of the initial mass function. *MNRAS*, 322:231–246.
- Lanzetta, K. M., Bowen, D. V., Tytler, D., and Webb, J. K. (1995). The gaseous extent of galaxies and the origin of Lyman-alpha absorption systems: A survey of galaxies in the fields of Hubble Space Telescope spectroscopic target QSOs. *ApJ*, 442:538–568.
- Lelli, F., McGaugh, S. S., and Schombert, J. M. (2016). SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves. *AJ*, 152(6):157.
- Leroy, A. K., Walter, F., Brinks, E., Bigiel, F., de Blok, W. J. G., Madore, B., and Thornley, M. D. (2008). The Star Formation Efficiency in Nearby Galaxies: Measuring Where Gas Forms Stars Effectively. *AJ*, 136:2782–2845.

- Liddle, A. (2003). *An Introduction to Modern Cosmology*. Wiley, Chichester, UK.
- Lin, Y.-T., Stanford, S. A., Eisenhardt, P. R. M., Vikhlinin, A., Maughan, B. J., and Kravtsov, A. (2012). Baryon Content of Massive Galaxy Clusters at  $z = 0-0.6$ . *ApJ*, 745:L3.
- MacArthur, L. A., González, J. J., and Courteau, S. (2009). Stellar population and kinematic profiles in spiral bulges and discs: population synthesis of integrated spectra. *MNRAS*, 395(1):28–63.
- Mamon, G. A., Biviano, A., and Boué, G. (2013). MAMPOSSt: Modelling Anisotropy and Mass Profiles of Observed Spherical Systems - I. Gaussian 3D velocities. *MNRAS*, 429(4):3079–3098.
- Maraston, C., Pforr, J., Henriques, B. M., Thomas, D., Wake, D., Brownstein, J. R., Capozzi, D., Tinker, J., Bundy, K., Skibba, R. A., Beifiori, A., Nichol, R. C., Edmondson, E., Schneider, D. P., Chen, Y., Masters, K. L., Steele, O., Bolton, A. S., York, D. G., Weaver, B. A., Higgs, T., Bizyaev, D., Brewington, H., Malanushenko, E., Malanushenko, V., Snedden, S., Oravetz, D., Pan, K., Shelden, A., and Simmons, A. (2013). Stellar masses of SDSS-III/BOSS galaxies at  $z \sim 0.5$  and constraints to galaxy formation models. *MNRAS*, 435(4):2764–2792.
- Maraston, C., Pforr, J., Renzini, A., Daddi, E., Dickinson, M., Cimatti, A., and Tonini, C. (2010). Star formation rates and masses of  $z \sim 2$  galaxies from multicolour photometry. *MNRAS*, 407(2):830–845.
- Marra, R., Churchill, C. W., Kacprzak, G. G., Vander Vliet, R., Ceverino, D., Lewis, J. G., Nielsen, N. M., Muzahid, S., and Charlton, J. C. (2021). Spatial Distribution of O VI Covering Fractions in the Simulated Circumgalactic Medium. *ApJ*, 907(1):8.
- McGaugh, S. S. (2012). The Baryonic Tully-Fisher Relation of Gas-rich Galaxies as a Test of  $\Lambda$ CDM and MOND. *AJ*, 143(2):40.



- McGaugh, S. S. and Schombert, J. M. (2015). Weighing Galaxy Disks With the Baryonic Tully-Fisher Relation. *ApJ*, 802(1):18.
- McGaugh, S. S., Schombert, J. M., Bothun, G. D., and de Blok, W. J. G. (2000). The Baryonic Tully-Fisher Relation. *ApJL*, 533(2):L99–L102.
- McMillan, P. J. (2011). Mass models of the Milky Way. *MNRAS*, 414(3):2446–2457.
- Meidt, S. E., Schinnerer, E., van de Ven, G., Zaritsky, D., Peletier, R., Knapen, J. H., Sheth, K., Regan, M., Querejeta, M., Muñoz-Mateos, J.-C., Kim, T., Hinz, J. L., Gil de Paz, A., Athanassoula, E., Bosma, A., Buta, R. J., Cisternas, M., Ho, L. C., Holwerda, B., Skibba, R., Laurikainen, E., Salo, H., Gadotti, D. A., Laine, J., Erroz-Ferrer, S., Comerón, S., Menéndez-Delmestre, K., Seibert, M., and Mizusawa, T. (2014). Reconstructing the Stellar Mass Distributions of Galaxies Using S<sup>4</sup>G IRAC 3.6 and 4.5  $\mu$ m Images. II. The Conversion from Light to Mass. *ApJ*, 788:144.
- Milgrom, M. (1983). A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *ApJ*, 270:365–370.
- Miller, M. J., Hodges-Kluck, E. J., and Bregman, J. N. (2016). The Milky Way’s Hot Gas Kinematics: Signatures in Current and Future OVII Absorption Line Observations. *ApJ*, 818:112.
- Mo, H., van den Bosch, F. C., and White, S. (2010). *Galaxy Formation and Evolution*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Moustakas, J., Kennicutt, Jr., R. C., Tremonti, C. A., Dale, D. A., Smith, J.-D. T., and Calzetti, D. (2010). Optical Spectroscopy and Nebular Oxygen Abundances of the Spitzer/SINGS Galaxies. *ApJS*, 190:233–266.
- Muñoz-Mateos, J. C., Gil de Paz, A., Zamorano, J., Boissier, S., Dale, D. A., Pérez-González, P. G., Gallego, J., Madore, B. F., Bendo, G., Boselli, A., Buat, V., Calzetti, D., Moustakas, J., and Kennicutt, Jr., R. C. (2009). Radial Distribution of Stars, Gas, and Dust in SINGS Galaxies. I. Surface Photometry and Morphology. *ApJ*, 703:1569–1596.

- Muñoz-Mateos, J. C., Sheth, K., Regan, M., Kim, T., Laine, J., Erroz-Ferrer, S., Gil de Paz, A., Comeron, S., Hinz, J., Laurikainen, E., Salo, H., Athanassoula, E., Bosma, A., Bouquin, A. Y. K., Schinnerer, E., Ho, L., Zaritsky, D., Gadotti, D. A., Madore, B., Holwerda, B., Menéndez-Delmestre, K., Knapen, J. H., Meidt, S., Querejeta, M., Mizusawa, T., Seibert, M., Laine, S., and Courtois, H. (2015). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G): Stellar Masses, Sizes, and Radial Profiles for 2352 Nearby Galaxies. *ApJS*, 219:3.
- Muller, C. A. and Oort, J. H. (1951). Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: The Interstellar Hydrogen Line at 1,420 Mc./sec., and an Estimate of Galactic Rotation. *Nature*, 168(4270):357–358.
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., and White, S. D. M. (1997). A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. *ApJ*, 490:493–508.
- Niikura, H., Takada, M., Yasuda, N., Lupton, R. H., Sumi, T., More, S., Kurita, T., Sugiyama, S., More, A., Oguri, M., and Chiba, M. (2019). Microlensing constraints on primordial black holes with Subaru/HSC Andromeda observations. *Nature Astronomy*, 3:524–534.
- Noll, S., Burgarella, D., Giovannoli, E., Buat, V., Marcillac, D., and Muñoz-Mateos, J. C. (2009). Analysis of galaxy spectral energy distributions from far-UV to far-IR with CIGALE: studying a SINGS test sample. *A&A*, 507(3):1793–1813.
- Oh, S.-H., de Blok, W. J. G., Walter, F., Brinks, E., and Kennicutt, Robert C., J. (2008). High-Resolution Dark Matter Density Profiles of THINGS Dwarf Galaxies: Correcting for Noncircular Motions. *AJ*, 136(6):2761–2781.
- Oman, K. A., Navarro, J. F., Fattahi, A., Frenk, C. S., Sawala, T., White, S. D. M., Bower, R., Crain, R. A., Furlong, M., Schaller, M., Schaye, J., and Theuns, T. (2015). The unexpected diversity of dwarf galaxy rotation curves. *MNRAS*, 452(4):3650–3665.
- Oort, J. H. (1932). The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *BAN*, 6:249.

- Opik, E. (1922). An estimate of the distance of the Andromeda Nebula. *ApJ*, 55:406–410.
- Ott, J., Walter, F., Brinks, E., Van Dyk, S. D., Dirsch, B., and Klein, U. (2001). Evidence for BlowOut in the Low-Mass Dwarf Galaxy Holmberg I. *AJ*, 122:3070–3091.
- Padmanabhan, T. (1993). *Structure Formation in the Universe*. Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- Pahre, M. A., Ashby, M. L. N., Fazio, G. G., and Willner, S. P. (2004). Mid-Infrared Galaxy Morphology along the Hubble Sequence. *ApJS*, 154:235–241.
- Papastergis, E. (2013). *Statistical analysis of ALFALFA galaxies: Insights in galaxy formation & near-field cosmology*. PhD thesis, Cornell University.
- Papastergis, E., Cattaneo, A., Huang, S., Giovanelli, R., and Haynes, M. P. (2012). A Direct Measurement of the Baryonic Mass Function of Galaxies and Implications for the Galactic Baryon Fraction. *ApJ*, 759:138.
- Pease, F. G. (1918). The Rotation and Radial Velocity of the Central Part of the Andromeda Nebula. *Proceedings of the National Academy of Science*, 4(1):21–24.
- Peebles, P. (1993). *Principles of Physical Cosmology*. Princeton Series in Physics. Princeton University Press, Princeton.
- Peebles, P. J. E. (1982). Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *ApJL*, 263:L1–L5.
- Peebles, P. J. E. and Yu, J. T. (1970). Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe. *ApJ*, 162:815.
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., and Rix, H.-W. (2010). Detailed Decomposition of Galaxy Images. II. Beyond Axisymmetric Models. *AJ*, 139:2097–2129.
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G.,

- Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., Ellis, R. S., Irwin, M., McMahon, R. G., Ruiz-Lapuente, P., Walton, N., Schaefer, B., Boyle, B. J., Filippenko, A. V., Matheson, T., Fruchter, A. S., Panagia, N., Newberg, H. J. M., Couch, W. J., and Project, T. S. C. (1999). Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae. *ApJ*, 517(2):565–586.
- Ponomareva, A. A., Verheijen, M. A. W., and Bosma, A. (2016). Detailed H I kinematics of Tully-Fisher calibrator galaxies. *MNRAS*, 463(4):4052–4067.
- Press, W. H. and Schechter, P. (1974a). Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation. *ApJ*, 187:425–438.
- Press, W. H. and Schechter, P. (1974b). Formation of Galaxies and Clusters of Galaxies by Self-Similar Gravitational Condensation. *ApJ*, 187:425–438.
- Querejeta, M., Meidt, S. E., Schinnerer, E., Cisternas, M., Muñoz-Mateos, J. C., Sheth, K., Knapen, J., van de Ven, G., Norris, M. A., Peletier, R., Laurikainen, E., Salo, H., Holwerda, B. W., Athanassoula, E., Bosma, A., Groves, B., Ho, L. C., Gadotti, D. A., Zaritsky, D., Regan, M., Hinz, J., Gil de Paz, A., Menendez-Delmestre, K., Seibert, M., Mizusawa, T., Kim, T., Erroz-Ferrer, S., Laine, J., and Comerón, S. (2015). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G): Precise Stellar Mass Distributions from Automated Dust Correction at 3.6  $\mu\text{m}$ . *ApJS*, 219:5.
- Read, J. I. and Trentham, N. (2005). The baryonic mass function of galaxies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 363.
- Rees, M. J. and Ostriker, J. P. (1977). Cooling, dynamics and fragmentation of massive gas clouds - Clues to the masses and radii of galaxies and clusters. *MNRAS*, 179:541–559.
- Renzini, A. (1981). Energetics of stellar populations. *Annales de Physique*, 6:87–102.
- Rhoads, J. E. (1998). Young Red Supergiants and the Near-Infrared Light Appearance of Disk Galaxies. *AJ*, 115(2):472–483.

- Ricotti, M. (2009). Late gas accretion on to primordial minihaloes: a model for Leo T, dark galaxies and extragalactic high-velocity clouds. *MNRAS*, 392(1):L45–L49.
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Garnavich, P. M., Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Jha, S., Kirshner, R. P., Leibundgut, B., Phillips, M. M., Reiss, D., Schmidt, B. P., Schommer, R. A., Smith, R. C., Spyromilio, J., Stubbs, C., Suntzeff, N. B., and Tonry, J. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. *AJ*, 116(3):1009–1038.
- Rix, H.-W. and Rieke, M. J. (1993). Tracing the Stellar Mass in M51. *ApJ*, 418:123.
- Roberts, M. S. and Whitehurst, R. N. (1975). The rotation curve and geometry of M31 at large galactocentric distances. *ApJ*, 201:327–346.
- Röck, B., Vazdekis, A., Peletier, R. F., Knapen, J. H., and Falcón-Barroso, J. (2015). Stellar population synthesis models between 2.5 and 5  $\mu\text{m}$  based on the empirical IRTF stellar library. *MNRAS*, 449(3):2853–2874.
- Röck, B., Vazdekis, A., Ricciardelli, E., Peletier, R. F., Knapen, J. H., and Falcón-Barroso, J. (2016). MILES extended: Stellar population synthesis models from the optical to the infrared. *A&A*, 589:A73.
- Roychowdhury, S., Chengalur, J. N., Begum, A., and Karachentsev, I. D. (2010). Thick gas discs in faint dwarf galaxies. *MNRAS*, 404:L60–L63.
- Rubin, V. C., Burley, J., Kiasatpoor, A., Klock, B., Pease, G., Rutscheidt, E., and Smith, C. (1962). Kinematic studies of early-type stars. I. Photometric survey, space motions, and comparison with radio observations. *AJ*, 67:491–531.
- Rubin, V. C., Burstein, D., Ford, W. K., J., and Thonnard, N. (1985). Rotation velocities of 16 SA galaxies and a comparison of Sa, SB and SC rotation properties. *ApJ*, 289:81–104.
- Salo, H., Laurikainen, E., Laine, J., Comerón, S., Gadotti, D. A., Buta, R., Sheth, K., Zaritsky, D., Ho, L., Knapen, J., Athanassoula, E., Bosma, A., Laine, S.,

- Cisternas, M., Kim, T., Muñoz-Mateos, J. C., Regan, M., Hinz, J. L., Gil de Paz, A., Menendez-Delmestre, K., Mizusawa, T., Erroz-Ferrer, S., Meidt, S. E., and Querejeta, M. (2015). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G): Multi-component Decomposition Strategies and Data Release. *ApJS*, 219:4.
- Salpeter, E. E. (1955). The Luminosity Function and Stellar Evolution. *ApJ*, 121:161.
- Salucci, P. and Persic, M. (1999). The baryonic mass function of spiral galaxies: clues to galaxy formation. *MNRAS*, 309:923–928.
- Samurović, S. (2007). Dark Matter in Elliptical Galaxies. *Publications de l’Observatoire Astronomique de Beograd*, 81:1.
- Samurović, S. (2014). Investigation of dark matter and modified Newtonian dynamics in early-type galaxies through globular cluster systems. *A&A*, 570:A132.
- Samurović, S., Vudragović, A., and Jovanović, M. (2015). Dark matter and MOND dynamical models of the massive spiral galaxy NGC 2841. *MNRAS*, 451:4073–4085.
- Scalo, J. M. (1986). The stellar initial mass function. *FCPh*, 11:1–278.
- Schaye, J., Crain, R. A., Bower, R. G., Furlong, M., Schaller, M., Theuns, T., Dalla Vecchia, C., Frenk, C. S., McCarthy, I. G., Helly, J. C., Jenkins, A., Rosas-Guevara, Y. M., White, S. D. M., Baes, M., Booth, C. M., Camps, P., Navarro, J. F., Qu, Y., Rahmati, A., Sawala, T., Thomas, P. A., and Trayford, J. (2015). The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments. *MNRAS*, 446(1):521–554.
- Schulz, J., Fritze-v. Alvensleben, U., Möller, C. S., and Fricke, K. J. (2002). Spectral and photometric evolution of simple stellar populations at various metallicities. *A&A*, 392:1–11.
- Sersic, J. L. (1968). *Atlas de Galaxias Australes*. Observatorio Astronomico, Cordoba, Argentina.

- Shaya, E. J., Tully, R. B., Hoffman, Y., and Pomarède, D. (2017). Action Dynamics of the Local Supercluster. *ApJ*, 850(2):207.
- Sheth, K., Regan, M., Hinz, J. L., Gil de Paz, A., Menéndez-Delmestre, K., Muñoz-Mateos, J.-C., Seibert, M., Kim, T., Laurikainen, E., Salo, H., Gadotti, D. A., Laine, J., Mizusawa, T., Armus, L., Athanassoula, E., Bosma, A., Buta, R. J., Capak, P., Jarrett, T. H., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., Knapen, J. H., Koda, J., Helou, G., Ho, L. C., Madore, B. F., Masters, K. L., Mobasher, B., Ogle, P., Peng, C. Y., Schinnerer, E., Surace, J. A., Zaritsky, D., Comerón, S., de Swardt, B., Meidt, S. E., Kasliwal, M., and Aravena, M. (2010). The Spitzer Survey of Stellar Structure in Galaxies (S<sup>4</sup>G). *PASP*, 122:1397–1414.
- Silk, J. (1968). Cosmic Black-Body Radiation and Galaxy Formation. *ApJ*, 151:459.
- Silk, J. and Vittorio, N. (1987). Does Lower Omega Allow a Resolution of the Large-Scale Structure Problem? *ApJ*, 317:564.
- Sofue, Y. and Rubin, V. (2001). Rotation Curves of Spiral Galaxies. *ARA&A*, 39:137–174.
- Stilp, A. M., Dalcanton, J. J., Warren, S. R., Skillman, E., Ott, J., and Koribalski, B. (2013). Global H I Kinematics in Dwarf Galaxies. *ApJ*, 765:136.
- Stojković, N., Vukotić, B., and Ćirković, M. M. (2019). Habitability of Galaxies and the Application of Merger Trees in Astrobiology. *Serbian Astronomical Journal*, 198:25–43.
- Sullivan, W. T., I. (1982). *Classics in radio astronomy Turner Sullivan, III*. Reidel, Dordrecht.
- Swaters, R. A. (1999). *Dark Matter in Late-type Dwarf Galaxies*. PhD thesis, , Rijksuniversiteit Groningen, (1999).
- Swaters, R. A., van Albada, T. S., van der Hulst, J. M., and Sancisi, R. (2002). The Westerbork HI survey of spiral and irregular galaxies. I. HI imaging of late-type dwarf galaxies. *A&A*, 390:829–861.

- Tegmark, M., Strauss, M. A., Blanton, M. R., Abazajian, K., Dodelson, S., Sandvik, H., Wang, X., Weinberg, D. H., Zehavi, I., Bahcall, N. A., Hoyle, F., Schlegel, D., Scoccimarro, R., Vogeley, M. S., Berlind, A., Budavari, T., Connolly, A., Eisenstein, D. J., Finkbeiner, D., Frieman, J. A., Gunn, J. E., Hui, L., Jain, B., Johnston, D., Kent, S., Lin, H., Nakajima, R., Nichol, R. C., Ostriker, J. P., Pope, A., Scranton, R., Seljak, U., Sheth, R. K., Stebbins, A., Szalay, A. S., Szapudi, I., Xu, Y., Annis, J., Brinkmann, J., Burles, S., Castander, F. J., Csabai, I., Loveday, J., Doi, M., Fukugita, M., Gillespie, B., Hennessy, G., Hogg, D. W., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., Lamb, D. Q., Lee, B. C., Lupton, R. H., McKay, T. A., Kunszt, P., Munn, J. A., O'Connell, L., Peoples, J., Pier, J. R., Richmond, M., Rockosi, C., Schneider, D. P., Stoughton, C., Tucker, D. L., vanden Berk, D. E., Yanny, B., and York, D. G. (2004). Cosmological parameters from SDSS and WMAP. *PhRvD*, 69(10):103501.
- Tinsley, B. M. (1972). Galactic Evolution. *A&A*, 20:383.
- Trachternach, C., de Blok, W. J. G., Walter, F., Brinks, E., and Kennicutt, Jr., R. C. (2008). Dynamical Centers and Noncircular Motions in THINGS Galaxies: Implications for Dark Matter Halos. *AJ*, 136:2720–2760.
- Trager, S. C., Faber, S. M., Worthey, G., and González, J. J. (2000). The Stellar Population Histories of Early-Type Galaxies. II. Controlling Parameters of the Stellar Populations. *AJ*, 120(1):165–188.
- Tully, R. B. and Fisher, J. R. (1977). Reprint of 1977A&A....54..661T. A new method of determining distance to galaxies. *A&A*, 500:105–117.
- Tyson, J. A., Valdes, F., and Wenk, R. A. (1990). Detection of Systematic Gravitational Lens Galaxy Image Alignments: Mapping Dark Matter in Galaxy Clusters. *ApJL*, 349:L1.
- van de Hulst, H. C., Muller, C. A., and Oort, J. H. (1954). The spiral structure of the outer part of the Galactic System derived from the hydrogen emission at 21 cm wavelength. *BAN*, 12:117.



- van der Kruit, P. C. and Searle, L. (1981). Surface photometry of edge-on spiral galaxies. I - A model for the three-dimensional distribution of light in galactic disks. *A&A*, 95:105–115.
- van der Marel, R. P. and Franx, M. (1993). A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies. *ApJ*, 407:525–539.
- Verde, L., Oh, S. P., and Jimenez, R. (2002). The abundance of dark galaxies. *MNRAS*, 336(2):541–549.
- Walcher, J., Groves, B., Budavári, T., and Dale, D. (2011). Fitting the integrated spectral energy distributions of galaxies. *Ap&SS*, 331:1–52.
- Walter, F., Brinks, E., de Blok, W. J. G., Bigiel, F., Kennicutt, Jr., R. C., Thornley, M. D., and Leroy, A. (2008). THINGS: The H I Nearby Galaxy Survey. *AJ*, 136:2563–2647.
- Wang, W., Han, J., Cautun, M., Li, Z., and Ishigaki, M. N. (2020). The mass of our Milky Way. *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 63(10):109801.
- Wechsler, R. H. and Tinker, J. L. (2018). The Connection Between Galaxies and Their Dark Matter Halos. *ARA&A*, 56:435–487.
- White, M. (2001). The mass of a halo. *A&A*, 367:27–32.
- Young, P. A., Mamajek, E. E., Arnett, D., and Liebert, J. (2001). Observational Tests and Predictive Stellar Evolution. *ApJ*, 556(1):230–244.
- Zwicky, F. (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helvetica Physica Acta*, 6:110–127.

# Biografija autora

Milena Jovanović rođena je 27. decembra 1981. godine u Nišu. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Valjevu. Školske 2000/01. godine upisala je osnovne akademske studije na Matematičkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Astrofizika, gde je diplomirala 2010. godine sa prosečnom ocenom 8.31. Tokom jednog polugodišta školske godine držala je nastavu fizike u dve osnovne škole u Beogradu. Školske 2010/11. godine upisala je doktorske akademske studije na modulu Astronomija i astrofizika. Od februara 2011. godine zaposlena je na Astronomskoj opervatoriju u Beogradu kao istraživač pripravnik na projektu Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije „Vidljiva i nevidljiva materija u bliskim galaksijama: teorija i posmatranja” (ON176021, rukovodilac: dr Srđan Samurović). Sve ispite predviđene programom doktorskih akademskih studija položila je sa prosečnom ocenom 10.0, zaključno sa 2013. godinom. Od 2017. godine je u zvanju istraživač saradnik. Učestvovala je i na FP7 projektu Evropske komisije BELISSIMA (Belgrade Initiative for Space Science, Instrumentation and Modelling in Astrophysics, br. ugovora: 256772, koordinator: dr Srđan Samurović). Od 2016. angažovana je na poslovima pomoćnika urednika u časopisu Serbian Astronomical Journal. Saradnik je u Istraživačkoj stanici Petnica.

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а Милена Јовановић

број уписа 2023/2010

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

---

Одређивање барионске функције масе за узорак блиских галаксија

---

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 06.08.2021

*Milena Jovanović*

---

Прилог 2.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Милена Јовановић

Број уписа 2023/2010

Студијски програм астрономија-астрофизика

Наслов рада Одређивање барионске функције масе за узорак блиских галаксија

Ментор др Срђан Самуровић

Потписани Милена Јовановић

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, 06.08.2021.

Потпис докторанда

*Milena Jovanović*

Прилог 3.

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

---

Одређивање барионске функције масе за узорак блиских галаксија

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 06.08.2021.

Потпис докторанда

*Milena Jovanović*

---