



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Probing cosmic monsters: confronting hydrodynamic simulations with new observations of high-density environments

Ahad, S.L.

Citation

Ahad, S. L. (2023, November 21). *Probing cosmic monsters: confronting hydrodynamic simulations with new observations of high-density environments*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3663135>

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/1887/3663135>

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

Nederlandse samenvatting

Het huidige standaardmodel van de kosmologie, het ‘Lambda Cold Dark Matter’ (Λ CDM) model met koude donkere materie en een kosmologische constante (Λ) als belangrijkste ingrediënten, is één van de indrukwekkendste prestaties van de moderne wetenschap. De theorie wordt ondersteund door een reeks aan verschillende kosmische metingen. Volgens de oerknaltheorie in het Λ CDM-paradigma is het universum grofweg 13,8 miljard jaar geleden ontstaan. Vlak na de oerknal had het universum een enorm hoge dichtheid, het was heet, en alle atomen waren geïoniseerd en opmerkelijk homogeen verdeeld, wat heeft geleid tot de bijna isotrope temperatuur van de kosmische achtergrondstraling die we waarnemen. De dichtheidsverdeling had echter zeer kleine oneffenheden, die in de loop van de tijd onder de invloed van zwaartekracht zijn gegroeid en uiteindelijk donkere materiehalo’s (dm-halo’s) vormden. Naarmate het universum voldoende was afgekoeld, klonterden de atomen samen in deze dm-halo’s. Ongeveer 100 miljoen jaar na de oerknal ontstonden de eerste sterren waaruit vervolgens de eerste sterrenstelsels zijn gevormd.

Vandaag de dag zijn de sterrenstelsels in het heelal verdeeld in een complexe structuur die bekend staat als het kosmische web. De grootschalige verdeling van materie lijkt op een web, met grote leegtes, draden en knooppunten op de kruisingen van deze draden. Van de kleine dm-halo’s tot de kosmische webstructuur is het hele heelal in de loop van de kosmische tijd hiërarchisch gegroeid doordat individuele dm-halo’s fuseerden tot steeds grotere objecten. Sterrenstelsels vormden zich in deze dm-halo’s en groeiden mee langs de reeds bestaande kosmische filamenten, wat uiteindelijk resulteerde in vorming van de grootste door zwaartekracht gebonden structuren in het heelal, namelijk gigantische clusters van sterrenstelsels, op de kruispunten van de draden van het kosmische web. Omdat dit de grootste gevormde structuren zijn binnen het hiërarchische vormingsmodel kan hun hoeveelheid en hun massaverdeling gebruikt worden om de theorie van structuurvorming in de loop van de kosmische tijd te testen.

Clusters van sterrenstelsels en hun kleinere tegenhangers, groepen van sterrens-

telsels, bestaan uit tientallen tot duizenden sterrenstelsels in een relatief klein volume in vergelijking met andere gebieden in het heelal. Door de hoge dichtheid van sterrenstelsels zijn groepen en clusters van sterrenstelsels unieke kosmische laboratoria om de invloed van de interacties tussen sterrenstelsels en hun omgeving en de impact hiervan op de evolutie van sterrenstelsels te bestuderen. Hoewel ons begrip van de processen die de evolutie van deze sterrenstelsels bepalen in de laatste decennia is gegroeid, zijn er nog veel open vragen.

Een van deze open vragen is waarom de sterrenstelsels in deze drukke omgeving stoppen met het vormen van sterren. In het lokale heelal begrijpen we de groei van sterrenstelsels in groepen en clusters redelijk goed met behulp van vereenvoudigde modellen die het stoppen van stervorming beschrijven. Op hogere roodverschuivingen ($z > 1$) kunnen deze theorieën echter een aantal recente waarnemingen, zoals dat zware sterrenstelsels in clusters en protoclusters al eerder stoppen met het vormen van sterren, niet verklaren.

Verder krijgt de verdeling van licht binnen deze groepen en clusters, zoals de diffuse halo van sterren rond de centrale sterrenstelsels in groepen/clusters van sterrenstelsels recent meer aandacht. De diffuse stellaire halo is een overblijfsel van de wisselwerking tussen sterrenstelsels tijdens de vorming van de grootschalige structuren. Bovendien is er waargenomen dat de massaverdeling van deze sterren de universele dm-verdeling volgt, waardoor het een potentiële tracer is van de onzichtbare dm-halo waarin het sterrenstelsel verblijft. Door de diffuse aard vallen deze studies in het regime van lage oppervlaktehelderheden ($27 \geq \text{mag}/\text{arcsec}^2$), waardoor ze bemoeilijkt worden door de limitaties van de optische observationele sterrenkunde. Ondanks recente vooruitgang blijft de bijdrage van de diffuse sterren aan de totale baryonische massa van de sterrenstelsels en de invloed van vormingsmechanismen op het ontstaan en de groei van sterrenstelselclusters en hun centrale sterrenstelsels nog steeds onduidelijk.

Het verklaren van de rijke diversiteit binnen de sterrenstelselpopulatie in verschillende omgevingen met een uitgebreide theorie over sterrenstelselvorming is een ingewikkelde uitdaging. Het ontstaan en de groei van dm-halo's en de vorming van sterrenstelsels daarin kan numeriek gesimuleerd worden. Vooral hydrodynamische simulaties zijn een succesvol hulpmiddel geweest om de individuele bestanddelen van het universum, namelijk donkere materie en gewone (baryonische) materie bestaande uit gas, stof en sterren, te verbinden in de context van sterrenstelselvorming.

Omdat deze simulaties een extreem groot bereik van dynamische schalen, van stervorming via koud moleculair gas tot grootschalige structuren, moeten bestrijken, is het numeriek onmogelijk om de simulaties volledig vanuit eerste principes op te bouwen.

Een oplossing is om onder de resolutieschaal zogenaamde subgrid natuurkundige modellen te gebruiken voor processen die op kleinere schalen plaatsvinden. Voorbeelden van deze processen zijn het afkoelen van gas, stervorming en de energie- en impulsinjectie die wordt veroorzaakt door extreem zware zwarte gaten en supernova's. De parameters die de subgrid modellen beschrijven hebben onbekende en onmeetbare waarden en worden meestal afgeschat zodat geselecteerde relaties in de simulatie overeenkomen met metingen in het lokale heelal, zoals bijvoorbeeld de massa functie van sterrenstelsel of de sterren-over-halo-massafunctie. De relaties tussen de parameters van het subgrid model en de gesimuleerde eigenschappen van sterrenstelsels zijn echter niet-lineair en het grofweg reproduceren van één waarneembare sterrenstelseigenschap garandeert geen overeenkomst tussen andere eigenschappen. Het vermogen van simulaties om realistische waarneembaarheden te voorspellen moet daarom worden getoetst met zorgvuldig ontworpen controletests.

In dit proefschrift heb ik gebruik gemaakt van de EAGLE en Hydrangea simulaties. Hydrangea is een suite van 24 hoge-resolutie zoomin simulaties van zware sterrenstelselclusters en hun directe omgeving. De Hydrangea-simulaties en het EAGLE-project gebruiken dezelfde versie en afstelling van de EAGLE-code. Tot op heden zijn de Hydrangea simulaties de grootste set van zware sterrenclusters met een vergelijkbare hoge resolutie. De simulaties zijn over het algemeen succesvol in het reproduceren van waargenomen eigenschappen van sterrenstelsels in omgevingen met een hoge dichtheid.

Het is cruciaal om de accuraatheid van de simulaties op hogere roodverschuivingen te testen voordat conclusies kunnen worden getrokken, omdat deze simulaties, net als alle moderne simulaties, zijn geijkt op $z = 0$. Vanwege de grove behandeling van de onderliggende fysica met de subgrid modellen betekent het feit dat de simulaties een waarneembare functie reproduceren niet dat ze de daadwerkelijke natuurkundige processen in het echte heelal nauwkeurig reproduceren. Bovendien kunnen subtiele details bij het vergelijken van de simulaties en waarnemingen de conclusie sterk beïnvloeden. Een zorgvuldige vergelijking tussen de simulaties en waarnemingen die rekening houdt met hun fysische aard en mogelijk geïntroduceerde fouten van beide kanten overweegt is daarom van cruciaal belang.

Met de enorme recente vooruitgang in zowel theorie als waarnemingen zal de meetfout klein genoeg worden dat de tekortkomingen in de methodologie de beperkende factor zijn in de interpretatie van de data. Daarom is dit het uitgelezen moment om de hulpmiddelen te bouwen die de kwaliteit van de interpretatie bevorderen.

In dit proefschrift

In dit proefschrift hebben we verschillende eigenschappen van sterrenstelsels in groepen en clusters uit de Hydrangea en EAGLE-simulaties vergeleken met recente waarnemingen op $z < 3, 5$. We zijn begonnen met algemene eigenschappen, zoals de totale massa in sterren in groepen en clusters, waarna we verder gingen met meer gedetailleerde eigenschappen, zoals de ruimtelijke verdeling van massa in sterrenstelsels binnen de clusters. We hebben de waarnemingen nagebootst in simulaties, zodanig dat dat ze overeenkomen met echte data van de Kilo-Degree Survey, waarna we andere eigenschappen met elkaar vergeleken. Door een breed scala aan eigenschappen van sterrenstelsels uit kosmologische hydrodynamische simulaties te vergelijken met recente waarnemingen van hoge kwaliteit, hebben we de betrouwbaarheid van de simulaties bij hogere roodverschuivingen getest en laten we zien hoe deze vergelijkingen nieuwe tests motiveren en nieuwe inzichten opleveren over de evolutie van sterrenstelsels in omgevingen met hoge dichtheden.

In **Hoofdstuk 2** hebben we verschillende eigenschappen van massieve sterrenclusters uit de Hydrangea-simulaties vergeleken met recente waarnemingen van clusters tot een roodverschuiving $z=2$. We hebben bevestigd dat de totale massa in sterren in de Hydrangea-clusters bij een vaste halomassa en roodverschuiving vergelijkbaar is met waargenomen sterrenstelselclusters. Daarna ontdekten we dat bij een vaste roodverschuiving de normalisatie van de massafunctie in sterrenstelsels van clusters sterk correleert met de halo-massa van de cluster. Ook voorspelden de simulaties, met een halo-massaverdeling die overeenkomt met een waargenomen cluster dataset, de waargenomen stellaire massa functie correct tot een roodverschuiving $z=1,5$. Vervolgens bestudeerden we de dichtheidsprofielen van clusters op $z < 2$, voor zowel de donkere materie als de sterren. Door de concentratie-parameters van de Navarro-Frenk-White (NFW) model profielen te vergelijken met eerder onderzoek, hebben we geverifieerd dat de tegenovergestelde evolutie van de donkere materie en sterren concentratie in clusters over de kosmische tijd niet in strijd is met de Λ CDM-kosmologie.

In **Hoofdstuk 3** bestudeerden we het licht in groepen en clusters, met als doel de kloof te overbruggen tussen simulatie-gebaseerd werk (waar de massaverdeling bepaald wordt) en observationeel werk (waard de lichtverdeling bepaald wordt). We hebben waarnemingen van meerdere filters gesimuleerd voor 500 sterrenstelselgroepen en -clusters uit de Hydrangea-simulaties. We hebben deze beelden vergeleken met de gegevens van de Kilo Degree Survey (KiDS) en Galaxy and Mass Assembly (GAMA) survey. Dit werk loste een cruciaal probleem op in de analyse, namelijk door het

selecteren van de beste plaats voor het centrum van de groep. We ontdekten dat in plaats van het helderste sterrenstelsel, het stelsel met de hoogste geassocieerde halo-massa een betere kandidaat is voor centraal sterrenstelsel. Bovendien konden we de sterrenstelsels beter begrijpen door ze te groeperen op basis van de helderheid van het centrale sterrenstelsel. Ten slotte gaven de kleur-, massa- en metaalprofielen van het diffuse sterlicht van Hydrangea aan dat in groepen met een lage massa het diffuse sterlicht voornamelijk groeit door grote fusies, terwijl in zwaardere clusters de groei van het diffuse sterlicht voornamelijk verloopt via de aangroei van sterren uit satelliet sterrenstelsels.

In **Hoofdstuk 4** hebben we de fractie van het diffuse sterlicht in sterrengroepen gemeten op basis van de gegevens van het KiDS+GAMA-onderzoek en deze resultaten vergeleken met de bevindingen van **Hoofdstuk 3**. De standaard dataverwerkingspijplijn voor KiDS is geoptimaliseerd om kleine, zwakke sterrenstelsels te detecteren en niet om diffuus licht te meten. We ontwikkelden een speciale pipeline om de afbeeldingen van KiDS te gebruiken voor de meting van diffuus licht. Hiermee verkregen we de eerste robuuste meting van het diffuse licht voor 850 groepen. We ontdekten dat beperkingen in de gegevens de metingen kunnen beïnvloeden, zelfs met onze speciale pipeline. Door een grote dataset en zorgvuldig geoptimaliseerde analyse te combineren, kunnen we echter robuuste boven- en ondergrenzen stellen aan de fractie van diffuus licht voor ons groepsensemble over roodverschuivingen van $0,09 \leq z \leq 0,27$. Onze metingen zijn compatibel met bestaande metingen in individuele systemen op vergelijkbare roodverschuiving en met overeenkomende halo-massa's, echter met grotere precisie. Dit werk demonstreert de potentie van statistische analyse van diffuus licht in grote groepen en clusters van de volgende generatie observatieprogramma's zoals Euclid en LSST. Bovendien kan de ontwikkelde pipeline met minimale aanpassingen worden toegepast op de toekomstige gegevens van deze studies.

Recent onderzoek heeft uitgewezen dat een fractie van de zware sterrenstelsels in clusters van melkwegstelsels al gestopt is met de vorming van sterren op een roodverschuiving van $z = 1,5$. De aanleiding hiervoor is onbekend omdat de clusters nog niet volledig gevormd zijn en de bekende mechanismen voor het stoppen van ster-
vorming in clusters niet sterk genoeg kunnen zijn. Bovendien hebben deze zware sterrenstelsels sterren populaties van vergelijkbare leeftijd in zowel clusters als het veld, wat suggereert dat het dominante mechanisme voor zware sterrenstelsels vergelijkbaar is in beide omgevingen. In **Hoofdstuk 5** hebben we gegevens van de Hydrangea en EAGLE-simulaties gebruikt om te testen of deze vroege uitdoving van zware sterrenstelsels in $z \geq 1,5$ clusters het gevolg is van fundamentele verschillen in

hun halo-eigenschappen. We vonden dat de fracties van zulke zware sterrenstelsels in $1,5 < z < 3,5$ consequent hoger zijn voor sterrenstelsels met een hogere maximale rotatiesnelheid van de donkere materiehalo. De bevindingen suggereren dat seculiere processen alleen al verantwoordelijk kunnen zijn voor de waargenomen eigenschappen van zware sterrenstelsels in (proto)clusters op hoge roodverschuiving. Onze resultaten stellen een fundamentele aanname van populaire modellen ter discussie, namelijk dat clusters worden samengesteld uit een representatieve subgroep van invallende sterrenstelsels uit het veld. Als dit wordt bevestigd, zou dit impliceren dat dergelijke modellen noodzakelijkerwijs moeten falen bij een hoge roodverschuiving, zoals blijkt uit recente waarnemingen.