



Universiteit
Leiden
The Netherlands

On the nature of early-type galaxies

Krajnović, D.

Citation

Krajnović, D. (2004, October 12). *On the nature of early-type galaxies*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/575>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/575>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

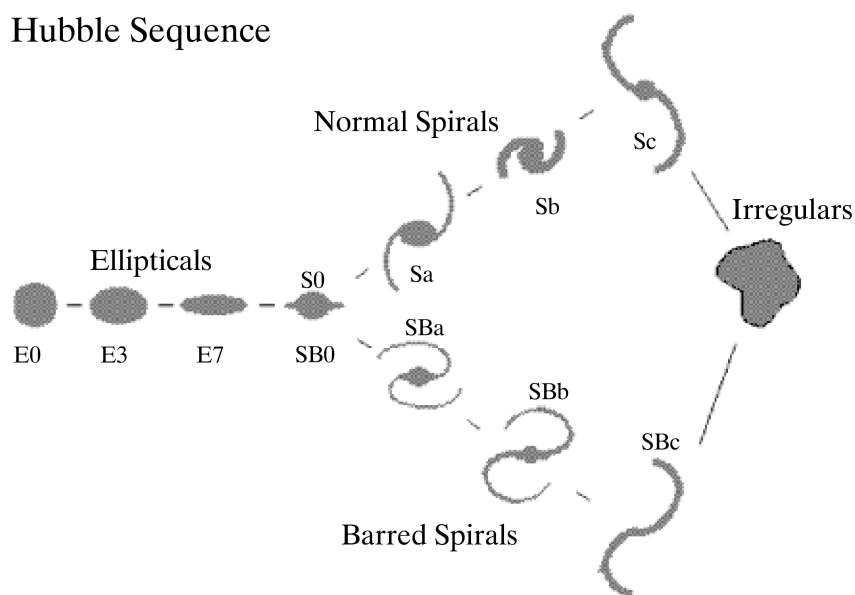
Hrvatski sažetak

Razumijevanje svijeta

PORIV za spoznajom i opisom svijeta osnovna je karakteristika čovjeka. Znamenit primjer tog poriva nalazi se na naslovnici ove disertacije. Keramički lonac, ukrašen usklađenim nizom znakova, star je otprilike 4500 godina. Izradio ga je zanatlija Vučedolske kulture, a iskopan je 1978. godine u Vinkovcima. Klasičnu Vučedolsku kulturu razvili su tokom europskog neolitika novodošli Indo-europljani. Ova raširena kultura nazvana je po svom središnjem lokalitetu na rijeci Dunav u istočnoj Hrvatskoj. Značenje znakova na loncu bilo je do nedavno nepoznato kada je arheolog Aleksandar Durman predložio da oni predstavljaju sazviježđa koja su dominirala europskim nebom prije pet tisućljeća. Polurazbijeni lonac iz Vučedola je vrlo vjerojatno najstariji Europski kalendar, kojeg su ljudi iz Vučedola koristili za organizaciju svakodnevnog života.

Prije pet tisuća godina, stočari Panonske nizine gledali su u noćno nebo. Primijetili su pravilnosti i stvorili složen sustav mjerenja vremena. Na taj način mogli su opisati bitnu značajku svijeta koristeći primitivna, ali direktna astronomska opažanja. Danas je astronomija znanost, koja je prošla put od *proricanja budućnosti* prvih astrologa do *objašnjavanja činjenica* suveremenih astronoma, opažanih modernim teleskopima i instrumentima koristeći zakone fizike. Ipak, u središtu astronomije kao znanosti čući ista želja koja je vodila ljude iz Vučedola: razumijeti, opisati i ukrotiti svijet oko nas.

Naše metode su puno složenije, no i astronomske teme su se promijenile. Astronomija je imala značajan utjecaj na ljude Vučedolske kulture podarivši im kalendar. On je bio izvor informacija važnih za život. Za razliku od nekih drugih znanosti u sadašnje vrijeme, astronomija ne utječe izravno na naš svakodnevni život. Moderna astronomska istraživanja su usmjerena na procese koji oblikuju Svemir, počevši od Sunca, njegovih susjeda, Mliječne staze, i drugih galaksija, do udaljenih kvazara i ostataka Velikog Praska. U širem smislu, astronomija danas je idealizirana potraga za spoznajom Svemira. Sukadno s tim, astronomija bilježi ljudsko poimanje svijeta. Napretci u astronomiji se odražuju u promjenama u filozofiji i kulturi. U 1960tima veličina Svemira se mijenjala gotovao svakog dana otkrićima sve udaljenijih kvazara. Sada se čini samo pitanje vremena kada će prva planeta nalik Zemlji biti otkrivena van Sunčevog sustava¹. Slijedeći korak biti će potraga za životom na takvoj planeti. Astronomija ne mijenja izravno naše živote, ali ima dugotrajan utjecaj na ljudsko društvo. Astronomija je naš prozor u složenost Svemira. Ova disertacija usredotočena je na posebnu temu astronomije: nastanak i evoluciju galaksija.



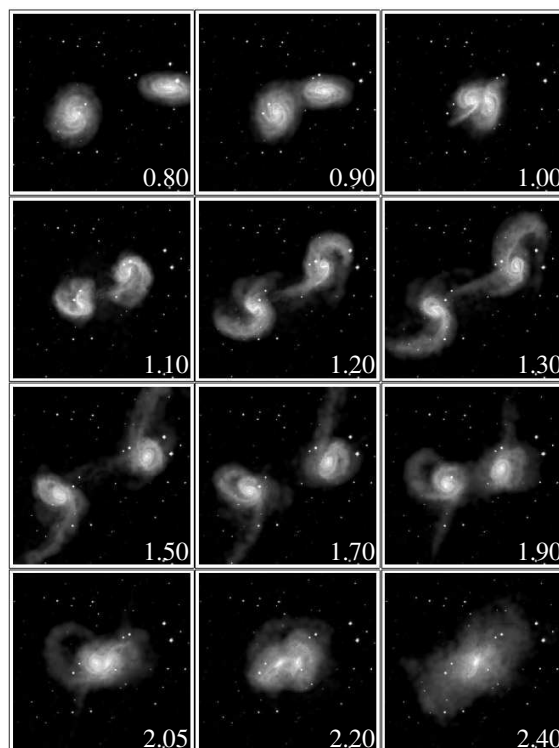
Slika 1 — Hubblov niz galaksija. Hubblov niz je osnova klasifikacije galaksija. Galaksije su klasificirane prema svom obliku. Na lijevoj strani nalaze se eliptične galaksije koje se međusobno razlikuju prema svojoj prividnoj spljoštenosti (eliptičnosti). Gotovo okrugle galaksije su nazvane E0, a najspljoštenije su E7. Nakon njih slijede lentikularne galaksije koje označavaju prijelaz od eliptičnih do disk galaksija. Disk galaksije imaju znamenite spiralne krakove (gore), ali postoje i spiralne galaksije s tzv. prečkama koje prolaze centrom i povezuju krakove spirala (dolje). Na samom kraju nalaze se nepravilne galaksije. U tu skupinu spadaju sve galaksije bez određenog oblika.

Galaksije ranog-tipa

Galaksije je vjerojatno najelegantnije opisao Immanuel Kant u 18. stoljeću kao “svemirske otoke”. Ni on niti itko drugi nije znao što su ustvari ti “svemirski otoci”. Izgledaju poput maglica na nebu, ali od čega su izgrađeni i koliko su udaljeni od Zemlje bilo je nepoznato do početka 20. stoljeća. Opažanja s 100 inčnim teleskopom na Mount Wilsonu pružila su prve naznake prave prirode galaksija. One su sastavljene od zvijezda i nalaze se daleko od našeg “svemirskog otoka”, Mliječne staze. Mnogo je različitih vrsta galaksija i obično su klasificirane prema svom prividnom obliku u četiri istaknute skupine (Slika 1). Razredovanje galaksija uveo je Edwin Hubble 1936. godine, a danas je poznato kao Hubblov niz galaksija (Hubblorov dijagram ili Hubblova tonska vilica su također često upotrebljavani izrazi). Niz započinje sa *eliptičnim* galaksijama koje se čine vrlo jednolike i jednostavne. Na drugom kraju su disk galaksije, sa svojim vrlo upadljivim spiralnim kracima. One se obično nazivaju *spiralnim* galaksijama, da se naglasi njihova uočljiva struktura. *Lentikularne* galaksije (često kratko zvane S0), koje nalikuju lećama, izgledaju kao prijelazni objekti između eliptičnih i spiralnih galaksija. One imaju istaknuti disk, bez značajne spiralne strukture, uronjen u skoro potpuno sferičnu raspodjelu zvijezda. U četvrtu skupinu galaksija pripadaju sve ostale galaksije bez pravilnog oblika, koje su prikladno nazvane *nepravilne* galaksije. Izrađujući niz Hubble je razmišljao o evoluciji galaksija. Spiralne galaksije, sa svojom zamršenom i lako uočljivom strukturom, bile su prirodni kandidati za složene i razvi-

¹Poznato je više od stotinu planeta sličnih Jupiteru u orbitama oko drugih zvijezda.

Slika 2 — Vremenski niz simulacije sudara dviju jednakih disk galaksija. Vrijeme (u milijardama godina) je označeno u donjem desnom kutu svake slike. Kada se galaksije približe po prvi put gravitacijske sile stvaraju izražene otvorene spirale. Nakon susreta, zvijezde i plin iz galaksija su izbačeni u obliku plimnih repova. Na kraju sudara diskovi su uništeni i pretvoreni u sferičnu nakupinu zvijezda i plina, pomalo nalik na eliptičnu galaksiju. S dopuštenjem V. Springela, MPA.



jene sustave, dok su eliptične galaksije bile primjer jednostavnih sustava. Lentikularne galaksije su pak bile stepenica između tih dviju vrsta galaksija. Iako ovo objašnjenje nije više prihvatljivo i evolucija galaksija ustvari “ide” u suprotnom smjeru na Hubblovom dijagramu, eliptične i lentikularne galaksije se još uvijek zovu galaksije ranog-tipa, a spiralne su galaksije sukladno poznate kao galaksije starog-tipa.

Galaksije se ne sastoje samo od zvijezda. One također sadrže plin i prašinu u različitim količinama, ovisno o Hubblovim tipu: galaksije ranog-tipa sadrže manje količine u odnosu na galaksije starog-tipa. U 1970tima otkrivena je nova sastavna komponenta spiralnih galaksija: ove galaksije su okružene tamnom materijom. Vjeruje se da su sve galaksije uronjene u haloe tamne tvari, ali opažački dokazi za tamnu tvar oko eliptičnih galaksija nisu potpuni. Neovisno o tome, priroda tamne tvari još uvijek nije poznata, iako opažnja jasno upućuju da je većina materije u Svemiru upravo ta tamna tvar. Teorija nastanka i evolucije galaksija mora moći objasniti sve ove opažalačke činjenice. Nažalost, životni vijek astronoma je puno kraći od vremena potrebnog za evoluciju galaksija. Astronomi stoga djeluju poput detektiva tražeći dokaze procesa koji su sudjelovali u nastajanju i daljnjem razvoju galaksija. Galaksije ranog-tipa posebno su tome pogodne jer sadrže male količine plina i prašine i, ne stvarajući nove zvijezde, sačuvali su nacрте svog nastanka.

Kratki vodič kroz nastanak i evoluciju galaksija

Galaksije potječu od fluktuacija u gustoći tamne tvari u ranom Svemiru. Područja veće gustoće, gravitacijski djelujući na okolinu, sakupljaju materiju starajući tako malene kozmičke objekte. Manji objekti se međusobno sudaraju i spajaju stvarajući sve veće

objekte. Oni su definirani gravitacijskim utjecajem tamne tvari, a u središtu se često nalazi plin u obliku diska. Pod određenim uvjetima, iz plina nastaju zvijezde koje obasjavaju prostor i otkrivaju novo nastale disk galaksije.

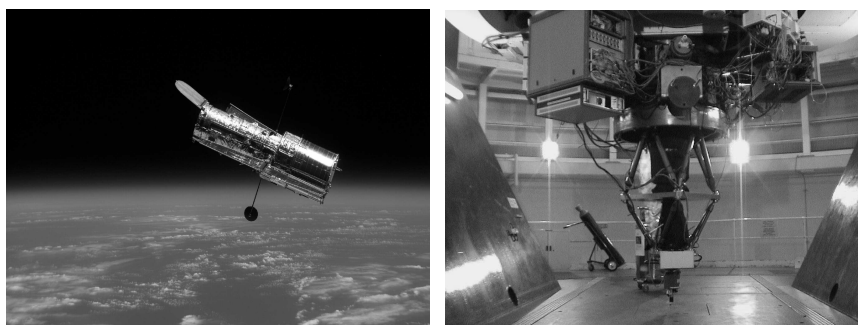
Sudaranje galaksija se i dalje odvija i ukoliko se dvije disk galaksije dovoljno približe spojit će se, a kao produkt nastat će eliptična galaksija. Slika 2 prikazuje simulaciju sudara dvije disk galaksije. Konačni rezultat, nakon nekoliko milijardi godina, je sferična raspodjela zvijezda. Međtim, eliptične galaksije nisu kraj evolucijskog puta galaksija. Eliptična galaksija može ponovo postati disk galaksija ukoliko uhvati plin iz međugalaktičkog prostora, koji će iznova stvoriti disk zvijezda. Ova igra sudara i hvatanja dešava se naizmjenice, ali ne opisuje sve procese koji utječu na evoluciju galaksija. Uz gore navedene brze, u galaksijama, djeluju i polaganiji procesi, koje se stoga i naziva sporim procesima. Ti procesi uglavnom su rezultat specifičnosti galaksija u kojem se zbivaju, poput njihovog oblika, oblika gravitacijskog potencijala (odnosno oblika haloa tamne tvari), količine plina ili interakcije sa susjednim manjim galaksijama. Nastanak spiralnih struktura, zvijezdanih prečki, prestenovala plina i mladih zvijezda tipične su posljedice spore unutarnje evolucije galaksija. Slika 1 Uvoda u ovu disertaciju shematski prikazuju osnovne procese koji djeluju u galaksijama.

Opazanje galaksija ranog-tipa

Astronomija je opažalačka znanost koja se od ostalih znanosti razlikuje po tome što ne možemo proizvoljno prilagođavati galaksije (ili ostale objekte) našim eksperimentima, kao niti promijeniti naš položaj u odnosu na njih. Na sreću, galaksija u Svemiru ima gotovo neizmerno mnogo, a i opažanjem udaljenih objekata, promatra se u prošlost, u mlađi Svemir, tako da je proučavanjem većeg broja galaksija moguće dokučiti njihov nastanak i evolucijski razvoj. Ipak, da bi dobili što potpuniji uvid u trodimenzionalnu strukturu i dinamiku galaksija, nužno je sakupiti podatke iz što raznovrsnijeg i većeg broja izvora. Za proučavanje strukture i dinamike eliptičnih galaksija, na primjer, potrebni su podaci o raspodjeli, kinematici i vrsti zvijezda, te o količini i raspodjeli plina i prašine. U ovoj je disertaciji, iz tog razloga, predstavljen širok opseg opažanja: s površine Zemlje i iz Svemira, od radio do optičkih valnih duljina.

Raspodjela zvijezda utvrđuje se slikanjem galaksija. Krajem 19. stoljeća fotografski aparat je revolucionirao astronomiju, a pojava digitalnih detektora, tzv. CCDa, sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća, omogućila je gotovo neslućeni napredak u proučavanju detalja svemirskih objekata. Ipak, pravi korak naprijed u istraživanju detalja galaksija bilo je lansiranje Hubbleovog svemirskog teleskopa (HST) u orbitu 1990. godine. Slika 3 prikazuje HST u orbiti. Svjetlost koju sakuplja zrcalo na HSTu ne prolazi kroz atmosferu, koja djeluje poput filtera odstranjajući i zaglađujući informacije koje donose fotoni iz udaljenih svemirskih objekata. Zaista, opažanja HSTom promijenila su naše poimanje "jednostavnih" eliptičnih galaksija, koje su pokazale komplicirane strukture odvojenih komponenti i malenih diskova prašine i zvijezda u svojim središtima.

Kinematiku i vrstu zvijezda u galaksiji moguće je istraživati snimanjem njihovih spektara. Svjetlost galaksije, koju teleskopi skupljaju i koja, prolazeći kroz prizmu, biva razložena po valnim duljinama, stvaraju zvijezde. Međutim, osim u najbližim



Slika 3 — Lijeva slika - Hubblov svemirski teleskop (HST) u orbiti. Instrumenti s HSTa korišteni su u studijama predstavljenim u drugom i trećem poglavlju. Desna slika - SAURON, dvodimenzionalni spektrograf, namješten na fokus 4.2m William Herschel teleskopa na La Palmi. Opažanja SAURONom korištena su u četvrtom i petom poglavlju ove disertacije. Otisnuto sa dopuštenjem NASAe i SAURON tima.

galaksijama (udaljenih do otprilike 3 milijuna svjetlosnih godina²), nije moguće opažati spektre pojedinih zvijezda, već snimljeni spektri nose integriranu informaciju o mnoštvu zvijezda koje se nalaze na našoj liniji gledanja. Tako proučavajući spektre galaksija mi ustvari istražujemo prosječne karakteristike mnoštva zvijezda. Ipak, potrebno je znati i od kuda iz galaksije, koja se vidi kao dvodimenzionalna projekcija na nebu, dolazi snimljeni spektar. Suvremena je tehnologija omogućila izradu posebnih *dvodimenzionalnih spektrografa*, koji dijele svjetlost po valnim duljinama, istovremeno bilježeći informaciju odakle je svjetlost došla s neba. Na taj način, krajnji rezultat je trodimenzionalni skup podataka s informacijom o položaju na nebu i valnoj duljini (x, y, λ). SAURON, prikazan desno na Slici 3, je upravo takav instrument. Nalazi se na William Herschel teleskopu na kanarskom otoku La Palmi i izgrađen je za proučavanje strukture i kinematike galaksija ranog tipa, kao i vrsta zvijezda koje se nalaze u njima.

Vodič kroz disertaciju

Teorija nastanka i evolucije galaksija je složena i sastoji se od mnogo dijelova koje treba dobro razumijeti i uklopiti u sukladnu sliku. Svako poglavlje ove disertacije posvećeno je jednoj strani teorije o nastanku i evoluciji galaksija. Istraživanja predstavljena u disertaciji usredotočena su na aktivnost, strukturu, kinematiku i dinamiku bliskih³ galaksija ranog-tipa.

Aktivne galaksije

Središnji dijelovi mnogih galaksija ranog-tipa odašilju zračenje koje nije zvjezdanog porijekla. Takva središta galaksija se nazivaju *aktivnim galaktičnim jezgrama* - AGJ. Trenutno shvaćanje aktivnosti u jezgrama galaksija se bazira na paradigmi da se u središtu

²Jedna svjetlosna godina je udaljenost koju svjetlost prođe u godinu dana i iznosi otprilike deset tisuća milijardi kilometara. Astronomi često koriste i jedinicu parsek, gdje je $1\text{pc} \sim 3.3$ svjetlosne godine.

³Blisko je vrlo relativan termin u astronomiji. Andromeda, galaksija slična našoj, nalazi se na otprilike 3 milijuna svjetlosnih godina. Galaksije u ovoj disertaciji, koje se smatra *blikim*, nalaze se na udaljenostima od oko 20 do 100 milijuna svjetlosnih godina, a astronomi će koristiti ovaj termin i na objekte koji su do 10 puta udaljeniji. Nakon toga počinje udaljeni Svemir.

svake aktivne galaksije nalazi masivni objekt, nazvan *crna rupa*, koji ima toliku masu da ništa, čak ni svjetlost, ne može uteći njegovom gravitacijskom djelovanju. Materija privučena gravitacijom crne rupe, pada na nju i tokom tog procesa snažno zrači u okolni prostor. U dalekom Svemiru postoje snažni AGJ-ovi; kvazari i radio galaksije su dva primjera. Međutim, jezgre bliskih galaksija, iako pokazuju određenu aktivnost, puno su slabije. Uoliko se uzme u obzir da su "tihe" bliske galaksije svojevrsni potomci "bučnih" dalekih galaksija, sve one moraju imati crne rupe u svojim jezgrama⁴. Jedan od mogućih razloga neaktivnosti u bliskim galaksijama je nepostojanje materijala (goriva), koji pada na crne rupe (strojeve) i prouzrokuje aktivnost u jezgrama.

Aktivnost u bliskim galaksijama je proučavana u **drugom poglavlju** disertacije. Skup galaksija, opažan s Very Large Array radio interferometrom i sa HSTom, je bio podijeljen na dva dijela: galaksije sa i bez prašine. Opažanja su pokazala da iako galaksije s prašinom češće pokazuju aktivnost u svojim jezgrama, galaksije bez prašine isto posjeduju aktivne jezgre. To znači da postojanje prašine vidljive sa HSTom nije nužan uvjet za postojanje AGJ u bliskim galaksijama.

Nuklearni zvjezdani diskovi

Opažanja Hubblovim svemirskim teleskopom otkrila su postojanje malenih ($< 1''$) zvjezdanih diskova u jezgrama bliskih galaksija ranog tipa. Ovi diskovi su vrlo tanki (30 pc u usporedbi s 300 pc tankog diska u našoj galaksiji), i često na neki način povezani s velikim diskovima koji postoje u nekim galaksijama. Zvjezdani diskovi su vrlo zanimljive strukture, koje se mogu iskoristiti za proučavanje centralnog gravitacijskog potencijala galaksija (npr. mjerenje centralnih gustoća i masa crnih rupa), ali i za istraživanje evolucije galaksija.

Dva su vjerojatna scenarija nastajanja nuklearnih zvjezdanih diskova. Jedan je vezan uz scenarijo interakcije galaksija, kada se veća galaksija spaja s manjom. Tada uhvaćeni plin tone do dna gravitacionog potencijala, do jezgre galaksije, i pri povoljnim uvjetima stvara disk. U interakciji sa crnom rupom u središtu, disk se dinamički stabilizira i stvara zvijezde. Po drugom scenariju, mali zvjezdani disk može nastati i pod utjecajem nekog od sporih procesa, na primjer, kao posljedica transporta materijala iz vanjskog dijela galaksije prema centru uzrokovanog nestabilnošću velikog galaktičkog diska. Moguće je da i kombinacije procesa djeluju u nastajanju nuklearnih zvjezdanih diskova. U svakom slučaju, ukoliko su diskovi imali drugačiji evolucijski put od ostatka galaksije, za očekivati je da će se to odraziti na razlikama u kemijskoj strukturi i starosti zvijezda.

U **trećem poglavlju** disertacije prikazana su opažanja četiri bliske galaksije s poznatim nuklearnim diskovima (NGC 4128, NGC 4570, NGC 4621 i NGC 5308). Galaksije su opažane s dva instrumenta na HSTu, rezultirajući sa spektrima i slikama trenutno

⁴Crne rupe su indirektno otkrivene u središtu 30tak bliskih galaksija na osnovu njihovog gravitacijskog utjecaja na kretanje plina i zvijezda u neposrednoj blizini. Njihove mase su, izgleda, povezane sa veličinom galaksije u kojoj se nalaze, a dosada otkrivene se kreću u rasponu od milijun do nekoliko milijardi sunčevih masa. U Svemiru postoje i manje, zvjezdane, crne rupe sa masom nekoliko puta većom od mase Sunca, za koje se vjeruje da nastaju u eksplozijama zvijezda. Porijeklo velikih crnih rupa u središtima galaksija nije poznato.

najviše moguće razolucije ($0''.05$, odnosno $0''.0455$)⁵. Opažanja su otkrila raznovrsne i pomalo neočekivane strukture u jezgrama, ne nužno povezane sa zvjezdanim diskovima. Zvijezde u proučavanim galaksijama su uglavnom stare, ali imaju različit kemijski sastav. Vjerojatno je da zvjezdani diskovi nastaju kombinacijom različitih brzih i sporih procesa. Na slikama galaksije NGC 4128 otkriven je i tranzijent, koji bi mogao biti prva zabilježena supernova u NGC 4128 galaksiji, ali čije stvarno porijeklo ostaje nepoznanica.

Dvodimenzionalne kinematičke mape

Ukoliko nema svemirskih objekata ispred i iza opažane galaksije, spektroskopskim opažanjima moguće je odrediti njezina kinematička svojstva. Brzinu gibanja jedne zvijezde moguće je odrediti analizom njezinog spektra, ali opažani spektri galaksije se sastoje od spektara mnogih zvijezda koje se nalaze na liniji gledanja. Te zvijezde imaju različite brzine, i posljedica toga je da su spektralne linije puno šire nego u spektru jedne zvijezde. Iz tog razloga, zajednički spektar donosi informaciju o raspodjeli brzina zvijezda u galaksiji duž linije gledanja.

Dvodimenzionalne kinematičke mape produkti su opažanja sa dvodimenzionalnim spektrografima. One prikazuju kako se kinematički parametar, poput brzine, mijenja ovisno o položaju u galaksiji projiciranoj na nebo. Mape su vizualno vrlo zahvalne, međutim potrebno ih je i pažljivo proučiti. U **četvrtom poglavlju** ove disertacije opisana je metoda kojom se mape mogu opisati i u detalje proučavati. Metoda se bazira na harmoničkoj analizi mapa, i slična je metodama korištenim u istraživanju površinskog sjaja galaksija (fotometrija) i analizi mapa brzina od radio opažanja. Iz tog razlog nazvana je *kinometrija*. Metoda je prezentirana, testirana i upotrebljena na modelima kinematičkih mapa, kao i mapama opažanja sa SAURONom. Iznenadujući preliminarni rezultat je da su dvodimenzionalne mape brzina opažanih eliptičnih galaksija vrlo slične mapama brzina zvijezda koje se gibaju po kružnim putanjama u diskovima, iako se zvijezde u eliptičnim galaksijama uglavnom ne nalaze u diskovima.

Dinamički modeli

Potpuno razumijevanje intrinzičnih oblika i struktura galaksija moguće je samo detaljnim dinamičkim modeliranjem. Stvaranje takvih modela je teoretski pothvat koje se osniva na zakonima fizike, a uključuje ideje i pretpostavke o istraživanim objektima (ili procesima). Ipak, samo modeli koji mogu reproducirati opažanja se smatraju fizikalnim. Teoretske konstrukcije su ograničene tek maštom ljudi, ali svijet oko nas je jedinstven. Da bi ga objasnila, teorija se mora slagati s opažanjima.

Peto poglavlje ove disertacije sadrži detaljnu dinamičku studiju zvjezdane i plinovite komponente eliptične galaksije NGC 2974. Opažanja se sastoje od opažanja sa zemaljskim i svemirskim teleskopima i dvodimenzionalnim spektrografom SAURONom, te su korištena u konstrukciji i provjeri teoretskih modela. NGC 2974 je neobična eliptična galaksija jer sadrži veliku količinu plina, koji je ioniziran zračenjem zvijezda. Dinamički modeli plinovite komponente galaksije su bazirani na pretpostavci da se

⁵Rukometna lopta na vrhu zagrebačke katedrale, gledana iz barke u Leidenu, bila bi velika otprilike $0''.04$ (lučne sekunde).

plin giba u tankom disku koji je nagnut pod određenim kutem prema našem pravcu gledanja. S obzirom da se plin giba u istom gravitacijskom polju kao i zvijezde, rezultati se mogu usporediti s rezultatima modeliranja zvijezdane komponente.

Opažanja zvijezda u galaksiji NGC 2974 upućuju da njihova raspodjela čini trodimenzionalnu strukturu sa osnom simetrijom. Prema tome potrebno je napraviti modele galaksije koji imaju istu simetriju. Elegantna metoda konstrukcije galaksija je Schwarzschildova metoda superpozicije zvjezdanih orbita. Metoda se bazira na ideji da su galaksije dinamički objekti koji se bolje mogu opisati kao nakupine neovisnih orbita nego kao nakupine zvijezda koje međudjeluju svojom gravitacijom. Pojedine orbite tada ne predstavljaju zvijezde, već skupine zvijezda i umjesto 10^{11} neovisnih zvijezda moguće je konstruirati galaksiju sa 10^4 neovisnih orbita. Koristeći kinematička opažanja galaksije NGC 2974 napravljeni su Schwarzschildovi modeli njezine zvjezdane komponente. Rezultati zvjezdanih modela se slažu sa rezultatima modela plina, iako je otkriveno da korišteni modeli ne mogu precizno odrediti nagib galaksije.

Ova studija je iskorištena i za detaljno testiranje Schwarzschildove metode konstrukcije osno simetričnih galaksija. Testovi su obavljani na teoretskoj galaksiji, dakle, modelu kojem se znaju sve osobine. Metoda se pokazala uspješnom, jer je odredila sve parametre korištenog modela galaksije, kao i njezinu unutarnju strukturu i raspodjelu zvjezdanih orbita. Ipak, testovi su potvrdili da se nagib galaksije, koristeći raspoloživa opažanja, ne može odrediti sa sigurnošću.

Pogled u budućnost

Osnovni koncepti nastanka i evolucije galaksija, kao i kozmološka pozadina procesa koji djeluju, se smatraju poznatim i oblikovani su u paradigmatu moderne astronomije. Mnogo je, ipak, neriješenih pitanja koja nas izazivaju i očekuju naš odgovor.

Istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji postavila su temelje budućem radu sa dvodimenzionalnim kinematičkim mapama galaksija ranog-tipa. Sljedeći korak je primijeniti kinometriju i dinamičke modele na većem broju galaksija te analizirati njihovu strukturu, kao i simetrije i svojstva koja se odražavaju na opažanim mapama i posljedica su procesa koji su oblikovali galaksije. Također, opažanja nuklearnih zvjezdanih diskova iskoristiti će se za mjerenje masa crnih rupa u tim galaksijama.

Općenito, napretci su mogući u opažanjima, ali i u konstrukciji teoretskih modela. Modeli galaksija za sada uzimaju u obzir poziciju i kinematiku, ali ne i vrste zvijezda. Galaksije su sastavljene od zvijezda različite starosti i kemijskog sastava, i ta se informacija također treba uvrstiti u modele da bi oni mogli u potpunosti opisati galaksiju, kao i njezinu prošlost. S druge strane modele treba generalizirati tako da mogu opisivati i galaksije koje imaju triakslialnu simetriju. Članovi SAURON tima započeli su već rad na ovim idejama.

S opažalačke strane, pojava teleskopa s 8 - 10 metarskim zrcalima opremljenim tehnologijom adaptivne optike, koja ispravlja utjecaj atmosfere, te široka upotreba dvodimenzionalnih spektrografa otvaraju nove opažalačke mogućnosti. One će otvoriti novi prozor u strukturu, kinematiku i vrste zvijezda bliskih galaksija, kao i uvid u svojstva udaljenih kozmoloških objekata od kojih galaksije nastaju.

Curriculum vitae

I saw the first light on June 10, 1975 in Zagreb, Croatia, where I also spent the next twenty five years. My parents encouraged me in all my interests, and astronomy did not play a major role in my adolescent years. In the winter of 1996, I was fortunate enough to have the opportunity to go on a working visit to Višnjan Observatory. The vastness of the night sky that my eyes then saw, enticed me to investigate the processes that turn the darkness into light. On November 12, 1999 I graduated from the Faculty of Mathematics and Natural Sciences of the University of Zagreb, with a study of “Ultra-high energy cosmic rays and Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff”, under the supervision of Dr. Mladen Martinis.

After a period of work at the Institute Ruđer Bošković, in the group of Dr. Martinis, I moved to Leiden to work on a PhD project “Nuclei of nearby early-type galaxies” under supervision of Dr. Walter Jaffe and Prof. Tim de Zeeuw. The goal of this project was to study in detail the structure, kinematics and dynamics of nearby galaxies using observations from the Hubble Space Telescope and by the new integral-field spectrograph, SAURON, at the William Herschel Telescope. During this project, I joined numerous observing runs at the William Herschel Telescope on La Palma, the Canada-France-Hawaii Telescope on Mauna Kea, and the MDM telescope on Kitt Peak. I participated in a NOVA fall school in Dwingeloo (2000), in conferences on La Palma (2001) and in Ringberg (2002), in the IAU Symposium in Sydney (2003) and the Lorentz Center meeting with the Nukers (2004). During the last four years I have taken part in all meetings of the SAURON team, of which I become a full member in 2003. I enjoyed organising the seasons of the observatory football team, as well as helping and participating in Science and Open day activities. I learned a great deal by assisting in the course of Active Galactic Nuclei given by Prof. Tim de Zeeuw.

My investigations of light in the Universe will continue at Oxford University where I will join the group of Prof. Roger Davies.

Nawoord / Acknowledgments

FOUR years ago I started on a journey, with two suitcases and a back-pack. How lonely I felt on that September day! The journey is about to come to its end, and I feel everything but alone. During the last four years I carried old friendships along, but I also met so many interesting people on the way. The last four years were not only spent on the work presented in this thesis, and you all made them pass too quickly.

I am greatly indebted to Michele Cappellari, who was always available and had ready advice that helped in the making of this thesis. I am also grateful to Richard, Glenn, Ellen and Jesus for numerous discussions and patiently letting me use their computers. My sincere thanks go to the members of the SAURON team, who offered so much inspiration necessary for finishing this thesis. I am proud to be a member of this team. I am very grateful to Anne-Marie Weijmans for correcting and adding many a beauty mark to "my Dutch" in the Nederlandse samenvatting. I am greatly indebted to the secretarial support of Marja Zaal, Kirsten Groen and Jeanne Drost. The members of the Leiden computer group deserve all the praise, for readily answering all my questions and often working after-hours to make the system reliable. I am also grateful to Prof. Pavlovski for telling me The Netherlands is the place to be, and to Dr. Martinis for encouraging and helping me to go. I have enjoyed the hospitality of the Johns Hopkins University in Baltimore, where a part of this thesis research was conducted. I thank het Leids Kerkhoven Bosscha Fonds for financial support. I would also like to thank M.E.J. van den Bos - van Sambeek and the workers at IPA/ECM for helping an "allochtoon" to feel at home.

Dragi moji roditelji, bez vaše dobrote, podrške i pouzdanja u mene, a ponajviše bez vas samih, sigurno ne bih pisao ove redove i zato ovu knjigu posvećujem vama. Brate moj, ti i tvoja obitelj ste bili uvijek spremni pomoći i razveseliti me. MariaRosa, you melted most of the stress and helped along the way so much!

There are many people at the Sterrewacht that made the past four years unforgettable. The friendship with Wouter and Kirsten started over combined cooking and Dutch lessons, and it went on to many relaxing activities, trips and outings. Gijs, thanks for the hint to put a lot of onion on a herring. Garrelt, I enjoyed our cycling trips. Kirsten and Richard, I will never forget all the tasty meals you cooked for me, as well as your support, friendship, books and, of course, the name of the best whiskey ever. Pedro and Ivo, our outings, movies and Friday evening discussions kept me sane in the last year. Mariska, Erik-Jan, Kristen, Nadine, spelers van de Forza voetbal team, Zan, Ammerentie, Carlo, Jaap, Robb en de andere schermers van de LUSV, hartelijk bedankt voor alles. Joško, Bojan, Robi, Fanči, Hrčo, Ico, Božo, Šime, Hrvoje i Tomo - naši razgovori, susreti, bordanja, ronjenja, morski i zagrebački provodi, nezaboravni su trenutci koji su smanjivali udaljenost od domovine.

At the end I would like to thank all the good people of Leiden, who made my stay so enjoyable and made me feel at home here. The hardest part of the PhD project comes now: to leave you all.