

Samenvatting

Sterrenstelsels

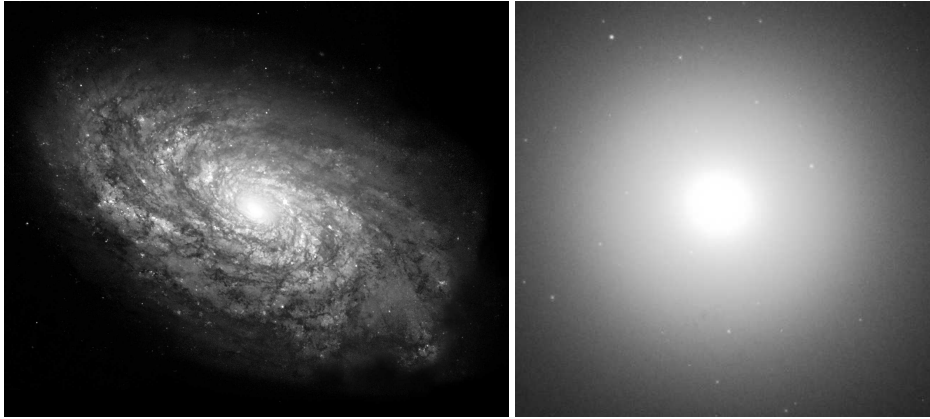
De Melkweg, waarin de Zon één van de circa 100 miljard sterren is, is slechts één van de vele sterrenstelsels in het Heelal. Sterrenstelsels, ook wel de bouwstenen van het heelal genoemd, bestaan in verschillende soorten.

Ten eerste zijn er spiraalstelsels (ook laat-type stelsels genoemd). De Melkweg behoort tot deze soort, waarvan het uiterlijk wordt gedomineerd door een schijf van sterren, stof en gas met spiraalarmen. In deze schijf worden tot op dit moment nog steeds nieuwe sterren gevormd. In het centrum bevindt zich een lensvormige verzameling sterren. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 1. Ten tweede zijn er de elliptische sterrenstelsels (ook vroeg-type stelsels genoemd). Bij deze soort ontbreekt de gas-rijke schijf en wordt de verschijning door een ronde of rugbybal-vormige verzameling sterren gedomineerd (zie Figuur 1). Er zijn nog andere soorten sterrenstelsels (bijvoorbeeld dwergstelsels en onregelmatige stelsels).

Spiraalstelsels komen het meest voor, maar elliptische stelsels zijn doorgaans groter. Volgens de laatste schattingen bevindt minstens de helft van alle sterren in het Heelal zich in een elliptisch stelsel. Tot aan jaren '70 dacht men dat elliptische stelsels heel lang geleden gevormd zouden zijn, terwijl spiraalstelsels in latere stadia nog zouden groeien via hun schijf.

Sterrenstelsels zijn niet willekeurig verspreid door het heelal, maar ze zijn verdeeld over structuren die we, met toenemende grootte, groepen, clusters en superclusters noemen. Andere gebieden van het heelal zijn juist vrijwel leeg. De eigenschappen van individuele sterrenstelsels hangen af van de omgeving waarin ze zich bevinden. In de centra van clusters, waar de stelsels dicht op elkaar staan, bevinden zich alleen maar elliptische stelsels, terwijl in de legere gebieden meer spiraalstelsels voorkomen. Dit leidde tot het idee dat elliptische stelsels bij nader inzien helemaal niet ouder zijn dan spiraalstelsels, maar dat ze juist gevormd worden door het samensmelten van spiraalstelsels. Spiraalstelsels komen elkaar het meest waarschijnlijk tegen in gebieden waar zijn dicht bij elkaar staan, dus in de centra van clusters. Dat het samensmelten van stelsels geen bizar idee of zeldzaam verschijnsel is, bleek uit de ontdekking dat de eerder genoemde onregelmatige stelsels veelal samensmeltende stelsels zijn.

De conclusie is gerechtvaardigd dat elliptische stelsels een cruciale rol spelen in het heelal: het zijn de grootste stelsels, ze domineren de centrale delen van clusters, zijn het einde van de “voedselketen” wat betreft sterrenstelsels, en bevatten het merendeel van de sterren. Daarom gaat dit proefschrift uitsluitend over elliptische sterrenstelsels.



Figuur 1: *Links:* Voorbeeld van een spiraalstelsel (NGC 4414). *Rechts:* Voorbeeld van een elliptisch stelsel (NGC 4552).

Het Ontstaan van Structuur in het Heelal

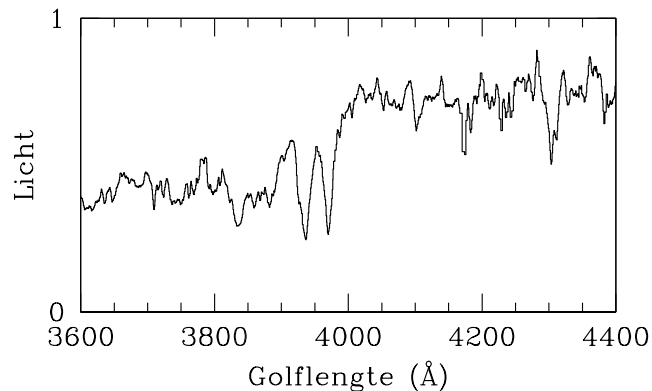
Via samensmelting hangt de levensloop van sterrenstelsels, ofwel hun evolutie, samen met de vorming van clusters en andere grote-schaal structuren. De vorming van structuur wordt op zijn beurt weer beïnvloed door de uitdijning en “vorm” van het heelal. Een theorie voor de vorming van sterrenstelsels moet dus worden opgesteld binnen de theorie voor de evolutie van het heelal zelf.

Het heelal is 13.7 miljard geleden begonnen met de Big Bang. 300.000 jaar daarna was alle materie vrijwel perfect egaal verdeeld. Er was geen sprake van structuur, behalve minieme afwijkingen in dichtheid. Die zijn als gevolg van de zwaartekracht gegroeid, waardoor gebieden die een iets hogere dichtheid hadden steeds voller werden, en gebieden die een iets lagere dichtheid hadden steeds leger.

Volgens de modernste theorieën werden eerst kleine “units” van gas en sterren gevormd die in de loop van de tijd samensmolten tot steeds grotere sterrenstelsels. Het samensmelten van verschillende stelsels is dus een vanzelfsprekende eigenschap van deze theorie.

De grote-schaal structuur in het heelal, clusters en super-clusters, kan goed verklaard worden met de huidige modellen. De theorie wordt betrouwbaar geacht, want er is slechts een klein aantal ingrediënten nodig, met als belangrijkste de zwaartekracht.

De vorming van individuele sterren en sterrenstelsels is echter een veel gecompliceerder proces, waaraan veel meer facetten zitten waarvan de kennis beperkt is. Zo is er geen goede theorie voor de vorming van sterren. De modellen voor de vorming van sterrenstelsels zijn dus heel flexibel. Er wordt dikwijls opgemerkt dat de theoretici alles voor elkaar kunnen krijgen door ‘aan de knoppen te draaien’. Om de voorspellingen van de modellen te controleren, moet er dus voortdurend vergeleken worden met waarnemingen.



Figuur 2: Voorbeeld van een spectrum. Langs de horizontale as staat de golflengte. Naar rechts toe wordt de golflengte langer, en heeft het licht dus een rodere kleur. De smalle “dallen” zijn de spectraallijnen. Aan de hand van de precieze positie van deze lijnen kan de roodverschuiving bepaald worden. Dit spectrum is het resultaat van 24 uur lang waarnemen met de VLT.

Roodverschuiving

In een laboratorium, of op wat voor wijze dan ook, kun je geen experimenten met sterren of sterrenstelsels doen. Je kunt ook niet wachten tot een sterrenstelsel verandert in de loop van de tijd, want die veranderingen treden niet op in de loop van het schrijven van een proefschrift, maar in de loop van op z'n snelst tientallen miljoenen, en meestal miljarden jaren.

Niettemin is er een directe methode om de evolutie van sterrenstelsels te bestuderen. De basis daarvan is het feit dat licht tijd nodig heeft om van de ene naar de andere plek te komen, net als geluid. In tegenstelling tot de snelheid van geluid, is de snelheid van licht zo groot dat we er in het dagelijks leven niets van merken. Op de schaal van ons zonnestelsel is het al wel merkbaar: het licht van de Zon zien wij 8 minuten nadat de Zon het heeft uitgestraald. Het licht van de dichtstbijzijnde ster behalve de Zon heeft er 4 jaar over gedaan (zijn afstand is dus 4 lichtjaar), en de afstand van het dichtstbijzijnde grote sterrenstelsel buiten de Melkweg is zo'n 2 miljoen lichtjaar. Als je nu sterrenstelsels bestudeert die miljarden lichtjaren ver weg staan, zie je ze dus zoals ze er miljarden jaren geleden uitzagen. Op die tijdschaal, een behoorlijk deel van de leeftijd van het heelal, treden er veranderingen op.

Licht bestaat uit elektro-magnetische golven. Hoe langer de golflengte (de afstand tussen twee toppen van de golf), hoe roder het licht. Het licht van een veraf gelegen sterrenstelsel is zo lang geleden uitgezonden dat het heelal sindsdien een flink stuk is uitgedijt. Nu is het licht, zeg maar, mee uitgedijt, waardoor de golflengte langer is geworden en het licht dientengevolge roder. We zeggen dat het sterrenstelsel een *roodverschuiving* heeft. Hoe groter de roodverschuiving, hoe meer het heelal is uitgedijt sinds het licht werd uitgezonden, hoe langer geleden dat is gebeurd, en hoe verder weg het sterrenstelsel staat. Roodverschuiving is dus een maat voor afstand en tijd.

Roodverschuiving kan gemeten worden aan de hand van een zogeheten spectrum. Je maakt een spectrum door het licht dat je waarneemt te sorteren naar kleur, ofwel golflengte. Dit kun je doen met behulp van een prisma of, zoals gebeurt in de praktijk, met een ingewikkelder apparaat dat onder een telescoop hangt. Sterren zenden bij de ene golflengte meer licht uit dan bij de andere. Dit komt ten eerste door de temperatuur. Een koele ster zendt bij lange golflengten meer licht uit dan bij korte, en krijgt daardoor een rode kleur. Een hete ster is blauw. Ten tweede absorberen atomen in de sterren licht bij bepaalde golflengten. Hierdoor ontstaan zogenaamde spectraallijnen.

Figuur 2 laat een voorbeeld van een spectrum van een sterrenstelsel zien. Dit spectrum bevat het licht van alle sterren in het stelsel bij elkaar. Je kunt zien dat er meer licht bij lange golflengtes is dan bij korte. Het is dus een stelsel waarin zich veel rode sterren bevinden. De smalle “dalen” waarbij minder licht waargenomen wordt, zijn de spectraallijnen. Voor een sterrenstelsel op *hoge* roodverschuiving zijn zulke lijnen meer naar rechts verschoven dan voor een stelsel op *lage* roodverschuiving. Een dergelijke waarneming wordt tegenwoordig routinematig gedaan voor stelsels tot 10 miljard lichtjaar ver weg.

De vraag die astronomen via waarnemingen van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving proberen te beantwoorden, kan als volgt geformuleerd worden: *Hoe veranderen de aantallen van verschillende types sterrenstelsels en de sterren daarin met roodverschuiving?* De kunst is om eigenschappen van sterrenstelsels op verschillende roodverschuivingen met elkaar te vergelijken, en zodoende de evolutie in kaart te brengen.

Massa's van Sterrenstelsels

Een belangrijke eigenschap is het gewicht, of de massa, van een sterrenstelsel. Hier zijn twee redenen voor. Ten eerste wordt massa voorspeld door de modellen voor de vorming van sterrenstelsels. Ten tweede is massa een eigenschap die niet verandert, tenminste als een sterrenstelsel niet samensmelt met een ander stelsel. Dit laatste stelt je in staat om stelsels op verschillende roodverschuivingen maar met dezelfde massa direct met elkaar te vergelijken, en de evolutie van andere eigenschappen te meten.

Hoe meet je een massa zonder weegschaal? De zwaartekrachtswet van Newton zegt dat de kracht die een object op een ander object uitoefent slechts afhangt van de massa's van de objecten en de afstand tussen de objecten. De bewegingen van sterren in een sterrenstelsel worden uitsluitend door de zwaartekracht bepaald.

Een meer alledaags voorbeeld is de beweging van de Aarde rond de Zon. De snelheid van de Aarde in zijn baan rond de Zon is zo'n 30 km/s , met een gemiddelde afstand tot de Zon van 150 miljoen km . Stel dat die snelheid tweemaal zo groot was geweest. Dat zou betekenen dat de Zon $4\times$ zwaarder is. Ook als de snelheid hetzelfde was, maar de afstand tweemaal zo groot, zou de Zon $2\times$ zwaarder zijn.

Wat voor de Zon geldt, geldt ook voor sterrenstelsels: hoe sneller de bewegingen van de sterren, hoe groter de massa, en hoe groter het stelsel, hoe groter de massa. Om een sterrenstelsel te wegen, moet je dus zijn grootte meten en hoe snel de sterren in het stelsel bewegen.

Om de grootte van een sterrenstelsel te meten, moet je zijn afstand weten (via de roodverschuiving). Iets dat ver weg staat lijkt immers kleiner dan iets dat dichtbij staat.

Het meten van snelheden binnen een stelsel is lastiger. Hiervoor gebruiken we ook het spectrum en de spectraallijnen daarin. De ene ster beweegt in een andere richting dan de andere ster, waardoor de roodverschuiving van een spectraallijn varieert van ster tot ster. Aangezien het miljarden sterren betreft, uit die snelheidsvariatie zich in een verbreding van de spectraallijn van een sterrenstelsel. Hoe groter die verbreding, hoe groter de snelheden.

Een dergelijke verbreding is meetbaar, maar dit is niet eenvoudig, zeker niet voor zeer ver weg gelegen sterrenstelsels. Het vereist een veel hogere kwaliteit van het spectrum dan het bepalen van een roodverschuiving, want daarvoor hoef je een spectraallijn alleen maar te kunnen zien. Zelfs als je de grootste telescopen ter wereld gebruikt, is het nodig om vele uren te besteden aan het verzamelen van het licht van een sterrenstelsel.

Toch is het zeer de moeite waard om veel tijd te besteden aan dit soort waarnemingen. Als het éénmaal is gelukt om de massa van een veraf gelegen stelsel te meten, kun je de eigenschappen van dat stelsel vergelijken met een nabij gelegen stelsel met dezelfde massa. Op deze manier kun je bijvoorbeeld op directe wijze de evolutie van de helderheid van zo'n stelsel bepalen. Dat geeft op zijn beurt weer een indicatie van leeftijd en het moment van vorming van het stelsel. Dit zou niet mogelijk zijn zonder de massa van veraf gelegen stelsels te kennen.

Dergelijke leeftijdsbepalingen hebben geleid tot de conclusie dat de sterren in elliptische sterrenstelsels in clusters relatief kort na de Big Bang zijn gevormd. De modellen voor de vorming van sterrenstelsels voorspellen dat sterren in elliptische stelsels die zich niet in clusters bevinden, de zogenaamde veldstelsels, jonger zijn. De eerste centrale vraag die in dit proefschrift aan de orde komt is: **Zijn veldstelsels jonger dan clusterstelsels?**

Kennis van het moment van vorming van individuele stelsels is zeer interessant. Maar om de vorming van de hele verzameling sterrenstelsels te begrijpen, moeten we achterhalen hoe de hele populatie van sterrenstelsels evolueert. Het is ondoenlijk om massa's te meten voor alle stelsels omdat dat het een tijdrovend proces is. Verder is het ook niet mogelijk voor zeer zwakke en de verst weg gelegen stelsels massa's te meten. Het zou te lang duren om goede spectra te meten met de huidige telescopen.

Om deze redenen moet men vaak terugvallen op minder nauwkeurige schattingen van de massa. Deze schattingen zijn gebaseerd op de helderheid en de kleur van sterrenstelsels die relatief makkelijk te meten zijn. Met kleur wordt de verhouding tussen de hoeveelheid licht bij twee verschillende golflengtes bedoeld. Figuur 2 laat een voorbeeld van een rood stelsel zien: er is meer licht bij lange golflengtes dan bij korte.

Voor sterren geldt dat de zwaarsten en heldersten het kortste leven. Ook zijn de zwaarste sterren het heetst en hebben daardoor een blauwe kleur. In de loop van het leven van een sterrenstelsel, verdwijnen de heldere, blauwe sterren, en blijven alleen de zwakke, rode sterren over. Door de kleur van een sterrenstelsel te meten, kan dus een schatting worden gemaakt van de soort sterren die het bevat. Dit geeft een schatting voor de leeftijd van het sterrenstelsel. De helderheid van het stelsel zegt

dan hoeveel sterren er zijn, en dus hoe zwaar het stelsel is: de zogenaamde “kleur” massa.

Voor het omrekenen van kleur naar leeftijd en massa zijn modellen gemaakt. Het probleem is dat de omrekeningsfactor verandert als je de eigenschappen van de sterren verandert. Sterker nog, als je modellen gemaakt door verschillende mensen met elkaar vergelijkt, blijken er verschillen te bestaan, zelfs als de eigenschappen van de sterren hetzelfde zijn. Door de verschillende uitkomsten te vergelijken met de “echte” massa’s die zijn gemeten aan de hand van de verbreding van spectraallijnen, kan de betrouwbaarheid van de indirecte methode getest worden. Eventuele problemen komen op deze manier aan het licht.

Dit is het onderwerp van de hoofdstukken 6 en 7. De tweede centrale vraag die in dit proefschrift behandeld wordt is de volgende: **Hoe nauwkeurig en betrouwbaar is de indirecte methode om de massa van een sterrenstelsel te bepalen aan de hand van zijn kleur?**

Dit Proefschrift

Hoofdstuk 2 In dit hoofdstuk beschrijven we waarnemingen van 4 sterrenstelsels in één van de meest veraf gelegen bekende clusters (afstand ca. 8.5 miljard lichtjaar). Met de *Very Large Telescope* (VLT) in de Atacama woestijn Chili hebben we de beste spectra ooit gemaakt van zulke veraf gelegen stelsels. Een voorbeeld is te zien in Figuur 2. De “sluiterijd” van deze waarnemingen met de VLT, de beste telescoop ter wereld voor dit soort werk, was 24 uur. Met beelden van de *Hubble Space Telescope* (HST) hebben we de grootte en de helderheid van de stelsels gemeten. Deze sterrenstelsels behoren tot de meest massieve stelsels in het heelal: ze zijn wel 1000 miljard maal zo zwaar als de Zon (zo’n stelsel bevat dus ruwweg 1000 miljard sterren).

Door deze stelsels te vergelijken met nabije stelsels met dezelfde massa, hebben we bepaald dat dit soort stelsels 8.5 miljard jaar geleden circa 2.5 maal helderder waren dan ze nu zijn. Deze evolutie in lichtkracht impliceert dat de sterren in dit type stelsel momenteel 11.5 miljard oud zijn, en dus al 2 miljard jaar na de Big Bang zijn ontstaan. De resultaten in dit hoofdstuk zijn consistent met eerder uitgevoerd werk aan clusterstelsels op lagere roodverschuiving, of met spectra van mindere kwaliteit.

Hoofdstukken 3 en 4 In deze twee hoofdstukken stappen we over naar veldstelsels. Met dezelfde technieken (spectra van de VLT; beelden van de HST) bepalen we de massa’s van enkele tientallen elliptische veldstelsels op een afstand van zo’n 8 miljard lichtjaar. Nooit eerder werd van een dergelijk groot aantal veldstelsels op deze afstand de massa gemeten. De kwaliteit van de data is ook nog eens bijzonder goed.

Dit stelt ons in staat om de evolutie van de veld- en clusterstelsels met elkaar te vergelijken. In antwoord op de eerste centrale vraag van dit proefschrift: **De sterren in massieve elliptische veld- en clusterstelsels vertonen geen leeftijdsverschil.** Dit is dus in tegenspraak met de theorie die voorspelt dat er wel een verschil is. Ook de sterren in zware veldstelsels waren 8 miljard jaar geleden al een paar miljard jaar oud.

Andere projecten die poogden een verschil te vinden tussen veld- en clusterstelsels hebben steeds tegenstrijdige resultaten opgeleverd. We verklaren deze resultaten

door verschillen in methoden, te kleine aantallen sterrenstelsels, te magere kwaliteit van de data, en te kleine afstand van de stelsels.

We vinden dus geen verschil tussen vergelijkbare sterrenstelsels in verschillende omgevingen. Aan de andere kant vinden we wel een leeftijdsverschil tussen sterrenstelsels met een grote en een kleine massa: zware sterrenstelsels lijken ouder te zijn dan lichte sterrenstelsels. Een complicatie in de interpretatie van deze ontdekking is dat oude, weinig massieve sterrenstelsels niet erg helder zijn. Daarom kan er geen spectrum worden gemeten dat goed genoeg is voor het bepalen van de massa. Echter, zelfs als we dit zogenaamde selectie effect meenemen in de analyse, dan vinden we nog steeds een leeftijdsverschil tussen zware en lichte stelsels. Hoe groot dit verschil is, kunnen we met deze resultaten niet bepalen.

Hoofdstuk 5 In dit hoofdstuk bestuderen we de kleuren van elliptische veldstelsels op een afstand van 8 miljard lichtjaar. Omdat stelsels met oude sterren een rodere kleur hebben dan stelsels met jonge sterren, zou het leeftijdsverschil tussen zware en lichte sterrenstelsels (ontdekt in Hoofdstuk 4) ook tot uiting moeten komen in hun kleuren. Bovendien zijn kleuren veel gemakkelijker te meten dan massa's.

Uit de kleuren van 90 elliptische stelsels met afstanden tot 8 miljard lichtjaar leiden we af dat de kleuren van heldere en zwakke stelsels nauwelijks verschillen. Hieruit concluderen we dat het in Hoofdstuk 4 beschreven leeftijdsverschil tussen zware en lichte stelsels inderdaad in eerste instantie veroorzaakt wordt door het eveneens in Hoofdstuk 4 beschreven selectie effect.

Het mogelijke leeftijdsverschil tussen zware en lichte stelsels is vermoedelijk erg klein. De enige methode om de precieze grootte van dit verschil te achterhalen, is het direct meten van massa's van lichte stelsels. Dit vereist waarnemingen die op het moment niet uitvoerbaar zijn.

Hoofdstuk 6 In dit hoofdstuk worden infrarode waarnemingen geanalyseerd van de in Hoofdstuk 4 beschreven objecten. Deze waarnemingen zijn gedaan met de nieuwe *Spitzer Space Telescope* (SST). Met deze data meten we de evolutie van de infrarode lichtkracht van elliptische sterrenstelsels gedurende de afgelopen 8 miljard jaar. Deze vergelijken we met de evolutie bij visuele golflengtes (zie de Hoofdstukken 3 and 4).

De evolutie van de lichtkracht in het infrarood is 30% langzamer dan bij visuele golflengtes. Dit klopt niet met de meeste modellen: deze voorspellen dat de lichtkracht evolutie in het infrarood wel tweemaal zo langzaam is dan bij visuele golflengtes. Met andere woorden, de kleur (ofwel, de verhouding van de hoeveelheid licht gemeten bij visuele en infrarode golflengtes) van elliptische sterrenstelsels evolueert anders dan verwacht. Dit heeft consequenties voor de interpretatie van infrarode waarnemingen die in Hoofdstuk 7 aan bod zullen komen.

Hoofdstuk 7 In dit hoofdstuk verzamelen we waarnemingen van de helderheid van de in Hoofdstuk 4 beschreven sterrenstelsels bij 10 verschillende golflengtes. Deze lopen uiteen van het ultra-violet, via visuele golflengtes tot het infrarood. Deze waarnemingen zijn gedaan met drie verschillende telescopen: HST, VLT en SST.

We vergelijken de waargenomen kleuren met modellen voor de evolutie van kleur en lichtkracht. Dit levert een bepaling van de leeftijd en de massa van de stelsels op.

We hebben dan twee verschillende massa bepalingen: de “kleur” massa en de “echte” massa uit Hoofdstuk 4. Door deze met elkaar te vergelijken, krijgen we een indruk van de betrouwbaarheid van de “kleur” massa en de toepasbaarheid van de modellen.

We vinden dat voor het meest gangbare model de twee verschillende massa bepalingen sterk uiteen lopen: de “kleur” massa van de sterrenstelsels is wel driemaal groter dan de “echte” massa. Dit is het gevolg van het probleem dat in Hoofdstuk 6 al werd geconstateerd: de kleur evolutie is anders dan de modellen voorspellen. De leeftijd en de massa van de sterren in een stelsel worden dus verkeerd bepaald.

Als de infrarode waarnemingen worden weggelaten bij de bepaling van de “kleur” massa, blijkt dat de “kleur” massa wel klopt met de “echte” massa. Dit toont aan dat de fout in de modellen in het infrarood zit, en dat je beter visuele waarnemingen kunt gebruiken.

Het antwoord op de tweede vraag centrale vraag gesteld in dit proefschrift is: **de “kleur” massa van sterrenstelsels zoals bepaald met infrarode waarnemingen is onbetrouwbaar doordat de modellen voor de evolutie van kleur en lichtkracht niet kloppen. De visuele kleuren van een sterrenstelsel geven een betere indicatie van de massa.**

Met de SST kun je gemakkelijk verre sterrenstelsels waarnemen. De hoop was dat de gemeten lichtkracht in het infrarood de massa van een stelsel zou geven, en dat de moeizame meting van “echte” massa’s, het onderwerp van dit proefschrift, overbodig zou worden. De resultaten van de Hoofdstukken 6 en 7 tonen aan dat mensen die “echte” massa’s kunnen meten, onmisbaar zijn.