



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Exploring the edge

Contigiani, O.

Citation

Contigiani, O. (2022, January 26). *Exploring the edge*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3254432>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3254432>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Samenvatting

6.8 Moderne kosmologie

De fascinatie van de mensheid voor de kosmos is een alomtegenwoordig thema in onze gemeenschappelijke geschiedenis. De eerste scheppingsmythen vertegenwoordigen de eenvoudigste kosmogonie, d.w.z. modellen over de oorsprong van het heelal, en de meeste hebben de mensheid in een fundamenteel bevoorrechte rol, soms als het natuurlijke eindpunt van de kosmische geschiedenis. De ontwikkeling van de kosmologie, d.w.z. de wetenschappelijke studie van de oorsprong en de evolutie van het heelal, is daarentegen een proces geweest van voortdurende abstractie van onze persoonlijke ervaring en is een duidelijke verwerping gebleken van onze unieke positie. Wat wij hebben ontworpen is een onverschillig Universum, waarin wij opzettelijk geen bevoorrechte waarnemer zijn. Voor het grootste deel is deze onderneming een verootmoedigend en pijnlijk proces geweest. Toch is de moderne kosmologie ook een uiting van onze overmoed. Het gaat ons er niet om uitspraken te doen over ons, hier en nu, maar we streven ernaar alles te verklaren wat was en ooit zal zijn, om wetten af te leiden die we echt universeel kunnen noemen. Een perfect voorbeeld hiervan is de Algemene Relativiteitstheorie van Albert Einstein, die we vandaag de dag zien als de gravitatiewet van het heelal. Zij kan vrijwel elk fenomeen in haar toepassingsgebied beschrijven en kan een groot aantal waarnemingen nauwkeurig voorspellen: de aantrekkingskracht van de zwaartekracht tussen atomen, de structuur van de dichtste objecten in het heelal (zwarte gaten), en de evolutie van het heelal zelf.

Ondanks haar relatieve zwakte is de zwaartekracht de meest relevante kracht op grote schalen, omdat zij niet kan worden afgeschermd en haar bereik formeel oneindig is. Het is dan ook niet verwonderlijk dat het belangrijkste kader dat in de kosmologie wordt gebruikt, gebaseerd is op de Algemene Relativiteit. Volgens de huidige leidende opvatting is deze theorie het toneel van een touwtrekkerij tussen twee componenten: donkere materie en donkere energie. Deze twee componenten hebben tegengestelde effecten: de eerste vormt structuren die bijeen worden gehouden door gravitatiekrachten, terwijl de andere de dingen uit elkaar trekt en de structuur vernietigt. Ondanks hun essentiële rol is er zeer weinig bekend over de donkere sector, afgezien van deze zeer

basiseigenschappen en het feit dat beide componenten geen licht uitzenden. Vandaar het bijvoeglijk naamwoord "donker". De "normale" materie, die alles vormt wat we zien en aanraken, is daarentegen een subdominante component die geen belangrijke rol speelt in de vorming van de geschiedenis van het heelal.

6.9 De rand en donkere energie

De Melkweg is een spiraalvormig sterrenstelsel waarin het zonnestelsel en de aarde zich bevinden. Door onze positie lijken de sterren waaruit het bestaat als een melkwegstreep zichtbaar aan de nachtelijke hemel van afgelegen gebieden. Deze grote kosmische structuren zijn bij de meesten wel bekend, maar in werkelijkheid bevat het heelal nog veel grotere objecten. In het bijzonder gaat de aandacht in dit proefschrift uit naar donkere materie halo's, dichte klonters donkere materie die 1.000 keer groter zijn dan ons melkwegstelsel. Deze objecten zijn omgeven door een web-achtige verdeling die gewoonlijk wordt aangeduid als de grootschalige structuur van het heelal. In de afgelopen decennia is het mogelijk geworden om het ontstaan van dit complexe netwerk te bestuderen door middel van numerieke simulaties. Gesimuleerde heelallen worden gemaakt en geanalyseerd om de effecten van de donkere sector op de structuurvorming in te schatten. Dit begrip wordt echter bemoeilijkt door het feit dat structuren van donkere materie in het echte heelal niet kunnen worden gefotografeerd, omdat zij geen licht uitstralen. Gelukkig kunnen de sterrenstelsels die binnen de halo's ontstaan en evolueren, worden gebruikt om de structuren waarin zij leven te onderzoeken. Als je van veraf naar de sterrenstelsels kijkt, zie je ze als heldere punten die ingebed zijn in de stellage van donkere materie, die de grootschalige structuur van het heelal vormt.

Het vroege heelal bestond uit een homogene verdeling van materie, maar na verloop van tijd leidden zwaartekrachten tot de vorming van dichte kluiten die dankzij hun zwaartekracht nog meer materie aantrekken. Dit zijn de donkere materie halo's die centraal staan in dit proefschrift. Wanneer men hun gesimuleerde versie in detail bekijkt, kan men een dichte binnenkern herkennen, omgeven door een buitengebied dat bestaat uit materie die langzaam naar het binnengebied stroomt. Het overgangsg gebied tussen deze twee zones is relatief klein en gaat gepaard met een abrupte verandering van dichtheid: omdat het binnenste gebied in de loop van de kosmische tijd is gegroeid, is het aanzienlijk dichter dan het buitenste gebied. Deze scherpe daling in massadichtheid staat bekend als de splashback en vormt de titulaire rand van dit proefschrift.

Laten we, om te begrijpen hoe donkere energie van invloed is op structuurvorming en spatten, een eenvoudig model daarvoor beschouwen. De minimale verklaring voor donkere energie is de zogenaamde kosmologische constante, een numerieke parameter die voorkomt in de vergelijkingen van de Algemene Relativiteit en die resulteert in een drukkracht die tegengesteld is aan de aantrekkingskracht van de zwaartekracht. Dit vertraagt effectief de hierboven beschreven groei en belemmert de vorming van kos-

mische structuren. Er wordt echter getwijfeld aan deze verklaring omdat, indien waar, de numerieke waarde van deze constante aanzienlijk kleiner zou zijn dan die van andere natuurconstanten. Om deze discrepantie aan te pakken, wordt donkere energie in alternatieve modellen beschreven als een kwintessens: een vorm van energie die in de loop van de tijd kan evolueren. Met name vanwege het exclusieve verband met gravitatieverschijnselen kunnen modellen van quintessentie ook worden geïnterpreteerd als een uitgebreide versie van de Algemene Relativiteit in plaats van een nieuwe generieke component. Omdat zij evolueren, is de druk die door deze gewijzigde zwaartekrachtmodellen wordt uitgeoefend anders dan in het geval van de kosmologische constante en kan hun invloed op de structuur van het heelal worden gebruikt om ze te bestuderen.

6.10 Dit proefschrift

De grenzen van de grootste structuren bieden een laboratorium om de relatie tussen donkere materie halo's en kosmologie te onderzoeken. Het kenmerk dat deze randen definieert is een eenvoudige voorspelling, maar het potentieel ervan om de fysica van de structuurvorming te bestuderen is pas onlangs erkend. In het bijzonder is dit gebied de afgelopen vijftig jaar tot bloei gekomen dankzij recente grootschalige onderzoeken van de hemel, waarmee miljoenen melkwegstelsels kunnen worden waargenomen, verdeeld over een aanzienlijk deel van het waarneembare heelal. Ondanks de toegenomen belangstelling staat het vakgebied nog in de kinderschoenen, en er is meer kennis nodig voordat het ware potentieel kan worden gerealiseerd. Deze dissertatie presenteert vier hoofdstukken die erop gericht zijn deze wetenschap tot een volwassen vakgebied te maken en te laten zien hoe de dynamische aard van de grootschalige structuur van het heelal kan worden gemodelleerd en gemeten.

Hoofdstuk 2 van dit proefschrift presenteert de eerste meting van de splashback rond massieve halo's. Deze meting maakt gebruik van gravitatielensing, een bijzonder geavanceerde manier om de verdeling van donkere materie in het heelal waar te nemen. In de Algemene Relativiteit wordt de zwaartekracht van zware objecten opgevat als een vervorming van het weefsel van de ruimtetijd. Daarom worden lichtstralen die door verre objecten worden uitgezonden, beïnvloed door de kromming van structuren van donkere materie langs de gezichtslijn. De vervorming van beelden die het gevolg is van dit effect kan vervolgens worden gebruikt om de massaverdeling in het heelal te meten.

Hoofdstuk 3 presenteert de eerste kwantitatieve voorspellingen van hoe de rand van halo's wordt beïnvloed in de aanwezigheid van quintessence. Het hoofdstuk concentreert zich op een specifiek model, het symmetron, en maakt gebruik van een eenvoudig semi-analytisch model om grip te krijgen op de meest kritische parameters van deze theorie. Het resultaat is een consistent beeld van deze eigenschap als functie van deze parameters in de context van het bekende paradigma van structuurvorming.

Hoofdstuk 4 brengt twee nieuwe waarneembare grootheden naar voren. De eerste

is de relatie tussen de vorm van de rand van een halo en zijn verbinding met het hem omringende kosmische web. De tweede is het bestaan van een duidelijke relatie tussen de grootte van een halo, gedefinieerd door zijn rand, en zijn massa. Het meten van deze relatie is informatief omdat uitgebreide modellen van de zwaartekracht wel invloed blijken te hebben op de eerste, maar niet op de tweede.

Hoofdstuk 5 is het hoogtepunt van de vorige twee. De belangrijkste resultaten zijn de meting van de massa-grootte relatie in de gegevens verkregen door de Kilo-Degree Survey, en de studie van de implicaties daarvan voor het symmetron model.

Hoofdstuk 6 is een samenvatting van drie aanvullende projecten die tijdens het schrijven van dit proefschrift zijn uitgevoerd. Zij richten zich op de studie van de groot-schalige structuur van het heelal door middel van een nieuwe probe, gravitatiegolven. Door de grote kromming die met zwarte gaten samenhangt, veroorzaken de samen-smeltingen van twee van zulke objecten rimpelingen in de ruimtetijd die vanuit de hele kosmos kunnen worden waargenomen. Dit hoofdstuk onderzoekt deze nieuwe klasse van signalen in alternatieve zwaartekrachttheorieën en in de aanwezigheid van gravitatielensing.