

Nederlandse samenvatting

In de laatste 15 jaar is het veld van de extra-galactische astronomie doorgedrongen tot het verre heelal op hoge roodverschuiving en is onze kennis van jonge, afgelegen sterrenstelsels dramatisch gegroeid. Sterrenstelsels worden momenteel routinematig gedetecteerd op $z \approx 6 - 7$ (e.g. Bouwens et al. 2010; Labbé et al. 2010; Oesch et al. 2010; Bouwens et al. 2011; McLure et al. 2011). Toch zijn er fundamentele vragen waarop het antwoord nog niet is gegeven: Hoe komen sterrenstelsels aan hun gas? Hoe beïnvloedt feedback de ontwikkeling van sterrenstelsels?

5.7 Intergalactisch Medium

Sterrenstelsels worden gevormd uit het intergalactisch medium en er was een tijd, voordat er stelsels waren, dat alle materie in het heelal zich in het intergalactisch medium bevond. Het meeste wat we weten van het intergalactisch medium komt van onderzoek naar absorptiespectra van heldere objecten zoals quasars. Het tussenliggende gas laat zijn sporen na op quasar spectra door de selectieve absorptie van continuümstraling. Het meest prominente patroon in zulke spectra is het Lyman- α woud van het meest talrijke element in het heelal, waterstof. Het woud bestaat uit een aantal absorptielijnen die worden veroorzaakt door wolken van neutraal waterstofgas langs de gezichtslijn naar de quasar. Deze gaswolken absorberen alle continuümstraling die roodverschoven is naar een golflengte van HI Ly α (1216 Å).

Het moderne begrip van het Ly α woud stamt uit de vroege jaren 90, toen H. Bi en zijn collegas zich realiseerden dat dichtheidsverschillen in het intergalactisch medium een realistische verklaring voor het woud boden. Dit werd later bevestigd door hydrodynamische kosmologische simulaties. Het idee is simpel gezegd dat intergalactisch gas de ruimtelijke verdeling van donkere materie volgt en een netwerk van vlakken en filamenten vormt. Middenin de halos van donkere materie ontstaan hieruit uiteindelijk sterrenstelsels. Deze structuur veroorzaakt het Ly α woud: de vlakken en filamenten zijn zwakke absorbeers van de achterliggende straling, de halo absorbeert juist sterk. Dit zorgt ervoor dat het Ly α woud een overzicht biedt van de verdeling van alle materie langs de gezichtslijn naar quasars: de verdeling van baryonen wordt namelijk bepaald door de verdeling van donkere materie en de baryonen bestaan voor het grootste gedeelte uit waterstof. De structuren die

$\text{Ly}\alpha$ absorberen, van het zeer zwak absorberende ijle gas tot de sterk absorberende schijven van sterrenstelsels, vertegenwoordigen verschillende stadia in de odyssee van de baryonen, van diffuus gas tot samengeperste materie. Het doorgronden van hun aard en de link met sterrenstelsels is een essentiële stap als we willen begrijpen hoe sterrenstelsels zich vormen en ontwikkelen. Naast het feit dat de intergalactische materie een gasreservoir is voor sterrenstelsels, bevat het ook informatie over feedback. Feedback omhelst alle processen waarbij de huidige stervorming en actieve kernen in een sterrenstelsel de evolutie van het stelsel beïnvloeden, bijvoorbeeld door het verwarmen of verwijderen van gas dat sterren vormt. Straling afkomstig uit sterrenstelsels verwarmt en ioniseert het intergalactisch medium. Supernova-explosies en actieve kernen veroorzaken winden die het intergalactisch medium schokachtig verwarmen en het verrijken met elementen die zwaarder zijn dan helium (metalen in de volksmond van astronomen). Deze intergalactische metalen laten ook hun sporen na op de spectra van achtergelegen objecten. Via de absorptiespectra kan de verdeling van dergelijke metalen achterhaald worden, wat weer meer informatie geeft over feedback in sterrenstelsels.

5.8 Het intergalactisch medium in de buurt van sterrenstelsels

De natuurkunde die het $\text{Ly}\alpha$ woud bepaalt is betrekkelijk eenvoudig, maar wordt snel ingewikkeld in het gebied waar het intergalactische medium en de sterrenstelsels samenkomen en de materie niet-lineair fluctueert. Observationeel gezien wordt dit grensgebied vaak bestudeerd door sterrenstelsels te zoeken die dicht langs de gezichtslijn naar de achtergelegen objecten liggen. Vervolgens wordt de absorptie in de spectra van de achtergelegen objecten die overeenkomt met de roodverschuiving van de sterrenstelsels onderzocht. Zulke waarnemingen, van de omgeving van sterrenstelsels, zijn zeer tijdrovend. Op hoge roodverschuiving zijn typische stervormende sterrenstelsels zeer zwak en het bepalen van hun roodverschuiving vergt veel tijd, zelfs met grote telescopen. Doordat ze zo zwak zijn, worden deze sterrenstelsels meestal als object in de voorgrond gebruikt en kiest men voor de achtergelegen objecten vaak voor de veel helderdere QSOs. Het aantal geschikte QSOs daalt met roodverschuiving en het aantal hechte QSO-sterrenstelsel paren is nog kleiner. Door stervormende sterrenstelsels als achtergrondobjecten te gebruiken kan een groter aantal hechte sterrenstelsel-paren gevonden worden, waardoor waardevolle studies naar de omgeving van de stelsels mogelijk wordt gemaakt. Het nadeel hiervan is dat de kwaliteit van de achtergrondspectra veel slechter is, zodat er opeenstapeling van data vereist is, wat beperkend is voor het soort onderzoek dat kan worden uitgevoerd. Pas wanneer de nieuwe generatie van 30m telescopen beschikbaar wordt zal de kwaliteit van dit soort spectra voldoende verbeteren.

Op lage roodverschuiving is het waarnemen van sterrenstelsels makkelijk

ker zijn en het aantal geschikte QSO-kandidaten hoger, maar hiervoor geldt weer dat de interessante overgangen zoals die van Ly α enkel toegankelijk zijn met behulp van ruimte-faciliteiten aangezien ze hun straling uitzenden in het ultraviolet (UV) liggen. Toch wordt hier flinke vooruitgang geboekt dankzij de komst van de UV-gevoelige Cosmic Origins Spectrograph (COS) op de Hubble ruimtetelescoop in 2009.

Het behoeft geen uitleg dat we dit soort studies, in het grensgebied tussen sterrenstelsel en intergalactisch medium, het liefst op verschillende roodverschuivingen verrichten. De omstandigheden in het heelal veranderen dramatisch van roodverschuiving $z \sim 2$ tot $z = 0$. Op hoge roodverschuiving is het heelal dichter, sterrenstelsels vormen sterren op een hoger tempo, actieve kernen komen veel vaker voor en galactische achtergrondstraling is intenser dan in het lokale heelal.

Ook theoretisch onderzoek naar het grensgebied tussen sterrenstelsels en het intergalactisch medium is lastig. Verscheidene processen die belangrijk zijn in dit gebied, zoals het (niet-evenwichtig) afkoelen van gas in nabijheid van metalen, ionisatie door botsingen, gravitationele verwarming door schokken, schokachtige verwarming door galactische winden, foto-ionisatie door lokale stralingsbronnen en zelf-afscherming, vereisen een numerieke benadering. Helaas zijn numerieke simulaties nog niet in het stadium dat ze alle relevante processen mee kunnen nemen. Dat komt doordat het vormen van een sterrenstelsel een groot dynamisch bereik vergt van een simulatie; van processen op atomair niveau tot het gedrag van clusters van sterrenstelsels. Deze voorschriften worden ondersteund door waarnemingen en de uitkomst van de simulaties moet zorgvuldig en kritisch worden bekeken ten opzichte van andere waarnemingen. Door een dergelijk proces werd het duidelijk dat feedback nodig is in sterrenstelsels om bijvoorbeeld te voorkomen dat er te veel sterren worden gevormd of ervoor te zorgen dat er schijven groeien tot een realistische grootte.

5.9 Dit proefschrift

Dit proefschrift presenteert onderzoek naar het intergalactisch medium in de buurt van sterrenstelsels op roodverschuiving $z \sim 2.4$ in de Keck Baryonic Structure Survey (KBSS, Steidel et al. in voorbereiding), zoals het door Ly α absorptie wordt getoond. Deze waarnemingen worden vergeleken met de hydrodynamische kosmologische simulaties van de Overwhelmingly Large Simulations (OWLS). Deze roodverschuiving is zeer geschikt voor studies naar zowel sterrenstelsels als het Ly α woud, aangezien ze beiden goed waargenomen kunnen worden met telescopen op aarde. De typische spectrale kenmerken, uitgezonden in het ultraviolet zijn op deze afstand verschoven naar het optische deel van het centrum wat efficiënte identificatie mogelijk maakt met behulp van de zogenaamde Lyman Break techniek. Bovendien zijn de lijnen van het Ly α woud op $z \gg 2.4$ grotendeels verzadigd en op $z \ll 2.4$ juist zeer

zeldzaam, wat deze roodverschuiving extra bijzonder maakt. Daarbij komt ook nog dat de algehele stervorming in het heelal een hoogtepunt meemaakte op $z \sim 2 - 3$, wat dat tijdperk bijzonder bruikbaar maakt voor dit soort studies, aangezien de interactie tussen sterrenstelsels en hun omgeving op dat moment maximaal zou moeten zijn.

Hoofdstuk 2 beschrijft een nieuwe methode om roodverschuivingen van sterrenstelsels te kalibreren door gebruik te maken van absorptie-eigenschappen van het omliggende intergalactische medium. De gebruikelijke manier om roodverschuivingen te bepalen van afgelegen sterrenstelsels is door middel van absorptie van de uitgezonden UV-straling en emissielijnen afkomstig van de interstellaire materie in sterrenstelsels. Vanwege een combinatie van effecten die te maken hebben met stralingsoverdracht en galactische stromen, wordt hiermee echter niet precies de roodverschuiving van het systeem bepaald. Een algemeen geaccepteerde manier om deze roodverschuivingen te kalibreren is met behulp van infrarode waarnemingen van emissielijnen afkomstig uit H II-gebieden in sterrenstelsels. Helaas zijn dat soort waarnemingen momenteel zeer kostbaar en niet uit te voeren voor grote verzamelingen van zwakke sterrenstelsels. Met behulp van de sterrenstelsels in het KBSS en de achterliggende, laten we zien dat het ook mogelijk is om de roodverschuivingen van de sterrenstelsels op een andere manier te kalibreren. Namelijk door gebruik te maken van het feit dat de gemiddelde H I Ly-alpha absorptieprofielen rondom de sterrenstelsels, zoals ze zich in de spectra van achtergelegen objecten manifesteren, symmetrisch moeten zijn ten opzichte van de echte roodverschuiving van de sterrenstelsels als je ervan uitgaat dat sterrenstelsels willekeurig verdeeld zijn rond de gezichtslijn naar de achtergelegen objecten.

In Hoofdstuk 3 presenteren we waarnemingen van de H I optische diepte in de buurt van sterrenstelsels op $z \sim 2.4$ in de KBSS data, door de quarspectra te analyseren met behulp van de pixel optische diepte methode. Hieruit bleek dat Ly α absorptie wordt versterkt tot een afstand van tenminste 2.8 Mpc van het sterrenstelsel. We presenteren de eerste tweedimensionale kaarten van absorptie rond sterrenstelsels, waarbij we de mediaan van de Ly α optische diepte tonen als een functie van afstand van de sterrenstelsels, zowel langs de gezichtslijn naar de achtergelegen bron als er loodrecht op. We vinden twee soorten vervormingen van de roodverschuivingen. Op afstanden < 1 Mpc (of < 200 km s $^{-1}$ in de spectra) is de absorptie sterker langs de gezichtslijn dan dwars erop. Dit effect, ook wel vinger van God genoemd, zou gedeeltelijk kunnen zijn veroorzaakt door onzekerheden in de bepaling van roodverschuivingen, maar wordt waarschijnlijk gedomineerd door de beweging van gas binnenin of dicht bij de halos. Aan de andere kant wordt, op afstanden tussen de 1.4-2.0 Mpc, de absorptie samengedrukt langs de gezichtslijn, een effect wat we associëren met inval op grote schaal (het Kaiser effect). We hebben de dichtheid van de sterrenstelsels binnen een bepaald volume gemeten als een functie van optische diepte van de pixel and tonen de covering fraction van absorberend materiaal met een bepaalde kracht tot

op 200 kpc van de sterrenstelsels.

In Hoofdstuk 4 laten we zien dat de verdeling van Ly α absorptie in de buurt van sterrenstelsels waargenomen in hoofdstuk 2 gebruikt kan worden om de massa te bepalen van de halos van die sterrenstelsels. We koppelen de waargenomen absorptieverdeling aan de absorptie rondom sterrenstelsels in de kosmologische simulaties van de OWLS set. De minimale halomassa die op deze manier bepaald wordt, is consistent met resultaten van analyses van het clustergedrag van sterrenstelsels en de resultaten zijn onafhankelijk van verandering in kosmologische parameters of de beschrijving van feedback in de modellen. We laten ook zien dat deze methode gebruikt kan worden in kleinere velden met sterrenstelsel-QSO waarnemingen, van 30×30 arcseconds.

Geïnspireerd door recente theoretische resultaten, die laten zien dat de meeste brandstof voor stervorming in sterrenstelsels daar terecht komt door zogenaamde koude accretie, dat wil zeggen zonder te worden verwarmd tot de viriële temperatuur van de gasthalo, onderzoeken we in hoofdstuk 5 hoeveel Ly α absorptie er in de buurt van sterrenstelsels op $z = 2.5$ er in dit soort koude stromen geproduceerd wordt. We gebruiken modellen van OWLS en bestuderen de absorptie in gas dat we selecteren op basis van zijn thermische geschiedenis, gasthalo, beweging ten opzichte van het sterrenstelsel en de kans dat het terecht zal komen in het interstellair medium op $z = 0$. We kijken ook naar de fysische eigenschappen van het Ly α absorberende gas zoals de temperatuur en dichtheid als een functie van afstand tot de sterrenstelsels in de OWLS modellen met en zonder feedback door supernova en actieve kernen.

