

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/20961> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Mosleh, Moein

**Title:** The stellar mass-size evolution of galaxies from  $z=7$  to  $z=0$

**Issue Date:** 2013-06-12

# Nederlandse samenvatting

## Geschiedenis

Aan het begin van de twintigste eeuw was het algemeen aanvaard dat onze Melkweg bijna het hele Universum vulde. Pas in de jaren '20 van de vorige eeuw werden er aanwijzingen gevonden voor sterrenstelsels buiten onze Melkweg. Pioniers zoals Edwin Hubble vonden bewijs dat veel van de waargenomen "planetaire nevels" eigenlijk sterrenstelsels buiten onze Melkweg zijn. Grote aantallen sterrenstelsels zijn sindsdien gevonden en waargenomen. Om op een effectieve manier over deze objecten te kunnen praten werd door astronomen besloten om sterrenstelsels te classificeren aan de hand van hun structuur en vorm, of kortweg morfologie. Eén van de eerste classificatieschema's werd geïntroduceerd door Edwin Hubble (1926), en is bekend geworden als Hubble's Stemvork. Dit schema, dat vandaag de dag nog steeds gebruikt wordt, onderscheidt sterrenstelsels als elliptisch, lenticulair, spiraalvormig, of onregelmatig. Elke klasse kan op zijn beurt weer opgesplitst worden in subklassen aan de hand van extra kenmerken, zoals bijvoorbeeld de aanwezigheid van een balk. De verschillen tussen deze type sterrenstelsels reflecteren de verschillen in hun fysieke eigenschappen. Sinds de eerste classificaties is het doel van astronomen geweest om deze sterrenstelsels en hun fysieke eigenschappen in meer detail te bestuderen.

Men ontdekte dat spiraalvormige sterrenstelsels andere sterpopulaties hadden dan elliptische. De hoeveelheid gas en recente gevormde nieuwe sterren in spiraalstelsels zijn verschillend ten opzichte van elliptische sterrenstelsels, en verder hebben ze blauwere kleuren. De sterpopulaties van elliptische sterrenstelsels zijn oud, met roedere kleuren, en elliptische stelsels zijn gemiddeld zwaarder dan spiraalstelsels (Kauffmann et al. 2003, Blanton et al. 2005). Over het algemeen vormen observationele eigenschappen zoals kleur, vorm, helderheid, huidige sterformatie, stellaire en dynamische massa, circulaire snelheid, en snelheidsdispersie de empirische grondslag voor het onderscheiden en het bestuderen van de onderliggende fysica in sterrenstelsels (zie bijvoorbeeld Blanton & Moustakas 2009).

De diversiteit aan verschillende soorten sterrenstelsels in het nabije Universum leidde tot de vraag waar deze verschillende types vandaag komen. Astronomen proberen daarom het onderliggende verhaal te ontdekken over de vorming en evolutie van sterrenstelsels, vanuit zowel theoretisch als observationeel oogpunt. Het theoretische raamwerk afkomstig uit de jaren 1960-70 (bijv., Eggen et al. 1962, Sandage et al. 1970, Press & Schechter 1974), beschrijft de vorming van sterrenstelsels vanuit gravitationele instabiliteiten, ontstaan uit perturbaties in de verdeling van donkere materie en condensatie van gas.

Volgens de huidige theorie voor de vorming van sterrenstelsels geldt dat, zodra een

halo van donkere materie ineens stort, het gas binnenin deze halo zeer snel afkoelt. Deze afkoeling vermindert de druk van het gas; om te voorkomen dat al het gas naar het centrum valt is een hoeveelheid impulsmoment nodig (ontstaan uit getijdenkrachten in het jonge Universum). Dit zorgt ervoor dat het gas samenkomt in een roterende schijf (zie bijvoorbeeld, Mo et al. 1998). Echter, verschillende theoretische modellen gebruiken verschillende aannames voor de dichtheidsprofielen van de halo van donkere materie, evenals voor de initiële afhankelijkheid van het gas-impulsmoment op de halo van donkere materie. Het is onduidelijk of het gas-impulsmoment kan veranderen met de tijd, of hoe sterformatie en feedback processen een effect hebben op de structuur van sterrenstelsels, zoals bijvoorbeeld hun afmeting.

Er zijn kortweg twee verschillende scenario's voor de formatie van de *bulge* (centrale verdikking) van spiraalsterrenstelsels. Men gaat ervan uit dat ze gevormd worden door een botsing van twee sterrenstelsels, of door de instabiliteit van de schijf. De formatie van de bulge door middel van een botsing van twee sterrenstelsels, vereist de aangroei van gas op een later moment om een schijf te vormen rond de bulge. Daarom is het goed mogelijk dat in dit scenario de kern en de schijf verschillende sterpopulaties hebben. Bij een scenario met een instabiele schijf zal materiaal dat al aanwezig is de bulge vormen. Toch zijn er nog veel extra aannames nodig (bijvoorbeeld feedback processen) om een compleet beeld te krijgen over de vorming en evolutie van typische spiraalsterrenstelsels.

De vorming van elliptische sterrenstelsels wordt ook niet goed begrepen. Een van de mogelijke mechanismen voor de formatie van deze elliptische sterrenstelsels is door middel van een botsing van twee sterrenstelsels. Uit simulaties van botsende schijfsterrenstelsels is gebleken dat globale eigenschappen van elliptische sterrenstelsels gereproduceerd kunnen worden (bijv., Hernquist 1992). Ondanks het feit dat dit algemene model veel simpele karakteristieken voor deze sterrenstelsels goed kan voorspellen blijven er veel aspecten die niet overeen komen met waarnemingen.

Om die reden blijven directe waarnemingen essentieel om de formatiemodellen voor sterrenstelsels te testen. Het is van groot belang dat er niet alleen wordt gekeken naar complete verzamelingen van nabije sterrenstelsels, maar ook naar grote verzamelingen van sterrenstelsels op het moment dat ons Heelal jonger was. Om deze reden is het identificeren van de eerste en verste sterrenstelsels steeds belangrijker geworden sinds de midden-jaren '70. In de jaren '90 verschoof de waarneembare grens van verre sterrenstelsels naar roodverschuiving  $z \sim 1 - 4$ , wat overeenkomt met een terugkijktijd van  $\sim 7 - 12$  miljard jaar. Dankzij zeer diepe waarnemingen zijn in de laatste tien jaar de verzamelingen hoge-roodverschuiving sterrenstelsels enorm gegroeid en is de observati-  
onele limiet verder vooruitgeschoven naar  $z \sim 10$  (Bouwens et al. 2012).

## Schalingrelaties

Een van de belangrijkste onopgeloste problemen in de astrofysica is het begrijpen van de formatie en evolutie van sterrenstelsels. Er zijn veel complementaire manieren om de evolutie van sterrenstelsels te bestuderen en om de connectie te vinden tussen verre

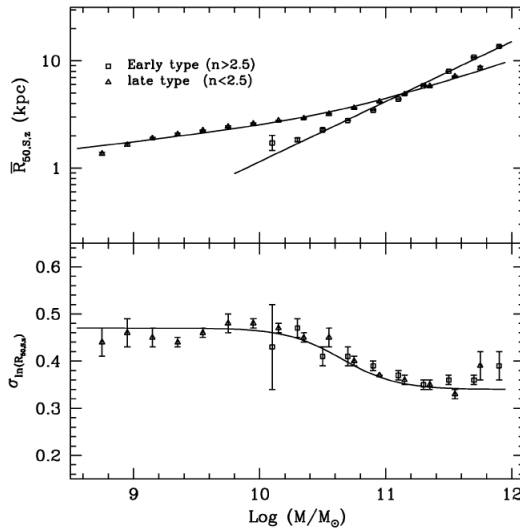
sterrenstelsels en sterrenstelsels in het huidige Heelal. De meeste geaccepteerde methodes zijn of gericht op de evolutie in de helderheids- of massafuncties van sterrenstelsels, of op de evolutie in de hoeveelheid sterformatie of stellaire massa dichtheid, of op de evolutie van de waargenomen schalingrelaties van sterrenstelsels. Neem bijvoorbeeld de helderheidsfunctie; deze beschrijft het aantal sterrenstelsels met een bepaalde helderheid. Dit kan op zijn beurt gebruikt worden om het totale aantal sterrenstelsels te bepalen op verschillende tijdstippen. Op deze manier geeft de evolutie van de helderheidsfunctie met roodverschuiving ons essentiële informatie om de evolutie van sterrenstelsels te begrijpen.

Sterrenstelsel tonen een grote verscheidenheid aan fysieke eigenschappen zoals helderheid, stellaire massa, afmeting en rotationele snelheid. Sterrenstelsel vertonen goed gedefinieerde schalingrelaties tussen deze eigenschappen. Voor spiraalstelsels, bijvoorbeeld, wordt het verband tussen de helderheid en de rotationele snelheid beschreven door de ‘Tully-Fisher’ relatie (Tully & Fisher 1977). Dit is kortweg de correlatie tussen de dynamische massa en de helderheid van sterrenstelsels. De relatie tussen de snelheidsdispersie en de helderheid van elliptische sterrenstelsel is bekend als de ‘Faber-Jackson’ relatie (Faber & Jackson 1976), waarbij elliptische sterrenstelsels met een hogere snelheidsdispersie helderder zijn.

Het is essentieel om deze schalingrelaties te bestuderen over een groot bereik in roodverschuiving. Dit kan ons helpen vast te stellen hoe sterrenstelsels zich bewegen binnen deze relatie en maakt het dus mogelijk om verschillende evolutionaire modellen te testen. Over het algemeen geldt dat het bepalen van de helling, nulpunt en spreiding rond deze relaties op verschillende tijdstippen van fundamenteel belang is om de verschillende modellen voor de formatie voor sterrenstelsels te testen.

Echter, er zijn een aantal uitdagingen om de benodigde precisiewaarnemingen te verkrijgen. Om bijvoorbeeld de rotationele snelheid of snelheidsdispersie te meten voor sterrenstelsels op hoge roodverschuiving zijn diepe spectroscopische observaties vereist. Het verkrijgen van een groot aantal van deze metingen is een tijdsintensief proces. Daar komt bij dat als sterrenstelsels minder helder worden de onzekerheid van deze metingen toeneemt. Om deze reden is het bepalen van correlaties tussen sommige eigenschappen van sterrenstelsels bijzonder moeilijk op hoge roodverschuiving.

Van deze schalingrelaties is degene tussen de stellaire massa en de afmeting van sterrenstelsels bijzonder belangrijk. De afmeting van een sterrenstelsel kan worden bepaald door middel van waarnemingen in een enkele filter (fotometrie). De stellaire massa van een sterrenstelsel kan ook robuust worden gemeten met behulp van fotometrie op vele verschillende golflengtes en precieze modellen voor sterpopulaties. Het is daarom minder moeilijk om een goede schatting te maken voor de afmeting en massa als het gaat om grote hoeveelheden sterrenstelsels op hoge roodverschuiving in vergelijking met de spectroscopische metingen zoals eerder beschreven. Daar komt bij dat de stellaire massa en de afmeting van sterrenstelsels twee belangrijke ingrediënten zijn voor het karakteriseren van sterrenstelsels en belangrijke fysische betekenis hebben. Het bestuderen van deze eigenschappen op verschillende tijdstippen in het Heelal zal bijdragen in het onderzoek naar hoe de structuur van nabije sterrenstelsels is ontstaan en wat de eigenschappen zijn van hun voorgangers op hoge roodverschuiving. In het kort, het kan ons helpen om de verschillende evolutionaire scenario’s voor de formatie en evolutie van sterrenstelsels af

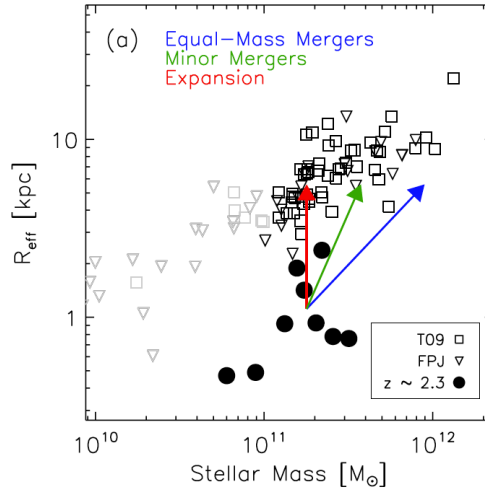


**Figuur 1** – De stellaire massa-grootte relatie voor spiraal- en elliptische sterrenstelsels in de SDSS (bovenste paneel) en de dispersie in de afmetingen als een functie van stellaire massa (onderste paneel) uit de studie door Shen et al. (2003).

te bakenen.

De relatie tussen de stellaire massa en de afmeting van sterrenstelsels in het huidige Heelal is voor het eerst beschreven in Kauffmann et al. (2003), en goed gekarakteriseerd door Shen et al. (2003), die gebruik maken van een verzameling sterrenstelsels in de Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Het bovenste paneel van Figuur 1 laat de massa-grootte relatie zien voor spiraal- en elliptische sterrenstelsels zoals bestudeerd door Shen et al. (2003). De relatie is verschillend voor spiraal- en elliptische sterrenstelsels. Op hoge massa geldt dat spiraalsterrenstelsels een steilere relatie hebben in vergelijking met elliptische. Dit reflecteert verschillen in de formatiemechanismen van elk type sterrenstelsel. De spreiding in de afmetingen (onderste paneel van Figuur 1) laat ook een variatie zien als functie van de stellaire massa: de spreiding neemt af voor massievere sterrenstelsels.

De eerste baanbrekende onderzoeken naar de afmetingen van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving werden gedaan in de jaren '90 (bijv., LBGs op  $z \sim 3$  door Giavalisco et al. (1996), of Lilly et al. (1998) sterrenstelsels tot  $z \sim 1$ ). Echter, de resultaten van deze verschillende onderzoeken waren niet in overeenkomst, mede veroorzaakt door de moeilijkheidsgraad om een groot aantal van deze sterrenstelsels te meten op hoge roodverschuiving, maar ook door selectie-effecten voortkomend uit de oppervlakte helderheid limiet. Deze studies naar de helderheid-grootte relatie van sterrenstelsels verbeterden later door het gebruik van diepe waarnemingen vanaf de grond en vanuit de ruimte. Deze onderzoeken lieten zien dat sterrenstelsels in het jonge Heelal kleiner waren in vergelijking met sterrenstelsels met een vergelijkbare massa/helderheid in het lokale Universum



**Figuur 2** – De relatieve distributie van de stellaire massa en afmeting van dode sterrenstelsels op  $z \sim 2$  en in het nabije Universum. De verschillende pijlen laten de voorspelling zien voor elk model als functie van roodverschuiving. (Figuur afkomstig uit Bezanon et al. (2009)).

(bijv., Trujillo et al. 2006b, Zirm et al. 2007, van Dokkum et al. 2008). Dit betekent dat de afmeting van sterrenstelsels, gegeven een stellaire massa, moeten groeien in tijd met maximaal een factor  $\sim 6$ .

Dit proces van groei in de afmeting van sterrenstelsels kan verschillend zijn voor elke type en kan variëren op elk tijdstip. Stervormende sterrenstelsels op hoge roodverschuiving (bijv op  $z \sim 2$ ), hebben een grotere fractie gas per stellaire massa in vergelijking met hun tegenhangers op lage roodverschuiving (e.g., Erb et al. 2006). Een mogelijke verklaring voor de groei in afmeting voor deze sterrenstelsels zou kunnen worden gegeven door de aanwas van gas op de schijf wat weer omgezet wordt in nieuwe sterren (bijv., Law et al. 2012).

Verschillende observaties hebben verder laten zien dat elliptische sterrenstelsels op hoge roodverschuiving ook significant kleiner zijn dan stelsels op lage roodverschuiving. Er zijn twee belangrijke vraagstukken voor deze sterrenstelsels. Allereerst: hoe zijn deze sterrenstelsels gevormd op hoge roodverschuiving? En ten tweede: hoe verhouden deze sterrenstelsels zich tot hun lokale analogen. De formatie van deze compacte dode sterrenstelsels wordt nog nauwelijks begrepen. Niettemin zijn verscheidene mechanismen voorgesteld om de groei in afmeting van deze sterrenstelsels te verklaren. De vaakst voorkomende voorbeelden zijn door middel van grote botsingen, kleine botsingen, of adiabatische expansie (bijv., Khochfar & Silk 2009, Naab et al. 2009, Bezanon et al. 2009, Fan et al. 2008). Deze verschillende mechanismen kunnen de stellaire massa en massa-profielen op verschillende manier veranderen.

De waargenomen stellaire massa-grootte relatie voor deze massieve dode sterrenstel-

sels zou kunnen helpen om te bepalen welke van de verschillende modellen de juiste is. Botsingen van sterrenstelsels met weinig gas en met dezelfde massa (grote botsingen) kunnen de afmeting en de stellaire massa van deze sterrenstelsels verdubbelen. Kleine botsingen zorgen voor een grotere groei in afmeting ten opzichte van de groei in stellaire massa, en dit proces conserveert de centrale dichtheid en snelheidsdispersies. Het adiabatische expansie scenario voorspelt dat een grote hoeveelheid materiaal efficiënt wordt uitgestoten door middel van een vorm van feedback (bijv. Quasar feedback). Echter, in dit proces wordt de centrale dichtheid en de snelheidsdispersie van een elliptisch sterrenstelsel veranderd (zie Figuur 2 voor meer details). Door de verschillende schalingrelaties op verschillende roodverschuivingen (tijdstippen) te vergelijken met de resultaten van simulaties kunnen we de verschillende scenario's toetsen voor de vorming en evolutie van sterrenstelsels.

## Dit Proefschrift

De onzekerheden geassocieerd met de waargenomen eigenschappen van sterrenstelsels kunnen worden verminderd door extra observaties die gebruik maken van diepere data met grotere gebieden aan de hemel en goed gedefinieerde selectiemethoden. Metingen op meerdere golflengtes zijn krachtige instrumenten voor dit soort studies. Door gebruik te maken van de snelle recente ontwikkeling op het gebied van infrarood metingen van sterrenstelsels, en met behulp van aanvullende optische en nabije-infrarood waarnemingen, is het nu mogelijk geworden om de eigenschappen van verschillende typen sterrenstelsels over een groot bereik in roodverschuiving te bestuderen en de observationele limieten verder vooruit te schuiven tot het tijdstip van de formatie van de eerste sterrenstelsels ( $z \sim 10$ ).

In dit proefschrift ligt de focus op het bestuderen van de structurele eigenschappen van sterrenstelsels, zoals hun afmetingen en helderheidsprofielen, en te analyseren hoe deze eigenschappen veranderen als functie van tijd. In het bijzonder bestuderen we de stellaire massa-grootte relatie van sterrenstelsels tussen  $z = 7$  en  $z = 0$ , door gebruik te maken van recente diepe observaties in het nabije infrarood. De combinatie van diepe optische en nabije-infrarood waarnemingen maakt het mogelijk om de spectra van sterrenstelsels te karakteriseren over een groot bereik in roodverschuiving, in het bijzonder tijdens de piek in de sterformatie activiteit ( $z \sim 2$ ). Het bestuderen van de eigenschappen van sterrenstelsels en het bepalen van de schalingrelaties op verschillende tijdstippen is van groot belang om onderscheid te kunnen maken tussen de verschillende fysische processen die invloed zouden kunnen hebben op de vorming van deze sterrenstelsels (bijv., aanwas van gas op sterrenstelsels, of grote/kleine botsingen en feedback effecten).

*Hoofdstuk 2:* In dit hoofdstuk presenteren we de eerste studie naar de evolutie van de afmetingen van sterrenstelsels die gebruik maakt van een verzameling van objecten met een spectroscopische roodverschuiving tussen  $z \sim 0.5 - 2.5$  in het GOODS-Noord veld. Over het algemeen maken studies slechts gebruik van fotometrische roodverschuivingen; door stelsels met spectroscopische roodverschuivingen te gebruiken kunnen we

belangrijke selectie effecten verwijderen. Verder bestuderen we de afmeting van verschillende type UV-heldere stervormende sterrenstelsels op hoge roodverschuiving. Dat wil zeggen, we meten de afmetingen van verschillende soorten sterrenstelsels, zoals Lyman Break Sterrenstelsels, BM/BX sterrenstelsels, en Lyman Break analogen, op een roodverschuiving van  $z \sim 1$ . Bovendien vergelijken we de afmetingen van deze sterrenstelsels met andere type stervormende sterrenstelsels, zoals BzKs en sub-millimeter sterrenstelsels (SMGs). De positie van deze sterrenstelsels ten opzichte van de massa-grootte relatie kan aanwijzingen geven over hun connectie met andere soorten sterrenstelsels.

*Hoofdstuk 3:* Met de komst van de recent geïnstalleerde Wide Field Camera 3 (WFC3) op de *Hubble Space Telescope* en de daarmee gemaakte ultradiepe nabije-infrarood observaties van de Hubble Ultra Deep Field (HUDF), is het mogelijk geworden om een groot aantal nieuwe kandidaat-Lyman Break Sterrenstelsels (LBGs) te identificeren, reikend tot de beginfase van de formatie van de eerste sterrenstelsels (bijv. tot  $z \sim 8$ ). De meeste onderzoeken zijn vooral gericht geweest op de evolutie van de helderheidsfunctie, stellaire massa, en mate van sterformatie in LBGs op deze roodverschuiving (bijv., Bouwens et al. 2011, Gonzalez et al. 2011). Echter, de stellaire massa-grootte relatie van deze sterrenstelsels op  $z \gtrsim 4$  zijn nog niet in detail onderzocht. In dit Hoofdstuk maken we daarom gebruik van de ultra diepe WFC3 nabije-infrarood en IRAC observaties in de HUDF en het Early Release Science (ERS) veld, om de stellaire massa-grootte relatie van LBGs te bestuderen tot een roodverschuiving van  $z \sim 7$ .

Op  $z \gtrsim 4$  wordt optisch licht roodverschoven naar het mid-infrarood, wat een probleem is voor het bepalen van stellaire massa's. Met de Spitzer Space Telescope is het mogelijk om gevoelige fotometrische metingen uit te voeren op deze golflengtes; helaas zorgt zijn grote PSF voor problemen, doordat sterrenstelsels optisch vermengen. Echter, er bestaan robuuste technieken om voor deze versmeerde objecten individueel de fotometrie te bepalen, wat weer gebruikt kan worden om de stellaire massa van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving accuraat te bepalen (Labbé et al. 2006). Bovendien hebben we de afmetingen van deze stelsels gemeten met een meettechniek (uitgaande van een Sérsic model) die consistent is met de manier waarop dit veelal wordt gedaan op lagere roodverschuivingen. Met behulp van deze methoden zijn we in staat om de stellaire massa-grootte relatie te bepalen voor sterrenstelsels tot  $z \sim 7$ .

*Hoodstuk 4:* De stellaire massa-grootte relatie van sterrenstelsels in het huidige Heelal kan gebruikt worden als een basislijn voor de evolutie van de afmetingen van sterrenstelsels als een functie van tijd. Om die reden bestuderen we in dit Hoofdstuk de massa-grootte relatie voor een verzameling van sterrenstelsels op  $z = 0.01 - 0.02$ , waarbij de verzameling is opgedeeld aan de hand van algemene classificatiemethoden. We bestuderen verschillende technieken om de afmetingen van sterrenstelsels te bepalen: een enkel Sérsic profiel, een twee-componenten Sérsic profiel, en een non-parametrische methode, met als doel om de systematische onzekerheid te kwantificeren die bij elke techniek hoort. Tot slot testen de we de potentiële systematische fouten in de bepaling van afmetingen op hoge roodverschuiving door onze sterrenstelsels op  $z = 0$  artificieel te verschuiven naar  $z = 1$  en de metingen opnieuw uit te voeren, gebruik makend van een enkel Sérsic profiel.



*Hoofdstuk 5:* Vele studies hebben aangetoond dat de meerderheid van sterrenstelsels een kleur-morfologie relatie vertoont, zowel op lage als hoge roodverschuiving. In andere woorden, morfologische transformatie en het einde van sterformatie zouden gecorreleerd kunnen zijn. Echter, er is een populatie van rode, dode spiraal sterrenstelsels (zonder enige vorm van sterformatie), als eerste opgemerkt door van den Bergh (1976) en Couch et al. (1998), die niet binnen deze relatie past.

In dit Hoofdstuk maken we gebruik van zorgvuldig geselecteerde schijfstelsels (op  $z \sim 0$ ) uit de Galaxy Zoo morfologische catalogus (visueel geselecteerd), om een verzameling op te bouwen van echt passieve schijf sterrenstelsels. We proberen de verschillende fysische processen te onderzoeken die verantwoordelijk kunnen zijn voor stopzetten van de sterformatie in deze rode passieve spiraalsterrenstelsels zonder de spiraal morfologie te verstoren. We bestuderen de eigenschappen van het stof en stellaire populaties in deze sterrenstelsels in vergelijking tot blauwe, nog levende spiraalstelsels. Bovendien analyseren wij het effect van de omgeving op deze sterrenstelsels en onderzoeken we of er aanwijzingen zijn voor AGN activiteit. Verder onderzoeken wij de fractie van objecten met bepaalde morfologische kenmerken (zoals bijvoorbeeld een balk) in rode en blauwe spiraalstelsels.

# Curriculum vitae

I was born on September 16, 1980 in Shiraz, Iran. My interest in Astronomy grew with me from the time I was a child and started when I read Isaac Asimov's book. During high school, my keen desire triggered me to register at the first Iranian Astronomical Institute for learning elementary Astronomy. The total solar eclipse in 1995 in Iran and the passage of the Comet Hale-Bopp a year later inspired me to choose the subject of physics at university (1998) in order to find the answers to thousands questions which arose in my mind. My first year of studying at Shiraz University ended with the last total eclipse of twentieth century (Aug 11 1999). This event led me to become a member of a student group at Biruni Observatory, Shiraz University. This Observatory was active with the photometry and data analysis of variable stars, especially eclipsing binary stars using photomultiplier tube (PMT) with its 20" telescope.

During my undergraduate studies I attended small workshops, seminars and schools to learn more about astronomy. While I was giving lectures in astronomy to the general public and visitors of the Biruni Observatory, I also became acquainted with photometry of variable stars and started to collaborate with postgraduate students on data acquisition, photometry and photometric data reduction of eclipsing binary stars. I then decided to do my B.Sc. project on a photometry of a delta scuti star under the supervision of Prof. N. Riazi of Shiraz University. This experience introduced me to a wide area of observational Astronomy and gave me an impulse to be enthusiastic in the field of observations.

The association with Biruni Observatory was continued after completing the B.Sc. (2002) and I had the opportunity to work with a CCD camera. Because of lack of experiences with CCD imaging in my country, I tried to obtain experience with CCD imaging and compiling information from different sources. The result of this effort was then published as a book (in Persian) in 2006 on "Digital Imaging and Astronomical Image Processing" in 263 pages, in which I have introduced the structure of CCDs, practical ways for CCD imaging, photometry with CCDs, using digital cameras for astronomical imaging and introduction to image processing. The book is at the level of advance amateurs and undergraduate students.

In September 2006, I started a master program in Astronomy at the university of Sussex (Brighton, UK). I carried out my Msc project on the "Extraction of luminous red galaxies (LRGs) from the Dark Energy Survey (DES) simulation", under supervision of Dr. Kathy Romer. After my Msc., I started to collaborate with the Galaxy Zoo team, specifically, Prof. R. C. Nichol and Dr. K. Masters at the Institute of Cosmology and Gravitation (ICG) in Portsmouth, on studying the properties of red spiral galaxies.

In January 2009, I started my PhD in Astronomy at the Sterrewacht Leiden (Leiden University) under the supervision of Prof. Marijn Franx and Dr. Rik Williams funded by the Marie Curie Initial Training Network of the European Union (ELIXIR). My research has been dedicated to investigate how structural properties of galaxies such as their sizes,

surface brightness profiles and other physical properties change with time.

During my PhD, I participated in the many schools, such as three ELIXIR Schools in Astrum (Germany), ESA/ESTEC (Netherlands) and also a summer school in Heidelberg (Germany) and NOVA fall school (Netherlands) and Oort Workshop (Leiden). I also presented my work in workshops, conferences and seminars, specifically in Lorentz Center (Leiden), Oxford (UK), Madrid (Spain), Cambridge (IoA, UK) and Durham (UK).

I would like to continue my career in Astrophysics and I be will considering upcoming postdoc opportunities.