

University of Groningen

## Morphology and dynamics of the cosmic web

Aragón Calvo, Miguel Angel

**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:*

2007

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

*Citation for published version (APA):*

Aragón Calvo, M. A. (2007). *Morphology and dynamics 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).

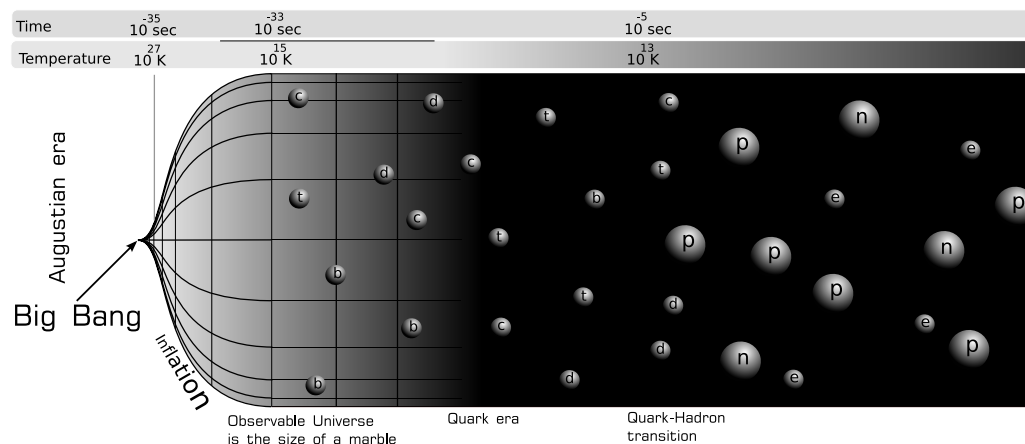
The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

### 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.





**Figure 6.1:** De eerste ogenblikken van het Universum startten met de Big Bang, inflatie en het quarktijdperk. Boven het figuur is de tijd en temperatuur weergegeven die corresponderen met de posities van de sneden. De 6 verschillende soorten quarks (up, down, color, strange, top, bottom) en ook de elektronen (e), protonen (p) en neutronen (n) worden voorgesteld door de bolletjes. Zie de tekst voor de details.

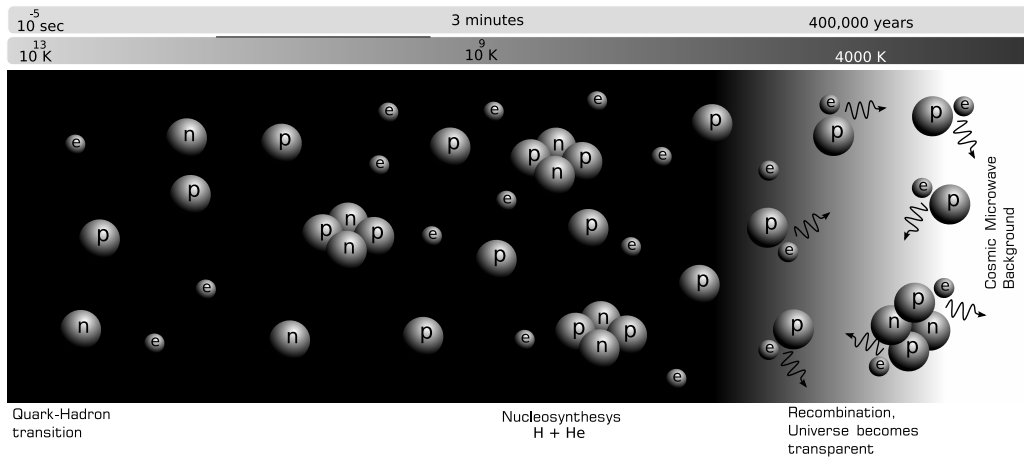
## Inflatie en de uitzaaing van het Kosmische Web

Op een zeker moment rond  $10^{-34}$  seconde trad er een fase in van snelle exponentiele expansie. Die bekend staat als inflatie. Zowel het mechanisme dat deze expansie veroorzaakte, als wel de beëindiging ervan, is niet goed begrepen. Tijdens de inflatie nam in een kleine fractie van een seconde het volume van het Universum toe met tenminste een factor  $10^{78}$ . Een van de meest belangrijke effecten van inflatie is het ontstaan van een inhomogene verdeling van materie. Zeer kleine schommelingen in het kwantumveld werden plotseling met een enorme factor opgeblazen. Deze eerste subatomische verstoringen zijn daarom de kiemen van waaruit sterrenstelsels en structuren van sterrenstelsels uiteindelijk zijn ontstaan.

## Materie and Straling

Aan het einde van de inflatie zwierven de quarks, de bouwstenen van de protonen en neutronen, vrij rond in een zinderend hete zee van quarks. Toen het Universum was afgekoeld tot  $10^{13}$  K, konden de quarks met elkaar binden om protonen, neutronen en andere baryonen te vormen.

Vanaf de verschijning van de eerste baryonen tot aan de eerste drie minuten gedroeg het Universum zich als een *Kosmische Nucleaire Reactor*. Protonen en neutronen vormden samen heliumkernen en sporen van deuterium totdat er geen neutronen meer beschikbaar waren. Dit proces wordt de Big Bang nucleosynthese genoemd en geeft een accurate voorspelling van de oorspronkelijke verhoudingen van waterstof en helium. Deze ver-



**Figure 6.2:** Van de Big Bang nucleosynthese tot de eerste stabiele atomen in het recombinitie tijdperk. De zwarte achtergrond vertegenwoordigt het compacte Universum, de witte achtergrond vertegenwoordigt het latere transparante universum.

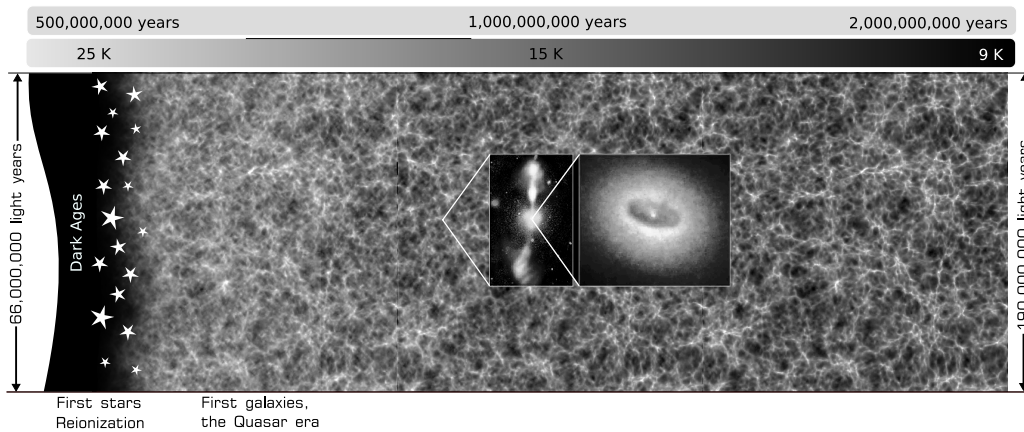
houdingen zijn door observaties bevestigd, wat mag worden beschouwd als één van de grootste successen van de Big Bang theorie.

### Donkere materie: het skelet van het Kosmische Web

Toen het Universum 0.01% van zijn huidige omvang bereikte, begon materie de dynamica van het Universum te domineren en konden fluctuaties in de dichtheid van *donkere materie* beginnen te groeien. Ongehinderd in de groei, bakende de donkere materie de gebieden af, waar later de baryonische materie naartoe werd getrokken. Uiteindelijk leidde dit tot de vorming van sterren en sterrenstelsels. Zonder donkere materie zou het onmogelijk zijn geweest om de rijke structuur te vormen die we vandaag de dag aantreffen in het heelal. Een van de grootste vragen in de astronomie is de identiteit van deze donkere materie. Terwijl de aanwezigheid ervan wel degelijk wordt waargenomen door zijn gravitationele invloed, is het nog niet direct waargenomen of gedetecteerd in het laboratorium. Het algemeen geaccepteerde standpunt is dat het een deeltje moet zijn dat niet of nauwelijks interactie heeft met normal materie. Waarschijnlijk een deeltje dat wordt voorspeld door supersymmetrische theorieën.

### De Kosmische Achtergrondstraling

Materie en straling waren vanaf het begin altijd sterk gekoppeld. Het Universum was daardoor niet transparant en fotonen hadden veel interacties met baryonen. Dit zette zich de komende 379.000 jaren voort en eindigde toen de temperatuur van het Universum de vorming van de eerste stabiele atomen mogelijk maakte. Op dat tijdstip was het Universum 1/1090 van zijn huidige grootte en had het een temperatuur van ongeveer

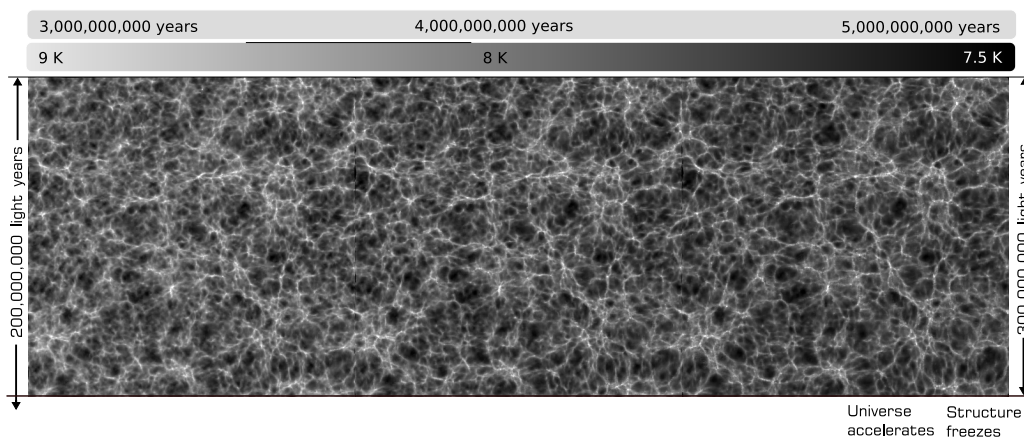


**Figure 6.3:** Van het einde van de donkere tijdperken met de geboorte van de eerste sterren in het re-ionisatie tijdperk, tot de eerste sterrenstelsels in het quasar tijdperk. De achtergrond laat de evolutie zien van de donkere materie schommelingen in meebewegende coördinaten. Hun evolutionaire staat correspondeert met de tijd weergegeven in het figuur maar niet met hun eigenlijke omvang die wordt gezien door een waarnemer op het huidige tijdstip. De invoeging correspondeert met een quasar die zich in het midden van een sterrenstelsel bevindt. Aan de twee uiteinden van het figuur geven we de lengte weer van de periode die het figuur omvat.

3000 K. Waterstof- en heliumkernen ving elektronen, waardoor fotonen voor het laatst werden verstrooid. Het Universum dat was gevuld met een intense rode gloed, werd plotseling transparant en licht kon ongehinderd lange afstanden afleggen. Dit licht is nu nog steeds waarneembaar als microgolf straling en wordt de Kosmische Achtergrondstraling genoemd. Het spectrum van de straling evenaart die van een perfecte zwarte lichaamsstraler met een temperatuur van slechts  $T_0 = 2.725$  K (ca.  $-270^\circ\text{C}$ ). Deze straling is het sterkste bewijs voor het bestaan van een gloeiend hete en dichte fase in het vroegere Heelal, vandaar de naam Hot Big Bang.

### Donkere tijden, eerste sterren en quasars

Wat er de 500 miljoen jaar na het recombinitie tijdperk gebeurde is nog grotendeels een onduidelijk. Deze periode wordt de *donkere tijden* genoemd, omdat we er geen observaties van hebben en er ook nog helemaal geen sterren bestonden die licht konden produceren. Wolken van neutraal gas stortten langzaam ineen en de eerste generatie van sterren ontstonden. Deze sterren begonnen met de productie van allerlei elementen zwaarder dan helium. De straling die werd uitgezonden door deze gigantisch zware sterren was energierijk genoeg om het Universum te re-ionizeren. Samen met het gas zaten de eerste generatie sterren met miljoenen bijeen gepakt in zogenaamde proto-stelsels. Zo werden de eerste heldere sterrenstelsels gevormd en vele, zoniet allemaal, herbergden

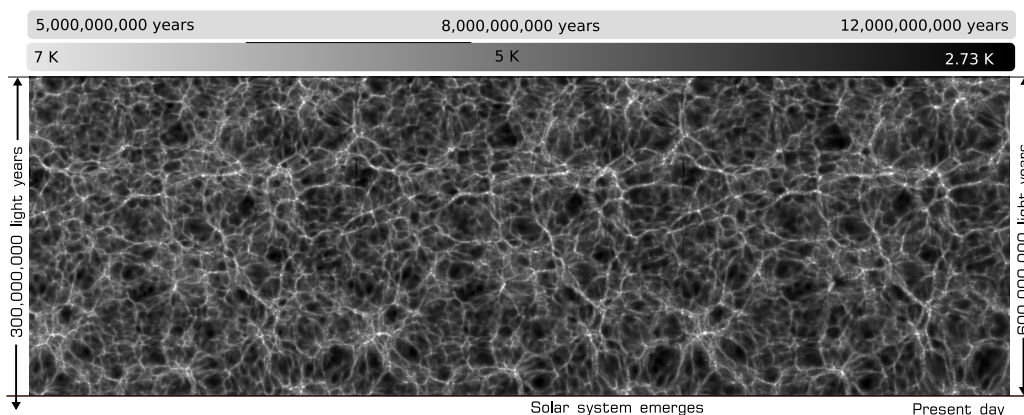


**Figure 6.4:** Van de ontwikkeling van de grootschalige structuren in het quasar tijdperk tot de versnellingsfase waarin de donkere energie de dynamica van het Universum domineert. Nu verkrijgt het universum zijn karakteristieke cellulaire patroon gedomineerd door de lege regio's.

een krachtige stralingsbron in hun centrum aangedreven door enorme zwarte gaten. Deze extreem heldere objecten worden quasars genoemd en zijn de verste objecten die we vandaag de dag aan de hemel kunnen zien.

### Donkere energie en het versnellende Universum

Een andere component van het Universum, de Donkere Energie, was tot dan toe redelijk onbelangrijk gebleven, maar begon al snel de dynamica van het Heelal te domineren. Dit gebeurde toen het Heelal ongeveer half zo klein was als nu. Alles wat gezegd kan worden over donkere energie is dat het een negatieve druk heeft, met als resultaat een afstotende zwaartekracht. De meeste waarnemingen die zijn gedaan wijzen erop dat het equivalent is aan de kosmologische constante van Einstein's Relativiteits Theorie, hoewel er nog steeds andere opties open zijn. Zijn grootste invloed betreft de dynamica van het Heelal. Door de afstotende werking is er geen fluctuaties in donkere energie mogelijk. Het effect dat het heeft op de vorming van structuren is voornamelijk gerelateerd aan de invloed op de expansiesnelheid en de leeftijd van het heelal. Zodra deze snelheid te hoog wordt stopt de verdere groei van structuur. Aan de andere kant is er door de versnelling relatief meer tijd beschikbaar in het vroege Heelal om structuren te vormen en te laten evolueren. Tegenwoordig zorgt de donkere energie voor bijna  $3/4$  van het totale energiebudget. In tegenstelling tot materie of straling wordt het niet ijler als het heelal expandeert. Dit zorgt ervoor dat het heelal voor eeuwig zal blijven uitzetten.



**Figure 6.5:** De ontwikkeling van de grootschalige structuren "bevriest" als een consequentie van de versnelling van de uitbreiding van het heelal. De gehele verdeling van materie blijft onveranderd, we zien alleen een verscherping van de kenmerken die al aanwezig waren.

### Het hier en nu

Op grote schalen is de groei van structuur inmiddels gestopt. Hoewel op kleine schaal zwaartekracht nog steeds het Kosmische Web verandert. We zien dit als een algehele verscherping van de contouren die al aanwezig waren voor de versnelde expansie. Dit verscherpte contrast is het resultaat van structuren die nog steeds ineenstorten en van de daarop vallende materie. Op schalen van enkele miljoenen lichtjaren vinden nog vele veranderingen plaats. Door de zwaartekracht die ze op elkaar uitoefenen zijn er onderling interacties als melkwegstelsels door zeer dichtbevolkte gebieden razen. Het gevolg hiervan is dat stelsels drastisch van kleur en vorm kunnen veranderen. Dit proces zorgt voor de enorme diversiteit aan sterrenstelsels die we vandaag de dag waarnemen.

### Het Standaard Hot Big Bang model

De kosmologische blauwdruk van de Hot Big Bang in een homogeen en isotropisch Heelal is zo algemeen geaccepteerd dat het het Standaard Hot Big Bang Model wordt genoemd. Het wordt ondersteund door een groot en nog altijd toenemend aantal waarnemingen, een paar van de meest belangrijkste zijn:

- De relatie tussen de afstand en de recessiesnelheid (wet van Hubble): objecten verwijderen zich van elkaar met een snelheid die evenredig is met hun onderlinge afstand. Dit is een consequentie van de uniforme Robertson-Walker ruimtetijd metrie. Het onmiddellijke gevolg hiervan is dat het Universum een eindige leeftijd heeft.
- Het bijna perfecte zwarte lichaam spectrum van de Kosmische Achtergrondstraling, dat het ultieme bewijs is voor een extreem hete en dichte begin fase van het



**Figure 6.6:** De drie dominante soorten en hun bijdrage aan de totale energie inhoud van het Universum. Donkere energie is verantwoordelijk voor 73.2% van de totale energie inhoud van het Universum, Donkere materie voor 26.6% en baryonen voor 4.4%.

Universum.

- De uitstekende overeenkomst tussen de geobserveerde hoeveelheid lichte elementen en de voorspellingen van primordiale nucleosynthese. <sup>2</sup>.
- Het feit dat de hemel donker is in de nacht, ook wel Olberts paradox genoemd.
- De overduidelijke evolutie van het uiterlijk van objecten als functie van hun afstand.

Ons huidige begrip van het Universum is gecodeerd in het zogenoemde Lambda Cold Dark Matter ( $\Lambda$ CDM) model. Dit model tracht een verklaring te vinden voor de versnelling van het heelal m.b.v de observaties van supernova's, het Kosmische Web en de Kosmische Achtergrondstraling. Lambda ( $\Lambda$ ) refereert naar de kosmologische constante, mogelijk gerelateerd aan de donkere energie, die vermoedelijk de afstotende kracht veroorzaakt van huidige versnellingsfase in het Heelal. Koude Donkere materie is de naam die wordt gebruikt voor een soort donkere materie die niet relativistisch is, niet baryonisch is, nauwelijks wisselwerking heeft en de structuren in het heelal domineert. De voornaamste componenten van het  $\Lambda$ CDM Universum, bepaalt volgens de laatste waarnemingen, zijn weergegeven in Figuur 6.34.

<sup>2</sup>Onafhankelijk bevestigd m.b.v. CMB fluctuaties door WMAP



## Grote Schaal Structuren in het Universum

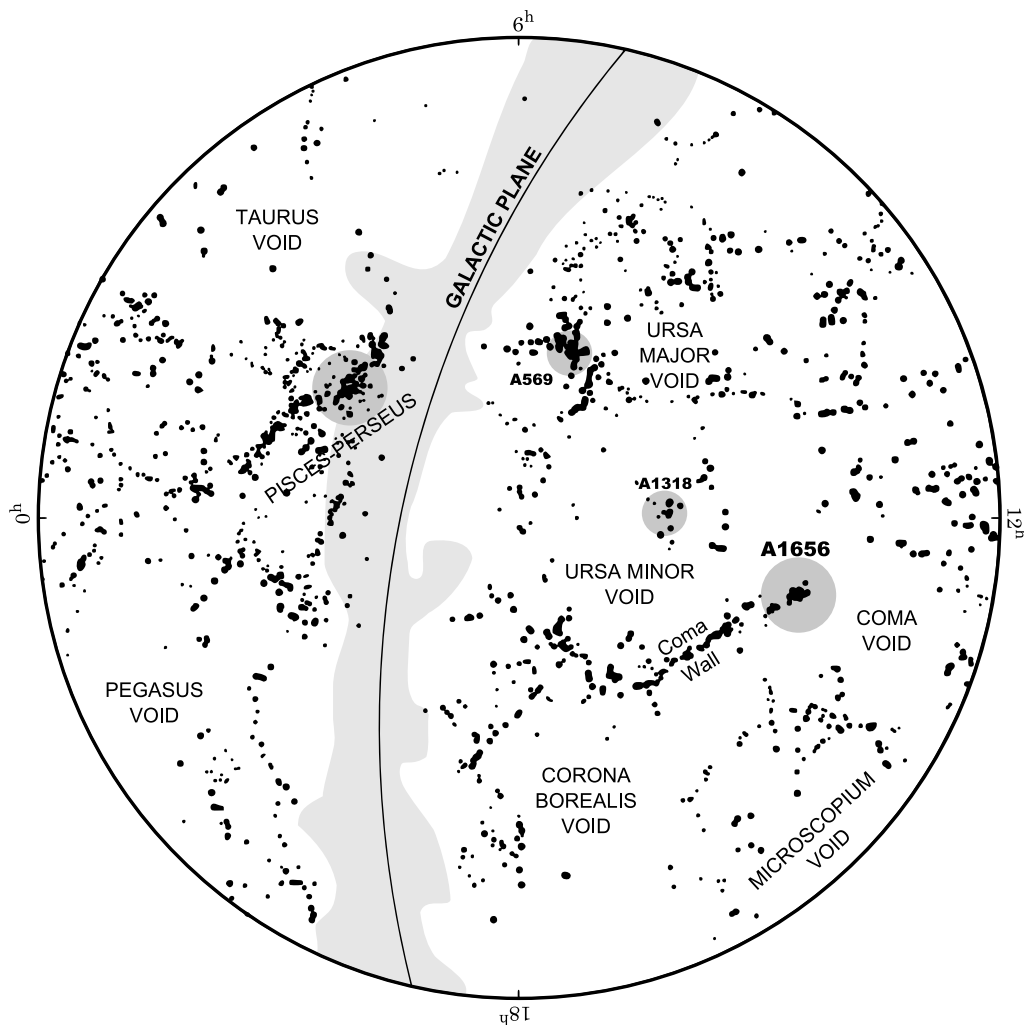
De Big Bang Theorie geeft antwoord op de vragen die betrekking hebben op de oorsprong van het Universum en zijn globale eigenschappen. Maar het kan niet de rijke patronen verklaren die te zien zijn in de verdeling van de materie op vele schalen. Deze verdeling heeft een opmerkelijke hiërarchische aard. Planeten die om sterren wentelen, associaties van sterren, wolken van gas en stof klonteren allemaal samen om een zeer georganiseerd systeem te vormen, bekend als sterrenstelsel. Sterrenstelsels zelf vormen paren, groepen en clusters van wel honderden en zelfs duizenden stelsels. Deze massieve clusters vormen de verbindende knooppunten van de grootste structuren in het heelal: de superclusters.

## Anisotropische ineenstorting

De vorming van structuren in het Universum is het resultaat van de gravitationele groei van de primordiale dichtheidsverstoringen. Zwaartekracht heeft een versterkend effect op de aanvankelijke kleine fluctuaties. Elke regio met een dichtheid hoger dan zijn omgeving zal ineenstorten en zijn contrast vergroten. De toename van de dichtheid zal worden gereflecteerd in een toename in het zwaartekracht die hierdoor nog meer materie zal aantrekken naar de oorspronkelijke verstoring. Het tegengestelde effect gebeurt in de minder dichte gebieden. Als materie hieruit wegvloeit worden ze nog minder dicht. De gravitationele aantrekking zal nog zwakker, waardoor nog meer massa zal ontsnappen uit de ijle regio's. Al met al resulteert dit in een proces waarin elke verstoring wordt versterkt. Zeer dichte gebieden zullen ineenstorten totdat ze gebonden objecten zijn en ijle regio's zullen expanderen totdat ze geen materie meer bevatten.

De gravitationele ineenstorting van een wolk van materie kan worden beschreven (met een eerste benadering) door het te idealiseren als een triaxiale ellipsoïde en vervolgens aan te nemen dat elk van zijn drie assen onafhankelijk van elkaar ineenstort. In zo'n geval kan je laten zien dat de kleinste as als eerste in elkaar stort, om zo een platte pannenkoek te vormen. De middelste as zal hierna ineenstorten, en de wolk zal de vorm van een sigaar gaan aannemen. Ten slotte zal de grootste as ineenstoren en een bolvormige configuratie produceren.

In de werkelijkheid is de ineenstorting van een wolk veel gecompliceerder. Het hangt niet alleen af van zijn eigen zwaartekracht maar ook van het externe zwaartekrachtveld. Dit externe veld speelt een grote rol in de evolutie van de ineenstortende wolk, misschien nog belangrijker, het bepaalt de globale verspreiding van materie in zijn omgeving. Dit is de basis van de Kosmische Web Theorie uitgedacht door Dick Bond en medewerkers. Het verklaart het karakteristieke cellulaire patroon van de materie op grote schalen, die een netwerk vormt van met elkaar verbonden elementen: het Kosmische Web.



**Figure 6.7:** Projectie van de noordelijke hemel op een schaal van  $1000 \text{ km s}^{-1}$  gecentreerd op  $6500 \text{ km s}^{-1}$  met recessie snelheid (na Fairall (1997)). De horizon (dikke cirkel) correspondeert met het vlak van de evenaar op declinatie  $\delta = 0$ . De tekens in de horizon wijzen de rechter helling aan. Sterrenstelsels worden weergegeven als zwarte stippen geschaald met hun redshift. Verscheidene clusters worden weergegeven met hun naam en gemarkeerd met een donkergrijze cirkel. Het verlengde grijze stuk ontbloot van sterrenstelsels die de hemel kruisen correspondeert met het vlak van de Sterrenstelsel. Merk op de prominente leegte in de gehele distributie van de sterrenstelsels.

### Morfologie van het Kosmische Web: de Kosmische dierentuin

Het Kosmische Web vormt een ruimtevullend netwerk waarin wij drie basiscomponenten met verschillende morfologie kunnen identificeren: clusters, filamenten en wanden (zie figuur 6.35).

## Clusters

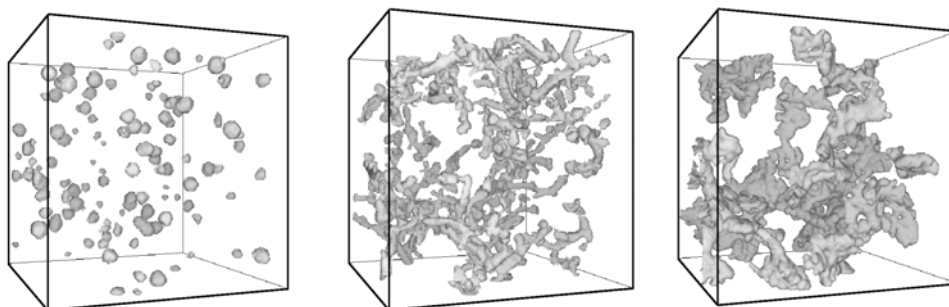
De opmerkelijkste concentraties van sterrenstelsels zijn de clusters. Dit zijn de meest massieve, en meest recente, volledig ingestorte en gevirialiseerde objecten in het Heelal. De rijkste clusters bevatten vele duizenden sterrenstelsels binnen een vrij klein volume van enkele miljoenen licht jaar groot. De sterrenstelsels en hun sterren vormen slechts een kleine fractie van de totale massa, zij zijn opgesloten en ingebed in diepe gravitatieputten van donkere materie. Clusters zijn krachtige bronnen van Röntgenstraling. Die wordt uitgezonden door het diffuse extreem hete gas wat opgesloten zit in de gravitatiepotentiaal van de clusters. Dit intraclustergas vertegenwoordigt de meest prominente baryonische component van de cluster. In zekere zin kunnen clusters worden gezien als bollen van heet, Röntgenstralende gas. De clusters worden bovendien gekenmerkt door een uiterst hectisch milieu, waarin sterrenstelsels door getijdenkrachten van de cluster en andere sterrenstelsels sterk worden beïnvloed. Een goed voorbeeld van een rijke cluster is de Coma cluster (A1656) die meer dan duizend sterrenstelsels bevat en een massa heeft in de orde van  $\sim 10^{15} M_{\odot} h^{-1}$ .

## Filamenten

Tussen de clusters kunnen zich bruggen van materie vormen die als filamenten bekend staan. Zij vormen zeer coherente stromen van materie, die in de richting van clusters aan het invallen is. De clusters en de filamenten vormen de basis van onderling verbonden structuren, ofwel een "Cosmic Web", waarmee de ruimte is gevuld. Eén van de meest bekende voorbeelden is de Pisces-Perseus Supercluster. Het is een systeem van clusters en filamenten dat een afstand van meer dan 300 miljoen lichtjaren overspant. Het wordt overheerst door de Perseus cluster, één van de meest massieve clusters in het nabijgelegen heelal.

## Wanden en Voids

De gebieden tussen de filamenten worden opgevuld door dunne vlakke associaties die bekend staan als wanden. Door hun lage oppervlaktedichtheid, zijn zij uiterst moeilijk te identificeren. De wanden markeren de randen van enorme lege gebieden van ruimte die als voids bekend staan. Zij zijn bijna helemaal verstoken van sterrenstelsels en vormen de opvallendste ruimtelijke component in het Heelal.



**Figure 6.8:** De clusters, de filamenten en de wanden geïdentificeerd met de MMF. Wij tonen de oppervlakten van de gebieden die elke morfologie omhullen. Voor de duidelijkheid tonen wij slechts de grootste structuren.

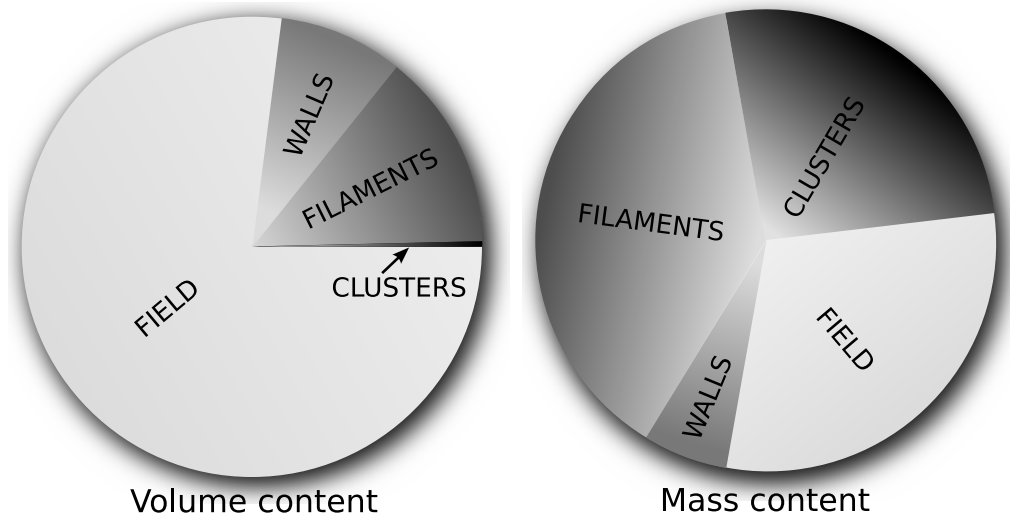
## Dit proefschrift

Het Kosmische Web is van groot belang om te begrijpen hoe structuren vormen in het Heelal. Ook zijn deze diverse kosmische milieus belangrijk voor de sterrenstelsels die zich hierin vormen en evolueren. Desondanks is het opvallend dat er nog geen duidelijk gedefinieerde techniek bestaat voor de objectieve identificatie van morfologische elementen in het Kosmische Web.

Een juiste beschrijving van het Kosmische Web is essentieel om de verschillende morfologische en dynamische omgevingen te identificeren, te selecteren en te isoleren. Het beschikken over een dergelijk instrument biedt de mogelijkheid om tot een meer systematisch gedefinieerde beschrijving van het Kosmische Web en zijn componenten. Het zal een fysisch veel nauwkeuriger definitie van kosmische omgeving opleveren dan tot nu toe beschikbaar en zal een beter begrip opleveren van zijn invloed op de vorming van sterrenstelsels.

In deze studie presenteren wij een nieuwe methode voor het ontleden van het Kosmische Web: de Multischaal Morfologie Filter (MMF). De methode is gebaseerd op technieken die worden gebruikt in beeldverwerking, computervisualisatie en in het bijzonder medische beeldvorming. MMF stelt ons in staat om clusters, filamenten en wanden te identificeren in de grote schaal structuur in het Heelal (zie figuur 6.36). Met het gebruik van dit instrument bestuderen wij verscheidene eigenschappen van de individuele componenten van Kosmische Web. Dit proefschrift richt zich ook op de invloed die het Kosmische Web heeft op de eigenschappen van sterrenstelsels zoals massa, leeftijd, impulsmoment (spin parameter), vorm, accretie, en oriëntatie van zowel het stelsel als wel van zijn rotatie-as (spin) ten opzichte van de omringende grote schaal structuur.

Het grootste deel van dit proefschrift is gewijd aan de studie van de door computer gegenereerde heelalmodellen. Deze bevatten alleen donkere materie. In het laatste hoofdstuk presenteren wij een studie naar de spinrichtingen van sterrenstelsels, die zijn waargenomen door de Sloan Digital Sky Survey.



**Figure 6.9:** Inventarisatie van het Kosmische Web in termen van volume (links) en massa (rechts) van clusters, filamenten, wanden en de velden (leegtes plus structuren die geen morfologie zijn toegekend).

### De beschrijving van het Kosmische Web

Met behulp van de MMF methode zijn clusters, filamenten en wanden geïdentificeerd uit een kosmologische N-deeltjes simulatie. Deze simulaties kunnen voorspellen hoe de huidige structuren in het Heelal eruit moet zien. Het resultaat van deze morfologische analyse wordt getoond in Figuur 6.36. Hierin laten we het oppervlak zien van structuren die behoren tot een van de drie verschillende morfologiën. Clusters (linker paneel) worden weergegeven als bollen van verschillende omvang. Dit laat de kracht van de MMF-techniek zien om structuren op verschillende schalen van elkaar te onderscheiden. Filamenten (midden paneel) worden als uitgestrekte vormen afgebeeld die tussen de clusters lopen. Als laatste worden de wanden (rechter paneel) afgebeeld, die een complexe vorm en topologie bezitten.

### Inventarisatie van Kosmische Web

Vervolgens zijn de globale eigenschappen van de verschillende elementen van het Kosmische Web onderzocht. De totale massa en volume zijn hier van bijzonder belang, aangezien dit bepaalt welk morfologische element het meest voorkomt. De clusters, de knopen in het Kosmische Web, zijn de meeste dichte en compacte objecten (zie de inventarisatie van het Kosmische Web in (Figuur 6.37). Filamenten zijn minder dicht, maar bevatten het grootste deel van de massa van het heelal. De wanden zijn nog minder promi-

nent en dicht dan de filamenten, zij bevatten een relatief vrij kleine fractie van de massa en het volume in het Heelal. Tot slotte het veld, vertegenwoordigt door de voids en alles wat niet door MMF wordt geclassificeerd. Dit betreft de meest ijle gebieden, welke het grootste gedeelte van de ruimte beslaan.

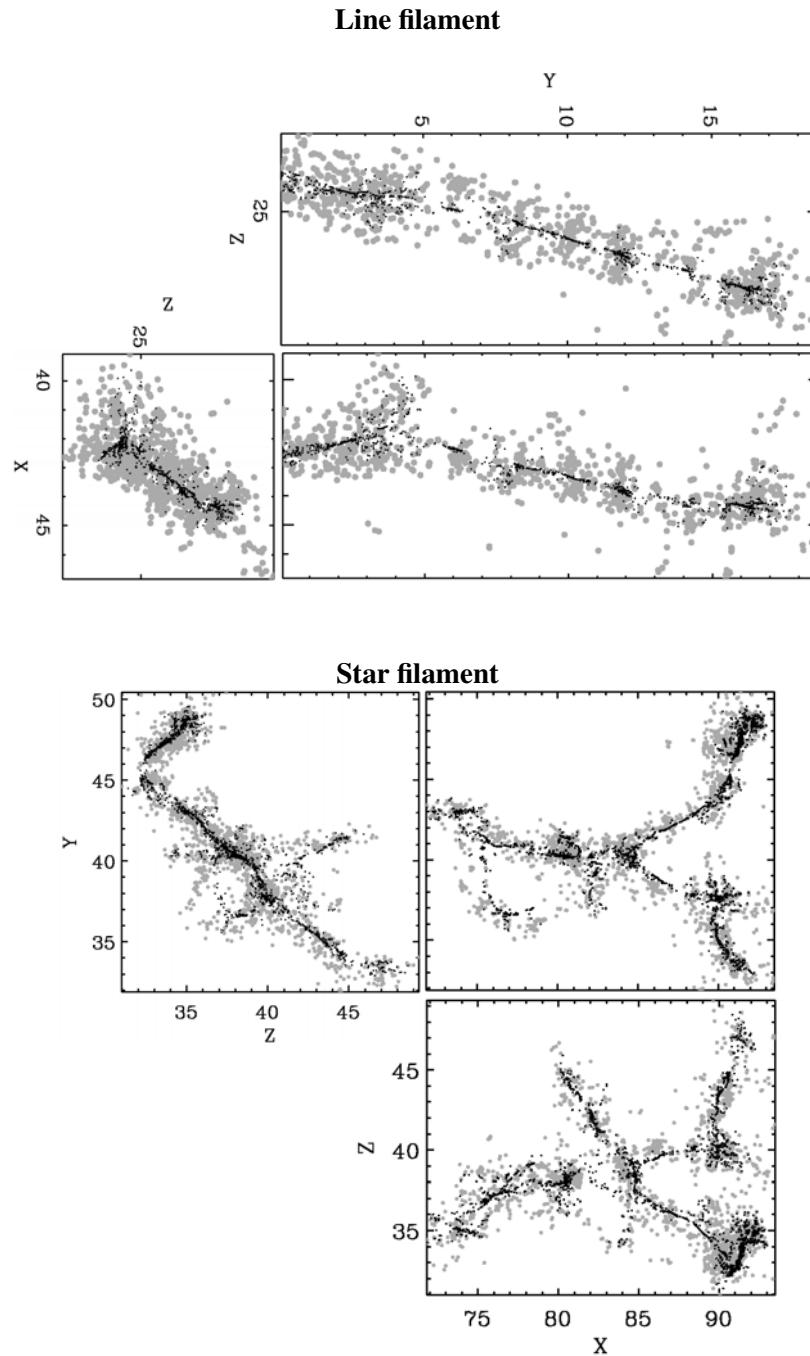
### **Het Kosmische Netwerk**

Speciale aandacht is besteed aan de intrinsieke eigenschappen van de filamenten en de cluster-filament-cluster verbindingen, daar zij het skelet van het Kosmische Web vormen. We vinden een rijke verzameling aan structuren. Op basis hiervan stellen wij eenvoudige doch enigszins subjectieve classificatie van filamenten voor. We herkennen vier basistypes: "lijn" filamenten, "ster" filamenten, "rooster" filamenten en "complexe" filamenten. Voorbeelden van elk type worden getoond in de figuren 6.38 en 6.39. Deze selectie stelt ons in staat de lengte en massaverdeling, alsmede dichtheidsprofiel, van de filamenten te bestuderen. Zoals valt te verwachten in een hiërarchisch scenario van structuurvorming zijn de kleine filamenten in aanzienlijk grotere getale aanwezig dan de grote massieve equivalenten.

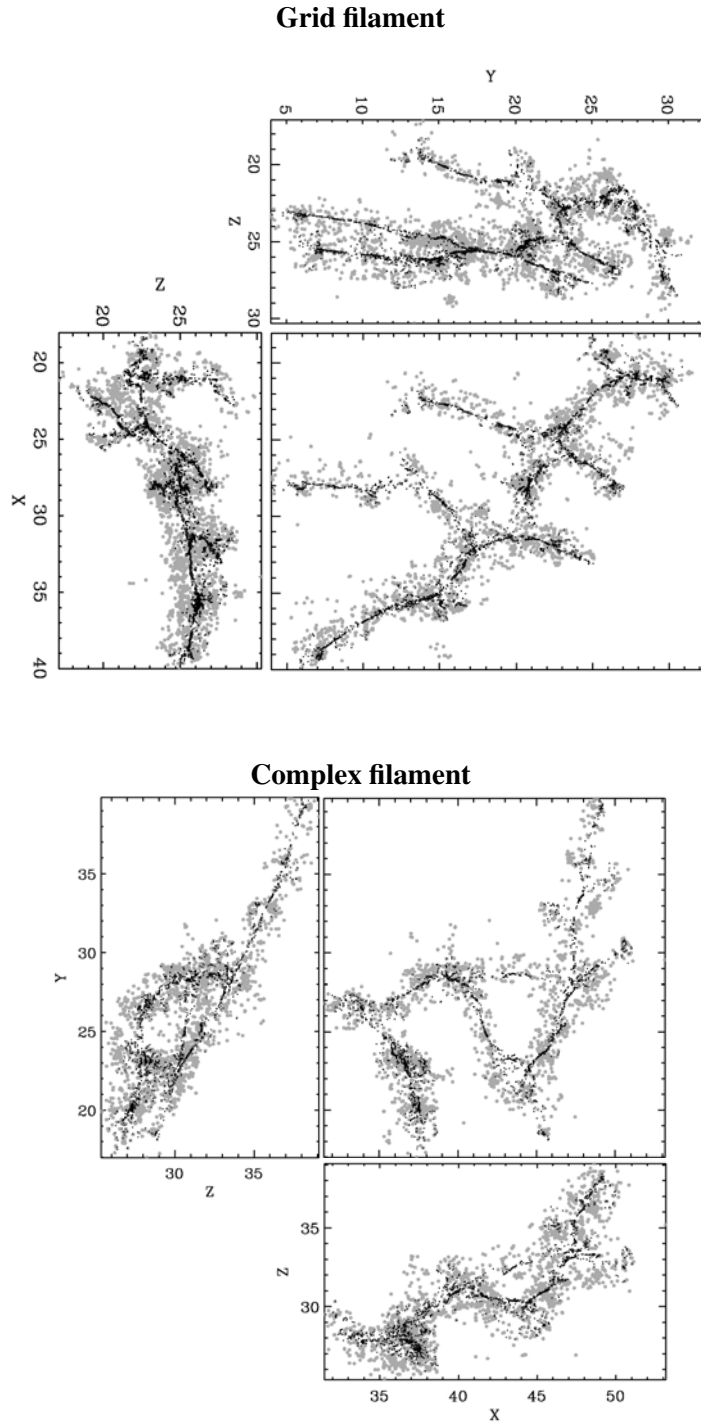
Behalve hun structuur hebben we ook de snelheidsstromen in en rondom filamenten en wanden geanalyseerd. De stroomsnelheid is direct gerelateerd aan de sterkte van het gravitatieveld. Materie verzamelt zich zo in webachtige patronen van filamenten en wanden. De contouren van deze structuren zijn reeds vroeg bepaald door de globale getijdenkrachten, een manifestatie van de inhomogene verdeling van materie op grote schaal. Binnen de filamenten en wanden stroomt de materie verder naar de dichtstbijzijnde cluster. Op basis hiervan vinden wij een verband tussen de massa van het filament en zijn snelheidsdispersie, een bevestiging van een vorige studie. Dit stelt ons in staat om de massa van waargenomen filamenten af te leiden. Dit opent wellicht de mogelijkheid om waarden van kosmologische parameters te bepalen op basis van de massa en afmetingen van filamenten.

### **Sterrenstelsels in het Kosmische Web**

Hoge resolutie N-deeltjes simulaties hebben ons in staat gesteld de relatie tussen de eigenschappen van sterrenstelsels en hun grootschalige omgeving te bekijken. Bijna zonder uitzondering wordt de omgeving slechts gedefinieerd in termen van lokale dichtheid. De in dit proefschrift ontwikkelde methode leidt tot een betere en een meer algemene definitie van "omgeving". Het resultaat laat zien dat lokale morfologie essentieel is om de invloed van omgeving op sterrenstelsels te begrijpen.



**Figure 6.10:** Drie orthogonale projecties van typische lijn- (boven) en ster- (onder) filamenten. Donkere materie deeltjes worden aangeduid met gevulde grijze cirkels. De ruggengraat van het filament is ook weergegeven met de zwarte stippen, om de vorm van de filamenten beter te kunnen weergeven.

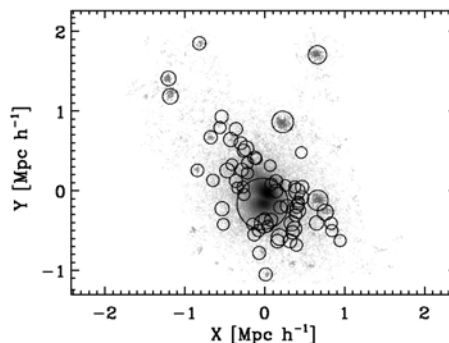


**Figure 6.11:** Drie orthogonale projecties van typische net- (boven) en complexe- (onder) filamenten. Donkere materie deeltjes worden aangeduid met gevulde grijze cirkels. De ruggengraat van het filament is ook weergegeven met de zwarte stippen, om de vorm van de filamenten beter te kunnen weergeven.



## Halo en subhalo catalogussen

Hier beperken we ons tot halo's van donkere materie. De zichtbare sterrenstelsels bevinden zich in deze halo's. Om een catalogus van donkere materie halo's te verkrijgen, is een nieuwe eenvoudige en efficiënte zoekmethode bedacht om substructuren die zich binnen de grotere halo's bevinden te identificeren: de FracHOP subhalo finder (zie figuur 6.40). Het is gebaseerd op de bestaande halo zoekmethode HOP. Bolvormige configuraties zijn zeldzaam en komen nauwelijks voor. Een typische donkere materie halo is een dichte concentratie van donkere materie met een drie-assige vorm, die zowel sigaar- of een pannenkoekvormig kan zijn. De oriëntatie van een halo is per definitie de richting waarin de langste as wijst. Galactische halo's zijn geïdentificeerd in de huidige kosmische epoche, waarna ze worden teruggevoerd in tijd om hun evolutie te bestuderen.



**Figure 6.12:** Een halo geïdentificeerd met HOP en zijn subhalos geïdentificeerd met FracHop. De grijze schaal wijst op dichtheid in logaritmische schaal, donkergrijze deeltjes hebben hogere dichtheid dan lichtgrijze deeltjes. De cirkels omsluiten alle subhalo's behalve de grootste, en zijn als  $M_{halo}^{1/3}$  halo geschaald met willekeurige groottes om een duidelijke indruk te geven van de substructuren.

## De eigenschappen van halo's in het Kosmische Web

Een van de resultaten van dit proefschrift betreft het verband tussen de eigenschappen van de halo's en structuur waarin ze zich bevinden. Eigenschappen die zijn bestudeerd;

- leeftijd
- massa verdeling
- lokale dichtheid
- vorm
- impulsmoment.

## Inval van materie

De inval van massa in halo's is sterk afhankelijk van hun omgeving. In hun directe omgeving stroomt materie eerst naar de filamenten, alvorens via het filament zelf naar de dichtsbijzijnde cluster te stromen. Het gevolg is een voorkeurs richting voor de inval van de

materie en de interacties met andere halo's. We zien hetzelfde bij halo's in de wanden. Voor een aantal situaties is de tijds-evolutie van de inval voorkeursrichting onderzocht. De richting blijkt sterk afhankelijk te zijn van de grote schaal structuur. Bij wanden zien we een verandering van de invalrichting, die samenhangt met de ineensstorting ervan.

### **Vorm- en spinoriëntatie**

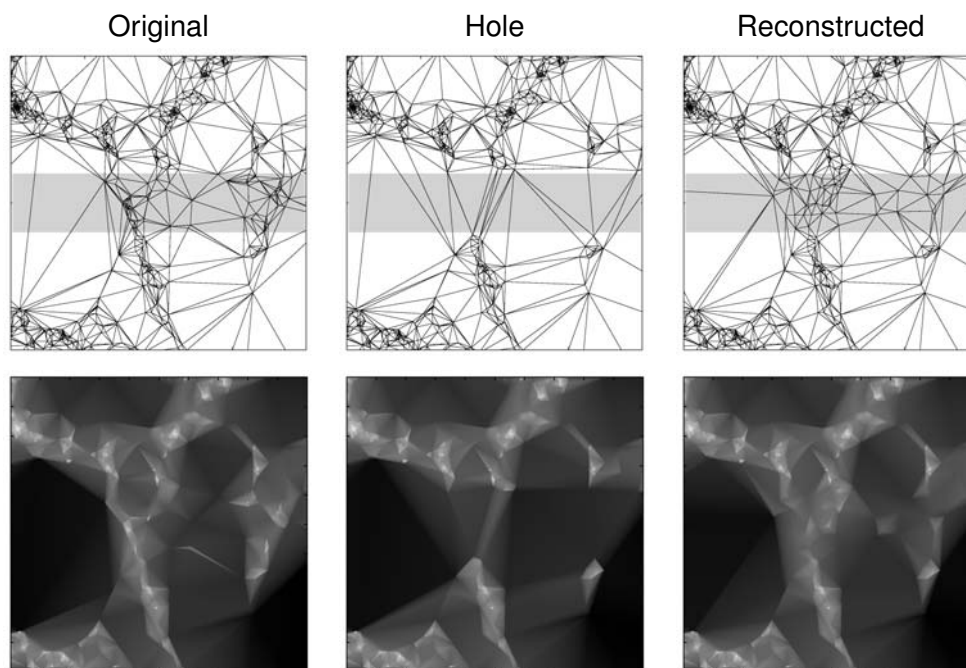
Een ander punt van aandacht is de oriëntatie van de vorm en de rotatie-as van de halo ten opzichte van het filament of wand waarin ze zich bevinden. Halo's in filamenten richten hun langste as langs het filament. Dit geldt ook voor de halo's in het vlak van de wanden. Het bevestigt de invloed van het sterk coherente getijde-veld en de daarmee samenhangende invalrichting van de materie. Ook de rotatie-as van halo's is gecorreleerd met de grote schaal structuur. Het blijkt dat de aard van de correlatie afhangt van de massa en van het tijdstip. De afhankelijkheid in tijd uit zich in een sterkere oriëntatie in het verleden. Wat betreft van hun massa afhankelijkheid zien wij dat massieve halo's loodrecht op hun filament staan, terwijl minder massieve halo's meer parallel zijn georiënteerd. Deze tendens wordt ook waargenomen in vroegere tijden. De situatie voor wanden is enigszins anders. De spin vector ligt op elk moment in het vlak van de wand. Het signaal dat wij vonden is zeer klein maar statistisch significant.

### **Spinoriëntatie van spiraalstelsels in SDSS filamenten**

In het laatste hoofdstuk bestuderen wij de spinoriëntatie van spiraalstelsels, geselecteerd uit de Sloan Digital Sky Survey, en de richting van hun filament. De Sloan Digital Sky Survey is op dit moment de grootste survey van sterrenstelsels, en bevat onder andere de 3D posities van bijna een miljoen stelsels.

Wij beschrijven de diverse stappen die nodig zijn om de morfologische segmentatie van het SDSS dichtheidsveld mogelijk te maken. We hebben de volgende effecten meegenomen; de geometrie van survey, de verandering van het gemiddelde aantal stelsels als functie van afstand, de fouten in afstandsbepalingen veroorzaakt door de intrinsieke snelheden van melkwegstelsels en het effect van lege gaten die zijn ontstaan doordat er gebieden aan de hemel zijn zonder observaties.

Om het effect van gaten in het survey te minimaliseren hebben we een nieuwe interpolatie methode ontwikkeld. Deze is gebaseerd op de Delaunay triangulatie van de ruimtelijke verdeling van stelsels (zie Figuur 6.41). Wij veronderstellen dat de geometrie rond het gat informatie bevat over de geometrie binnen het gat en gebruiken de Delaunay tessellatie om het dichtheidsveld te interpoleren. Onze resultaten wijzen erop dat onze methode een efficiënte manier is om deze kloven te dichten, waarbij we slechts een minimum aan veronderstellingen en vrije parameters behoeven te gebruiken.

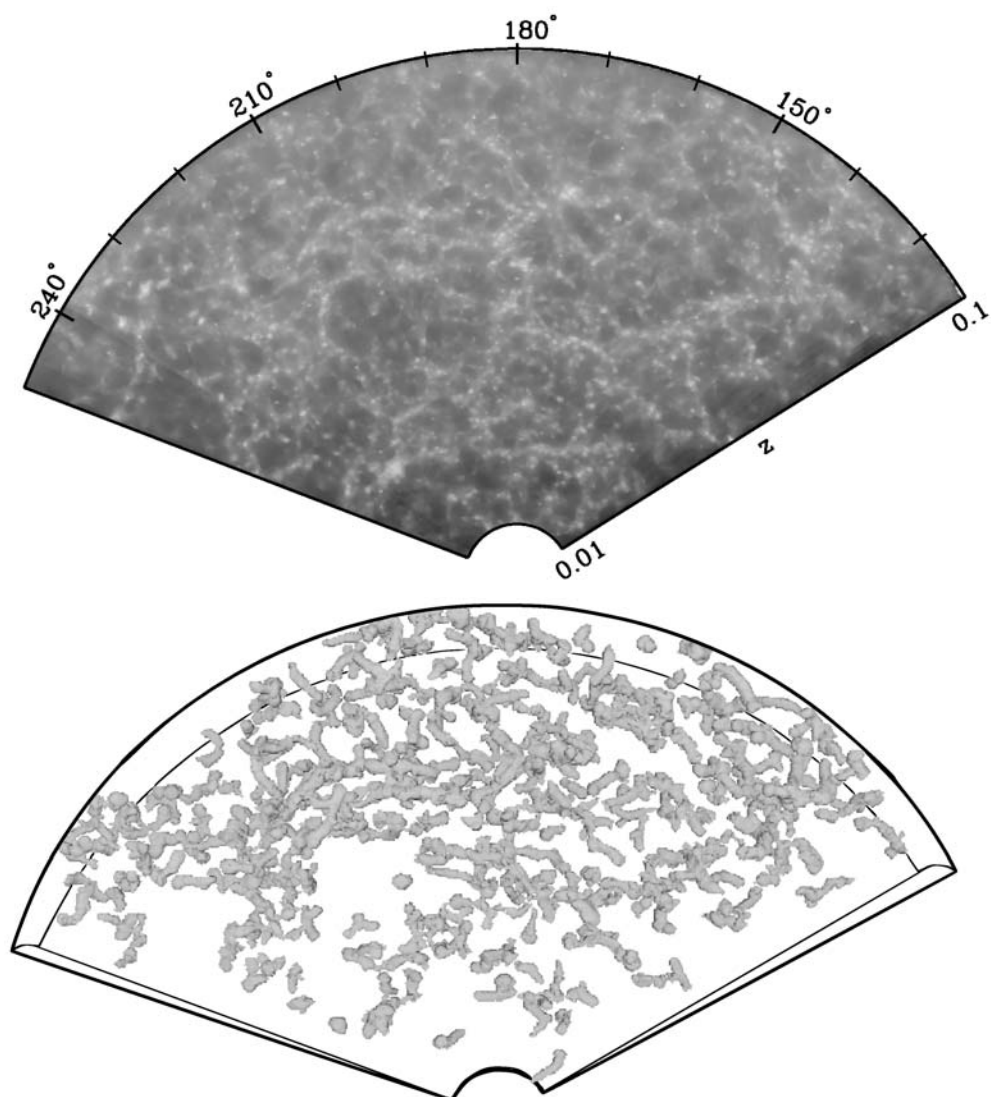


**Figure 6.13:** Het vullen van een gat dat DTFI gebruikt: De linkerpanelen tonen tessellation Delaunay (bovenkant) en dichtheidsgebied dat (bodem) aan de beïnvloede deeltjesdistributie beantwoordt in een simulatie N-body. De centrale panelen tonen het corresponderende Delaunay Tessellation en dichtheidsgebied nadat een "gat" van de originele deeltjesdistributie is gesneden. Het gat wordt door het horizontale in de schaduw gestelde gebied vermeld dat de hoogste panelen kruist. Het definitieve resultaat van het toepassen van DTFI wordt getoond in de rechts panelen. DTFI slaagt erin om het originele dichtheidsgebied na de aangrenzende meetkunde van de melkwegdistributie opnieuw op te bouwen.

Omdat filamenten beter te identificeren zijn dan wanden concentreren wij ons op sterrenstelsels in filamenten. Figuur 6.42 toont het dichtheidsveld (bovenste paneel) dat geconstructueerd is aan de hand van de ruimtelijke verdeling van de sterrenstelsels. In het onderste paneel zijn de grootste geïdentificeerde filamenten afgebeeld. Vervolgens is de spinvector van *edge-on* spiraalstelsels gerelateerd aan de lokale as van het filament. Zowel kleur als helderheid van de stelsels zijn onderzocht. Er blijkt sprake te zijn van een klein doch significant effect: de oriëntatie van de spin van blauwere spiraalstelsels langs het filament lijkt iets sterker te zijn. Deze vondst is een sterke motivatie om de analyse te herhalen voor een meer uitgebreide selectie van sterrenstelsels.

## Eindconclusie

In dit proefschrift hebben we een nieuwe morfologische methode ontwikkeld om clusters,



**Figure 6.14:** Boven: het dichtheidsveld die berekend is met behulp van de DTFE methode. Onder: Hier wordt de buitenkant van filamenten getoond. De filamenten bevatten bijna het hele grote schaal structuur.

filamenten en wanden in grote schaal verdeling van materie en sterrenstelsels te identificeren. Dit stelt ons in staat de eigenschappen van de componenten van het Kosmische Web te bestuderen en te vergelijken met theoretische voorspellingen. Het cruciale voordeel van onze MMF methode is dat deze structuren op een volledig consistente manier kunnen worden bekeken in theorie en in waarnemingen.

Wij durven te beweren dat de MMF techniek het eindelijk mogelijk maakt om de complexe relatie tussen clusters, filamenten en wanden onderling en enerzijds en sterrenstelsels anderzijds op een systematische, theoretische goed gefundeerde wijze te onderzoeken.

