



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Chronicles of cosmic dawn: high redshift quasars as probes of supermassive black holes and the intergalactic medium

Onorato, S.

Citation

Onorato, S. (2025, November 13). *Chronicles of cosmic dawn: high redshift quasars as probes of supermassive black holes and the intergalactic medium*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4283072>

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/1887/4283072>

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

NEDERLANDSE SAMENVATTING

Veel mensen voelen zich vaak overweldigd wanneer zij nadenken over het heelal en de vanzelfsprekende vragen die daarbij opkomen. Wie kan het hen kwalijk nemen? Astrofysica en kosmologie zijn immers even fascinerend als ingewikkeld, wild en zelfs “beangstigend”. Als wetenschappers is het minste wat wij kunnen doen deze concepten toegankelijker te maken, om zo de angst voor het onbekende te helpen wegnemen. We kunnen dit verhaal beginnen met te zeggen dat het onderzoek naar ons heelal buitengewoon breed is; zo breed dat er waarschijnlijk evenveel aspecten te bestuderen zijn als er sterren bestaan. De hoofdgebieden die we kunnen onderscheiden, gaande van *onze* omgeving tot de verste uithoeken van het heelal, omvatten: aardefysica en fysica in de omgeving van de aarde, zonnestelsel en exoplaneten, sterren en hun evolutie, interstellair en intergalactisch materie, sterrenstelsels en hun evolutie, kosmologie en grootschalige structuur, en het vroege heelal en fundamentele fysica. Al deze onderwerpen spelen een unieke rol in het opbouwen, stukje bij beetje, van de grote puzzel van onze kennis, en we richten ons op elk daarvan afhankelijk van de vraag die we proberen te beantwoorden.

De afgelopen vier jaar heb ik mij beziggehouden met het vroege heelal, in het bijzonder met de *Epoch of Reionization* (EoR), toen de eerste lichtbronnen ioniserende straling begonnen uit te zenden en het gas dat het heelal doordrong overging van een neutrale naar een geïoniseerde toestand. Het is bekend dat superzware zwarte gaten (SMBH's) met een miljard zonnemassa's reeds aanwezig waren in deze kosmische periode, minder dan een miljard jaar na de Oerknal. Deze objecten worden waargenomen als *quasars* bij roodverschuivingen $z \gtrsim 6$, accretiesystemen die als heldere bakens schijnen door de nevel van het vroege intergalactisch medium (IGM). Hun bestaan roept een reeks open vragen op: hoe zulke massieve zwarte gaten zo snel konden groeien, hoe lang zij actief blijven als heldere quasars, en wat hun licht kan onthullen over het tijdstip en de aard van de reïonisatie van het IGM.

Quasars zijn dus niet alleen buitengewone laboratoria voor het onderzoek van zwarte-gatenfysica, maar ook unieke tracers van het IGM. De ultraviolette straling die zij uitzenden, holt geïoniseerde regio's uit in het omringende gas en produceert duidelijke waarnemingskenmerken in hun spectra. Onder deze kenmerken bevinden zich de zogenaamde *(i) proximity zones*, gebieden met verhoogde ionisatie direct blauwwaarts van de Ly α -emissielijn van de quasar, en de uitgebreide absorptiekenmerken die bekend staan als *(ii) damping wings*, die roodwaarts van de Ly α -lijn kunnen verschijnen indien het IGM een aanzienlijke fractie neutraal waterstof behoudt. Zorgvuldige interpretatie van deze kenmerken maakt het mogelijk randvoorwaarden

op te leggen aan zowel de eigenschappen van quasars, zoals hun levensduur en ioniserende luminositeit, als aan de globale ionisatietoestand van het vroege heelal.

Het centrale doel van dit proefschrift is fysische inzichten te verkrijgen uit hoogwaardige spectra van quasars bij $z \gtrsim 5.7$ door middel van diverse analysetechnieken van hun Ly α -transmissie en spectrale eigenschappen in het algemeen. Daartoe hebben wij eerst gegevens verzameld, gereduceerd en gepubliceerd van een groot aantal bronnen; vervolgens hebben wij deze catalogus gebruikt en uitgebreid op basis van de wetenschappelijke doelen die we wilden bereiken.

Hoofdstuk 1 biedt de astrofysische achtergrond die nodig is om de inhoud van dit werk te begrijpen. In het bijzonder bespreken we wat de EoR en actieve galactische kernen (AGN) zijn, met de nadruk op de eigenschappen en uitdagingen van quasars op hoge roodverschuiving, en eindigen we met het probleem van de snelle groei van SMBH's. We introduceren de belangrijkste observatiemethoden voor de studie van zowel het IGM als quasars, en beschrijven de open vragen die dit werk motiveren.

Hoofdstuk 2 presenteert onze spectroscopische dataset van 45 quasars bij $6.50 < z < 7.65$, met lichtkrachten in het bereik $-28.82 \leq M_{1450} \leq -24.13$. De spectra zijn verzameld met zowel echelle- als longslit-instrumenten en op uniforme wijze verwerkt met de open-sourcepipeline `PypeIt`. Naast een gedetailleerde beschrijving van de objectselectie, reductie en datakwaliteit (bijvoorbeeld mediane signaal-ruisverhouding in de J -, H - en K -banden), introduceert dit hoofdstuk samengestelde rest-frame UV-spectra op basis van deze dataset en vergelijkt de belangrijkste daarvan met andere hoge- en lage- z -templates.

De resulterende catalogus en samengestelde spectra zijn publiek beschikbaar gesteld en vormen een referentiekader voor de continua en emissielijnen van quasars op hoge roodverschuiving, essentieel voor toepassingen zoals proximity zone-onderzoek. Bovendien laat de vergelijking met andere templates zien dat de algehele vorm van de spectra en emissielijnsterkten consistent blijven door de kosmische tijd, wat wijst op een beperkte evolutie van de globale UV-eigenschappen van quasars.

Hoofdstuk 3 presenteert uniforme metingen van proximity-zonegroottes (R_p) voor 59 quasars in het bereik $5.76 < z < 7.55$ (waarvan 35 uit de dataset van Hoofdstuk 2, en de rest uit twee andere openbare catalogi), inclusief 15 objecten die voor het eerst zijn geanalyseerd. Door de dataset uit te breiden tot bijna 100 quasars met literatuurmetingen, onderzoeken we hoe R_p varieert met zowel luminositeit als roodverschuiving. De afhankelijkheid van luminositeit volgt de verwachtingen van eenvoudige argumenten gebaseerd op foto-ionisatie, terwijl de afgeleide roodverschuivingstrend steiler is dan eerder in de literatuur werd gevonden ($R_p \propto 10^{-0.4M_{1450}/2.87} \cdot (1+z)^{-2.44}$).

Een opvallend resultaat is de aanzienlijke spreiding in R_p bij vaste z en M_{1450} . Wij schrijven dit toe aan de wisselwerking tussen variaties in de

quasarlevensduur, fluctuaties in de dichtheid langs de zichtlijn en omgevingen waarin quasars zich bevinden, evenals verschillen in de fractie neutraal waterstof en het voorkomen van optisch dikke absorbers. We vinden dat 13 quasars opvallen met ongewoon kleine R_p -waarden. In alle gevallen behalve één is de aanwezigheid van nabije absorbers onwaarschijnlijk, wat suggereert dat extreem jonge bronnen ($t_Q \lesssim 10^4$ jaar) een natuurlijke verklaring kunnen vormen voor zulke kleine proximity zones.

Hoofdstuk 4 introduceert een forward-modellingkader om waargenomen $\text{Ly}\alpha$ -transmissie waarschijnlijkheidsverdelingen (*probability distribution function*; PDF's) te vergelijken met voorspellingen van gesimuleerde spectra die rekening houden met onzekerheden in het quasarcontinuüm en instrumentele ruis. Deze aanpak wordt toegepast op 21 quasars uit de E-XQR-30 dataset bij $5.76 < z < 6.59$, waarbij PDF's worden berekend in twee rest-frame intervallen: het $\text{Ly}\alpha$ -forest ($1170 - 1190 \text{ \AA}$) en de proximity zone ($1190 - 1218 \text{ \AA}$). Vanuit IGM-absorptiemodellen genereren we duizenden mockrealisaties voor elk object en vergelijken deze met de data aan de hand van statistische toetsen.

De analyse toont aan dat de transmissie-PDF's binnen proximity zones doorgaans goed worden gereproduceerd door de modellen, wat erop wijst dat huidige toepassingen van stralingsoverdracht en continuümfitting de fysica in quasar-gedomineerde regio's goed vatten. Daarentegen laten verschillende roodverschuivingsintervallen in het $\text{Ly}\alpha$ -forest duidelijke discrepanties zien met de veronderstellingen van een homogeen IGM. Deze verschillen wijzen op ontbrekende fysische ingrediënten, zoals patchy reionization, resterende verhitting, of fluctuaties in de ultraviolette achtergrond, die niet door eenvoudige modellen worden meegenomen. De resultaten benadrukken de diagnostische kracht van transmissie-PDF's en de noodzaak voor meer geavanceerde simulaties om het IGM nabij het einde van de reionisatie te interpreteren.

Alles bij elkaar genomen bieden de in dit proefschrift gepresenteerde werken nieuwe inzichten in de wisselwerking tussen quasars en het IGM tijdens de EoR. Door een hoogwaardige spectroscopische dataset en samengestelde spectra op te bouwen, systematisch quasar proximity zones te meten en forward-modellingtechnieken toe te passen op statistiek van de $\text{Ly}\alpha$ -transmissie, hebben we zowel de beschikbare observationele randvoorwaarden uitgebreid als de tekortkomingen van vereenvoudigde IGM-modellen blootgelegd. Deze resultaten benadrukken de rol van quasars als unieke tracers van de kosmische geschiedenis, en onderstrepen tegelijk de noodzaak van steeds realistischer simulaties om de complexiteit van het vroege heelal te vatten. Op deze manier levert het proefschrift een kleine maar betekenisvolle bijdrage aan het grotere raadsel van hoe de eerste lichtgevende structuren ons heelal hebben getransformeerd.