

6

Nederlandstalige samenvatting

Wanneer we naar de nachtelijke sterrenhemel kijken is deze bezaaid met sterren. Kijken we nog beter dan zien we structuur aan de hemel: een band met meer sterren dan de rest van de hemel, met donkerdere gebieden en wazige vlekjes. Kijken we met verrekijkers of telescopen, dan zien we nog veel meer wazige vlekjes. Die vlekjes blijken niet allemaal hetzelfde te zijn. Sommige zijn gaswolken vlakbij die verhit worden door de sterren die er kort geleden in geboren zijn. Andere zijn het resultaat van zware sterren die ontploft zijn. Weer andere blijken volledige sterrenstelsels ver weg van de onze (zie Figuur 6.1). Ons eigen sterrenstelsel (het Melkwegstelsel) is ook precies datgene wat we zien als die band met meer sterren aan de hemel. Hoe komt de sterrenhemel aan deze rijke structuur en hoe hangen alle verschillende objecten en de processen die ze veroorzaken met elkaar samen?



Figure 6.1: M101 is een typisch spiraalvormig sterrenstelsel, dat erg lijkt op ons Melkwegstelsel. Van de zijkant zou je kunnen zien dat de schijf waar de spiraalarmen inzitten erg plat is. Duidelijk zichtbaar zijn het licht van de sterren in verschillende kleuren, en het effect van stof, wat een deel van dit licht, vooral in de spiraalarmen, tegenhoudt.

Structuur in het heelal

We weten dat het heelal in het begin (slechts 380.000 jaar na de Oerknal) bijzonder homogeen was. De temperatuur van de zogenaamde ‘kosmische achtergrondstraling’ vertoont slechts verbazingwekkend kleine fluctuaties en dit kan worden vertaald in een variatie in de dichtheid van het gas in het vroege heelal, die eveneens bijzonder klein is. In het huidige heelal zijn de dichtheidscontrasten enorm. Vele ordes van grootte verschil zit er tussen de allerdichtste en allerijlste stukken van het heelal.

De groei van structuur

De kleine variaties in de dichtheid in het heel vroege heelal zullen groeien: als er ergens net iets meer massa zit dan gemiddeld, dan trekt de zwaartekracht daarvan net iets harder dan gemiddeld omliggende materie die kant op. Hierdoor wordt het dichtheidscontrast groter, wat datzelfde effect versterkt, zodat er uiteindelijk steeds meer materie komt te zitten precies daar waar oorspronkelijk de dichtheid net een heel klein beetje hoger was. Laten we dit proces ‘uit de hand lopen’, dan ontstaan er

na verloop van tijd dus enorme concentraties materie (we noemen deze “halo’s”), met daar tussenin grote lege gebieden. Dit hele proces is volledig gedomineerd door de zwaartekracht. Aangezien we de zwaartekracht redelijk goed begrijpen zijn we al vrij lange tijd in staat nauwkeurig uit te rekenen hoeveel van die halo’s er zijn, hoe zwaar ze zijn, en waar ze zich bevinden.

De groteschaalstructuur van het heelal

De verdeling (in massa en in de ruimte) van deze halo’s noemen we de groteschaalstructuur van het heelal. In Figuur 6.2 zien we de vergelijking van een computersimulatie van die groteschaalstructuur met waarnemingen van hetzelfde. Elk puntje in dat plaatje is zo’n halo. De simulatie is simpelweg een simulatie van een heel groot stuk van het heelal, dat in de computer nageemaakt is vanaf toen het heelal bijzonder jong was, tot aan nu. Het enige wat in de simulatie is meegenomen is de zwaartekracht (dit is dus een sterke vereenvoudiging van alle processen die zich in het heelal afspelen!) en toch komt de structuur in het simpele computermodel erg goed overeen met de waarnemingen. In de waarnemingen zijn alle puntjes in Figuur 6.2 sterrenstelsels, waarvan een voorbeeld te zien in Figuur 6.1. Het feit dat gesimuleerde halo’s en waargenomen sterrenstelsels dezelfde verdeling in het heelal hebben geeft al aan dat de sterrenstelsels zich vormen in de halo’s, de verdichtingen die ontstaan uit de kleine verdichtingen uit het vroege heelal die we in de kosmische achtergrondstraling zien.

De vorming van sterrenstelsels

Binnen deze verdichtingen zullen zich de sterrenstelsels gaan vormen. Voor het maken van sterrenstelsels moeten we meer processen in ogenschouw nemen dan alleen zwaartekracht. Zo ligt het voor de hand dat we stervorming niet kunnen verwaarlozen. Sterren ontstaan uit gas, maar stoten ook weer gas uit, door ‘sterwinden’ en (in het geval van zware sterren) de zogenaamde supernova explosies. Ook bevatten sommige (of misschien zelfs alle) sterrenstelsels een enorm zwart gat in hun centrum, welke ook een grote invloed kan hebben op het gas en de vorming van sterren binnen het stelsel. In dit hoofdstuk zal ik op de belangrijkste processen kort ingaan om daarna in het volgende hoofdstuk te laten zien hoe we deze simuleren.

‘Normale’ materie

Het heelal bestaat voor een zeer groot deel (96%) uit dingen waarvan we weinig idee hebben wat het is. De termen ‘donkere energie’ (ongeveer 76% van de in-

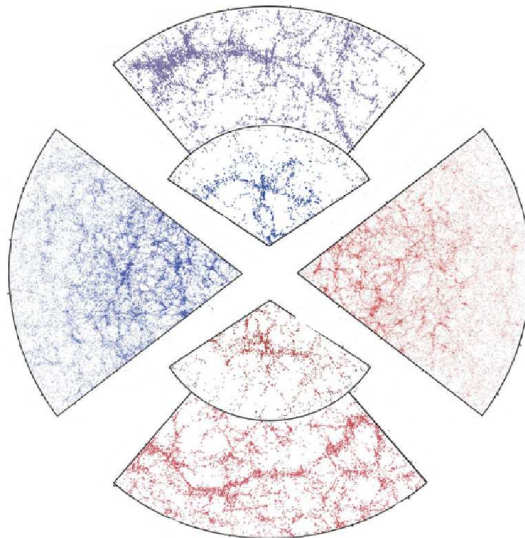


Figure 6.2: Een gesimuleerde (rood, rechts en onder) en waargenomen ‘taartpunt’ uit het heelal, waarop de groteschaalstructuur van het heelal goed te zien is wordt hier vergeleken met de waargenomen groteschaalstructuur (blauw, links en boven), waarin elk puntje een sterrenstelsel voorstelt waarvan de positie en de afstand zijn gemeten. De aarde staat in de punten van de taart, en naar de rand toe staan de stelsels steeds verder weg. Een goede overeenkomst tussen de simulatie en de waarnemingen is wat hier het meest opvalt. *Credit: V. Springel*

houd van het heelal) en ‘donkere materie’ (ongeveer 20%) worden gebruikt voor de twee verschijningsvormen die zich fundamenteel anders gedragen. Grofweg: donkere energie versnelt de uitdijning van het heelal, terwijl donkere materie, door de zwaartekracht, juist een rem zet op die uitdijning. De laatste 4% bestaat uit wat we ‘baryonen’ noemen en dit is het materiaal waarvan gas, sterren, planeten, mensen, tafels, etcetera zijn gemaakt. Op grote schaal (zoals hierboven beschreven) bepalen de donkere materie en donkere energie wat er gebeurt, maar op de kleine schaal (binnen sterrenstelsels) worden baryonen belangrijk. Bovendien zijn het de baryonen die kunnen worden waargenomen met telescopen en van de donkere componenten kunnen alleen indirect eigenschappen worden afgeleid uit waarnemingen. Hieronder ga ik kort in op sommige van de belangrijke processen in de vorming van sterrenstelsels.

Gasdynamica

Anders dan de donkere materie, werken er op gas meer krachten dan alleen de zwaartekracht, zoals bijvoorbeeld gasdruk (twee gaswolken vliegen niet zomaar door elkaar heen, maar zullen 'botsen' en kunnen daarbij opwarmen of afkoelen). Het simuleren van gas is alleen daarom al moeilijker dan donkere materie (zoals de simulaties hierboven beschreven, waar het slechts om de groteschaalstructuur van het heelal ging). Wanneer gas gesimuleerd moet worden moet dus bijgehouden worden of het gas opwarmt en afkoelt, processen die afhankelijk zijn van de dichtheid, temperatuur en samenstelling van het gas.

De vorming, evolutie en dood van sterren

Uit gas van hele hoge dichtheid kunnen sterren gevormd worden. Een gaswolk kan instorten onder zijn eigen zwaartekracht en in de allerdichtste gebieden zullen bollen van gas ontstaan die waterstof fuseren tot helium in hun kern: sterren (waarvan onze Zon er één is). Sterren zijn in feite hun eigen brandstof voorraad, het gas waar ze uit bestaan kan dienen als brandstof voor de kernfusie in hun binnenste. Na verloop van tijd is deze voorraad uitgeput en zullen de sterren 'overlijden'. Hoe snel dit gebeurt is voornamelijk afhankelijk van de massa van de ster: een zware ster leeft veel korter dan een lichte (hij heeft weliswaar meer brandstof, maar verbrandt deze ook heel veel sneller).

Aan het einde van hun leven stoten sterren hun buitenlagen van gas af (die verrijkt zijn door de kernfusie met zwaardere elementen). Zware sterren doen dat gewelddadiger dan lichte, in zogenaamde supernova explosies. In zo'n supernova explosie komt in een heel korte tijd bijzonder veel energie vrij, ongeveer net zo veel als in de rest van het hele sterrenstelsel (het equivalent van ongeveer een miljard sterren)! Deze energie wordt deels 'gedumpt' in het gas rondom de ontploffende ster. Dit verhit dat gas en duwt het ook weg.

Sterren vormen meestal in flinke groepen, waarin na ongeveer 10 miljoen jaar een aantal van dat soort explosies afgaat. De optelsom van deze supernovae is belangrijk voor hoe het gas in een sterrenstelsel zich gedraagt. Als er genoeg sterren gevormd worden, en dus genoeg van dergelijke explosies plaatsvinden, kan er zelfs op grote schaal gas het sterrenstelsel uitstromen (we noemen dat een galactische wind en zien dat ook gebeuren in waarnemingen). Ook zijn ze belangrijk in het verrijken van het gas met zware elementen (zwaarder dan waterstof en helium), wat heel belangrijk is voor het afkoelen van heet gas.

Simulaties

Dit proefschrift is grotendeels gebaseerd op gedetailleerde simulaties van een representatief volume in het heelal, waarin veel processen gevolgd worden die belangrijk zijn voor het vormen van sterrenstelsels. In dit hoofdstuk licht ik in het kort toe hoe dergelijke simulaties in elkaar zitten en wat het bijzondere is aan de set van simulaties die gebruikt wordt in de Hoofdstukken 2 en 4.

De groteschaalstructuur van het heelal

Voor het simuleren van de groteschaalstructuur van het heelal is alleen de kosmologie (om precies te zijn, de uitdijingsnelheid van het heelal als functie van de tijd en de samenstelling van het heelal) en zwaartekracht belangrijk. Het is dus afdoende om alle materie te beschouwen als donkere materie en alleen zwaartekracht uit te rekenen. Dit is lange tijd de belangrijkste manier geweest om kosmologische simulaties te doen. De Millennium Simulatie door Volker Springel en collega's is de grootste en meest gebruikte simulatie van deze soort.

Om de vorming van sterrenstelsels te volgen in simulaties met alleen maar donkere materie zijn de zogenaamde 'semi-analytische modellen' ontwikkeld. Dit zijn 'recepten' voor het gedrag van de baryonische materie in de gevormde donkere materie structuren. Om de vorming van sterrenstelsels consistent te volgen moeten echter alle baryonische processen worden meegenomen.

Fysica van baryonen in simulaties

Veel van de baryonische processen die van groot belang zijn voor het vormen van sterrenstelsels vinden plaats op heel kleine schaal. Door de limitatie van computers kunnen we, als we een realistische populatie sterrenstelsels willen simuleren, de resolutie (kleinste details die we kunnen nabootsen) van de simulatie niet hoog genoeg maken om dergelijke processen in detail te volgen. De simulaties die in dit proefschrift zijn beschreven bevatten baryonische 'deeltjes' met een massa die bijna een miljoen keer zo hoog is als de massa van een gemiddelde ster (zoals onze Zon). Om een systeem fatsoenlijk te kunnen simuleren moet het toch zeker uit zo'n honderd deeltjes bestaan. Sterren worden weliswaar meestal in groepen geboren, maar we hebben het dan over 'clusters' van ongeveer duizend tot een miljoen keer de massa van de Zon (en meer lichte systemen dan zware). Binnen die groepen van sterren ontploft ongeveer 1% van de sterren als een supernova, een van de heel belangrijke processen in de evolutie van sterrenstelsels. Het is dus duidelijk dat de belangrijke processen binnen een sterrenstelsel (stervorming, supernova explosies, maar ook de vorming van stervormingsgebieden en de groei van een superzwaar

zwart gat in het centrum) plaatsvinden op schalen beneden de resolutielimiet van de simulaties.

Om die baryonische processen toch hun welverdiende plaats in het verhaal te geven worden zogenaamde ‘sub-grid modellen’ ontwikkeld (wat letterlijk betekent dat ze gaan over schalen die fijner zijn dan de resolutielimiet van de simulatie). Deze modellen zijn simpele ‘recepten’ die aangeven hoe dergelijke kleine schaal processen invloed uitoefenen op de schalen die wél door de simulatie worden gevolgd. Hieronder worden kort enkele voorbeelden samengevat:

1. *Stervorming* Sterren moeten in de simulatie met ongeveer een miljoen stuks tegelijk gevormd worden. Omdat dit meer is dan wat onder de meeste omstandigheden in een sterrenstelsel gebeurt wordt een sub-grid model gebruikt, dat aangeeft wat de kans is dat een gasdeeltje (van dezelfde massa) wordt omgevormd in een sterdeeltje. Zo zorgen we ervoor dat gemiddeld genomen genoeg sterren worden gevormd door het hele heelal heen.
2. *Evolutie van sterren* We weten uit waarnemingen hoe, wanneer een groep sterren gevormd wordt, de verdeling van de sterren over de verschillende stermassa’s is. Met behulp van modellen voor de evolutie van sterren kunnen we dan bepalen hoeveel gas deze sterren weer uitblazen het heelal in, en wanneer en met welke samenstelling. Ook weten we hoeveel energie er in totaal in supernovae vrijkomt.
3. *Supernovae* Wanneer de supernovae ontploffen weten we dus de totale beschikbare energie, maar hoe we deze moeten terugvoeren in het gas is niet a priori duidelijk. Er bestaan verschillende manieren om energie in een gas te stoppen, bijvoorbeeld door het te verwarmen of door het snelheid te geven. Er zijn dan verschillende keuzes die je kunt maken: warm je een klein beetje gas heel veel op, of veel gas een klein beetje, en geef je een heel harde duw tegen weinig massa, of maar een klein duwtje tegen heel veel massa? Niemand die het goed weet en de verschillende mogelijkheden moeten worden nagegaan.
4. *Superzware zwarte gaten* In het centrum van veel (of alle) sterrenstelsels huizen de zogenaamde superzware zwarte gaten. Deze groeien door botsingen met andere superzware zwarte gaten (wanneer hun sterrenstelsels botsen en samensmelten) en door het ‘opeten’ van gas wat zich daarvoor in een hete schijf om het zwarte gat heen bevond. Wanneer dit gas wordt opgegeten komt er ook energie vrij, en die energie die wordt gebruikt om het gas in en om het sterrenstelsel heet te maken. Van heet gas is het moeilijker sterren vormen, dus de aanwezigheid van dit zwarte gat is een rem op het stervormingsproces.

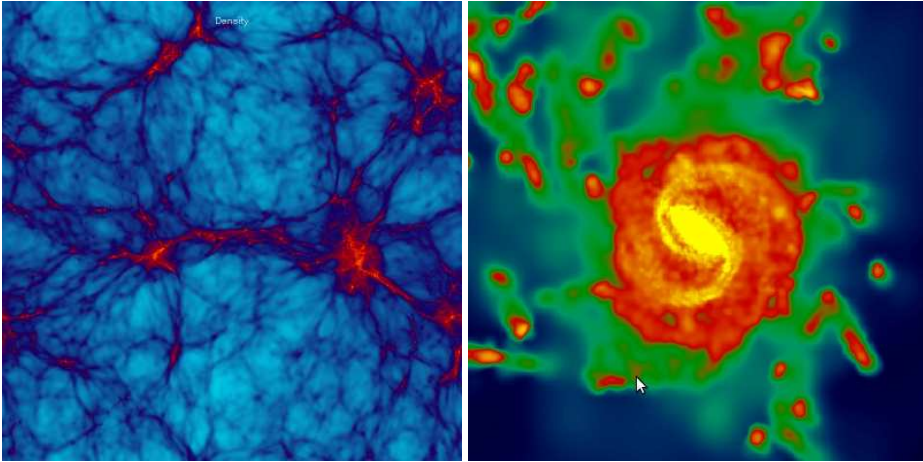


Figure 6.3: Twee plaatjes van de dichtheid van het gas in één van de OWLS model-heelallenen. Links is een plaatje van ongeveer 10 miljoen lichtjaar bij 10 miljoen lichtjaar, terwijl voor het plaatje rechts is ingezoomd op een sterrenstelsel. Het oppervlak wat is afgebeeld in het rechter plaatje is 62500 keer zo klein als in het linker plaatje.

Voor de laatste twee processen worden vaak samengevat onder de noemer ‘feedback’. Voor alle bovengenoemde processen zijn tot op zekere hoogte, uit waarnemingen of theoretische overwegingen, goed gemotiveerde modellen en parameters te gebruiken. Toch is het niet geheel duidelijk wat de juiste methode is om zulke processen te simuleren, en wat daarvoor de juiste parameters (zoals bijvoorbeeld de hoeveelheid massa die wordt uitgestoten door supernova explosies) zijn.

De ‘Overwhelmingly Large Simulations’

Precies die onzekerheid in modellen voor de zojuist genoemde processen is waar gebruik van gemaakt is in het project dat de ‘Overwhelmingly Large Simulations’ (OWLS) wordt genoemd, en waar twee van de hoofdstukken uit dit proefschrift gebruik van maken. Juist omdat er meerdere modellen voor stervorming (bijvoorbeeld meer of minder efficiënt), supernovae (bijvoorbeeld heel veel gas wegsturen met lage snelheid of vice versa), superzware zwarte gaten (hoeveel wordt het gas om het zwarte gat heen opgewarmt als het zwarte gat groeit?) etc. mogelijk zijn, kunnen we onderzoeken hoe verschillende eigenschappen van sterrenstelsels afhangen van deze modellen.

In OWLS is ervoor gekozen om op hoge resolutie veel verschillende modellen

te vergelijken, waarin we telkens maar 1 van de modellen tegelijk veranderen, zodat we direct kunnen zien wat het effect is van precies die verandering. Een voorbeeld van de gasdichtheid in een heel groot gebied (ongeveer 10 miljoen bij 10 miljoen lichtjaar) in het vroege heelal, en een sterrenstelsel die zich in datzelfde heelal bevindt is afgebeeld in Figuur 6.3. In Hoofdstuk 2, Figuur 2.2.2 staat hetzelfde sterrenstelsel, maar dan met allerlei variaties op de sub-grid modellen.

Dit proefschrift

In dit proefschrift is gekeken naar verschillende aspecten van (de vorming van) sterrenstelsels.

De invloed van kleine schaal processen op sterrenstelsels

De enorme variatie van sub-grid modellen in de OWLS database wordt in Hoofdstuk 2 onderzocht in termen van de fysische eigenschappen van sterrenstelsels (massa in sterren, stervormingssnelheid, hoeveelheid stervormend gas, etcetera). We vergelijken systematisch verschillende simulaties met elkaar om zo te identificeren welke modellen belangrijk zijn voor welke eigenschappen van sterrenstelsels.

Een interessante conclusie die kon worden getrokken is dat de hoeveelheid sterren niet wordt beïnvloed door de efficiëntie van stervorming, maar dat de stellaire massa van een sterrenstelsel voornamelijk wordt gedictieerd door de hoeveelheid beschikbaar gas (afhankelijk van het kosmologische model en de afkoeling van gas) en de hoeveelheid energie die weer terug wordt gevoerd in het gas door supernova explosies en superzware zwarte gaten. De sterrenstelsels passen hun voorraad gas zodanig aan dat er, als stervorming efficiënter is, altijd minder gas beschikbaar is om sterren van te maken, zodanig dat de totale hoeveelheid gevormde sterren en de totale hoeveelheid energie die door supernovae in het gas wordt geïnjecteerd hetzelfde blijven. We zeggen wel, dat de stervorming in sterrenstelsels ‘zelfregulerend’ is.

De ‘omgeving’ van sterrenstelsels

Omdat één van de grote vragen in het onderzoek naar de evolutie van sterrenstelsels is in hoeverre de eigenschappen van sterrenstelsels worden bepaald door interne processen en in hoeverre door hun omgeving, kijken we in Hoofdstuk 3 naar verschillende definities van de omgeving van sterrenstelsels. We gebruiken in dit hoofdstuk de Millennium Simulatie (die alleen donkere materie bevat), met

daarbovenop een model voor de vorming van sterrenstelsels. De baryonische fysica van deze sterrenstelsels werd dus niet expliciet gesimuleerd. De modellen zijn echter zo geconstrueerd, dat het goed mogelijk is een hele realistische populatie sterrenstelsels te vormen, veel realistischer dan bijvoorbeeld in OWLS. We laten zien welke definitie een goede maat is voor de massa van de halo waarin het stelsel zich bevindt (we hebben immers al deze gegevens ook, iets wat voor waarnemende sterrenkundigen zelden tot nooit geldt). Ook laten we zien hoe je een omgevingsparameter kunt construeren die onafhankelijk is van de halo massa. Dit is nog nooit gebruikt en is potentieel heel nuttig: we weten al dat veel eigenschappen van sterrenstelsels sterk afhangen van de halo massa. Wil je dus weten wat de invloed is van de omgeving, zonder daarmee halo massa te bedoelen, dan is het belangrijk een omgevingsparameter te hebben die onafhankelijk is van halo massa.

Gesimuleerde sterrenstelsels waarnemen

Om te zien hoe goed modellen en simulaties, zoals eerder beschreven, het waargenomen heelal beschrijven (en dus: hoe goed we begrijpen welke processen belangrijk zijn en hoe ze bijdragen aan de totstandkoming van sterrenstelsels) worden uiteraard de simulaties vergeleken met waarnemingen. Dit is echter nog niet zo eenvoudig als het lijkt. Waarnemingen geven ons alleen een bepaalde hoeveelheid waargenomen licht bij een bepaalde golflengte. Weten we de afstand van het sterrenstelsel nauwkeurig, dan komt dat overeen met een hoeveelheid licht die het stelsel uitstraalt, eventueel bij kortere golflengten (blauwer licht), als het stelsel ver weg staat. Dit laatste komt omdat het heelal uitdijt, dus als het licht lang onderweg is, dan heeft het een langere golflengte dan wanneer het werd uitgezonden. Deze hoeveelheid licht is niet per sé al het licht dat de sterren die in een stelsel zitten uitstralen, want onderweg komt het licht gas en stof tegen, waar het (gedeeltelijk) door geabsorbeerd kan worden. Bovendien vangen we dit licht op met grote telescopen en hun ‘camera’s’, en die laten de straling ook niet ongemoeid en veranderen het beeld van het sterrenstelsel een klein beetje (in het dagelijks leven is dit effect met digitale camera’s nauwelijks merkbaar, maar aanwezig).

In Hoofdstuk 4 kijken we naar de hoeveelheid licht die de sterrenstelsels in OWLS uitstralen. Om preciezer te zijn kijken we naar de verdelingsfunctie van de hoeveelheid licht (het aantal sterrenstelsels van iedere helderheid). Die functie noemen we de lichtkrachtverdeling. We kijken naar verschillende aspecten die op de lichtkrachtverdeling van invloed zijn, zoals:

1. *sub-grid fysica* De verschillende modellen die in OWLS zijn gebruikt, en met name de modellen met verschillende beschrijvingen van wat supernovae met hun omringende gas doen, resulteren in sterk variërende lichtkrachtverdelingen.

-
2. *absorptie van licht door stof* Stof houdt een deel van het licht dat er doorheen schijnt tegen, en het houdt meer blauw dan rood licht tegen. Lichtkrachtverdelingen in verschillende kleuren licht worden dan ook anders beïnvloed door het stof. Sterrenstelsels met meer ‘koud’ gas, en sterrenstelsels met meer zware elementen worden sterker beïnvloed door stof. In simulaties zoals OWLS is het echter erg moeilijk om een goede schatting te maken van de hoeveelheid absorptie door stof, omdat in werkelijke sterrenstelsels het grootste deel van de absorptie plaatsvindt in structuren die niet door onze simulaties worden opgelost (en de simulaties missen voor stof belangrijke fysica).
 3. *selectiemethode* Simulatoren noemen een door zwaartekracht bij elkaar gehouden ‘blob’ materie, die eventueel sterren bevat, een sterrenstelsel. De definitie van waarnemers is zoets als: een ‘vlek’ licht op een plaatje, die duidelijk boven de achtergrond uitsteekt. Deze definities zijn nogal verschillend van elkaar en leveren alleen al daarom misschien een andere lichtkrachtverdeling op. Om dit te testen hebben we van onze simulaties plaatjes gemaakt, en daarna de lichtkrachtverdeling geprobeerd terug te vinden met de methoden die waarnemers zouden gebruiken. Over het algemeen vinden we dat deze behoorlijk gelijk zijn aan de lichtkrachtverdelingen die direct uit de simulatie volgen. Eén interessant verschil is dat als het beeld van een klein (of heel ver weg staand) sterrenstelsel meer door de telescoop wordt ‘uitgesmeerd’, dan lijkt de verdeling over lichtkrachten vlakker (dat wil zeggen: terwijl er in het algemeen veel meer zwakke stelsels bestaan dan heldere lijkt het er dan op dat het verschil in aantal tussen heldere en zwakke sterrenstelsels kleiner wordt).

De verdeling van stermassa’s binnen een sterrenstelsel

De verdeling van de massa’s van de sterren die in een sterrenstelsel geboren worden heeft zijn invloed op verschillende aspecten van de evolutie van sterrenstelsels. Zo worden verschillende elementen door verschillende typen sterren gemaakt, en hebben de verschillende sterren een verschillend spectrum (verdeling van hun lichtintensiteit over golflengten, oftewel kleuren). Variatie van deze verdeling over de massa geeft dus zowel een andere ontwikkeling van de samenstelling van gas en sterren in een sterrenstelsel als een andere kleur van het sterrenstelsel, terwijl massa en leeftijd hetzelfde zijn.

De verdeling van stermassa’s in stervormingsgebieden en sterrenhopen in ons Melkwegstelsel lijkt behoorlijk universeel. De simpelste aanname is dan ook dat dit geldt voor alle stervormingsgebieden, en voor elk willekeurig sample net gevorm-

nde sterren in het heelal. De verdeling van massa's is dus altijd hetzelfde, ongeacht waar of wanneer de groep sterren wordt geboren.

We weten echter ook dat de stervormingsgebieden en sterrenhopen zelf een massa-verdeling volgen, die zodanig is dat er meer lichte objecten bestaan dan zware. Als deze groepen té licht worden, dan zullen ze een systematisch gebrek aan zware sterren vertonen. Dit kan ertoe leiden dat de verdeling van stermassa's in een sterrenstelsel anders is dan die binnen afzonderlijke sterrenhopen. In Hoofdstuk 5 bekijken we de verdeling van stermassa's in een sterrenstelsel onder de aanname dat deze universeel is binnen de sterrenhopen (en stervormingsgebieden). We laten zien hoe de totale verdeling afhangt van de manier waarop we de sterren (willekeurig) uit de gegeven onderliggende verdeling trekken en van de massaverdeling van de jonge sterrenhopen. Ook bekijken we wat hiervan de invloed is op de helderheid van sterrenstelsels bij verschillende golflengten, de chemische samenstelling van het gas in sterrenstelsels en het aantal zware, jonge sterren dat kan worden waargenomen in ons eigen Melkwegstelsel.

Hoe nu verder?

Door het onderzoek dat is samengevat in de vorige paragraaf zijn we weer iets wijzer geworden over de totstandkoming van de populatie sterrenstelsels in ons heelal. Het eind van het verhaal is dit echter niet. Er zijn nog veel open vragen, en voor veel aspecten van sterrenstelsels komen de simulaties nog helemaal niet overeen met de waarnemingen. Simulaties zoals die in het OWLS project leren ons veel over de natuurkundige processen die belangrijk zijn voor de evolutie van sterrenstelsels, maar veel van die ingrediënten zijn nog sterk vereenvoudigd en een volledig begrip van de levensloop van sterrenstelsels is nog ver buiten bereik.

In de nabije toekomst zullen zowel waarnemende als simulerende sterrenkundigen een hoop leren over vooral de vroege stadia van de vorming van sterrenstelsels. Door de immer toenemende computerkracht en technologie komen zowel waarneming als theorie steeds een beetje verder. Af en toe een goed idee van een sterrenkundige is echter minstens zo belangrijk: wetenschap blijft mensenwerk.