

# 7 | Samenvatting

## 7.1 Afstanden in het heelal

De meeste mensen, zeker in Nederland, wonen in steden. Ons dagelijks leven speelt zich dan ook af binnen enkele kilometers. Wanneer we een andere stad bezoeken bevindt zich deze meestal nog wel binnen enkele honderden kilometers. Als we op een verre reis gaan, wordt dat enkele duizenden kilometers. Een reis van Nederland naar Australië is zo'n 15.000 kilometer, voor menselijke begrippen een enorme afstand. De ruimtevaarders die de maan bezocht hebben, hebben daarvoor een nog veel grotere afstand afgelegd, ongeveer 380.000 kilometer heen en terug. Deze afstand is zo groot, dat licht er meer dan twee seconden over doet om heen en weer te gaan.

Dit proefschrift gaat voornamelijk over melkwegstelsels en sterrenhopen. De onderlinge afstanden hiertussen zijn van een volstrekt andere orde. Afstanden tussen sterren onderling worden gemeten in lichtjaren (de afstand die het licht in één jaar aflegt, zo'n 9.5 biljoen kilometer<sup>1</sup>, of in parsecs<sup>2</sup>. Om enigszins een idee te geven van deze afstanden heb ik ze geprobeerd te vertalen naar menselijke afstanden, waarbij ik onze melkweg de grootte van een stad als Leiden heb gegeven (zie tabel 7.1).

**Tabel 7.1:** Kosmische afstanden

grootte van:	in lichtjaar	in kkm <sup>3</sup>	vergelijkbaar met:
diameter melkweg	100.000	6	Leiden
afstand tot Andromeda	2.500.000	150	Leiden - Zwolle
afstand tot de Virgo cluster	50.000.000	3000	Leiden - Ankara
grootte van CosmoGrid	100.000.000	6000	Leiden - Novosibirsk
afstand verst bekende melkweg	12.500.000.000	750.000	Aarde - Maan en terug

<sup>1</sup>9.500.000.000.000 km

<sup>2</sup>1 parsec is ongeveer 3 lichtjaar

Onze melkweg ziet er ongeveer uit als een pannekoek met spiraalarmen en een bult in het midden (plaatje 7.1). Hij heeft een diameter van ongeveer 100.000 lichtjaar. Onze naaste buur van vergelijkbare grootte, het Andromedastelsel, staat op ongeveer 2,5 miljoen lichtjaar afstand.

Het heelal is onmetelijk groot. Het licht van het melkwegstelsel dat momenteel de recordhouder is van "verste melkweg" doet er zelfs 12,5 miljard jaar over om bij ons te komen, dat is bijna net zo lang als het heelal oud is.

Omdat het heelal zo groot is vergeleken met onze dagelijkse afstanden, zijn ook de tijdschalen van een andere orde. Tijdens een mensenleven kun je slechts af en toe kleine veranderingen zien in melkwegstelsels, zoals variaties in helderheden van sterren, en heel af en toe een ster die als supernova explodeert. Voor het overige lijkt het heelal stil te staan.

Toch weten we dat het heelal volop in ontwikkeling is. Melkwegstelsels ondergaan continu interacties met hun burens, dit leidt tot botsingen en het smelten tot grotere melkwegen. De sponsstructuur die we in het heelal zien (zie plaatje 7.2) is ontstaan uit een oorspronkelijk veel gelijkere verdeling van materie, die op den duur is gaan samenklonteren.

Omdat de tijdschaal waarop dit gebeurt in de orde van miljarden jaren ligt, kunnen we de verschillende ontwikkelingen die melkwegen ondergaan niet achtereenvolgens zien. We zien wel melkwegen in verschillende stadia van ontwikkeling, omdat licht van ver ook van lang terug komt. Maar om de ontwikkeling van een enkel melkwegstelsel te volgen moeten we deze proberen na te bootsen door middel van computersimulaties.

In dit proefschrift beschrijf ik een methode om een zo nauwkeurig mogelijke simulatie van een stukje heelal uit te voeren, en vervolgens enkele van de resultaten die deze simulatie heeft opgeleverd.

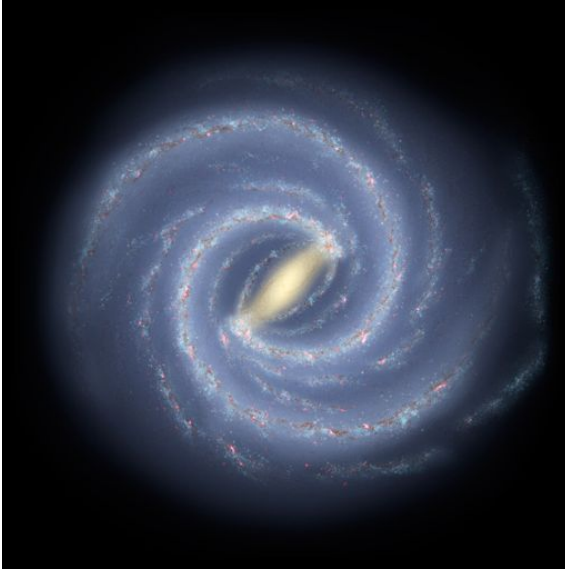
## 7.2 Samenstelling van het heelal

Volgens de meest recente metingen aan de samenstelling van het heelal, door de Planck satelliet, bestaat de energiedichtheid van het heelal voor 5 procent uit "normale" materie (zoals gas, sterren en planeten; maar ook zwarte gaten), 27 procent donkere materie en 68 procent donkere energie. Donkere energie is er verantwoordelijk voor dat het heelal steeds sneller uitdijt, donkere materie en gewone materie klonteren door hun zwaartekracht samen in respectievelijk halo's en melkwegen.

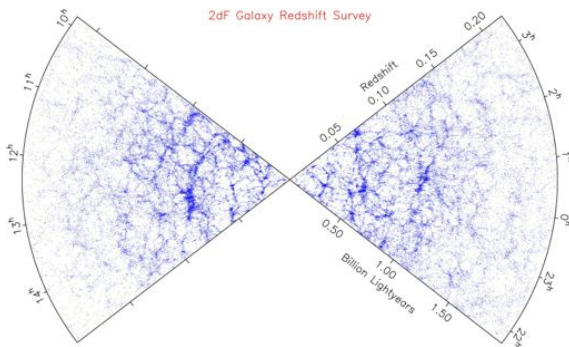
De grootschalige structuur in het heelal ontstaat dus voornamelijk door materie en energie die we niet direct kunnen zien. Indirect kunnen we donkere materie

---

<sup>3</sup>kosmische kilometers



**Figuur 7.1:** Conceptbeeld van ons melkwegstelsel (NASA/JPL-Caltech/ESO/R. Hurt).



**Figuur 7.2:** De sponsstructuur in het heelal, zichtbaar in de verdeling van melkwegstelsels. Beeld van de 2dF Galaxy Redshift Survey.

wel meten, door de zwaartekracht die deze uitoefent. Als we bijvoorbeeld de snelheden van sterren in een melkwegstelsel meten kunnen we er achter komen hoeveel massa voor deze snelheden nodig is. Door deze hoeveelheid massa te vergelijken met de zichtbare hoeveelheid weten we ongeveer hoeveel donkere materie er in melkwegstelsels zit.

### 7.3 Simulaties

Doordat donkere materie grotendeels verantwoordelijk is voor de structuur van het heelal moet een simulatie van het heelal dus voornamelijk donkere materie bevatten. Gelukkig is donkere materie goed na te bootsen: het reageert (vrijwel) alleen via de zwaartekracht, en die is alleen afhankelijk van de afstanden tussen deeltjes en hun massa.

De eenvoudigste manier om het heelal na te bootsen is door een grote kubus te nemen, in deze kubus een grote hoeveelheid deeltjes te verspreiden (op een manier vergelijkbaar met het begin van het heelal) en hier zwaartekracht op te laten werken. Donkere energie speelt hierbij ook een rol: deze zorgt ervoor dat naarmate de simulatie vordert alle afstanden steeds groter worden. Om te zorgen dat niet alle deeltjes naar het midden worden getrokken zijn zulke kubussen periodiek: een deeltje wat aan de linkerkant de kubus uitgaat komt aan de rechterkant weer binnen.

Om zo gedetailleerd mogelijk te kunnen volgen hoe structuur in het heelal ontstaat, zijn veel deeltjes nodig: hoe meer hoe beter. Ook de grootte van de kubus is van belang: een grote kubus geeft meer informatie over grote structuren, maar dit gaat ten koste van de hoeveelheid detail. Er worden dan ook veel verschillende simulaties gedaan, om zo veel mogelijk schalen te kunnen onderzoeken. Een van de meest gebruikte simulaties van de afgelopen jaren is de Millennium simulatie, deze besloeg een kubus met zijden van 1.500 miljoen lichtjaar. Elk deeltje in deze simulatie had een massa vergelijkbaar met die van 1 miljard zonnen. Ter vergelijking: onze melkweg zou in die simulatie uit ongeveer 1.000 deeltjes bestaan, nauwelijks genoeg om enige details te kunnen onderzoeken.

Om toch ook naar details van stelsels vergelijkbaar met de melkweg te kunnen kijken wordt vaak gebruik gemaakt van *re-simulaties*. Hierbij wordt in eerste instantie gebruik gemaakt van een simulatie zoals Millennium, waarin de interessante gebieden gemarkeerd worden. Deze gebieden worden daarna nogmaals gesimuleerd, maar nu met veel meer deeltjes van kleinere massa. Zo hoef je niet de hele simulatie met hoge resolutie uit te voeren, wat veel meer computerkracht zou kosten. Een nadeel van deze methode is wel dat je eerst al op zoek moet gaan naar de interessante gebieden in de simulatie met lagere resolutie.

De CosmoGrid simulatie die ik in dit proefschrift gebruik is er juist een die een klein volume beschrijft, met "slechts" 100 miljoen lichtjaar per zijde. Elk deeltje stelt hierin 10.000 zonsmassa's voor, klein genoeg om details van halo's ter grootte van kleine dwergstelsels te kunnen vinden. Omdat een klein volume relatief meer computerkracht dan een groot volume kost, was het uitvoeren van CosmoGrid een zware taak.

## 7.4 De hoofdstukken in dit proefschrift

### 7.4.1 Simulaties op gecombineerde supercomputers

Om simulaties met zo veel mogelijk deeltjes (zoals CosmoGrid) uit te kunnen voeren, is dus veel computerkracht nodig. Hoewel de supercomputers die er zijn steeds groter en sneller worden, kan het ook nuttig zijn om gebruik te maken van zo veel mogelijk supercomputers tegelijk, om zo meer computerkracht te krijgen. Voor CosmoGrid hebben we deze methode toegepast. In hoofdstuk 2 testen we deze methode, om te kijken of deze ook nog efficiënt blijft ten opzichte van een simulatie op één supercomputer. We gebruiken hiervoor een combinatie van drie supercomputers (in Nederland, Schotland en Finland).

De zwaartekrachtcode die we hiervoor gebruiken testen we op verschillende (combinaties van) systemen, waarbij we de snelheid op één locatie als basis nemen. Wanneer we alle drie de supercomputers gekoppeld gebruiken met een gecombineerde rekenkracht gelijk aan die op één locatie halen we 90% van de oorspronkelijke tijd, 10% van de tijd gaat dus verloren door communicatie tussen de verschillende computers. Wanneer we een simulatie zouden uitvoeren met een grotere hoeveelheid deeltjes gaat dit percentage nog verder omlaag, zodat op dat moment nog meer computers tegelijk gebruikt zouden kunnen worden. De methode is dus geschikt om dit soort simulaties uit te voeren, wanneer inderdaad meerdere supercomputers tegelijkertijd beschikbaar zijn.

### 7.4.2 De CosmoGrid simulatie

In hoofdstuk 3 beschrijven we de CosmoGrid simulatie. Deze simulatie is specifiek geschikt om structuur ter grootte van dwergstelsels tot de lokale groep te onderzoeken. We onderzoeken in hoeverre de CosmoGrid simulatie overeenkomt met eerder gepubliceerde modellen en simulaties voeren we een serie tests uit om te controleren tot welk detailniveau de simulatie betrouwbaar is.

Ook onderzoeken we de hoeveelheid satellithalo's die de halo's van verschillende massa hebben. We vinden een verband tussen de hoeveelheid massa van een halo en de hoeveelheid subhalo's (groter dan een bepaalde massafractie) die deze

halo bij zich heeft. Echter, vanwege de beperkte grootte van het CosmoGrid volume is deze hoeveelheid voor grotere halo's enigszins onzeker. Om dit beter te kunnen bestuderen zou een groter volume met vergelijkbare massaresolutie nodig zijn.

### 7.4.3 Ontstaan van sliertige melkwegen in leegtes

Het heelal ziet er op grote schaal uit als een soort spons. Er komen gebieden voor waar veel melkwegstelsels op een kluitje zitten, maar er zijn ook grote leegtes, zogenaamde `voids': lege holten tussen dichte clusters, afgeplatte wanden en uitgerekte filamenten. Hier zijn bijna geen sterrenstelsels te vinden. Toch hebben astronomen door middel van de ``Void galaxy survey" (zoektocht naar melkwegen in leegtes) ongeveer zestig zogenaamde kluizenaarsstelsels in deze leegtes gevonden. De meesten hiervan zijn in hun eentje, zonder nabije burenen, maar het systeem ``VGS\_31" bestaat uit maar liefst drie melkwegstelsels vlak bij elkaar. Uit waarnemingen blijkt dat deze stelsels in dezelfde sliert waterstofgas zitten, en dat ze wellicht pas recent bij elkaar zijn gekomen. Een merkwaardig melkwegensysteem dus, waarvan het ontstaan een raadsel is.

In hoofdstuk 4 onderzoeken we door middel van de CosmoGrid simulatie hoe dit soort kluizenaarsystemen kunnen zijn ontstaan. De CosmoGrid simulatie geeft in zeer hoog detail het ontstaan van donkere materie halo's waarin melkwegen ontstaan weer. In deze simulatie bevinden zich acht systemen die in allerlei aspecten sterk op VGS\_31 lijken. Van deze systemen onderzoeken we de ontstaansgeschiedenis. Hierbij kijken we naar verschillende aspecten: de hoeveel interacties/botsingen die de halo's ondergaan, hoe de afstanden tussen de verschillende halo's veranderen en hoe de omgeving van de stelsels er uit ziet.

De gesimuleerde systemen zien er aan het eind wel hetzelfde uit, maar de ontstaansgeschiedenis is desondanks erg gevarieerd. Ongeveer de helft van de systemen ontstond pas heel recent door botsingen tussen kleine halo's, de andere helft vormde heel vroeg en onderging daarna nauwelijks nog enige interactie. VGS\_31 is in dit opzicht dus niet een typisch voorbeeld van melkwegen in leegtes.

Er zijn ook overeenkomsten tussen de verschillende systemen: de stelsels blijken zonder uitzondering deel uit te maken van een zeer dunne structuur van donkere materie in de leegte. Dit verklaart het feit dat de VGS\_31 stelsels in een vrijwel rechte lijn staan, en dit lijkt een typische eigenschap te zijn van melkwegen in leegtes. De stelsels zijn in feite achtergebleven, terwijl grotere melkwegen aan de rand van de leegte alle materie wegtrokken. Een andere typische eigenschap van dit soort systemen is dat de stelsels al heel lang bij elkaar in de buurt te vinden zijn, waarschijnlijk zijn de stelsels in VGS\_31 dus al hun hele leven lang burenen.

#### 7.4.4 Evolutie van bolhopen in halo's van donkere materie

In melkwegstelsels zitten behalve losse sterren ook veel sterren in groepen of clusters, zogenaamde sterrenhopen. Sterren in zulke clusters ontstaan nagenoeg tegelijkertijd uit een grote wolk gas, en worden door hun onderlinge zwaartekracht bij elkaar gehouden. Ruwweg is er een onderscheid te maken tussen twee groepen sterrenhopen: de jonge, kleinere open sterrenhopen (die zich voornamelijk in de melkwegschijf bevinden) en de oude, grote bolvormige sterrenhopen (die zich in de halo bevinden). In hoofdstuk 5 onderzoeken we hoe die laatste groep beïnvloed wordt door getijdenkrachten veroorzaakt door de donkere materie halo waarin ze zich bevinden. Hiervoor koppelen we de CosmoGrid simulatie met nieuwe simulaties van de sterrenhopen.

De sterrenhopen die zich aan het eind van de simulatie het dichtst bij het centrum van de halo bevinden blijken ook gedurende hun hele leven de sterkste getijdenkrachten te hebben ondervonden. Hierdoor hebben deze ook de grootste hoeveelheid sterren verloren. Ook is er een onderscheid te maken tussen lokaal geboren sterrenhopen en immigrant-sterrenhopen, waarbij de laatste groep pas bij de halo kwam na diens laatste grote botsing met een andere halo. Deze immigrant-sterrenhopen blijken gemiddeld een minder sterk getijdenveld te hebben ervaren, waardoor ze aan het eind van de simulatie meer sterren hebben weten te behouden.

#### 7.4.5 Evolutie van sterrenhopen in een melkweg

In hoofdstuk 6 gebruiken we dezelfde methode als in hoofdstuk 5, maar nu passen we deze toe op open sterrenhopen in een gesimuleerd melkwegstelsel wat behalve donkere materie ook gas en sterren bevat. De gesimuleerde open sterrenhopen bevinden zich in de melkwegschijf, op ongeveer dezelfde afstand van het centrum als de Zon. Hierdoor kunnen we de gesimuleerde sterrenhopen vergelijken met waarnemingen van sterrenhopen in onze buurt. We simuleren sterrenhopen met verschillende waarden voor hun massa en straal aan het begin van de simulatie.

We zien dat de sterrenhopen die aan het begin een vrij grote straal (groter dan 7 parsec) hadden, relatief snel (binnen 100 miljoen jaar) uit elkaar vallen. De compactere sterrenhopen convergeren binnen 200 miljoen jaar naar een gemeenschappelijke straal van ongeveer 4 – 5 parsec. De groep van sterrenhopen die tot het eind overleeft, komt qua straal en massa vrij goed overeen met de waargenomen sterrenhopen. Geen van de gesimuleerde sterrenhopen blijft langer dan 1,1 miljard jaar bij elkaar, ook dit komt overeen met de waargenomen sterrenhopen.

