

University of Groningen

A void perspective of the cosmic web

Platen, Erwin

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2009

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Platen, E. (2009). *A void perspective of the cosmic web*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Polar disk galaxy found in wall between voids



— K. Stanonik, E. Platen, M. A. Aragón-Calvo, J. H. van Gorkom, R. van de Weygaert, J. M. van der Hulst, P. J. E. Peebles —

We have found an isolated polar disk galaxy in what appears to be a cosmological wall situated between two voids. This void galaxy is unique as its polar disk was discovered serendipitously in an H I survey of SDSS void galaxies, with no optical counterpart to the H I polar disk. Yet the H I mass in the disk is comparable to the stellar mass in the galaxy. This suggests slow accretion of the H I material at a relatively recent time. There is also a hint of a warp in the outer parts of the H I disk. The central, stellar disk appears relatively blue, with faint near UV emission, and is oriented (roughly) parallel to the surrounding wall, implying gas accretion from out of the voids. The considerable gas mass and apparent lack of stars in the polar disk, coupled with the general underdensity of the environment, supports recent theories of cold flow accretion as an alternate formation mechanism for polar disk galaxies.

8.1 Introduction

Polar ring galaxies are peculiar galaxies encircled by a ring of stars, gas and dust with perpendicular spin (Rubin 1994). These distinct kinematic components are confirmed by observations of their H I distribution (Schechter et al. 1984; van Gorkom et al. 1987; Arnaboldi et al. 1997), which generally exhibit extended emission throughout the polar ring with a central gap. Kinematically, we see that some of these structures are more disk-like than ring-like (Iodice et al. 2006), are massive enough to be self gravitating (Arnaboldi & Sparke 1994), and have the suggestion of spiral arms (Arnaboldi et al. 1997). The central galaxy is generally a rotationally supported S0 or elliptical galaxy and shares a common geometric centre with the polar disk, however is relatively gas poor. Polar disk galaxies are relatively rare, with only a few percent of S0s that have now or have had a polar ring (Whitmore et al. 1990). They are particularly useful and interesting as their perpendicular dynamics allow a three dimensional probe of the dark matter potential (Schweizer et al. 1983; Sackett et al. 1994; Combes & Arnaboldi 1996).

The formation mechanism for polar disks is not entirely clear, but presumably requires a second formation event to form the perpendicular spin components. Originally, a major merger or close encounter was assumed necessary (Schweizer et al. 1983), however neither theory resolves the problem of the central disk retaining its rotational support in systems with

significantly massive polar disks, as with NGC 4650A (Bournaud & Combes 2003; Bournaud et al. 2005; Iodice et al. 2006). The issue is also confused by indeterminate ages of observed polar disks, which are partly dependent on the stability of polar oriented structures (Sparke 2004). More recent theories and simulations suggest cold accretion along cosmological filaments may form and continue to feed these polar disks (Macciò et al. 2006).

We have found a polar disk galaxy in relatively isolated, void-like conditions, situated in a tenuous sheet-like configuration between two voids. It was found as part of an H I survey of 15 void galaxies selected using an early version of the Watershed Void Finder (Platen et al. 2007, see Chapter 2) and the Sloan Digital Sky Survey (SDSS, Adelman-McCarthy et al. 2008), with each galaxy in a different void. It has no optical polar ring visible in the SDSS imaging but a massive, extended H I polar disk. This suggests cold flow accretion as the most likely formation mechanism, and sheds a new and surprising light on the nature of galaxies populating the most desolate areas in the Universe (cf e.g. Peebles 2001). Observations are described in § 8.2, shown in § 8.3, and comparisons with theory made in § 8.4.

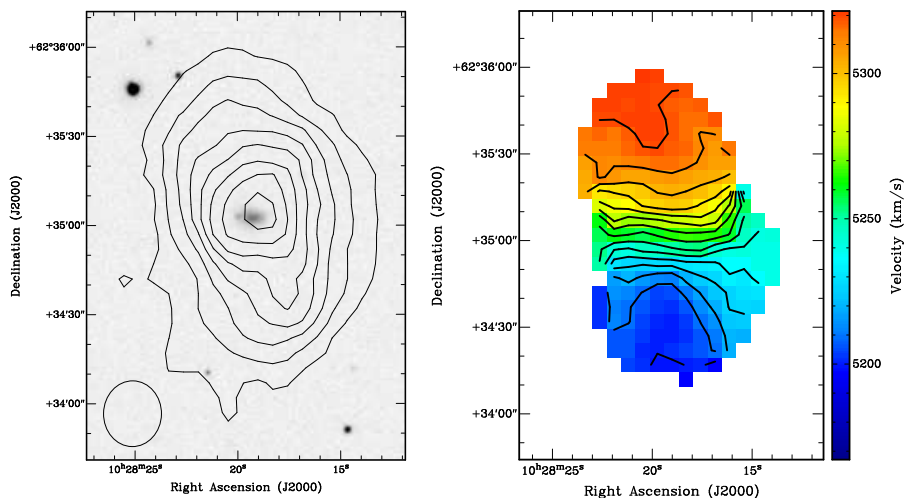


Figure 8.1– SDSS J102819.24+623502.6. On the left, the g-band image overlaid with H I contours. The column density contours are 0.76 (1.9σ), 2.0 , 3.3 , 4.5 , 5.9 , 7.0 , 8.4 , $9.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$. On the right, the intensity weighted velocity field overlaid with 8.5 km s^{-1} contours.

8.2 Observations

SDSS J102819.24+623502.6 is part of a pilot for a larger study of galaxy formation in underdense regions of the SDSS redshift survey (Stanonik et al. 2009, in preparation). Our lonely galaxy is situated at a RA & Dec (J2000) of $10:28:19.02 +62:35:02.0$ and a redshift of $z=0.0178446$. It is fairly blue, with a g-band magnitude of 17.67 and r-band magnitude of 17.41 as reported in the sixth data release from the SDSS. Note that these images reach to magnitudes of $g \sim 23$, as the drift-scan mode employed by the SDSS results in an effective exposure time in each band of 54.1 s (York et al. 2000). A distance of 76 Mpc is calculated assuming $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, which gives a scale of $1''=370 \text{ pc}$.

The 21 cm line of our target was observed for 12 hours at Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) in Maxi-short configuration, which optimizes imaging of very extended sources

in a single track observation with shortest baselines of 36, 54, 72 and 90 meters. We observed in 4 IFs each with 512 channels, a 10 MHz bandwidth, and 2 polarisations. The target redshift corresponds to an optical heliocentric velocity of 5302 km s^{-1} , so channel increments of 19.5 kHz give a velocity resolution of 4.27 km s^{-1} .

All calibration was done using standard AIPS procedures. Continuum emission was subtracted from the UV data by linear interpolation from the line free channels. Image cubes were created with a CLEAN box around the H I emission that cleaned down to 2 mJy beam^{-1} (4σ). Images were created with uniform weighting and robust 1 to give a balance of high resolution, a beam size of $22''.1 \times 19''.5$, with low noise, a rms of $0.5 \text{ mJy beam}^{-1}$. This corresponds to a 3σ detection limit in column density of $6.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ and in mass of $2.0 \times 10^8 M_{\odot}$ for a galaxy with velocity width 100 km s^{-1} . 0^{th} and 1^{st} moment maps were made, with 1.5σ clipping applied to a mask that is Hanning and Gaussian smoothed over 3 cells, both in velocity and spatially, respectively.

8.3 Results

8.3.1 Galaxy Parameters

The total H I image and intensity weighted velocity field are shown in Fig. 8.1. We calculate a total H I mass of $M_{\text{HI}} = 3.0 \pm 0.5 \times 10^9 M_{\odot}$. There is an angle of 90° between the central stellar disk and the polar H I disk, which warps at a distance of 20 kpc to 77° .

A comparison of slices through the data cube in position-velocity along the major axis of the H I disk compared to the major axis of the central stellar disk (Fig. 8.2) clearly demonstrate that the regular rotation within this misaligned gas disk is completely decoupled from the stellar component. The major axis slice (left panel, Fig. 8.2) confirms the notion from the velocity field that the H I is a disk and not a ring. The rotation curve increases non-linearly with increasing radius and appears to flatten out at a radius of about $30''$, or 11 kpc. The rotation at the last measured point (about 22 kpc) is 100 km s^{-1} (assuming an inclination of 40° derived from a best fit of the velocity field). This implies a dynamical mass of $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ within 22 kpc. The SDSS r_{90} value of $6.6''$ gives a radius of 2.4 kpc, so the extent of the H I gas is about 9 times the extent of the perpendicular stellar disk. The inverse concentration index for SDSS galaxies, taken from the ratio of r_{50} to r_{90} , correlates tightly with morphological type (Shimasaku et al. 2001), and in our central, stellar galaxy is consistent with an exponential, rotationally supported disk.

Analysis of the optical spectra available from SDSS allows an approximate measure of the stellar mass in the central galaxy. The parameters are calculated by Yip et al. (2009, in preparation) who utilises the spectrum services provided by Dobos et al. (2006), and the stellar population model by Bruzual & Charlot (2003) to find a mass of $1.6 \times 10^9 M_{\odot}$ for the part of our galaxy falling within the $3''$ fiber. This provides a lower limit for the stellar mass of the entire galaxy. Since this area is roughly half the optical extent of our tiny galaxy, we expect the total stellar mass to be twice that, roughly equal to the H I mass in the polar disk. This is similar to the polar disk simulated by Maccio' et al. (2006) which had a baryonic mass in the polar ring of only a third the mass of the central S0 galaxy, and NGC 4650A which has twice the mass in gas and stars in its polar disk as in the central host galaxy (Iodice et al. 2002).

Our target was also observed by GALEX as part of its All Sky Survey (AIS), and serendipitously in the field of a guest observer 1619 s NUV exposure. Fig. 8.3 overplots H I contours over the deep NUV image. The 19th magnitude UV emission follows the disk of the central optical galaxy, with no detection along the polar disk.

8.3.2 Large Scale Environment

Cosmologically, the galaxy is relatively isolated within a wall between two voids (Fig. 8.4). A cursory look at 18 other polar ring galaxies taken from Whitmore et al. (1990) which are contained within the SDSS redshift survey finds them in average or slightly overdense environments (Platen, private communication). This is consistent with a photometric statistical study by Brocca et al. (1997) of the visible environments of 56 polar ring galaxies, which found them to be similar to normal galaxies.

The two voids and their dividing wall were identified with the closely related Watershed Void Finder (WVF, Platen et al. 2007, Chapter 2) and Cosmic Spine formalism (Aragón-Calvo et al. 2008, see Chapter 4). The starting point is the Delaunay tessellation field estimator reconstructed density field inferred from the local SDSS galaxy distribution (Schaap & van de Weygaert 2000, see Chapter 5 and 6 for a description of the SDSS density field). The WVF identifies the voids and traces their spatial outline, the Cosmic Spine formalism recovers the wall forming the boundary between the two voids.

Following its identification, we determine the geometry, shape and orientation of the wall. These are inferred from the principal components of the covariance matrix $C_{ij} = \text{Var}(r_i r_j)$, computed on the basis of the 34 SDSS galaxies within a distance of 8.5 Mpc around the void galaxy. The wall's flattening is estimated from the ratio of its smallest eigenvalue, e_3 , over the other two eigenvalues e_1 and e_2 . The obtained thickness of the wall, ~ 1.3 Mpc, corresponds to a flattening of $\sim 96\%$.

Fig. 8.4 shows the spatial distribution of the galaxies in and around the wall, with the nearest neighbour 4.7 Mpc away, and the boundary voids roughly 25 Mpc in radius. The size of the upper void is a lower limit as it continues past the edge of the SDSS survey area. These maps are created using galaxy redshifts from SDSS DR6, which is limited to galaxies with $r < 17.77$ magnitudes and $55''$ separation from any neighbours. The polar disk is at an angle of $\sim 25^\circ$ from the normal of the wall, and the central stellar disk is similarly misaligned $\sim 25^\circ$ away

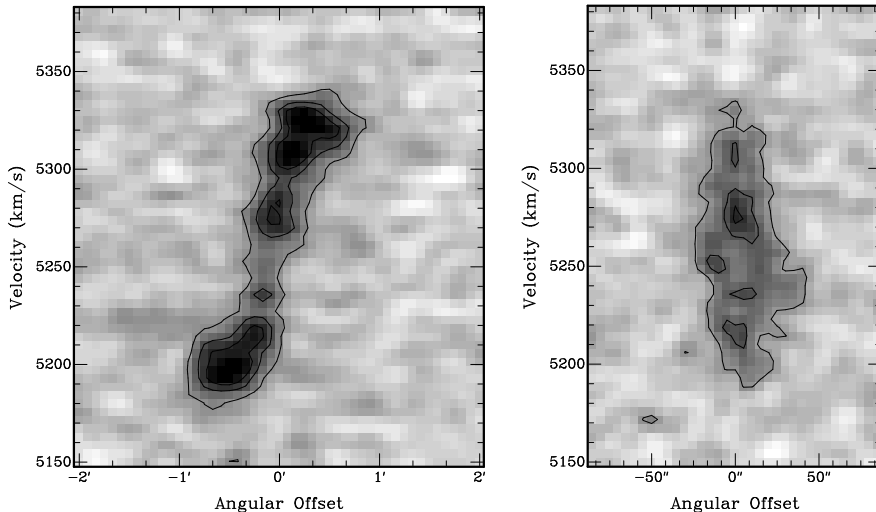


Figure 8.2– PV diagrams aligned with the polar disk (left) and central stellar disk (right). Note the central hole in the gas distribution in both slices. Contours in both images are at increments of $1.5 \text{ mJy beam}^{-1} (3\sigma)$.

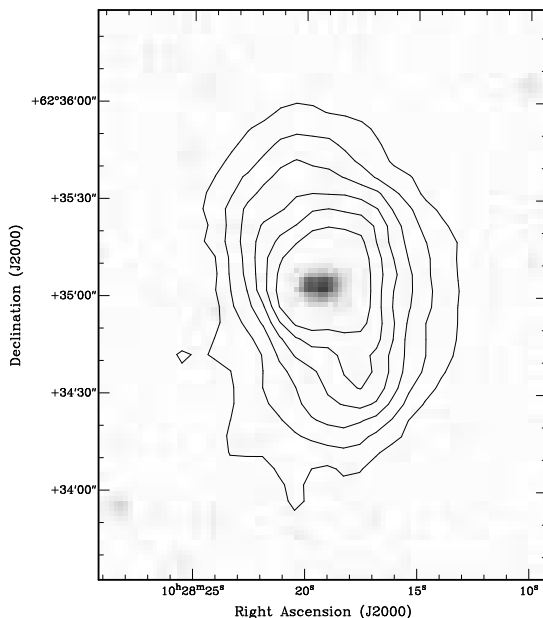


Figure 8.3– SDSS J102819.24+623502.6, galex NUV image overlaid with H I contours. H I contours are incremented as in Fig. 8.1, NUV detection is 19.0 magnitude after 1619 second exposure.

from the plane of the wall. Roughly, however, the polar disk appears more perpendicular to the wall than aligned.

8.4 Discussion

With our data we can probe in H I an area of $650 \text{ kpc} \times 650 \text{ kpc}$ on the plane of the sky surrounding SDSS J102819.24+623502.6, with a velocity range from 4232 km s^{-1} to 6196 km s^{-1} . Despite the significant volume probed, no companions are detected above the $2.0 \times 10^8 M_{\odot}$ limit in H I. Down to the SDSS limits, the neighbourhood surrounding our lonely galaxy is empty within 3.5 Mpc. This environmental isolation makes it unlikely that the substantial $3 \times 10^9 M_{\odot}$ of neutral hydrogen we detect was accreted through a merger or close encounter, and we propose cold accretion as the most likely mechanism (Binney 1977; Kereš et al. 2005; Dekel & Birnboim 2006).

Furthermore, satellite mergers are generally accompanied by a burst of star formation and the addition of existing stars to the system, neither of which are seen. We do see NUV emission in the stellar disk (Fig. 8.3), indicating star formation occurred there within the recent past, however the lack of UV or optical emission in the polar disk is convincing. Perhaps we are observing this system in the earliest stage of its development, where the slowly accreted gas has not yet cooled sufficiently to begin forming stars. The measured column density never passes above the 10^{21} cm^{-2} surface density threshold proposed by Skillman (1987) even without correcting for inclination, leading us to expect little to no star formation in our extended disk.

Slow accretion has been proposed as a formation mechanism for the optically discovered, H I rich polar disk galaxy NGC 4650A (Iodice et al. 2006). While tidal accretion simulations by Bournaud & Combes (2003) can reproduce massive, gas-rich and star-poor polar rings,

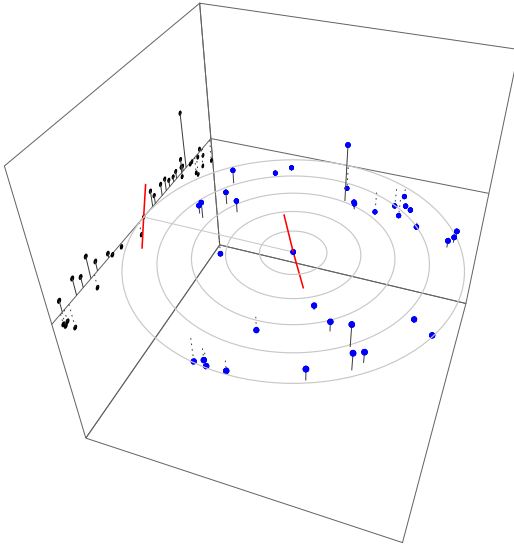


Figure 8.4– The location and orientation of the polar disk within the wall, between the two voids. The full volume of the sphere with galaxies brighter than $m_g = 17.76$ out to 10 Mpc has been plotted, with concentric circles every 2 Mpc in the plane of the wall. This demonstrates the loneliness of our galaxy and the emptiness of the bounding voids. An edge-on view is projected on the left, showing the thinness of the wall. The red line indicates the position and orientation of the projected major axis of the H I disk.

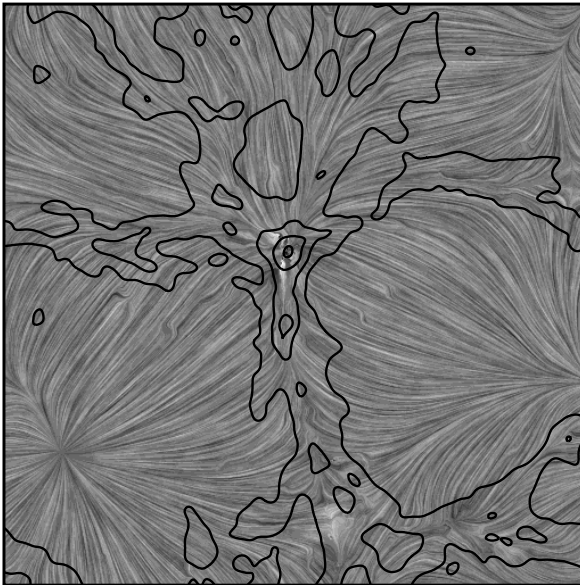


Figure 8.5– N-body simulation showing the flow lines of the cosmic velocity field, with density contours superimposed. Clearly visible is the flow out of the minima onto the wall-like boundaries, and then along these structures towards the high-density peaks.

Bournaud et al. (2005) note that such encounters would convert the central galaxy into an elliptical remnant, and not the rotationally supported disk found in NGC 4650A and suggested in our system. Cold flow accretion as a formation mechanism of polar disks has also been “observed” serendipitously in two simulations. Maccio’ et al. (2006) discovered a polar disk galaxy that formed in their simulation area through the infall of cold gas along a 1 Mpc long filament. Brook et al. (2008) found that their cosmological simulation contained a polar disk galaxy that was stable over timescales of 3-5 Gyr. In both cases, comparisons of the simulated galaxies with observations produce amazing optical and dynamical similarities.

The orientation of the central stellar disk $\sim 25^\circ$ from the wall is surprising. Recent observational and simulation results (Trujillo et al. 2006; Hahn et al. 2007; Aragón-Calvo et al. 2007; Hahn et al. 2007) show that disk galaxies statistically align their spin axis to lie within the wall they are embedded in. Such an alignment would then naturally lend itself to accretion of material within the plane of the wall, forming a polar disk. This, however, is not what we see, and instead the accreted material appears to be falling in out of the voids.

What we may witness reflects the process of a hierarchically evolving void population (Sheth & van de Weygaert 2004). As voids expand and evacuate matter from their interior, they tend to merge with neighboring voids into ever larger underdensities. The heuristic simulation of Dubinski et al. (1993) illustrates how a group of spherical voids, embedded within a larger underdense area, expand until they meet. Once they touch, matter at the sheetlike boundaries of the voids starts to stream along these interstices towards the emerging higher density boundary surrounding the entire complex of merging voids (see Fig. 8.5). As a result we observe the thinning and dissolution of the intervoid walls while they get gradually integrated in the emerging larger-scale void and remain visible as its tenuous interior substructure. The position of our galaxy within its wall is reminiscent of this situation, supporting the idea that the polar gas is not falling in from the wall, as that material is instead streaming away, but out of the bounding voids.

We have discovered completely by chance, as in simulations, a key example of polar disk formation in which accretion of cold gas is the most likely formation scenario.

De Nederlandse Samenvatting



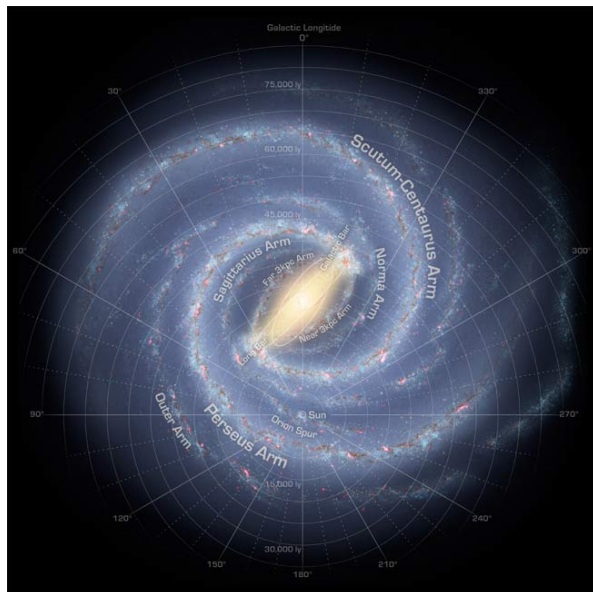
Materie in het Heelal is niet erg eerlijk verdeeld. Op sommige plekken zit erg veel opgehoopt, terwijl in andere gebieden nauwelijks iets te vinden is. Het is enigszins te vergelijken met het verschil tussen een drukke metropool en een lege woestijn. We kunnen ons nu afvragen; hoe is deze verdeling tot stand gekomen? Was deze verdeling er altijd al? Wat kunnen we ervan leren? Zulke vragen vormen de globale achtergrond en motivatie van dit onderzoek. Nu zijn deze vragen te omvangrijk en te breed om in één keer te beantwoorden, daarom hebben wij ons eerst gericht op één specifiek deelgebied, de Leegtes in het Heelal. Van hieruit zullen we proberen een perspectief te geven op het grotere geheel.

Om te begrijpen hoe de verdeling van materie in het Heelal tot stand is gekomen, moeten we eerst weten wat de bouwstenen zijn van deze structuur: de sterrenstelsels. Sterrenstelsels zijn in feite niets meer dan grote opeenhopingen van vele miljarden sterren en gas dat zich tussen deze sterren bevindt. Onze zon is bijvoorbeeld zo'n ster, die tezamen met vele andere sterren, rond het centrum van het Melkweg draait. Het gehele Melkweg is slechts één van de ontelbaar vele sterrenstelsels die zich in het Heelal bevinden.

Sterrenstelsels komen voor in allerlei vormen en maten. Zo zijn er grote blauwe stelsels die eruit zien als afgeplatte schijven. Vaak hebben deze schijven een kenmerkend spiraalpatroon. Ons Melkweg is ook zo'n groot spiraalstelsel waar de zon zich bevindt in de buitenste delen van één zo'n spiraalarm (zie Figuur 9.1). Ook zijn er stelsels die duidelijk meer bolvormig zijn en zij hebben ook geen spiraalarmen. Verder hebben ze vaker kleinere hoeveelheden gas en zijn zij ook roder van kleur. Dit laatste type stelsels wordt elliptische stelsels genoemd.

In Figuur 9.2 laten we vier grote sterrenstelsels zien. Linksboven zien we het gasrijke stelsel M101 (object 101 uit de Messier catalogus), dat gekenmerkt wordt door mooie blauwe spiraalarmen. Dit duidt op de aanwezigheid van jonge, hete sterren. Rechtsboven (M109) en linksonder (M100) zien we twee andere spiraalstelsels die iets roder van kleur zijn dan M101. In de rechter onderhoek zien we een voorbeeld van een groot en rood elliptisch stelsel (M87). Dit stelsel is voornamelijk opgebouwd uit oude en rode sterren. De directe omgeving blijkt een belangrijke factor te zijn die de kleur bepaalt. Zo bevindt het blauwe stelsel M101 zich aan de rand van de Lokale Leegte, terwijl het rode stelsel M87 zich midden in een dichtbevolkt gebied bevindt. Het kwantificeren van de omgevingsfactoren is één van de doelstellingen van dit proefschrift.

De vier afbeeldingen in Figuur 9.2 zijn opnames die deel uitmaken van de Sloan Digital Sky Survey, afgekort tot SDSS (Sloan Digitale Hemel Survey). Dit soort surveys zijn grote waarnemingsprojecten waar een groot gedeelte van de hemel wordt waargenomen. Zo heeft de SDSS bijna de gehele noordelijke hemel waargenomen en met behulp van deze opnames zijn de posities bepaald van nagenoeg een miljoen sterrenstelsels. Deze gigantische database is vrij toegankelijk voor iedereen en de analyse van deze informatie vormt een belangrijk onderdeel van dit proefschrift. Verderop zullen we enkele visualisaties van de SDSS data laten zien.



Figuur 9.1– Melkweg De figuur is een artistieke impressie (R. Hurt NASA/JPL) van hoe ons Melkweg eruit zou kunnen zien, zouden we het van boven af kunnen bekijken. De positie van de zon (sun) is aangegeven in de figuur, ook de namen van de verschillende spiraalarmen zijn aangeduid. De zon is dus slechts een ster die zich midden in deze grote schijf bevindt. Dit is de reden dat op een donkere avond er een heldere band te zien is, de Melkweg, bestaande uit het gezamenlijk licht van vele andere miljarden sterren zoals de zon.

9.1 Een Structuur van Bellen en Filamenten

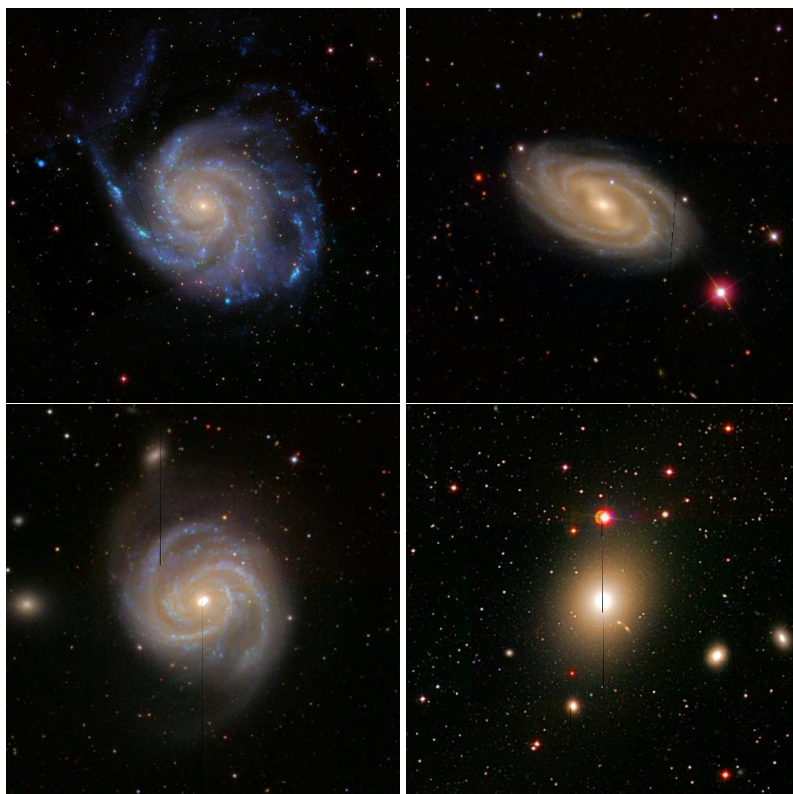
Accurate afstanden bepalen van sterrenstelsels is zeer moeilijk. Pas rond de vorige eeuwwisseling (tijdens het grote debat van 1920 tussen Shapley en Curtis) werd het duidelijk dat andere sterrenstelsels geen onderdeel zijn van ons eigen Melkweg. Dat deze zogenaamde extragalactische (buiten de Melkweg gelegen) nevels een nog grotere en uitgebreidere structuur vormen werd nog veel later ontdekt. Telescopen moesten eerst veel gevoeliger worden om de posities en afstanden van vele duizenden sterrenstelsels in kaart te kunnen brengen. Zo ongeveer eind jaren zeventig bleek uit deze eerste grote extragalactische surveys dat sterrenstelsels niet zo maar willekeurig verspreid zijn in de ruimte.

Sterrenstelsels bevinden zich namelijk in een sponsachtige structuur die we de Grote Schaal Structuur (GSS) van het Heelal noemen. Deze structuur heeft een zeer complexe en intrigerende morfologie. Figuur 9.4 geeft een indruk van deze structuur. Hierin zitten compacte knooppunten, die we clusters noemen, die onderling verbonden zijn door filamenten en wandachtige structuren. Deze afgeplatte wanden omgeven weer grotere gebieden waar zich nauwelijks sterrenstelsels bevinden, de leegtes.

Een van de meest dichtstbijzijnde clusters is de Virgo Cluster*, die slechts 60 miljoen lichtjaren van ons verwijderd is. Een lichtjaar is de afstand die het licht in een jaar kan afleggen. De aarde staat bijvoorbeeld op een afstand van 8 lichtminuten van de zon. De dichtst bijzijnde ster staat op ongeveer 3 lichtjaar. Andromeda, het zustersterrenstelsel van het Melkweg, staat op ongeveer 2.5 miljoen lichtjaar†. Op een heldere avond is dit het oudste object dat we met het blote oog aan de hemel kunnen waarnemen. Dit licht werd uitgestraald lang voordat de eerste mens op aarde liep. Zo is het licht dat wij nu waarnemen van de Virgo Cluster al 60 miljoen jaar oud. Echter ten opzichte van de schaal van de GSS staat de Virgo Cluster zeer

*Objecten in de sterrenkunde worden vaak vernoemd naar het Sterrenbeeld waar ze in staan. In dit geval Virgo (Maagd).

†In plaats van lichtjaar is de eenheid van parsec gebruikelijker. Een parsec is ongeveer 3.25 lichtjaar. Voor extragalactische objecten wordt dit vaak uitgedrukt in Mpc oftewel Megaparsecs (Mega = miljoen)



Figuur 9.2– Galactische Dierentuin Enkele mooie sterrenstelsels uit de Sloan Digital Sky Survey. Linksboven is het ‘pinwheel’ (pennenrad) stelsel, ook wel aangeduid met M101. Rechtsboven is M109 te zien, een spiraalstelsel met een zogenaamde balk in het centrum. Linksonder zien we M100 en M87, een spiraalstelsel en elliptische stelsel die zich beide bevinden zich in de Virgo Cluster.

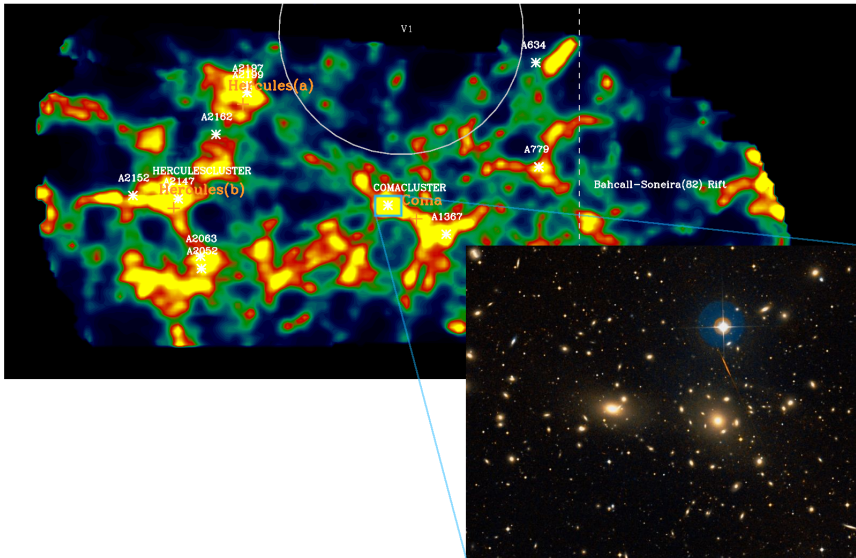
‘dichtbij’.

De Coma[‡] Cluster staat op 300 Miljoen lichtjaar van ons vandaan, dat is ongeveer 5 keer zo ver dan de Virgo Cluster. Dit licht is dus verzonden ten tijde dat de eerste dieren op het land begonnen te leven. Omdat de Coma Cluster een stuk verder weg staat dan de Virgo Cluster, is het gemakkelijker in beeld te brengen (zie Figuur 9.3). De Coma Cluster is een van de meeste prominente clusters in het nabije Heelal en zij maakt deel uit van een zogenaamde superstructuur.

Het blijkt dat ook clusters niet geheel willekeurig verspreid zijn in de ruimte. Er zijn gebieden met grote aantallen clusters, dit zijn de zogenaamde Superclusters[§]. De Coma cluster en nog een andere cluster (A1367) vormen samen de Coma *Supercluster*. Op enige afstand van de Coma Supercluster bevindt zich nog een Supercluster: de Hercules Supercluster (lin-

[‡]De naam Coma is afgeleid van de Engelse benaming voor het sterrenbeeld Hoofdhaar. Dit sterrenbeeld is vernoemd naar de Koningin Bernices die haar hoofdhaar offerde toen haar man, Ptolemeus III, veilig terugkeerde in Egypte.

[§]bij gebrek aan betere termen krijgen bestaande namen vaak een voorvoegsel zoals super, groot, e.d.



Figuur 9.3– De Coma Cluster is een dichte verzameling van meer dan duizend sterrenstelsels. De bovenste figuur laat het dichtheidsveld zien rondom de Coma Cluster, dit is de zogenaamde Coma Great Wall. Aan de linkerkant van boven naar beneden zien we de Hercules Supercluster, een grote aaneenrijging van tientallen verschillende clusters. De *inzet* laat optische opname van de Coma cluster zien. De twee grote elliptische stelsels in het midden zijn NGC4874 en NGC4889. De meeste oranje vlekjes die te zien zijn in de figuur, zijn sterrenstelsels die behoren tot de Coma Cluster.

kerkant van Figuur 9.3). Deze twee Superclusters tezamen vormen de Coma Great Wall. Een Great Wall laat zich zo ongeveer vertalen met Grote Wand. Figuur 9.3 geeft een indruk van de Coma Great Wall. In het middelpunt van deze Wall zit de Coma Cluster, die als een grote spin in het midden van een kosmische web zit.

Het beschrijven en in kaart brengen van deze kosmische structuren noemen we met een mooi woord kosmografie. Zoals geografie het in kaart brengen is van de Aarde, zo is kosmografie het in kaart brengen van de Kosmos.

9.1.1 De Voids in de Grote Schaal Structuur

De materie in het Heelal heeft een duidelijke verdeling dat lijkt op dat van schuim. De lege bellen in dit schuim corresponderen met gebieden waar de dichtheid van clusters en sterrenstelsels veel lager is dan het gemiddelde. We noemen deze gebieden de Voids, afkomstig van de afkorting voor *devoid of galaxies*, oftewel *leemte van sterrenstelsels*.

De eerste grote voids werden zo rond de jaren 80 van de vorige eeuw ontdekt. De meest belangrijke ontdekking was die van het bestaan van de Boötes¹ Void. Het bestaan van de Boötes Void gaf onomstotelijk bewijs voor het bestaan van grote lege gebieden in de 'Grote Schaal Structuur'. De kleurenfiguren in Hoofdstuk 6 geven een indruk van GSS in het nabije Heelal en de prominente positie die de Boötes Void daarin speelt.

¹Ook wel bekend als Ossenhoeder

De Boötes Void is in feite een groot bolvormig gebied met een diameter van 120Mpc waar geen enkele cluster in voor komt. Wel kunnen we nog vrij veel sterrenstelsels terug vinden in de Boötes Void. We kunnen zelfs nog enkele 'kleinere' voids identificeren in de Boötes Void. Een betere term voor dit object zou dan ook zijn *de Boötes Supervoid*. Zoals een void een leegte is in de distributie van sterrenstelsels, zo is een supervoid een leegte in de verdeling van clusters. En net zoals een supercluster een clustering is van clusters, zo moet men supervoids beschouwen als een clustering van voids. Om te begrijpen hoe deze structuren ontstaan, moeten we kijken naar de dynamica van het Kosmische Schuim.

9.2 Het ontstaan van een Kosmisch Web

De vorming van clusters en voids is een complex proces dat wordt gekenmerkt door een hiërarchie van schalen. De grootste schaal is zo ongeveer het waarneembare Heelal zo'n 1500 Mpc. De kleinste schaal is wat moeilijker vast te stellen en hier nemen we voor het gemak even de orde van grootte van een sterrenstelsel. Sterrenstelsels hebben ongeveer een afmeting van enkele tot honderden kpc (kiloparsec is duizend parsec). Deze schatting laat zien dat we tenminste zes ordes van magnitude (van 10^{-3} Mpc tot 10^3 Mpc zijn zes stappen van tien) in ogenschouw moeten nemen om structuren in het Heelal uit te rekenen. In de praktijk kunnen we gelukkig volstaan met veel kleinere volumes.

Dit feit stelt ons in staat om kosmologische N-deeltjes simulaties uit te voeren. We nemen dan een kleine kubus en die beschouwen we als representatief voor het gehele Universum. Vervolgens stoppen we er aantal^{||} verschillende deeltjes in, die elk een klein massa-elementje vertegenwoordigen. Op kosmologische schalen bepaalt de zwaartekracht de dynamica (bewegingen) van de materie. Die kracht berekenen we uit de verdeling van de materie. Vervolgens bewegen we deze deeltjes een klein beetje volgens het uitgerekende zwaartekrachtveld. Dit levert weer een net iets andere materieverdeling, die geeft weer een net iets andere kracht, waarmee we weer een nieuwe verplaatsing kunnen bepalen, etc. Door dit telkens te herhalen kunnen we de vorming van structuren in het Heelal simuleren. Zo krijgen we uiteindelijk een indruk van de huidige verdeling van de materie. In Figuur 9.4 laten we een uitkomst zien van zo'n simulatie.

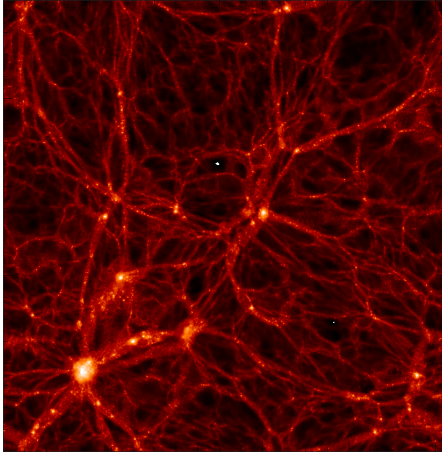
9.2.1 Donkere Materie

Voordat we een uitleg geven van deze structuren, moeten we eerst nog een cruciaal onderdeel introduceren: de donkere materie. Donkere materie is materie die zich niet laat ontdekken via licht dat ze uitstraalt. In plaats daarvan wordt het bestaan van donkere materie afgeleid uit de bewegingen van sterrenstelsels.

Het bekendste voorbeeld is de beweging van sterrenstelsels in clusters. Al in de jaren dertig van de vorige eeuw bleek dat de totale massa van clusters veel groter is dan de hoeveelheid materie in de vorm van sterrenstelsels. Dit impliceert dat er nog andere materie moet zijn. Een gedeelte van deze materie is reeds gevonden en bestaat uit een heel heet en ijl gas. Dit gas straalt alleen licht uit op hele energetische golflengten die niet zichtbaar zijn met het blote oog. Zelfs als we al dit gas meerekenen in de totale massabalans dan 'zien' we nog steeds te weinig materie. Dus is er waarschijnlijk nog een massacomponent die geen licht uitstraalt: de donkere materie**.

^{||}dit aantal wordt aangeduid met de letter N

^{**}Een alternatief is om veranderingen aan te brengen in de zwaartekracht (MOND, Modified Newtonian Dynamics)



Figuur 9.4– Kosmisch Web De figuur laat een mogelijk massaverdeling zien van donkere materie in het Heelal. De Figuur geeft een zogenaamde dichtheidskaart weer, des te lichter de kleur, des te hoger de materiedichtheid. Hoge dichtheden worden vaak bereikt in dichte compacte klompjes, deze zijn onderling verbonden door filamentachtige structuren, het kosmische web. De donkere cellen zijn nagenoeg lege gebieden die we voids noemen.

9.2.2 De Ruimtelijke Verdeling

In de huidige kosmologische modellen is er ongeveer vijf tot tien keer zoveel donkere materie dan gewone materie. Dit betekent dat de zwaartekracht van de donkere materie de vorming van structuren domineert. Figuur 9.4 geeft een indruk van de verdeling van de donkere materie in ons Heelal. De figuur is een doorsnede door het dichtheidsveld. De lichte plekken representeren punten met een hoge dichtheid, hier bevindt zich dus veel donkere materie, zoals in de clusters. In de donkere gebieden is er zeer weinig (donkere) materie, dit zijn de voids.

De figuur laat zien dat de verdeling van donkere materie een zeer complex webachtig structuur heeft, *het Kosmische Web*. Als we het schouwspel iets beter bestuderen dan zouden we enkele terugkerende patronen kunnen ontdekken. Dichte opeenhopingen zijn onderling verbonden door slierten, die we filamenten noemen. Ook lijkt te gelden dat des te groter de piek, des te dikker de filamenten die er mee verbonden zijn. De grote massieve pieken vormen de belangrijkste knooppunten van het Kosmische Web. Kleinere pieken kunnen we voornamelijk herkennen in de verbindende filamenten. Deze kleinere pieken zijn ook weer de knooppunten voor nog kleinere filamenten. Dit soort patronen zijn typisch voor hiërarchische netwerken, en geeft de indruk van een fractal patroon.

De relatie met de waargenomen structuren, zoals in Figuur 9.3, is nu min of meer eenvoudig te maken. De grote massieve pieken, de knooppunten in het Web, komen overeen met de clusters van sterrenstelsels. De materie en sterrenstelsels bewegen zich naar de clusters toe in grote dichte filamenten. De sterrenstelsels kunnen op zichzelf ook weer kleinere knooppunten vormen voor nog dunnere filamenten, waarin zich kleinere sterrenstelsels bevinden. In zekere zin kunnen we het Kosmische Web beschouwen als het fundamentele skelet. Dit skelet bepaalt de locaties en eigenschappen van de zichtbare sterrenstelsels, zoals ons Melkweg.

9.3 De Overvloedige Leegte

In dit proefschrift hebben we ons in de eerste plaats gericht op de voids. Deze leemtes zijn ontstaan doordat de initiële dichtheid in deze gebieden iets lager was dan in de rest van het Universum. De materie in dit gebied voelt dan effectief een kracht die naar *buiten* is gericht. Hierdoor begint materie naar de buitenkant te stromen en zodoende wordt de dichtheid nog lager. Het contrast met de rest wordt dan nog meer versterkt en zo zal nog weer meer materie

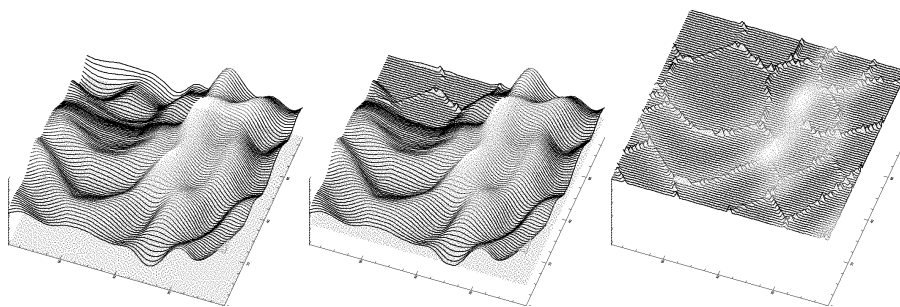
naar buiten stromen, etc. Op deze wijze kan dus vanuit een gebiedje met een iets lagere dichtheid een expanderende void ontstaan.

9.3.1 Void detectie, een kwestie van waterscheiding

Als we iets willen zeggen over de kwantitatieve eigenschappen van de voids dan moeten we ze eerst kunnen detecteren. In Hoofdstuk 2 van dit proefschrift hebben we getracht een goede manier te vinden waarop we voids automatisch kunnen herkennen. Hier verstaan we onder de term goed, in de eerste plaats dat de methode de gehele void moet herkennen. In de tweede plaats dat de methode van te voren geen aannames mag doen over de eigenschappen van een void.

Het blijkt dat op een oer-Hollandse wijze, door middel van het aanleggen van dijken, de voids zeer goed te detecteren zijn. Dit doen we namelijk door een overstroming te simuleren, waarbij we kijken naar hoe het water de verschillende compartimenten opvult. Hier maken we gebruik van de zogenaamde Waterscheidingstransformatie (Watershed Transform). Deze transformatie verdeelt de ruimte in afzonderlijke compartimenten, afhankelijk van de topologie van het veld.

De beste wijze om de methode te begrijpen is om het dichtheidsveld als een landschap voor te stellen. Plekken met een hoge dichtheid corresponderen met bergtoppen in het landschap, terwijl plaatsen met een zeer lage dichtheid overeenkomen met een polder (zie het eerste frame in Figuur 9.5). Laten we nu aannemen dat dit landschap langzaam overstroomt tijdens een langdurige plensbui. Het water verzamelt zich dan eerst op het laagste punt, het minimum. Vandaar uit zal het verder gaan stijgen en zo zal het landschap langzaam overstromen. Op een gegeven moment zal het water, dat uit verschillende bassins omhoog komt zetten, zich willen samenvoegen tot een groter geheel. Dit samenvoegen willen wij echter tegengaan en dat kan door middel van een dam die we precies aanleggen over de richel tussen de twee bassins in (zie het middelste frame in Figuur 9.5). Al naar gelang het water verder stijgt, blijven we deze dammen verder verhogen, zodat ten alle tijde de twee bassins gescheiden blijven. Dit is nu het principe van de Waterscheidingstransformatie. Uiteindelijk als alles is overstroomd, houden we alleen nog een segmentatie van dammen over. Deze scheidingsdammen vormen nu de grenzen voor de verschillende voids (het rechter frame in figuur 9.5). Figuur 2.2 in Hoofdstuk 2 laat een voorbeeld zien van de Waterscheidingsmethode.



Figuur 9.5– Waterscheiding De drie frames in het figuur illustreren de voiddetectiemethode. Links beelden we een dichtheidsveld uit alsof het een landschap zou zijn. In het middelste frame laten we het moment zien dat water vanuit drie bassins in contact komt, dan bouwen een dam om deze compartimenten gescheiden te houden. Rechts laten we het uiteindelijke resultaat zien, de dammen vormen de scheidingswanden tussen de verschillende kommen in het dichtheidsveld.

9.3.2 Voidvormen

Een void die vrij kan expanderen, zal de neiging hebben om zich te ontwikkelen tot een bolvormige bubbel. In werkelijkheid bestaat deze ideale geïsoleerde situatie niet. Vaak zijn er andere voids en clusters in de buurt die onherroepelijk een invloed hebben op de vorm van de void. De voiddetectiemethode die we hebben ontwikkeld, stelt ons in staat om de vorm van deze voids te bestuderen. Andere methodes werken vaak met bollen en zijn daardoor minder geschikt om de vorm van voids te bestuderen.

In Hoofdstuk 3 kijken we naar de relatie tussen de vorm van een void en de omliggende structuren. De voids blijken niet bolvormig te zijn, maar zien er vaak langgerekt uit (sigaarvormig), alhoewel er ook veel afgeplatte voids voorkomen (pannenkoekvormig). Verder blijkt dat deze vorm sterk overeenkomt met de vorm van andere voids in de omgeving. Dit resulteert in een patroon waar voids een neiging hebben om zich aan één te sluiten in één bepaalde voorkeursoriëntatie. We kunnen dit fenomeen duidelijk herkennen in Figuur 9.4. We zien dat de voids vaak allemaal dezelfde richting zijn uitgerekt. Vooral in de nabijheid van dichte gebieden resulteert dit soms in een haarachtig patroon van uitgerekte voids. Dit doet vermoeden dat sterke getijdenkrachten de voids aan het vervormen zijn. Uit onze analyse blijkt inderdaad dat de vorm van de voids sterk correleert met richting van deze getijdenkrachten.

9.3.3 De Ruggengraat van het Kosmische Web

De methode die we hebben ontwikkeld om de begrenzing van de voids te vinden, blijkt tevens een goede beschrijving op te leveren van filamenten en wanden in het Kosmische Web. Dit is op zich ook niet zo heel vreemd, als men in ogenschouw neemt dat de begrenzing van de verschillende voids van nature moet bestaan uit de filamenten en wanden van het Kosmische Web. Dus een goede beschrijving van de voids levert gelijktijdig de positie op van de filamenten en wanden. We zouden kunnen zeggen: *'we vangen twee vliegen in één Web'*.

Filamenten en wanden hebben van zichzelf een zekere dikte die onze methode niet direct kan oppikken. Wel kunnen we een eenvoudigere versie van het web reconstrueren, een draadmodel dat we de *Cosmic Spine* noemen, oftewel de Kosmische Ruggengraat. Dit formalisme stelt ons in staat om zowel voids, filamenten als ook wanden te detecteren. Figuur 4.9 en 4.10 (Hoofdstuk 4) geven een driedimensionale indruk van de *Cosmic Spine*.

Met behulp van deze methode kunnen we voor sterrenstelsels de lokale topologie van de omgeving bepalen. Bijvoorbeeld of een stelsel midden in een void zit of aan de rand, of het in een filament zit dan wel in een wand. In het laatste Hoofdstuk zullen we hierop verder terugkomen. Maar voordat we dit formalisme kunnen toepassen op de waarnemingen, moeten we eerst het dichtheidsveld reconstrueren uit de posities van de sterrenstelsels (zie bijvoorbeeld Figuur 5.4).

9.3.4 De Reconstructie van het Dichtheidsveld

Sterrenstelsel zijn dus van nature ruimtelijk verdeeld in een complexe driedimensionale structuur. De SDSS heeft de posities van veel stelsels gemeten en uit deze posities kunnen we het onderliggende dichtheidsveld reconstrueren (zoals in Figuur 9.3). We gebruiken hierbij het volgende principe: des te meer stelsels zich in een volume bevinden, des te hoger (dichter) is het onderliggende dichtheidsveld.

Sterrenstelsels bevinden zich voornamelijk in de pieken van het dichtheidsveld. Het zal daarom nooit lukken om alle kleine structuren terug te vinden, waarin zich geen stelsels bevinden. Uit ons onderzoek blijkt dat we wel wat kunnen zeggen over het globale gedrag van het dichtheidsveld. Dit globale gedrag kunnen we vergelijken met het kijken door een onscherpe bril, we verliezen dus kleinschalige informatie.

Een cruciaal aspect waar we rekening mee moeten houden zijn de hoge dichtheidspieken. In tegenstelling tot de analogie met een landschap zijn de hoge pieken niet goed vergelijkbaar met bergtoppen. Men zou ze beter kunnen voorstellen als scherpe pieken die te voorschijn komen uit een vlak polderlandschap. Op enige afstand van deze pieken mogen we deze hoge waardes *niet* meenemen in de reconstructie. Zouden we dat wel doen, dan gaan die hoge pieken ook de reconstructie domineren in de lage dichtheidsgebieden. Pieken zouden dan te ver worden uitgesmeerd in lage dichtheidsgebieden. In Hoofdstuk 5 laten we zien dat dit voorkomen kan worden door methodes te gebruiken die enkel gebaseerd zijn op lokale dichtheidswaarden.

Een verdere verbetering krijgen we door niet de dichtheidswaarden zelf te gebruiken, maar de logaritmische waarde ervan. Deze transformatie zorgt ervoor dat het contrast minder sterk wordt. Zodoende zijn de pieken minder scherp, waardoor er een kleinere kans is dat extreme hoge dichtheidswaarden de reconstructie verstoren. Uiteindelijk levert deze analyse ons een accurate reconstructie van het kosmologische dichtheidsveld op.

9.3.5 De Kosmografie van de Grote Schaal Structuur

In Hoofdstuk 6 beschrijven we de kosmografie van het SDSS dichtheidsveld. De structuren in het dichtheidsveld relateren we aan reeds bekende objecten uit de literatuur. Uit de vergelijking van de objecten met onze kaarten blijkt dat superclusters en supervoids een sterk onderling verbonden netwerk vormen. Superclusters en supervoids die al dan niet toevallig zijn uitgelijnd kunnen tezamen grotere structuren vormen. In het geval van superclusters kan dit structuren opleveren die we *Great Walls* noemen. De supervoids kunnen deze structuren verder versterken en tezamen kan dit een patroon opleveren dat doet denken aan slenken (geulen met verhogingen aan beide zijden).

Het SDSS-dichtheidsveld bevat hiervan twee zeer prominente voorbeelden, de Coma Grote Wand en de Sloan Grote Wand. Beiden hebben dezelfde oriëntatie en zijn gescheiden door tenminste twee grote supervoids, de Virgo Supervoid en de Boötes Supervoid. Deze wanden zijn onderling verbonden door een aantal bruggen, die bestaan uit filamentachtige superclusters. Deze bruggen tezamen met de Wanden vormen een tessellatie (betegeling) van supervoids en superclusters. De kleurenfiguren in Hoofdstuk 6 geven een indruk van deze kosmische structuren.

Het is niet eenvoudig vast te stellen of dit soort structuren prominenter zijn dan dat we op basis van de huidige modellen zouden mogen verwachten. Dit komt onder andere doordat we dergelijke grote volumes nog niet kunnen simuleren. Bovendien zouden we dit soort complexe simulaties enige malen moeten herhalen om überhaupt een goede statistiek te krijgen. Verder zijn er nog andere effecten die deze structuren artificieel kunnen versterken. In ieder geval zijn de Coma en Sloan Wanden twee zeer onmiskenbare dominante structuren in het nabije Heelal.

9.3.6 Statistiek van de Massaverdeling

Kosmografie kan worden gezien als een kwalitatieve manier om structuren in het Heelal te beschrijven. Willen we theoretische modellen toetsen aan de werkelijkheid, dan moeten we ook kwantitatieve uitspraken kunnen doen. In Hoofdstuk 7 beschouwen we een relatief simpele, doch verhelderende statistiek: de lokale dichtheidsdistributie. Deze distributie houdt in feite alleen maar bij hoe vaak een bepaalde dichtheidswaarde voorkomt.

De vorm van deze distributie hangt samen met de ruimtelijke verdeling van sterrenstelsels. Als stelsels willekeurig verdeeld zijn, zal de distributie nauwelijks extreem lage of extreem hoge dichtheidswaarden hebben. De distributie is dan smal en vrijwel symmetrisch. Als stelsels alleen maar voorkomen in compacte clusters, dan hebben we heel veel lege ruimte

en kleine volumes met zeer hoge dichtheidswaarden. De dichtheidsverdeling is dan breed en asymmetrisch met een voorkeur voor lage dichtheidswaarden.

De distributie kunnen we uit de waarnemingen bepalen met behulp van de SDSS dichtheidsveld (Hoofdstuk 5). Deze vergelijken we met die van de donkere materie uit de simulaties, zoals in Figuur 9.4. Het vergelijken van de twee distributies stelt ons in staat om uitspraken te doen over het onderliggende kosmologische model en/of over de vorming van sterrenstelsels. Een centraal concept dat hierbij een rol speelt is hoe sterrenstelsels het onderliggende dichtheidsveld van donkere materie bevolken. Dit noemen we de voorkeursfunctie^{††}. Zo zijn er bijvoorbeeld in voids veel minder stelsels dan we op grond van de simulaties verwachten, dit wordt het *void fenomeen* genoemd.

Ondanks de vele complexe processen die een rol spelen bij de vorming van sterrenstelsels, blijkt dat de onderlinge relatie tussen de twee dichtheidsvelden vrij simpel is. We zeggen dan dat de voorkeursfunctie nagenoeg één op één is. Tevens blijkt dat de verwachte voorkeursfunctie op basis van de modellen zeer goed overeenkomt met de gemeten voorkeursfunctie.

9.3.7 Een Voidsterrenstelsel met een Polaire Gasschijf

In Figuur 9.2 hebben we enkele mooie voorbeelden laten zien van grote sterrenstelsels. De eerste drie zijn spiraalstelsels, zij hebben schijven die ontstaan door de gezamenlijke rotatie van sterren en gas. Zoals satellieten stabiel rondjes om de aarde blijven draaien, zo blijven ook deze schijven stabiel door de gezamenlijke rotatie van het gas en de sterren.

Het gas in sterrenstelsels is vaak zeer ijl en heeft een temperatuur die kan verschillen tussen koud (-250° Celcius) en heet (10000° Celcius). Het koude gas bestaat voor een groot gedeelte uit neutraal waterstof (HI). Dit gas kent een zeer laag energetische transitie, die wordt uitgestraald op radiogolflengten. Deze straling is zeer goed te detecteren met radiotelescopen zoals de Westerbork Synthese Radio Telescoop (WSRT). Dit stelt ons in staat om het HI in kaart te brengen.

Met de WSRT hebben we 45 sterrenstelsels waargenomen die zich in voids bevinden. Deze voids zijn gevonden met behulp van onze methode (Hoofdstuk 2 en 4), die we hebben toegepast op het gereconstrueerde SDSS-dichtheidsveld van Hoofdstuk 5.

Eén van deze stelsels heeft een zeer atypische verdeling van het koude waterstofgas. Dit stelsel bevindt zich in een nagenoeg lege voidwand. De schijf van sterren ligt parallel aan deze wand en heeft dus dezelfde oriëntatie. Het koude gas blijkt zich hier echter niet zoveel van aan te trekken en roteert geheel eigenwijs loodrecht op de as van het sterrenstelsel (zie Figuur 8.1). De gasschijf staat dus haaks op de sterrenschijf en dit geval noemen we een polaire gasschijf.

De vraag is nu; hoe ontstaat zoiets in het midden van zo'n leeg gebied? Een concrete aanwijzing wordt gegeven door de omgeving van het stelsel. Het gas staat namelijk ook loodrecht op de muur, immers de sterrenschijf heeft dezelfde oriëntatie als de wand (Figuur 8.4). Zulke wanden ontstaan doordat materiaal vanuit twee verschillende richtingen op elkaar botst, in dit geval vanuit de twee voids (Figuur 8.5). Een verklaring voor het ontstaan van de configuratie zou kunnen zijn dat koud gas uit de twee voids stroomt en wordt ingevangen door dit stelsel. Dit ingevangen koude gas kan dan de polair draaiende gasschijf vormen.

We kunnen concluderen en samenvatten dat er (soms letterlijk) nog veel te leren valt uit bijna helemaal niets.

^{††}vertaalt uit het Engels, biasing-functie