



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

Les Lumières: probing the cosmic Epoch of Reionization with high-redshift quasars

Kist, T.

Citation

Kist, T. (2026, July 3). *Les Lumières: probing the cosmic Epoch of Reionization with high-redshift quasars*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4307539>

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/1887/4307539>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

Als ik de inhoud van dit proefschrift zou moeten samenvatten in twee woorden, zou het de titel van dit werk zijn: *Les Lumières*. Licht is onmisbaar voor ons als sterrenkundigen omdat we noodzakelijk alle informatie over de natuur van het Universum moeten afleiden van het licht⁴ dat we weten te detecteren met onze telescopen op aarde of in het heelal. Bijzonder geschikt voor deze doelen is een bepaald type van astrofysische bronnen die we quasars noemen. Deze astrofysische objecten schijnen zo uitzonderlijk helder dat ze onder de namen *quasi-stellar objects* of *quasars* bekend werden, hoewel hun afstanden allermindst vergelijkbaar zijn met die van sterren in ons eigen sterrenstelsel. Integendeel, aangedreven door supermassieve zwarte gaten in de centra van verre sterrenstelsels zijn quasars zo uitzonderlijk krachtig en helder dat we ze ook nog vanaf *kosmologische* afstanden kunnen detecteren, tot roodverschuivingen van $z \sim 7.5$. Gezien de tijd die het licht nodig had om de aarde te bereiken, betekent naar deze verre lichtbronnen te kijken niets minder dan naar de eerste miljard jaar van het universum te gluren.

Een bepalend tijdperk heeft de ontwikkeling van het universum tijdens deze vroege tijden gevormd: het *tijdperk van reïonisatie*. Ingeleid door de eerste sterren en sterrenstelsels die in deze jaren werden gevormd, markeerde dit tijdperk het eind van de kosmische *dark ages* of *middeleeuwen* waarin het universum verstoken was van elke vorm van zichtbaar licht. Toen echter deze eerste astrofysische bronnen begonnen te vormen, werd het universum letterlijk door hen verlicht: *Les Lumières* – een kosmisch tijdperk van *Verlichting*. Dit licht had zelfs invloed op de enorme leegtes tussen sterrenstelsels waar zich het meest van de kosmische materie daadwerkelijk bevindt. Blootgesteld aan deze nieuwe lichtbronnen, werd de neutrale waterstof geleidelijk gereïoniseerd door hun straling. Dit leidde tot de vorming van bellen van geïoniseerd waterstof rondom deze ioniserende bronnen die groeiden en zich verbonden tot het hele intergalactische medium gereïoniseerd was.

De vooruitgang van dit proces wordt gekenmerkt door de fractie van neutrale (in tegenstelling tot geïoniseerde) waterstofatomen in het intergalactische medium. Een nauwkeurige meting van de ontwikkeling van deze fractie als functie van kosmische tijd is een uitermate moeilijke taak – en ook het onderwerp van dit proefschrift. Het in kaart brengen van deze ontwikkeling brengt ons terug tot quasars, onze astrofysische bronnen die bijzonder geschikt zijn voor deze doelen. Dat komt doordat significante hoeveelheden van neutraal waterstof in de voorgrond van een quasar een karakteristieke absorptiesignatuur in zijn spectrum achterlaten, de zogenaamde Lyman- α *damping wing*. Het feit de sterkte ervan uitermate afhankelijk is

⁴evenals deeltjes zoals kosmische straling en neutrinos – en sinds kort ook zwaartekrachtgolven

van de exacte hoeveelheid neutraal waterstof maakt het een voortreffelijk meetinstrument voor het tijdperk van reïonisatie.

Tegelijkertijd is een quasar zelf een uitzonderlijk krachtige bron van ioniserende straling die een geïoniseerde bel rondom de quasar beïtelt, die groeit naarmate de quasar langer schijnt. De reductie van neutraal materiaal door de ioniserende straling van de quasar zelf verzwakt de intergalactische damping wing signatuur maar laat ook een tweede karakteristieke signatuur achter in zijn spectrum, de zogenaamde *proximity zone* waarvan de grootte overeenkomt met de omvang van de geïoniseerde bel rond de quasar. Dit informeert ons dan over zijn leeftijd, een essentiële grootheid om de groei en de ontwikkeling van supermassieve zwarte gaten te begrijpen die deze quasars aandrijven.

Deze ontarding tussen de bijdrage van het globale, kosmologische proces van reïonisatie en de bijdrage van de quasar als een astrofysische lichtbron te breken is een van de fundamentele taken in verbinding met dit probleem en vereist zowel adequate simulaties als een doordacht gevolgtrekkingskader om deze simulaties te vergelijken met waargenomen data. Dit proefschrift behandelt een framework dat recentelijk voor deze doelen ontwikkeld werd en is bedoeld om de capaciteiten van dit framework uit te breiden om nog meer informatie van deze intergalactische damping wing signatuur af te leiden.

Hoofdstuk 2 biedt een inventaris van de actuele stand van quasar damping wing analyse en kwantificeert de precisie waarmee dit soort metingen gedaan kunnen worden als rekening gehouden wordt met alle relevante bronnen van onzekerheid. We demonstreren dat (behalve de onzekere leeftijd van de quasar) twee bijdragen vergelijkbaar belangrijk zijn, beide met een significante impact op het totale onzekerheidsbudget. Ten eerste is de damping wing signatuur niet individueel te zien maar afgedrukt op het intrinsieke spectrum van de quasar. Dit intrinsieke spectrum reconstrueren en het ontwarren van de intergalactische signatuur van absorptie beïnvloedt de uiteindelijke precisie van de metingen. Ten tweede verliep het proces van reïonisatie niet overal gelijkmatig maar volgde een “Zwitserse kaas” topologie waar individuele geïoniseerde bellen groeiden en versmolten tot het universum helemaal gereïoniseerd was. De daadwerkelijke verdeling van neutraal waterstof langs een bepaalde zichtlijn kan dus aanzienlijk variëren, ook bij een vaste *gemiddelde* fractie van neutraal waterstof. Variaties tussen zichtlijnen dragen dus verder bij aan het totale onzekerheidsbudget.

De laatste bron van onzekerheid is ook de motivatie voor **Hoofdstuk 3**, een theoretische studie waar we twee nieuwe parameters introduceren die robuust zijn tegen kosmische variantie in het intergalactische medium. In plaats van als globaal gemiddelde zijn deze parameters lokaal gedefinieerd en geven de hoeveelheid neutraal waterstof aan langs de zichtlijn van een bepaalde bron. Dus maken ze het mogelijk de damping wing signatuur niet alleen maar te gebruiken om het globale verloop maar ook de lokale topologie

van reïonisatie te reconstrueren. Ook demonstreren we dat deze parameters geen aannamen over het onderliggende model van reïonisatie vereisen en dus op modelonafhankelijke wijze gemeten kunnen worden.

In **Hoofdstuk 4** gaan we door met het integreren van onze nieuwe parameterisering van quasar damping wings in onze bestaande gevolgtrekkingskader. We presenteren ook een framework dat het mogelijk maakt deze model-onafhankelijke lokale metingen aan een bepaald model van reïonisatie te koppelen. Dit komt neer op het opleggen van een niet-triviale prior op onze lokale parameters en levert ook een modelafhankelijke meting op van de globale fractie van neutraal waterstof met zich mee. Door het testen van ons framework op een groot aantal nepspectra meten we ook de precisie waarmee we in staat zijn deze nieuwe parameters te meten.

Het proefschrift eindigt met **Hoofdstuk 5** dat de eerste praktische toepassing van onze nieuwe parameterisering presenteert. Door het analyseren van JWST/NIRSpec spectra van twee van de meest verre quasars die op dit moment bekend zijn, J1007+2115 met $z = 7.51$ en J1342+0928 met $z = 7.54$, presenteren we voor het eerst metingen van de lokale topologie van reïonisatie voor deze twee objecten. Terwijl de eerste zichtlijn grotendeels geïoniseerd blijkt, vertoont de tweede duidelijk bewijs van een damping wing signatuur en dus een niet-triviale hoeveelheid van neutraal waterstof langs die zichtlijn. Door deze analyse doen we ook een eerste stap in richting van de toepassing van ons framework voor een statistisch steekproef van verre quasars dat beschikbaar zal worden in de komende jaren en helder nieuw licht zal schijnen op ons beeld van het tijdperk van reïonisatie.

