



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).

RIASSUNTO IN ITALIANO

Molte persone si sentono spesso sopraffatte quando pensano all'Universo e alle ovvie domande che lo accompagnano. Come possiamo biasimarle? L'astrofisica e la cosmologia sono sicuramente tanto affascinanti quanto complesse, selvagge e perfino "spaventose". Come scienziati, il minimo che possiamo fare è rendere questi concetti più accessibili a tutti, per contribuire a combattere la paura dell'ignoto. Possiamo iniziare questo racconto dicendo che lo studio del nostro Universo è estremamente ampio; così ampio che probabilmente esistono tanti aspetti da studiare quante sono le stelle che popolano il cielo. Le macro-aree che possiamo individuare, andando dai nostri dintorni fino ai confini dell'Universo, comprendono: astrofisica terrestre e delle vicinanze terrestri, Sistema Solare ed esopianeti, stelle e loro evoluzione, mezzo interstellare e intergalattico, galassie e loro evoluzione, cosmologia e struttura su larga scala, e Universo primordiale e fisica fondamentale. Tutti questi ambiti giocano un ruolo unico nel costruire, pezzo dopo pezzo, il grande puzzle della nostra conoscenza, e li affrontiamo a seconda della domanda a cui cerchiamo di rispondere.

Negli ultimi quattro anni mi sono interrogata sull'Universo primordiale, in particolare sull'*Epoca della Reionizzazione* (EoR), quando le prime sorgenti luminose iniziarono a emettere radiazione ionizzante e, di conseguenza, il gas che permeava l'Universo passò da uno stato neutro a uno ionizzato. È un fatto ben noto che buchi neri supermassicci (SMBHs) di un miliardo di masse solari erano già presenti in questa era cosmica, meno di un miliardo di anni dopo il Big Bang. Questi oggetti sono osservati come *quasar* a redshift $z \gtrsim 6$, sistemi in accrescimento che brillano come fari luminosi attraverso la nebbia del mezzo intergalattico (IGM) primordiale. La loro esistenza pone una serie di interrogativi aperti: come possano crescere così rapidamente buchi neri tanto massicci, quanto a lungo rimangano attivi come quasar luminosi, e cosa la loro luce possa rivelare sulle tempistiche e sulla natura della reionizzazione dell'IGM.

I quasar sono quindi non solo straordinari laboratori per lo studio della fisica dei buchi neri, ma anche sonde uniche dell'IGM. La radiazione ultravioletta che emettono scava regioni ionizzate nel gas circostante, producendo segnali osservativi ben riconoscibili nei loro spettri. Tra queste vi sono le cosiddette (i) *zone di prossimità*, regioni di ionizzazione aumentata immediatamente più nel blu della riga di emissione $\text{Ly}\alpha$ del quasar, e delle estese ali di assorbimento note come (ii) *ali di smorzamento*, che possono comparire più nel rosso rispetto alla riga $\text{Ly}\alpha$ se l'IGM conserva una frazione significativa di idrogeno neutro. Un'accurata interpretazione di queste osservabili ci permette di porre vincoli sia sulle proprietà dei quasar, come la loro vita media e la luminosità ionizzante, sia sullo stato di ionizzazione globale dell'Universo primordiale.

L'obiettivo centrale di questa tesi è estrarre informazioni fisiche da spet-

tri di alta qualità di quasar a $z \gtrsim 5.7$, attraverso diversi tipi di analisi della trasmissione Ly α e delle caratteristiche spettrali in generale. A tal fine, abbiamo dapprima raccolto, ridotto e pubblicato dati da un ampio campione di sorgenti; successivamente abbiamo utilizzato ed esteso questo catalogo in base agli obiettivi scientifici da raggiungere.

Capitolo 1 fornisce il background astrofisico necessario a comprendere il contenuto di questo lavoro. In particolare, vengono fornite alcune linee guida su cosa siano l'EoR e i nuclei galattici attivi (AGN), con un focus sulle caratteristiche e le sfide dei quasar ad alto redshift, concludendo con il problema della rapida crescita dei SMBHs. Vengono introdotti i principali strumenti osservativi usati per studiare sia l'IGM che i quasar, e descritte le domande aperte che motivano questo lavoro.

Capitolo 2 presenta il nostro dataset spettroscopico di 45 quasar nell'intervallo $6.50 < z < 7.65$, con luminosità comprese tra $-28.82 \leq M_{1450} \leq -24.13$. Gli spettri sono stati raccolti con strumenti echelle e long-slit, e processati in modo uniforme tramite la pipeline open-source `PypeIt`. Oltre a una descrizione dettagliata della selezione del campione, della riduzione e della qualità dei dati (ossia il rapporto segnale-rumore mediano nelle bande J , H e K), il capitolo introduce spettri compositi nell'ultravioletto nel sistema di riferimento a riposo costruiti a partire da questo dataset, e confronta quello principale con altri template a basso e alto redshift.

Il catalogo risultante e gli spettri compositi sono resi pubblicamente disponibili e forniscono un quadro di riferimento per il continuo e le proprietà delle righe di emissione dei quasar ad alto redshift, cruciali per applicazioni quali gli studi delle zone di prossimità. Inoltre, il confronto con altri template rivela che le forme spettrali globali e le intensità delle righe di emissione rimangono coerenti su tempi-scala cosmici, suggerendo una limitata evoluzione nelle proprietà ultraviolette dei quasar.

Capitolo 3 presenta misure ricavate in modo uniforme delle dimensioni delle zone di prossimità (R_p) per 59 quasar nell'intervallo $5.76 < z < 7.55$ (di cui 35 provenienti dal campione descritto nel Capitolo 2 e i restanti da altri due cataloghi pubblici), inclusi 15 oggetti analizzati per la prima volta. Estendendo il campione a quasi 100 quasar mediante misure dalla letteratura, esploriamo come R_p vari in funzione sia della luminosità che del redshift. La dipendenza dalla luminosità segue le aspettative di semplici argomenti di foto-ionizzazione, mentre l'andamento con il redshift risulta più ripido di quanto precedentemente riportato in letteratura ($R_p \propto 10^{-0.4M_{1450}/2.87} \cdot (1+z)^{-2.44}$).

Un risultato rilevante è l'ampia dispersione in R_p a redshift e luminosità fissati. Attribuiamo questo alla combinazione di variazioni nella vita dei quasar, fluttuazioni di densità lungo la linea di vista e caratteristiche ambientali, nonché a differenze nella frazione di idrogeno neutro e alla presenza di assorbitori otticamente spessi. Troviamo che 13 quasar si distinguono per valori di R_p insolitamente piccoli. In tutti i casi tranne uno, la presen-

za di assorbitori prossimi al quasar è improbabile, suggerendo che sorgenti estremamente giovani ($t_Q \lesssim 10^4$ anni) possano costituire una spiegazione naturale per zone di prossimità tanto ridotte.

Capitolo 4 introduce un framework di forward-modelling per confrontare le funzioni di distribuzione di probabilità (PDF) della trasmissione $\text{Ly}\alpha$ osservata con le previsioni di spettri simulati che tengono conto delle incertezze nel continuo dei quasar e del rumore strumentale. Questo approccio è applicato a 21 quasar del campione E-XQR-30 con $5.76 < z < 6.59$, calcolando le PDF in due intervalli di lunghezza d'onda nel sistema di riferimento a riposo: la foresta $\text{Ly}\alpha$ (1170–1190 Å) e la zona di prossimità (1190–1218 Å). Dai modelli di assorbimento IGM generiamo migliaia di spettri simulati per ciascun oggetto e li confrontiamo con i dati tramite test statistici.

L'analisi mostra che le PDF della trasmissione all'interno delle zone di prossimità sono in generale ben riprodotte dai modelli, indicando che gli attuali trattamenti del trasferimento radiativo e del fitting del continuo catturano in maniera adeguata la fisica nelle regioni dominate dai quasar. Al contrario, diversi intervalli di redshift nella foresta $\text{Ly}\alpha$ mostrano discrepanze significative con le assunzioni di un IGM omogeneo. Queste differenze indicano la presenza di ingredienti fisici aggiuntivi, come una reionizzazione irregolare, riscaldamento residuo o fluttuazioni del fondo ultravioletto, non catturati dai modelli semplici. I risultati mettono in risalto il potere diagnostico delle PDF della trasmissione e la necessità di simulazioni più sofisticate per interpretare l'IGM nelle fasi finali della reionizzazione.

Nel complesso, i lavori presentati in questa tesi offrono nuove prospettive sull'interazione tra quasar e IGM durante l'EoR. Costruendo un dataset spettroscopico di alta qualità e uno spettro composito, misurando sistematicamente le zone di prossimità dei quasar e applicando tecniche di forward-modelling alle statistiche di trasmissione $\text{Ly}\alpha$, abbiamo sia ampliato i vincoli osservativi disponibili che evidenziato i limiti dei modelli di IGM semplificati. Questi risultati sottolineano il ruolo dei quasar come sonde uniche della storia cosmica, e al tempo stesso la necessità di simulazioni sempre più realistiche per cogliere la complessità dell'Universo primordiale. In tal modo, questa tesi contribuisce in maniera piccola ma significativa al grande enigma di come le prime strutture luminose abbiano trasformato il nostro cosmo.