

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/21949> holds various files of this Leiden University dissertation.

**Author:** Rahmati, Alireza

**Title:** Simulating the cosmic distribution of neutral hydrogen and its connection with galaxies

**Issue Date:** 2013-10-15

# NEDERLANDSE SAMENVATTING

De theorie die de vorming van sterrenstelsels beschrijft, omvat natuurkunde waarin zowel de grootste als de kleinste schalen in het heelal een belangrijke rol spelen. Het enorme dynamische bereik van de verschillende fysische grootheden (zoals lengte, massa en leeftijd) die een sterrenstelsel karakteriseren, maakt het modelleren van deze complexe systemen tot een grote uitdaging. Niettemin zou de vorming en evolutie van sterrenstelsels in principe te begrijpen moeten zijn vanuit de bestaande fysische wetten. Het nauwkeurig beschrijven en verklaren van de waargenomen trends vanuit deze wetten is tot op heden één van de belangrijkste doelen van het onderzoeksgebied. Dankzij het werk van vele grote wetenschappers hebben we nu een tamelijk goed beeld van hoe sterrenstelsels vormen en zich ontwikkelen en kunnen we met een redelijke nauwkeurigheid verklaren wat we zien van deze systemen in het heelal. Toch zijn er nog tal van fenomenen die we niet doorgronden met de huidige theorie van sterrenstelsels, omdat, evenals in andere gebieden van de natuurwetenschap, iedere stap vooruit in ons begrip van de vorming en evolutie van sterrenstelsels onherroepelijk leidt tot nieuwe ononttrafelde problemen en uitdagingen.

## Neutraal waterstof in galactische ecosystemen

Sterrenstelsels worden beïnvloed door aan de ene kant de zwaartekracht, die verantwoordelijk is voor de vorming van halo's, het aantrekken van nieuw materiaal (voornamelijk gas) en het bijhouden van de 'baryonische' en donkere materie waauit een stelsel is opgebouwd, en aan de andere kant de verschillende 'feedback' mechanismen die juist tegen de zwaartekracht in werken en proberen de opgebouwde structuren te ontbinden. De interactie tussen deze strijdige mechanismen creëert complexe ecosystemen in en rondom sterrenstelsels en drukt een stempel op de verdeling van baryonen in de nabije omgeving van deze stelsels (het zogenaamde 'circumgalactische medium', CGM). De verdeling van baryonen, en de verdeling van neutraal waterstof (HI) in het bijzonder, verschaft ons waardevolle informatie over de ontstaansgeschiedenis van deze sterrenstelsels. De reden dat HI een belangrijke rol speelt in het onderzoek, is dat HI de voornaamste brandstof vormt voor de vorming van moleculaire gaswolken, de geboorteplaatsen van sterren. Derhalve is onderzoek naar de verdeling van HI en hoe deze verandert met de tijd cruciaal voor ons begrip van de verschillende aspecten van stervorming.

We weten dat vlak na de Big Bang het, in eerste instantie hete, plasma begint af te koelen naarmate het heelal uitdijt en dat protonen en elektronen uiteindelijk recombineren tot neutraal waterstof. Op  $z \sim 6$  raakt waterstof, het meest voorkomende element in het heelal, echter opnieuw in hoge mate geïoniseerd ('reïonisatie') door de vorming van de eerste generatie sterren en sterrenstelsels. De typische afstand die fotonen kunnen afleggen voordat ze worden geabsorbeerd, neemt vanaf dat moment aanzienlijk toe naarmate de tijd vordert, omdat aan de ene kant het heelal uitdijt en dus minder dicht wordt en aan de andere

kant de activiteit van stervorming in het heelal toeneemt. De vele bronnen van ioniserende straling, die op grote schaal relatief uniform verdeeld zijn, zorgen voor een min of meer uniforme achtergrond van ultraviolette straling (afgekort als 'UVB'), die op  $z \geq 3$  wordt gedomineerd door fotonen afkomstig van sterren en op lage roodverschuiving door het licht van quasars. Als gevolg van deze alom aanwezige bron van straling zijn de meeste waterstofatomen blijvend geïoniseerd vanaf het moment van reïonisatie op  $z \sim 6$ .

Hoe complex de verschillende processen zijn die de ionisatietoestand van waterstof bepalen, hangt sterk af van de kolomdichtheid van het waterstof. Bij lage dichtheden (d.w.z.  $N_{\text{HI}} \leq 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , wat overeenkomt met het zogenaamde 'Lyman- $\alpha$  forest') is HI in hoge mate geïoniseerd door de UVB-straling en overwegend transparant voor ioniserende straling van de UVB dan wel van andere bronnen. In dit geval kunnen we het systeem beschouwen als 'optisch dun' en kunnen we werken in de 'optisch dunne limiet'. Bij hogere dichtheden (d.w.z.  $N_{\text{HI}} \geq 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ , wat overeenkomt met de zogenaamde 'Lyman Limit' en 'Damped Lyman- $\alpha$ ' systemen) is het gas echter optisch dik en daarom overwegend neutraal. De ionisatietoestand van HI in dergelijke systemen is sterker afhankelijk van de mate waarin de verschillende aspecten, zoals de schaduwgevende werking van optisch dik materiaal en de fluctuaties van de UVB-straling op kleine schaal, een rol spelen bij het stralingstransport.

Het onderzoeken van de HI-verdeling in het heelal blijkt geen gemakkelijke opgave. In het lokale heelal kan de hoeveelheid HI in sterrenstelsels worden gemeten door gebruik te maken van 21 cm-emissie, maar op hogere roodverschuiving is dit vooralsnog niet mogelijk. Het wachten is op de komst van krachtigere telescopen, zoals het *Square Kilometer Array*. Op  $z \leq 6$ , dus na reïonisatie, is het mogelijk HI te bestuderen met behulp van 21 cm-absorptie. We kunnen de verdeling van het gas bepalen door spectra van heldere achtergrondbronnen zoals quasars te analyseren en te kijken naar de absorptiekenmerken van HI-systemen door zich tussen ons en de bron bevinden. Op hoge roodverschuiving is het bestuderen van deze absorptiekenmerken daarom een goed alternatief voor metingen in emissie. De enorme afstanden tussen de meeste absorberende objecten en hun achtergrondbronnen maken het onwaarschijnlijk dat ze op enig fysische manier gerelateerd zijn, iets wat de absorptielijnen in een spectrum zou kunnen beïnvloeden. Dit geeft ons de mogelijkheid om de verdeling van HI langs de gezichtslijn nauwkeurig te reconstrueren.

De laatste tientallen jaren hebben verscheidene observationele onderzoeken zich toegespitst op het bepalen van de statistische eigenschappen van de HI-verdeling in het heelal. Dankzij een significante toename van het aantal quasars dat is waargenomen en een verbetering van de observatietechnieken spannen deze waarnemingen nu een groot bereik in kolomdichtheid en roodverschuiving. Het is daarom belangrijk om de eigenschappen van de HI-verdeling ook in kosmologische simulaties te bestuderen, die ons een beter begrip van de waargenomen trends zullen geven en ons bovendien zullen helpen de verschillende observaties in de context van de huidige theorie van sterrenstelsels te plaatsen.

---

Hier zal ik mij op richten in dit Proefschrift. Als onze simulaties overeenkomen met de observaties, kunnen we deze gebruiken om te voorspellen hoe toekomstige waarnemingen eruit zullen zien. Deze voorspellingen kunnen dan gebruikt worden aan de ene kant om de juistheid van de onderliggende modellen in de simulaties te testen, en waar nodig verbeteringen aan te brengen, en aan de andere kant om te onderzoeken welke rol de verschillende fysische processen spelen in de vorming en evolutie van sterrenstelsels.

## Dit Proefschrift

Hedendaagse observationele onderzoeken gaan verder dan het bestuderen van de sterren in sterrenstelsels alleen, maar richten zich ook op de verschillende belangrijke, maar zeer complexe, processen die de verdeling van gas in en rondom stelsels beïnvloeden. Ook de hydrodynamische kosmologische simulaties die gebruikt worden om de vorming van sterrenstelsels te onderzoeken, verbeteren aanzienlijk door het gebruik van steeds betere numerieke technieken, sterker onderbouwde fysische modellen en hogere resoluties. Het is belangrijk, zo niet essentieel, om observaties en simulaties met elkaar te blijven vergelijken om aan de ene kant een beter begrip te krijgen van de observationele resultaten en aan de andere kant de simulaties te testen en te verbeteren.

De verdeling van HI en hoe deze verandert met de tijd is nauw verbonden met de verschillende aspecten van stervorming. Derhalve is het begrip en modelleren van de HI-verdeling van cruciaal belang bij het onderzoek naar de vorming en evolutie van sterrenstelsels. In dit Proefschrift zal ik mij voornamelijk richten op het bestuderen van de kosmische verdeling van neutraal waterstof met behulp van hydrodynamische kosmologische simulaties. We zullen dit doen door simulaties die gebaseerd zijn op de *OverWhelmingly Large Simulations*, te combineren met nauwkeurige beschrijvingen van stralingstransport, waarbij we rekening houden met de verschillende foto-ionisatieprocessen.

In **Hoofdstuk 2** beschrijven we de effecten van de metagalactische UVB-straling en diffuse recombinatiestraling op het stralingstransport en de ionisatie van waterstof op  $z = 5 - 0$ . We zullen ons richten op kolomdichtheden van  $N_{\text{HI}} > 10^{16} \text{ cm}^{-2}$ , omdat hierbij de effecten van stralingstransport vooral van belang zijn. Door ruim 12 miljard jaar van de evolutie van de HI-verdeling te modelleren tonen we aan dat de voorspelde verdeling van kolomdichtheden uitstekend overeenkomt met de waargenomen verdeling en slechts een matige verandering vertoont van  $z = 5$  tot  $z = 0$ . We vinden ook dat op  $z \geq 1$  de UVB de belangrijkste bron van ioniserende straling is, maar dat op lagere roodverschuiving botsingsionisatie een steeds grotere rol begint te spelen, wat gevolgen heeft voor de schaduwwerking van optisch dik materiaal. Op basis van onze simulaties presenteren we een aantal afgeleide verbanden die gebruikt kunnen worden om heel precies de fractie neutraal waterstof te kunnen berekenen zonder rekening te houden met stralingstransport. Gezien de complexiteit van de

stralingstransportsimulaties zullen deze verbanden bijzonder nuttig zijn voor de volgende generatie van kosmologische simulaties op hoge resolutie.

Stervorming vindt typisch plaats in omgevingen van zeer hoge kolomdichtheid, waar het gas optisch dik en daarom afgeschermd van externe ioniserende straling is. De lokale sterren vormen daarom een belangrijke bron van ioniserende straling bij deze dichtheden. Het simuleren van deze effecten is echter geen gemakkelijke opgave doordat het aantal stralingsbronnen over het gehele simulatievolume extreem groot is. Verschillende onderzoeken vinden tot op heden dan ook verschillende, vaak geenszins overtuigende, resultaten wat betreft de invloed van straling afkomstig van sterren op de HI-verdeling. In **Hoofdstuk 3** bieden we een oplossing voor dit probleem door kosmologische simulaties te combineren met stralingstransport door gebruik te maken van TRAPHIC, een code die ontwikkeld is om op een efficiënte manier om te gaan met grote aantallen stralingsbronnen. We simuleren de ioniserende straling van zowel sterren als van de UVB en recombinatieprocessen. We tonen aan dat de straling van lokale sterren significant van invloed kan zijn bij kolomdichtheden zoals die voorkomen in 'Damped Lyman- $\alpha$ ' (DLA) en 'Lyman Limit' (LL) systemen. We laten bovendien zien dat de voornaamste reden dat de resultaten van eerdere werken niet altijd overeenkwamen, het gebrek aan een voldoende hoge resolutie is. Dit probleem lossen wij echter op door stervormende 'deeltjes' in de simulatie als ionisatiebronnen te gebruiken. We tonen ook aan dat wanneer het interstellair medium (ISM) in kosmologische simulaties niet volledig is opgelost, dit het modelleren van de eigenschappen van sterke DLA's (d.w.z.  $N_{\text{HI}} \geq 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ) in de weg staat.

Objecten die zorgen voor sterke HI-absorptielijnen als DLA's zijn hoogst waarschijnlijk representatief voor het koude gas dat zich in, of in de buurt van, het ISM van sterrenstelsels op hoge roodverschuiving bevindt. Deze objecten maken het daarom mogelijk een verzameling sterrenstelsels te selecteren op basis van hun absorptiekenmerken en aan de hand hiervan het ISM te bestuderen, met name hoe dit eruit zag in de vroege stadia van de vorming en evolutie van sterrenstelsels. Omdat observationele onderzoeken doorgaans beperkt worden door het kleine aantal sterk absorberende bronnen en bovendien voor de lage-massa stelsels detecties missen in emissie, is het onderzoeken van de relatie tussen de absorberende objecten en de sterrenstelsels waarin zij zich bevinden, echter verre van gemakkelijk en is het noodzakelijk om gebruik te maken van kosmologische simulaties om de relatie tussen deze twee te doorgronden. In **Hoofdstuk 4** gebruiken we hydrodynamische kosmologische simulaties, waarvan we in Hoofdstuk 2 hebben laten zien dat zij goed overeenkomen met wat we zien in observaties van de HI-verdeling, om de connectie tussen sterke HI-systemen en sterrenstelsels op  $z = 3$  te bestuderen. We tonen aan dat de sterkst absorberende objecten overeenkomen met lage-massa sterrenstelsels die met de huidige waarneemtechnieken te zwak zijn om gedetecteerd te worden. We laten echter zien dat onze voorspellingen in goede overeenstemming zijn met de bestaande observaties. We wijzen op een sterke anticorrelatie tussen de kolom-

---

dichtheid van sterk absorberende HI-systemen en de loodrechte afstand tussen elk object en het dichtstbijzijnde sterrenstelsel. Bovendien onderzoeken we de correlatie tussen de kolomdichtheid en de verschillende eigenschappen van de sterrenstelsels waar de HI-systemen mee geassocieerd worden.

Net als neutraal waterstof, de voornaamste vorm van brandstof voor stervorming, heeft ook het stof dat aanwezig is in sterrenstelsels een sterke invloed op de stervormingsactiviteit. Het bestuderen van de verdeling en evolutie van stof is daarom ook van groot belang voor ons begrip van de ontwikkeling van sterrenstelsels. Door de lage resolutie van de waarnemingen, die doorgaans op lange golflengte worden gedaan, is de identificatie en het nemen van spectra van individuele infrarode sterrenstelsels in het verre heelal een lastige opgave. Relevante informatie over de evolutie en statistische eigenschappen van deze objecten wordt daarom gehaald uit de oppervlakedichtheid van de bronnen als functie van hun helderheid (m.a.w. het aantal bronnen per oppervlakte met een bepaalde helderheid). In **Hoofdstuk 5** presenteren we een model voor de evolutie van stoffige sterrenstelsels dat gebaseerd is op de waargenomen brondichtheid en roodverschuivingverdeling bij  $850\mu\text{m}$ . We gebruiken een simpel formalisme voor de evolutie van de kleur- en helderheidsverdeling van infrarode stelsels. Met behulp van een nieuw algoritme om de brondichtheden te berekenen onderzoeken we de mate waarin de verschillende vrije parameters van ons model worden beperkt door de beschikbare observationele data. We laten zien dat het model uitstekend in staat is de waargenomen brondichtheid en roodverschuivingverdeling op golflengten van  $70\mu\text{m} \lesssim \lambda \lesssim 1100\mu\text{m}$  te reproduceren en dat het in goede overeenstemming is met de meest recente resultaten van *Herschel* en *SCUBA 2*.

