



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Aggravating matters: accounting for baryons in cosmological analyses

Debackere, S.N.B.

Citation

Debackere, S. N. B. (2022, September 22). *Aggravating matters: accounting for baryons in cosmological analyses*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3464420>

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/1887/3464420>

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

Nederlandstalige samenvatting

In de Griekse mythologie is de kosmos (κόσμος) een geordende toestand die ontstaat uit de chaos (χάος), de leegte⁶. De kosmologie als onderzoeksgebied probeert op een gelijkaardige manier de metaforische leegte in ons begrip van het universum op te vullen: waar kwam het vandaan en hoe zal het evolueren? Slechts in de laatste eeuw is de kosmologie geëvolueerd van een voornamelijk filosofisch tijdverdrijf naar een volwaardig wetenschappelijk vakgebied. De bouw van grote telescopen met spectrografen opende een nieuwe kijk op ons heelal: de verschuiving van atomaire emissielijnen van verafgelegen objecten, veroorzaakt door hun beweging ten opzichte van de Aarde, toonde aan dat de sommige van de wazige nevels, waarvan er al duizenden ontdekt waren, in werkelijkheid gigantische openhopingen van sterren zijn die aan “ongeëvenaarde snelheden” van ons wegsnellen. Deze hypothese bleek initieel controversieel en leidde tot het “Grote Debat” tussen Shapley en Curtis in 1921 over de grootte van het heelal. Het definitieve antwoord kwam in 1925 via Edwin Hubble die individuele variabele Cepheïdesternen ontdekte in de nabije Andromeda- en Driehoeknevels en de relatie tussen hun periodieke helderheidsvariaties en hun lichtkracht gebruikte om aan te tonen dat deze nevels daadwerkelijk sterrenstelsels zijn die zich op miljoenen lichtjaren van ons bevinden. Georges Lemaître was de eerste die de waarnemingen van de hoge snelheden van verafgelegen sterrenstelsels in 1927 interpreteerde in de optiek van een uitdijend heelal zoals de vergelijkingen van Einsteins algemene relativiteitstheorie voorspellen. Hubble toonde in 1929 direct aan dat verder afgelegen sterrenstelsels met hogere snelheden van ons wegsnellen, precies zoals verwacht voor een uitdijend universum. Deze doorbraak luidde het begin van het tijdperk van de *observationale* kosmologie in.

Sinds de ontdekking van de uitdijing van het heelal, nu bijna een eeuw geleden, heeft een overvloed aan afzonderlijke observaties de verdeling van materie op kosmologische schalen van miljoenen tot miljarden lichtjaren verhelderd. Het consistente plaatje is dat van een uitdijend heelal dat structuur bevat op verschillende lengteschalen: sterrenstelsels hopen zich op in groepen van enkele melkwegstelsels tot clusters die er honderden tot duizenden bevatten. De groepen bevinden zich in een filamentaire structuur met de clusters in de knooppunten: een uitgebreid netwerk van overdichtheden, het kosmisch web genoemd. De ruggengraat van dit netwerk bestaat uit donkere materie, een vorm van materie die enkel zwaartekracht voelt en die ongeveer 25 % van de totale energiedichtheid van het heelal beslaat. De normale materie, waar wij mee bekend zijn, bevindt zich in gaswolken, sterren, planeten en hun bewoners, maar draagt amper 5 % bij aan het energiebudget. De overige 70 % van de rekening gaat naar de mysterieuze donkere energie, een onbekende vorm van energie die de zwaartekracht tegenwerkt en het heelal in een toestand van een ogenschijnlijk oneindige versnelde uitdijing drijft.

Kosmologie in de toekomst

Een rist telescopen zal het komende decennium hun eerste licht waarnemen met als doel de eigenschappen van deze donkere energie te verhelderen. Met behulp van de miljarden

⁶Hesiodius, *Theogonia*, 110

sterrenstelsels die ze zullen ontdekken, zullen ze de evolutie van de verdeling van de totale materie, zowel donker als normaal, over de afgelopen 10 miljard jaren in kaart brengen. De ware doorbraak zal liggen in hun vermogen om direct het tijdperk waar te nemen wanneer het heelal voldoende was uitgedijd zodat donkere energie het energiebudget begon te domineren over de zwaartekracht van de materie, ongeveer 3.6 miljard jaren geleden. De versnelde uitdijing van het heelal werkt de aantrekking van de zwaartekracht tegen, wat de vorming van structuur vertraagt en een duidelijke afdruk nalaat in de verdeling van sterrenstelsels. De uitdaging zal hem liggen in het afleiden van de verdeling van alle materie uit de observaties van enkel de sterrenstelsels.

Het is mogelijk om de totale verdeling van materie waar te nemen, zij het indirect, aangezien massa de onderliggende ruimtetijd vervormt, zoals ook het oppervlak van een trampoline, wat gevolgen heeft voor het pad dat licht aflegt op weg naar onze telescopen. De differentiële kromming van de ruimtetijd fungeert als een lens die achterliggende sterrenstelsels uitvergroot en hun afbeelding vervormt. Een extreem voorbeeld van een sterke zwaartekracht lens is te zien in Fig. 1.5 in Hoofdstuk 1, waar een cluster van sterrenstelsels omringd is door uitgerekte bogen van sterk vervormde achterliggende melkwegstelsels. Dit effect vindt ook subtieler plaats voor sterrenstelsels die zich in projectie verder van het centrum van de cluster bevinden, zoals schematisch getoond in Fig. 1.6 in Hoofdstuk 1. Aangezien sterrenstelsels a priori geen voorkeursoriëntatie vertonen, kunnen we de massa van een object bepalen door statistisch de oriëntatie van vele sterrenstelsels te meten. De aanwezigheid van een grote massa zal leiden tot een preferentiële oriëntatie tangentieel aan de grote cirkels gecentreerd op de massaverdeling (zoals duidelijk te zien in de bogen in Fig. 1.5), waar de grootte van het signaal afhangt van de massa van het object. Aangezien de afbeeldingen bij de statistische methode minder vervormd zijn, spreken we in dit geval over een zwakke zwaartekracht lens.

Door de correlaties tussen de vervorming van sterrenstelsels in het zwakke regime op verschillende afstanden van ons en op verschillende plekken aan de hemel te correleren, kunnen we de statistische verdeling van materie in het heelal bepalen. Daarnaast kunnen we met zwakke zwaartekracht lenzen ook de massa van individuele objecten, zoals clusters van sterrenstelsels, bepalen. Clusters zijn zeldzame objecten: ze zijn extreem massief, waardoor het een lange tijd duurt vooraleer ze vormen. De evolutie in het aantal clusters hangt dus nauw af van de hoeveelheid materie en haar verdeling alsook van de geschiedenis van donkere energie.

Deze thesis focust op de interpretatie van het zwakke zwaartekracht lens signaal zodanig dat we de correcte massa kunnen bepalen. Dit is een ingewikkeld probleem aangezien we moeten weten hoe de normale materie zich gedraagt ten opzichte van de donkere materie. Beide soorten materie voelen de zwaartekracht, maar slechts de normale materie interageert ook door middel van de elektromagnetische kracht. Deze interacties zorgen voor fundamenteel verschillend gedrag op de relatief kleinere schalen van sterrenstelsels. Eigenlijk kunnen melkwegstelsels enkel ontstaan *dankzij* deze elektromagnetische interacties. Paradoxaal genoeg is niet alle normale materie zichtbaar voor onze telescopen aangezien een aanzienlijke fractie zich bevindt in gas van lage dichtheid en hoge temperatuur waarvoor de gevoeligheid van onze huidige Röntgenstraling telescopen te laag is om het direct waar te nemen. Bijgevolg moeten we een manier vinden om de ongekende bijdrage van de normale materie te ontwarren van het totale waargenomen lens signaal.

Uitdagingen

In het prille begin, ongeveer 20 000 jaren na de oerknal, is het heelal genoeg afgekoeld zodat materie en niet straling het energiebudget van het heelal domineert. Op dat moment beginnen kleine fluctuaties in de dichtheid van donkere materie te groeien onder de invloed van de zwaartekracht terwijl de overvloedige elektromagnetische straling in de vorm van fotonen nog steeds sterk gekoppeld is aan de normale materie en voorkomt dat deze meegroeit. Ongeveer 380 000 jaren na de oerknal is het heelal genoeg uitgedijd en de koppeling met de straling danig afgenomen zodat de normale materie eindelijk instort onder invloed van de zwaartekracht van de reeds sterk gegroeide donkere materie-overdichtheden.

De elektromagnetische interacties tussen normale materie zorgen ervoor dat atomen, elektronen en ionen met elkaar kunnen botsen, wat resulteert in een druk die de instorting vanwege de zwaartekracht kan tegengaan. Bijgevolg vormt zich in de ingestorte donkere materiestructuren, een gasachtige halo met een evenwichtstemperatuur zodanig dat de druk van het gas de zwaartekracht balanceert. Dit is echter niet het volledige verhaal: eenmaal de dichtheid en de temperatuur van het gas hoog genoeg zijn, zal het gas geïoniseerd worden en zullen vrije elektronen in botsingen de atomen exciteren of ioniseren, wat gepaard gaat met de emissie van fotonen, waardoor de elektronen energie verliezen en het gas afkoelt. De meeste atomaire transities komen overeen met temperaturen tussen $10^4 - 10^6$ K en gas met deze temperatuur zal dus efficiënt kunnen afkoelen wat leidt tot fragmentatie en stervorming in halo's met massa's van $10^{10} - 10^{12} M_{\odot}$, waar M_{\odot} een zonnemassa is. Tijdens het afkoelen zal het gas instorten naar het centrum van de halo terwijl het hoekmoment behouden blijft, wat resulteert in de vorming van sterrenschijven zoals waargenomen in spiraalstelsels. De halo's en hun sterrenstelsels groeien door de continue instroom van meer materie en door samensmeltingen met andere halo's waarin de sterrenschijven verstoord worden en de spiraalstelsels omvormen tot elliptische sterrenstelsels. Meer massieve halo's groeien hiërarchisch door de ophoping van verschillende kleinere halo's als een satellietpopulatie.

De vorming en de groei van sterrenstelsels gaat gepaard met hevige zogenaamde "feedbackprocessen". Sterren genereren stellaire winden die het gas in hun omgeving verrijken en massieve sterren kunnen exploderen als supernovae na enkele tientallen miljoenen jaren. Deze explosies verdrijven en verhitten het naburige gas wat stervorming kan stopzetten in sterrenstelsels met lage massa. Massieve sterrenstelsels herbergen een centraal supermassief zwarte gat dat gevoed wordt door de instroom van gas. Materiaal dat de accretieschijf bereikt wordt daar versneld en voedt winden en "jets" die gas op de schaal van het hele sterrenstelsel kunnen verhitten en ontbinden wat leidt tot de injectie van verrijkt materiaal in de halo. De feedback van deze actieve galactische nucleus (AGN) stopt de stervorming in massieve stelsels en kan bovendien de verdere instroom van koel gas verhinderen. Deze heftige processen zijn moeilijk te voorspellen aangezien ze plaatsvinden op relatief kleine schalen, maar ze hebben een belangrijke impact op de totale verdeling van materie in het heelal.

Computersimulaties kunnen heel precies voorspellen hoe de gravitationele instorting van donkere materie resulteert in een kosmisch web door miljarden deeltjes onder de invloed van de zwaartekracht te laten evolueren in een volume van miljoenen lichtjaren. Het

is echter moeilijker om de normale materie mee te nemen in deze berekeningen, aangezien de feedbackprocessen plaatsvinden op schalen van enkele lichtjaren die niet gelijktijdig gesimuleerd kunnen worden in de gigantische volumes vanwege de beperkte beschikbare rekenkracht. Deze processen kunnen enkel worden meegenomen als versimpelde recepten onder de resolutielimiet van de simulaties. Bijgevolg kunnen simulaties niet van de grondbeginselen de verdeling van materie voorspellen.

Dit proefschrift

In dit proefschrift bestuderen we hoe onze gebrekkige kennis van de vorming van sterrenstelsels en hun impact op de totale verdeling van materie, de interpretatie van toekomstige kosmologische analyses beïnvloedt. Winden op de schaal van sterrenstelsels gegenereerd door supernova-ontploffingen en verhitte bellen geblazen door de supermassieve zwarte gaten in het centrum van sterrenstelsels, hebben een sterke invloed op de verdeling van materie wanneer we deze vergelijken met een simpeler heelal dat enkel materie bevat die instort onder de invloed van de zwaartekracht. Dit bemoeilijkt de kosmologische analyse van toekomstige missies aanzienlijk, aangezien deze processen nog steeds niet goed begrepen zijn.

In **Hoofdstuk 2** verhelderen we de onzekerheid in de verdeling van alle materie voor grootschalige zwakke zwaartekrachtenslensanalyses. We gebruiken een fenomenologisch halo model dat observationele data reproduceert om de totale verdeling van materie statistisch te modelleren. Dit model heeft genoeg vrijheid om de invloed van de niet waargenomen normale materie op het uiteindelijke antwoord te kwantificeren. We tonen aan dat de verdeling van het hete gas in groepen en clusters van sterrenstelsels van cruciaal belang is omdat deze objecten het totale signaal domineren op de schalen die de correlaties in de oriëntaties van sterrenstelsels bepalen. We benadrukken ook dat feedbackprocessen vooral de massa van halo's verlagen ten opzichte van een heelal dat enkel donkere materie bevat: de verdeling van de halo's zelf verandert niet veel.

In **Hoofdstuk 3** schakelen we over naar clusters als een sonde voor de evolutie van het heelal, geïnspireerd door hoe succesvol het simpele model in Hoofdstuk 2 de impact van de normale materie op de totale materieverdeling zoals voorspeld in simulaties kan reproduceren, hoewel het enkel observationele data gebruikt. We gebruiken Röntgenstralingobservaties van het hete gas in clusters om hun totale dichtheidsprofiel, inclusief donkere materie, te bepalen. We verbinden waargenomen halo's met gesimuleerde halo's in een heelal dat enkel donkere materie bevat, waardoor we theoretisch hun aantal kunnen voorspellen als functie van hun driedimensionale massa. Vervolgens simuleren we zwakke zwaartekrachtenslensobservaties van onze modelclusters om te kwantificeren wat de impact is van een foute aanname voor hun dichtheidsprofiel op de afgeleide driedimensionale massa. We tonen aan dat de clusteranalyses van toekomstige missies significant verkeerde waarden zouden afleiden voor zowel de afgeleide hoeveelheid materie en haar verdeling als voor de evolutie van donkere energie, indien ze geen rekening houden met de verschillende verdeling van normale materie ten opzichte van donkere materie.

In **Hoofdstuk 4** pakken we het probleem van de massakalibratie van clusters op een andere manier aan. We constateren dat er momenteel een oneerlijke last ligt bij de zwakke zwaartekrachtenslenswaarnemingen om de driedimensionale massa af te leiden aangezien

die gemakkelijk te bepalen is in simulaties. Deze stap vereist echter kennis van het geprojecteerde dichtheidsprofiel van de cluster dat observationeel moeilijk te bepalen is. Wij stellen voor het aantal waargenomen clusters theoretisch te kalibreren als een functie van hun excessieve geprojecteerde massa die direct te meten is in zwakke zwaartekracht-lens-observaties én simulaties. We tonen aan dat deze geprojecteerde massa's met een beduidend lagere observationele fout kunnen afgeleid worden dan de driedimensionale massa. Bovendien blijkt uit grote collecties van simulaties die enkel donkere materie evolueren dat het aantal clusters als functie van de geprojecteerde massa minstens even gevoelig is voor veranderingen in de kosmologie als het aantal als functie van de driedimensionale massa. Bijgevolg kunnen geprojecteerde massakalibraties leiden tot een grote reductie in de systematische onzekerheid van kosmologische studies die het aantal clusters meten.

Tot slot gebruiken we in **Hoofdstuk 5** kosmologische hydrodynamische simulaties om het effect van normale materie op de geprojecteerde massa van clusters te kwantificeren door de verandering in de massa te vergelijken voor halo's in gesimuleerde universa met en zonder normale materie. Geprojecteerde massa's blijken enigszins minder gevoelig te zijn voor de feedbackprocessen dan de driedimensionale massa's aangezien normale materie en donkere materie aan de rand van de cluster gelijkaardig verdeeld zijn en de rand van de cluster ook bijdraagt aan de geprojecteerde massa. De gevoeligheid neemt niet dramatisch af, maar, in samenspel met de reductie in de systematische onzekerheid in de massakalibratie, is het een ander voordeel van geprojecteerde massakalibraties voor kosmologie met clusters.