

Mase supermasivnih crnih rupa u kvazarima

Matijević, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:109337>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Luka Matijević

MASE SUPERMASIVNIH CRNIH RUPA U
KVAZARIMA

Diplomski rad

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
FIZIKA; SMJER ISTRAŽIVAČKI

Luka Matijević

Diplomski rad

**Mase supermasivnih crnih rupa u
kvazarima**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Vernesa Smolčić

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2023.

Na konstruktivnim kritikama, smjernicama i motivaciji za ostatak u znanosti zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Vernesi Smolčić bez čije podrške i savjeta ovaj rad nikad ne bi ugledao svjetlo dana. Također bih htio zahvaliti i ostatku tima astrofizičara na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu na svim komentarima upućenima kroz tjedne sastanke. Veliko hvala i svim prijateljima na podršci i lijepim trenucima kroz dane studiranja. Naposljetku, najveća hvala obitelji na strpljenju i razumijevanju.

Sažetak

Vjeruje se da se supermasivne crne rupe nalaze u središtima većine galaksija te da su njihove mase povezane sa svojstvima galaksije u kojoj se nalaze. Određivanje mase supermasivnih crnih rupa je stoga važno za razumijevanje koevolucije galaksija i njihovih središnjih supermasivnih crnih rupa. Jedna od najpouzdanijih metoda procjene mase supermasivnih crnih rupa je metoda kartiranja jeke. Ta metoda je vremenski zahtjevna i njen uspjeh ovisi o mnoštvu faktora. Rezultati te metode pokazuju da postoji empirijska korelacija između 1) veličine područja širokih linija, a to je područje ioniziranog plina koji okružuje supermasivnu crnu rupu i 2) monokromatskog luminoziteta kontinuuma. U ovom radu te korelacije će se koristiti kako bi se izračunale virijalne mase supermasivnih crnih rupa koristeći dva različita pristupa.

U prvom pristupu analizirali su se spektri kvazara iz *Data Release 3* baze pregleda neba *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Ti kvazari nalaze se na crvenim pomacima $0.7 < z < 2$ te je stoga u analizi korištena emisijska linija Mg II, kao i monokromatski luminozitet na 3000 \AA . Monokromatski luminoziteti su izračunati koristeći monokromatske tokove zračenja interpolacijom njihovih vrijednosti kroz 3 najbliže vrijednosti oko zadane valne duljine što se pokazalo pouzdanijim od vrijednosti dobivenih koristeći prilagodbu zakona potencije. Prije računa svih parametara, na spektar se primijenio Savitzky-Golay filter kako bi se uklonio šum. Rezultati dobiveni ovim pristupom pokazali su konzistentnost s masama supermasivnih crnih rupa prethodno određenim sličnim metodama iz literature.

Drugi pristup koristi najnoviju SDSS-ovu bazu spektara kvazara *Data Release 16 Quasar Catalog* koja pokriva crvene pomake $0.1 \lesssim z \lesssim 6$. Veći interval crvenih pomaka znači da emisijska linija Mg II nije prisutna u svim spektrima. Zbog toga se uz nju koriste i emisijske linije $H\beta$ te C IV. Za račun spektralnih karakteristika koristi se PyQSOFit algoritam. PyQSOFit je moćan alat za prilagodbu kontinuiranog zračenja i emisijskih linija na spektre kvazara te se može koristiti za računanje širine linija, monokromatskih luminoziteta, itd. Od izabranog uzorka $\sim 85 \%$ masa se slaže do na ~ 0.1 dex s masama prethodno određenima sličnim metodama. Rezultati su potom uspoređeni s masama dobivenima u prvom pristupu te se pokazalo da je medijan distribucije omjera masa pomaknut od jedinice za $\approx 40 \%$. Unatoč tomu, mase dobivene PyQSOFit algoritmom se smatraju pouzdanima jer ovaj pristup uzima u obzir

više parametara od prethodnog.

Naposljetku, PyQSOFit algoritam za račun masa supermasivnih crnih rupa je primijenjen na spektre kvazara iz pregleda neba *Cosmic Evolution Survey* (COSMOS). Iako su COSMOS spektri snimani s različitom tehnikom spektroskopije te se vrijednosti toka zračenja u nekim slučajevima razlikuju u usporedbi sa SDSS spektrima zbog varijabilnosti, pokazalo se da se $\sim 80\%$ masa dobivenih iz COSMOS spektara nalazi oko ~ 0.4 dex od usporednog uzorka dobivenog iz SDSS spektara.

Ključne riječi: supermasivne crne rupe, područja širokih linija, monokromatski luminozitet, disperzija linija, puna širina na polovici maksimuma, *Sloan Digital Sky Survey*, aktivne galaktičke jezgre, PyQSOFit, COSMOS

Supermassive black hole mass estimates from quasar spectra

Abstract

Supermassive black holes (SMBHs) are believed to reside at the center of most galaxies, and their masses are correlated with the properties of their host galaxy. The determination of SMBH masses is therefore a crucial ingredient for understanding the co-evolution of galaxies and their central black holes. One of the most accurate methods for estimating the mass of SMBHs is reverberation mapping (RM). Reverberation mapping campaigns are time consuming, and their success depends on various factors. The RM results show an empirical correlation between 1) the size of the broad line region (BLR), which is a region of ionized gas that surrounds the SMBH, and 2) a monochromatic continuum luminosity. In this thesis, those correlations are used to estimate virial SMBH masses using two different approaches.

In the first approach a sample of quasar spectra from Sloan Digital Sky Survey's (SDSS) Data Release 3 was analyzed. Those quasars are located at redshifts $0.7 < z < 2$ and therefore the emission line used in the analysis is Mg II with monochromatic luminosities at 3000 \AA . Monochromatic luminosities were calculated from monochromatic fluxes by interpolating their values over the three nearest values on specified wavelength which showed greater reliability than using values from fitted power-law. Before all calculations of parameters, the Savitzky-Golay filter was fitted on spectra to decrease the noise. Results from this approach showed consistence with SMBH mass estimates from similar approaches in the literature.

The second approach used the newest SDSS quasar spectra from the Data Release 16 Quasar Catalog which covers redshifts $0.1 \lesssim z \lesssim 6$. Greater redshift range means that Mg II line is not present in all spectra. Hence $H\beta$ and C IV emission lines are used in addition to the Mg II line. For calculating spectral characteristics, the PyQSOFit algorithm is used. PyQSOFit is a powerful tool which fits continuum emission and emission lines on a given spectra and can be used to calculate line FWHM, monochromatic luminosities, etc. From the selected sample $\sim 85 \%$ of the masses are scattered ~ 0.1 dex from the comparison sample taken from the literature. The results were then compared to the first approach, and it was shown that the median

of the distribution of the ratio of SMBH masses is shifted by $\approx 40\%$ from unity. However, PyQSOFit masses were chosen as fiducial because they are calculated by taking more parameters into account.

Lastly, PyQSOFit algorithm was used to calculate SMBH masses from quasars in Cosmic Evolution Survey (COSMOS). Although COSMOS spectra used different kind of spectroscopy than SDSS spectra and flux values differed because of variability, it was shown that $\sim 80\%$ masses are scattered around ~ 0.4 dex from the comparison sample from SDSS.

Keywords: Supermassive black holes, Broad line region, Monochromatic luminosity, Line dispersion, Full width at half maximum, Sloan Digital Sky Survey, Active Galactic Nuclei, PyQSOFit, COSMOS

Sadržaj

1	Uvod	1
1.1	Crne rupe	1
1.1.1	Akrecija	3
1.1.2	Sferična akrecija	4
1.2	Aktivne galaktičke jezgre	5
1.2.1	Akreijski disk	6
1.2.2	Spektralna energetska distribucija	8
1.2.3	Područja širokih i uskih linija	9
1.2.4	Kvazari	10
1.3	Izazovi u proračunima masa SMBH	11
1.3.1	Metoda kartiranja jeke	11
1.3.2	Procjena virijalne mase koristeći empirijske korelacije	12
2	Prvi pristup: metoda opisana u Rafiee i Hall, 2011.	13
2.1	Podaci	13
2.2	Analiza	15
2.2.1	Određivanje R_{BLR}	17
2.2.2	Određivanje širine linije Mg II	19
2.3	Rezultati	21
3	Drugi pristup: metoda opisana u Wu i Shen, 2022.	23
3.1	Podaci	23
3.2	Analiza i rezultati	24
4	Usporedba oba pristupa	27
5	Primjena računa masa na spektre iz polja COSMOS	29
5.1	zCOSMOS - promatranja i podaci	29
5.2	Analiza i rezultati	29
6	Zaključak	32
	Literatura	34

1 Uvod

1.1 Crne rupe

Crna rupa je područje prostor-vremena u kojemu je gravitacijsko polje toliko jako da mu se nikakva informacija ni signal ne može oduprijeti [1]. Takvi objekti nastaju kada se veličina nekog objekta mase M smanji na polumjer manji od Schwarzschildovog polumjera koji je definiran relacijom:

$$r_S = \frac{2GM}{c^2} \quad (1.1)$$

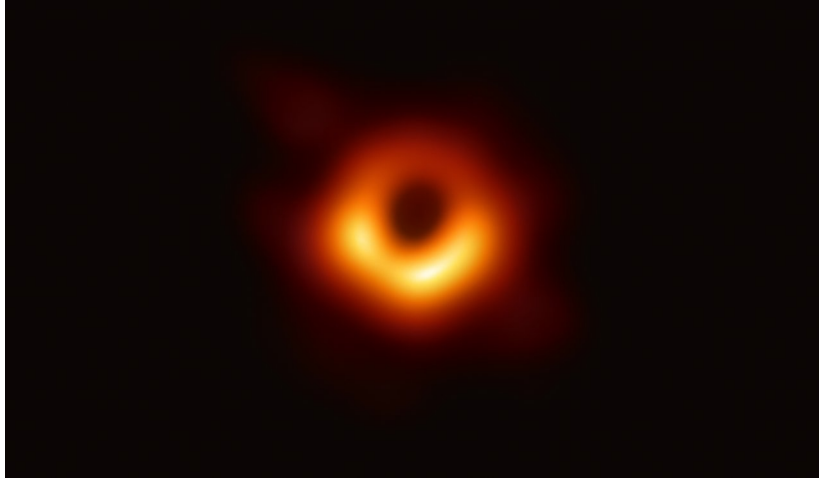
gdje je c brzina svjetlosti, a G gravitacijska konstanta.

Jedna od karakteristika crnih rupa je singularitet koji se nalazi u njezinom centru, a predstavlja infinitezimalno maleno tijelo beskonačne gustoće u kojem se nalazi sva masa crne rupe. Osim singulariteta, važan je i horizont crne rupe, poznat i kao horizont događaja. To je sferična ploha oko singulariteta koja sprječava prolazak bilo kakve informacije iz unutrašnjosti.

Teorija o postojanju crnih rupa započinje u 18. stoljeću s Michellom i Laplaceom koji dolazi do zaključka da bi dovoljno masivna zvijezda imala gravitacijski utjecaj kojem se svjetlost ne bi mogla oduprijeti. Uvrštavanjem brzine svjetlosti u Newtonovu formulu za brzinu oslobađanja:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (1.2)$$

dobiva se da je polumjer takve zvijezde $R = 2.95 M/M_\odot$ km što se činilo kao neobično malena vrijednost. 1915. godine Albert Einstein iznosi opću teoriju relativnosti koja opisuje kako se mjere udaljenosti u prostor-vremenu uz postojanje mase. Prostor-vrijeme je opisao jednadžbama koje danas zovemo Einsteinove jednadžbe polja, a prvo njihovo rješenje iznosi Schwarzschild 1916. To rješenje opisuje prostor-vrijeme u gravitacijskom polju nenabijene, nerotirajuće sferno-simetrične mase te sadrži singularitete u $r = 0$ i $r = r_S$, ali znanstvena zajednica sumnja u stvarno postojanje takvih objekata. Oppenheimer i Snyder 1939. proučavaju urušavanje zvijezde uz pretpostavku sferne simetrije te r_S tumače kao horizont. 1963. Kerr donosi rješenje Einsteinovih jednadžbi za nenabijenu, rotirajuću aksijalno-simetričnu masu, a 1967. Wheeler prvi puta koristi naziv crna rupa [1]. 1971. godine otkrivena je prva crna rupa, a prva fotografija sjene crne rupe nastala je 2017.



Slika 1.1: Prva fotografija sjene crne rupe M87 nastala kroz kolaboraciju *Event Horizon telescope* [2].

Današnja teorija tvrdi da su crne rupe u potpunosti određene trima parametrima: nabojem, kutnom količinom gibanja i masom [3]. Zanemarujući naboj, crne rupe dijelimo na već spomenute rotirajuće i nerotirajuće. Nerotirajuće crne rupe su u potpunosti određene gravitacijskim radijusom. Rotirajuće crne rupe opisane su s još dva parametra, a to su maksimalna kutna količina gibanja definirana kao:

$$L_{max} = \frac{GM^2}{c}, \quad (1.3)$$

kao i bezdimenzionalan parametar spina a :

$$a = \frac{cL}{GM^2} \quad (1.4)$$

Oko crne rupe postoji i posljednja stabilna kružna orbita (eng. *innermost stable circular orbit*, ISCO) izvan koje se čestice mogu beskonačno dugo gibati po stabilnim kružnim putanjama. Njezina vrijednost iznosi $r_{ms} = 3r_S$ za nerotirajuće crne rupe, odnosno ovisno o vrijednosti parametra a za rotirajuće crne rupe $0.5r_S < r_{ms} < 4.5r_S$.

S obzirom na masu [1], crne rupe se dijele na:

- mikro crne rupe ($M < 3 M_{\odot}^1$)
- crne rupe zvjezdanih masa ($M \approx 3 - 50 M_{\odot}$)
- crne rupe srednjih masa ($M \approx 50 - 50000 M_{\odot}$)

¹ M_{\odot} predstavlja jednu Sunčevu masu

- supermasivne crne rupe ($M > 50000 M_{\odot}$)

Postojanje mikro crnih rupa je hipotetsko, o crnim rupama srednjih masa se zna nešto više te trenutno postoji nekoliko kandidata za te objekte, a astrofizičkim promatranjima je potvrđeno postojanje crnih rupa zvjezdanih masa i supermasivnih crnih rupa (eng. *supermassive black hole*, SMBH). Ovaj rad bavi se proračunima masa supermasivnih crnih rupa u središtima galaksija koje aktivno nakupljaju materiju.

1.1.1 Akrecija

Akrecija, odnosno nakupljanje materije, te s njom povezano oslobađanje gravitacijske potencijalne energije su važni izvori zračenja u astrofizici. Proces akrecije ovisi o geometriji sustava pa se prema tome u sferičnim i nesferičnim sustavima drukčije odvija. Dvije važne veličine za taj proces su Eddingtonov luminozitet i Eddingtonova brzina akrecije [3].

Pretpostavimo točkasti izvor mase M , luminoziteta² L i monokromatskog luminoziteta³ L_{ν} oko kojeg se nalazi potpuno ioniziran plin na udaljenosti r . Sila tlaka zračenja koja djeluje na česticu iznosi:

$$f_{rad} = \frac{N_e \sigma_T}{4\pi r^2 c} \int_0^{\infty} L_{\nu} d\nu = \frac{N_e \sigma_T}{4\pi r^2 c} L \quad (1.5)$$

gdje je N_e gustoća elektrona i σ_T Thomsonov udarni presjek. Gravitacijska sila po čestici iznosi:

$$f_g = \frac{GM\mu m_p N_e}{r^2} \quad (1.6)$$

gdje je μ srednja molekulska masa (srednji broj protona i neutrona po elektronu, za potpuno ioniziran plin istog sastava kao u Suncu iznosi 1.17). Sferična akrecija potpuno ioniziranog plina na središnji objekt je održiva dok vrijedi $f_g > f_{rad}$. Granična vrijednost za akreciju, $f_{rad} = f_g$, vodi do definiranja Eddingtonovog luminoziteta:

$$L_{Edd} = \frac{4\pi c GM\mu m_p}{\sigma_T} \simeq 1.5 \times 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \frac{\text{erg}}{\text{s}} \quad (1.7)$$

²Luminozitet je količina energije koju neko tijelo izrači u jedinici vremena

³Monokromatski luminozitet je količina energije koju neko tijelo izrači u jedinici vremena na specifičnoj valnoj duljini ili frekvenciji.

⁴ $\text{erg s}^{-1} = 10^{-7} \text{ W}$

Eddingtonov luminozitet zapravo označava maksimalan dozvoljen luminozitet koji mogu imati objekti čija snaga zračenja potječe od ravnomjerne akrecije. Ako definiramo relaciju za brzinu akrecije kao:

$$\dot{M} = \frac{L}{\eta c^2} \quad (1.8)$$

gdje η predstavlja efikasnost konverzije mase u energiju (luminozitet), koristeći vrijednost za Eddingtonov luminozitet možemo definirati Eddingtonovu brzinu akrecije

\dot{M}_{Edd} :

$$\dot{M}_{Edd} = \frac{L_{Edd}}{\eta c^2} \quad (1.9)$$

Ova veličina predstavlja brzinu akrecije koja je potrebna za dobivanje ukupnog luminoziteta L_{Edd} .

1.1.2 Sferična akrecija

Najjednostavniji oblik akrecije je sferična akrecija, poznata i kao Bondijeva akrecija. Takva akrecija počinje na udaljenostima gdje plin miruje, daleko od centralnog objekta i polako se počinje kružno gibati pod utjecajem gravitacije i sile tlaka zračenja.

Efikasnost konverzije mase u energiju za sferičnu akreciju ϵ_r je puno manja od η za tipične crne rupe gdje $\eta \simeq 0.057$. Razlog tome je što je u takvim slučajevima većina zračenja emitirana sudarima čestica ionizirane plazme. U plinovima male gustoće takvi procesi su manje efikasni u usporedbi s oslobađanjem gravitacijske potencijalne energije pa se plin ne stigne ohladiti prije akrecije na središnji objekt. Posljedica toga je da se većina gravitacijske potencijalne energije dovede advekcijom⁵ na središnji objekt što znači da je izračen luminozitet samo mali udio oslobođene gravitacijske potencijalne energije. Dobra procjena za luminozitet sferične akrecije je:

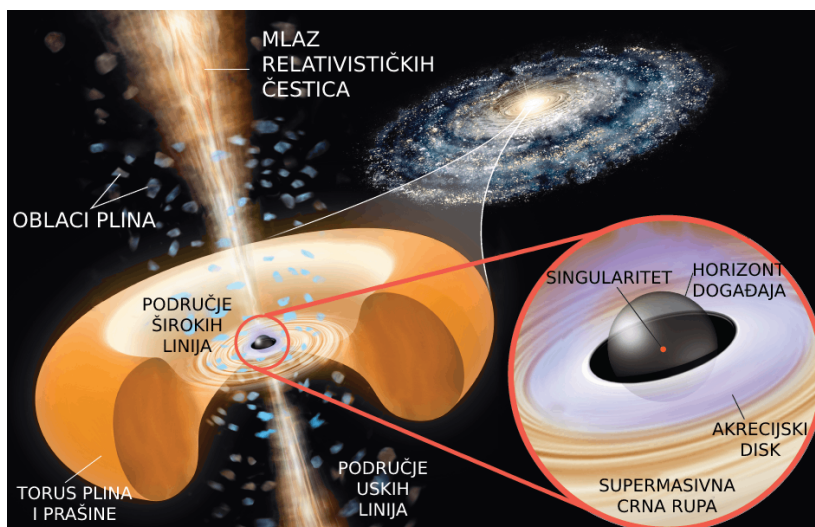
$$\frac{L}{L_{Edd}} \simeq 10^{-4} \left[\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{Edd}} \right] \quad (1.10)$$

iz čega bi slijedilo da je $\epsilon_r \sim 10^{-4}$. Iako je luminozitet dobiven sferičnom akrecijom puno manji od luminoziteta dobivenog akrecijom pomoću akrecijskog diska, sferični tip akrecije vrućeg plina na središnju crnu rupu u galaksijama je najvjerojatnije uzrok

⁵Advekcija je prijenos tvari skupnim kretanjem fluida.

pojavljivanja relativističkih radio mlazova.

1.2 Aktivne galaktičke jezgre



Slika 1.2: Ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgara tvrdi da su sve aktivne galaktičke jezgre sastavljene od istih dijelova, a razlikujemo ih zbog različite orijentacije u odnosu na doglednicu te po luminozitetima. Aktivne galaktičke jezgre se sastoje od supermasivne crne rupe u središtu, akrecijskog diska, oblaka plina te torusa plina i prašine. Neki takvi objekti sadrže i mlazove relativističkih čestica koji izlaze okomito na akrecijski disk. Originalna ilustracija autora Roena Kelly-ja, kreirana za potrebe časopisa *Astronomy*, prilagođena za potrebe ovog rada. [4]

U središtima većine danas poznatih galaksija nalazi se supermasivna crna rupa [5] oko koje je područje plina velike gustoće s izrazito velikom populacijom zvijezda te se takva područja zovu galaktičke jezgre. Otprilike 1% galaksija u svom centru sadrži supermasivnu crnu rupu koja aktivno nakuplja materiju te se takvi objekti nazivaju aktivne galaktičke jezgre (eng. *active galactic nucleus*, AGN). Fizikalni procesi u takvim objektima stvaraju snažno elektromagnetsko zračenje u područjima ultraljubičastog (eng. *ultraviolet*, UV) te radio i x-zračenja. Faza aktivnih galaktičkih jezgara je zapravo povremen proces tijekom života supermasivne crne rupe i vjeruje se da ga pokreće stapanje crnih rupa ili neki unutarnji, odnosno sekularni procesi unutar galaksije [6].

Neki objekt se može svrstati u aktivne galaktičke jezgre ako je makar jedna od sljedećih stavki zadovoljena:

1. Objekt sadrži kompaktnu nuklearnu jezgru koja emitira znatno više energije nego što je očekivano od zvjezdanih procesa u takvim tipovima galaksije.

2. U središtu objekta javlja se kontinuirano zračenje koje ne potječe od zvjezdanih procesa.
3. Spektar objekta sadrži jake emisijske linije čiji omjeri nisu tipični za pobuđenja iz zvjezdanih izvora.
4. Postoje varijacije u kontinuiranom zračenju i/ili emisijskim linijama.

Kao što je i prikazano na slici 1.2, središnji dio aktivne galaktičke jezgre je akrecijski disk u orbiti oko rotirajuće supermasivne crne rupe. Oko akrecijskog diska nalazi se torus neutralnog plina i prašine, a iz središta AGN-a, okomito na disk, mogu izlaziti relativistički mlazovi. Osim sferične akrecije, njihov nastanak je potencijalno uzrokovan i snažnim magnetskim poljima koja se stvaraju priljevom materije u disk [7].

Detaljnija proučavanja aktivnih galaktičkih jezgara su počela u 70-im godinama prošlog stoljeća nakon otkrića prvog kvazara. AGN-ovima osim kvazara pripadaju i razni drugi objekti kao što su blazari, Seyfertove galaksije tipa 1 i 2, itd. Prihvaćena teorija (ujedinjeni model aktivnih galaktičkih jezgara) tvrdi da se svi oni sastoje od istih dijelova te ih razlikujemo po luminozitetu i njihovoj orijentaciji u odnosu na doglednicu.

1.2.1 Akrecijski disk

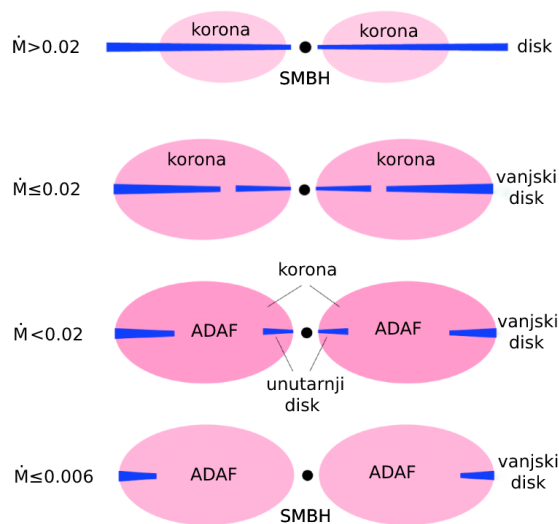
Efikasniji procesi akrecije, od onih već spomenutih, povezani su s prisustvom akrecijskog diska. Akrecijski diskovi u aktivnim galaktičkim jezgrama prisutni su oko supermasivnih crnih rupa tijekom perioda brze akrecije. Unutarnji radijus akrecijskog diska najčešće se povezuje s posljednjom stabilnom kružnom orbitom dok njegov vanjski radijus nije strogo definiran te ovisi o tlaku i gravitaciji na velikim udaljenostima od centralnog objekta [3].

Akrecijski diskovi prirodno nastaju upadanjem plina na središnju ravninu galaksije koji pri tom procesu zadržava svoju kutnu količinu gibanja. Pretpostavka je da zbog viskoznosti diska nastaje mehanizam koji omogućuje plinu da se spiralno kreće prema centru te tako gubi značajan dio gravitacijske potencijalne energije. Tako izgubljena energija može biti pretvorena u elektromagnetsko zračenje s efikasnošću od 4 do 42%. Moguća je i pretvorba u kinetičku energiju plina koji se onda otpuhuje

dalje od diska ili u toplinu, gdje se onda plin zagrijava na vrlo visoke temperature što uzrokuje advekciju mase na crnu rupu.

Ovisno o obliku akrecijske diskove aktivnih galaktičkih jezgara možemo podijeliti na geometrijski tanke i optički debele te na geometrijski debele i optički tanke. Optička debljina ovisi o stupnju ionizacije plina i površinskoj gustoći.

Model geometrijski tankog i optički debelog diska razvijen je ranih 1970.-ih [8] te se pretpostavlja da takav disk nastaje pri većim brzinama akrecije i ima nižu temperaturu. Takav hladni akrecijski disk zrači poput crnog tijela. U ovom modelu rotirajući tok plina se kreće prema središtu diska zbog pomicanja kutne količine gibanja uzrokovane magnetskim rotacijskim nestabilnostima ili vjetrovima. Na ovaj način uspješno se opisuju sjajne aktivne galaktičke jezgre poput kvazara.

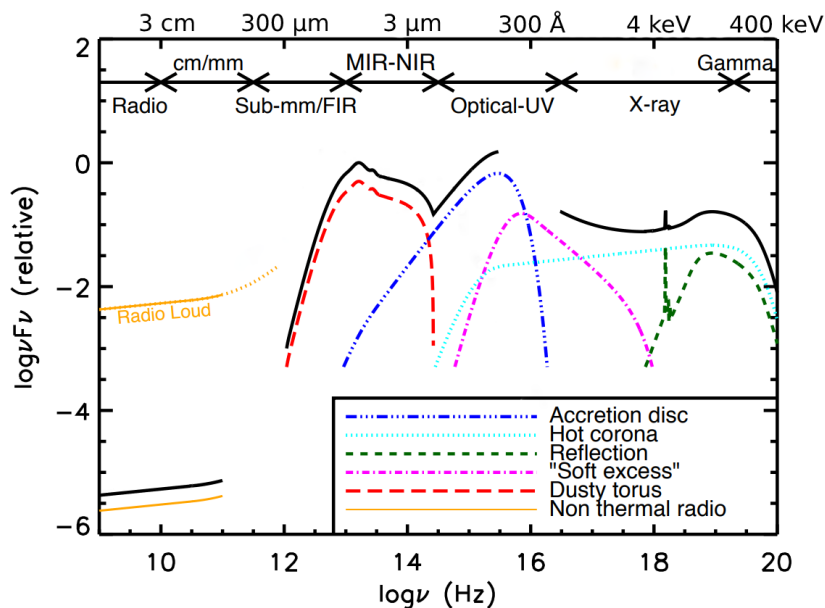


Slika 1.3: Primjer modela akrecijskih diskova oko SMBH za različite brzine akrecije. Porastom brzine akrecije tanki disk se širi prema unutra te prevlada model s geometrijski tankim i optički debelim diskom. Slika prilagođena iz [9].

Geometrijski debeo i optički tanak disk nastaje pri nižim brzinama akrecije. Temperature plina u ovakvim diskovima puno su veće i bliže su virijalnim temperaturama. Glavna stavka ovog modela je u tome što se raspršenom akrecijskom energijom zagrijava tok akrecije pri čemu disk postaje geometrijski debeo. Ovakve vrste vrućih akrecija nazivaju se advekcijski dominantni tokovi akrecije (eng. *Advection-Dominated Accretion Flows*, ADAF) te su ovakvim modelom uspješno opisana svojstva AGN-ova niskih luminoziteta poput onog u središtu naše galaksije.

1.2.2 Spektralna energetska distribucija

Spektralna energetska distribucija (SED) nekog izvora opisuje njegovo zračenje kroz neki dio elektromagnetskog spektra te stoga predstavlja važan alat u istraživanju fizikalnih procesa koji ga uzrokuju. Najčešće se spektralna energetska distribucija izražava u monokromatskim luminozitetima, odnosno monokromatskim tokovima zračenja po jedinici frekvencije, valne duljine ili energije.



Slika 1.4: Prikaz spektralne energetske distribucije aktivnih galaktičkih jezgara koje nisu aktivne u radio području. Puna crna linija predstavlja ukupnu SED, dok obojene krivulje predstavljaju pojedine doprinose. Također, debljom narančastom linijom je prikazano kako bi snažni radio izvori imali nekoliko redova veći nivo emisije zračenja. Slika prilagođena iz [10].

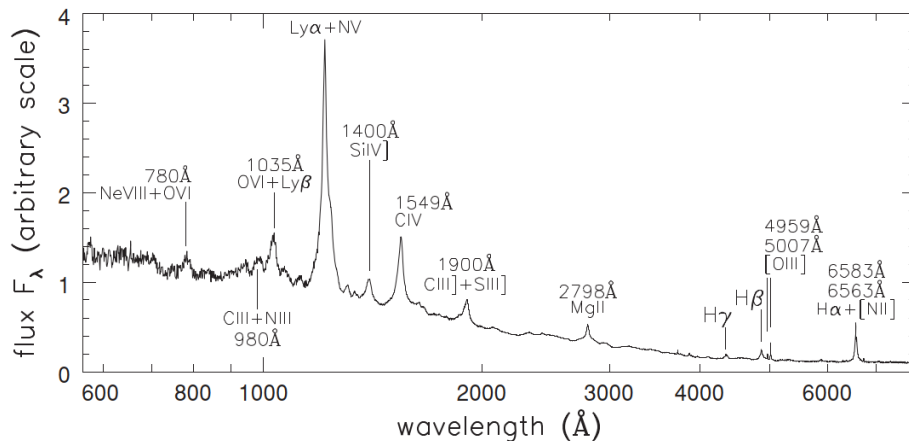
Ukupna SED aktivnih galaktičkih jezgara s geometrijski tankim i optičkim debelim diskom se sastoji od doprinosa koji nastaju različitim mehanizmima u raznim područjima AGN-a. U optičkom i ultraljubičastom području ističe se tzv. "plavo ispučenje" (eng. *blue bump*) koje dolazi od pretvorbe gravitacijske potencijalne energije u termalnu u akrecijskom disku. Na niskim frekvencijama X-područja javlja se zračenje koje se ne može opisati jednostavnim modelima akrecijskih diskova te se takvo zračenje u SED naziva "blagi višak" (eng. *soft excess*). U torusu plina i prašine koji okružuje akrecijski disk događa se apsorpcija UV i optičkih fotona te njihova reemisija u infracrvenom području pa stoga nastaje tzv. "infracrveno ispučenje" (eng. *infrared bump*). Nadalje, oko akrecijskog diska se nalazi optički tanka korona gdje se odvija Comptonovo raspršenje fotona te tako nastaje visoko energetska

X-zračenje. Takve X-zrake se također mogu odbiti od torusa plina i prašine i/ili akrecijskog diska i tako proizvesti dodatnu refleksijsku komponentu u X-području [11]. Naposljetku, u radio području postoji netermalna komponenta koja potječe od sinkrotronskog zračenja iz blizine crne rupe.

Na ograničenom području valnih duljina SED aktivnih galaktičkih jezgara se može opisati pomoću zakona potencije kao:

$$F_{\lambda} \propto \lambda^{-(2-\alpha)} \quad (1.11)$$

gdje je α spektralni indeks. Tako npr. za opaženih 1200-6000 Å kontinuirano zračenje većine sjajnih AGN-ova je dobro opisano s $F_{\lambda} \propto \lambda^{-1.5}$. Osim kontinuiranog zračenja, u spektrima aktivnih galaktičkih jezgara prisutne su i emisijske linije koje potječu iz oblaka plina na različitim udaljenostima od akrecijskog diska.



Slika 1.5: Primjer tipičnog spektra kvazara u ultraljubičastom i optičkom području s označenim spektralnim linijama. Preuzeto iz [12].

1.2.3 Područja širokih i uskih linija

Na jako bliskim udaljenostima od središnje crne rupe ($r \sim 0.01$ pc) pa sve do nekoliko kpc⁶ od nje nalaze se vrući ($T \approx 10^4$ K) oblaci plina različitih gustoća. UV fotoni nastali u akrecijskom disku ioniziraju guste oblake plina ($n_e \geq 10^9$ cm⁻³) na bliskim udaljenostima od crne rupe. Zbog neposredne blizine crnoj rupi, ti oblaci su pod njenim izravnim gravitacijskim utjecajem pa se plin kreće velikim brzinama. Takve velike brzine plina uzrokuju dopplerovska proširenja emisijskih linija u spek-

⁶1 pc = 3.0857×10^{16} m

tru u rasponu od približno 1000 do 25 000 km s⁻¹ [13] pa se takva područja nazivaju područja širokih linija (eng. *broad line regions*, BLR).

Ionizirajući fotoni koji pobjegnu utjecaju crne rupe mogu ionizirati plin na većim udaljenostima čija je gustoća niža ($n_e \leq 10^3 \text{ cm}^{-3}$). Takvi oblaci plina se zbog veće udaljenosti od crne rupe kreću nižim brzinama pa su zbog toga i dopplerovska proširenja linija manja i iznose između 250 i 2000 km s⁻¹. Takva područja oko aktivnih galaktičkih jezgara se nazivaju područja uskih linija (eng. *narrow line regions*, NLR).

Obje vrste linija imaju izražen crveni pomak prema vidljivom dijelu spektra zbog recesijske brzine apsorbirajućeg materijala ili, na većim udaljenostima, zbog širenja svemira.

1.2.4 Kvazari

Kvazari su podtip aktivnih galaktičkih jezgara čiji je luminozitet veći od luminoziteta galaksije u kojoj se nalaze te su jedni od najsjajnijih izvora u svemiru. Naziv su dobili skraćivanjem izraza kvazi-zvjezdani radio izvor (eng. *quasi stellar radio source*) jer su otkriveni kao jaki radio izvori i na prvim slikama su izgledali poput zvijezda. Slikama visoke rezolucije (npr. pomoću teleskopa Hubble) otkriveno je da se kvazari javljaju u središtima galaksija. Analizom njihovih spektara otkriven je velik crveni pomak što znači da takvi objekti moraju imati veliki luminozitet da bi bili vidljivi, a takav luminozitet se opravdava upadanjem materije s akrecijskog diska na crnu rupu.

Nemaju svi kvazari jaku emisiju u radio području, štoviše takvih objekata je samo $\approx 10\%$. Ostatak kvazara je neaktivan u radio području i nazivaju se kvazi-zvjezdanim objektima (eng. *quasi-stellar object*, QSO). Obje vrste kvazara su rotirane u odnosu na doglednicu tako da omogućuju pogled na područje širokih linija koje se nalazi duboko u potencijalnoj jami crne rupe. Ta činjenica je važna pri proračunima masa supermasivnih crnih rupa unutar kvazara.

Luminozitet tipičnog kvazara iznosi $L = 5 \times 10^{39} \text{ W}$ što znači da takvi objekti emitiraju 10^5 puta više energije nego prosječna galaksija poput Mliječne staze [14]. Eddingtonov luminozitet predstavlja gornju granicu na luminozitet tijela u hidrostatskoj ravnoteži. Koristeći ga može se odrediti donja granica mase SMBH unutar

tipičnog kvazara te ona iznosi:

$$M > \frac{L}{1.5 \times 10^{31} \text{ W}} M_{\odot} = 3.3 \times 10^8 M_{\odot} \quad (1.12)$$

1.3 Izazovi u proračunima masa SMBH

S obzirom na to da je masa jedan od parametara supermasivnih crnih rupa razvile su se mnoge metode kojima se ona može odrediti. Neke od njih su preciznije od drugih pa se za proračun mase najčešće koristi nekoliko metoda. U nastavku ovog rada detaljnije će se opisati dvije usko povezane metode.

1.3.1 Metoda kartiranja jeke

Kontinuirano zračenje aktivnih galaktičkih jezgara opisano relacijom 1.11 potječe iz akrecijskog diska. U ultraljubičastom, optičkom i blisko infracrvenom području primijećeno je postojanje varijacija u tom zračenju. Priroda tih varijacija nije u potpunosti poznata, ali se pretpostavlja da dolaze od magnetskih rekombinacija u akrecijskom disku [15]. Te varijacije su također primijećene u širokim emisijskim linijama.

Vremensko kašnjenje τ_{BLR} varijacija u širokim linijama u odnosu na kontinuum predstavlja srednji slobodni put svjetlosti od akrecijskog diska do BLR. S obzirom na to da se pretpostavlja da je akrecijski disk kompaktan, vremensko kašnjenje ustvari daje prosječan radijus područja širokih linija R_{BLR} . Mjerenje vremenskog kašnjenja varijacija u zračenju zove se metoda kartiranja jeke [16]. Za ovu metodu potrebno je vidjeti široke linije u spektru AGN-a pa je ta metoda jedino primjenjiva za tipove aktivnih galaktičkih jezgara kod kojih je BLR u pravcu gledanja, kao kod npr. kvazara.

Metoda kartiranja jeke se temelji na spektrofotometrijskim promatranjima aktivnih galaktičkih jezgara kroz duže vrijeme (najmanje trostruko duže od najdužeg očekivanog τ_{BLR}). Također su potrebna duga vremena ekspozicije zbog smanjenja šuma, kao i velika spektralna rezolucija kako bi se izbjeglo preklapanje emisijskih linija. Važno je napomenuti da teleskopima na Zemlji ovakva promatranja mogu otežati i vremenski uvjeti što je, uz već spomenute druge uvjete, razlog zašto je jako malo masa SMBH određeno ovom metodom.

S obzirom na to da je plin u području širokih linija duboko u potencijalnoj jami crne rupe gdje je njegova kinematika dominantno pod utjecajem gravitacije, njegova

radijalna brzina u odnosu na doglednicu je opisana dopplerovski proširenom emisijskom linijom u spektru. Koristeći R_{BLR} dobiven iz mjerenja kašnjenja varijacija kontinuiranog zračenja i virijalni teorem, dobiva se relacija [16] kojom je opisana masa SMBH:

$$M_{\bullet} = f \frac{R_{\text{BLR}} V^2}{G} \quad (1.13)$$

gdje je V puna širina na polovici maksimuma (eng. *full width at half maximum*, FWHM) emisijske linije, izražena u km s^{-1} , a f predstavlja faktor skaliranja koji ovisi o orijentaciji aktivne galaktičke jezgre te detaljnoj kinematici plina.

1.3.2 Procjena virijalne mase koristeći empirijske korelacije

Rezultati metode kartiranja jeke pokazali su da postoji empirijska korelacija između R_{BLR} i monokromatskog luminoziteta kontinuuma [17]. Ovakva korelacija pojednostavljuje određivanje mase SMBH tako da se dugotrajna i zahtjevna promatranja zamijene s mjerenjima monokromatskog luminoziteta koristeći spektre aktivnih galaktičkih jezgara. Ova druga metoda se bazira na kalibriranju relacije 1.13 iz masa SMBH već određenih metodom kartiranja jeke mjereći širine emisijske linije i određujući monokromatski luminozitet. S novodobivenom relacijom se onda mogu odrediti do tad nepoznate mase. U ovom radu pokušat će se reproducirati rezultati ove metode koristeći dva različita pristupa.

2 Prvi pristup: metoda opisana u Rafiee i Hall, 2011.

Prvi pristup proračuna masa supermasivnih crnih rupa koristi metodu empirijskih korelacija te se temelji na članku Raffie i Hall, 2011. [18]. U navedenom članku autori su izračunali mase SMBH za 27 602 kvazara na crvenim pomacima $0.7 < z < 2$ koristeći javno dostupne spektre snimljene pregledom neba *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS). Koristeći podatke dobivene metodama kartiranja jeke iz [19] i [20], odredili su poveznicu između τ_{BLR} i monokromatskog luminoziteta na 3000 Å koja iznosi:

$$\begin{aligned}\tau_{BLR} &= (29.44_{-5.51}^{+6.78}) l^{0.5} \\ l &= [\lambda L_{\lambda} / 10^{44} \text{ erg s}^{-1}]\end{aligned}\tag{2.1}$$

Uz tu korelaciju i poveznicu između τ_{BLR} i R_{BLR} :

$$R_{BLR} = c \tau_{BLR}\tag{2.2}$$

pretpostavili su relaciju za masu SMBH u obliku:

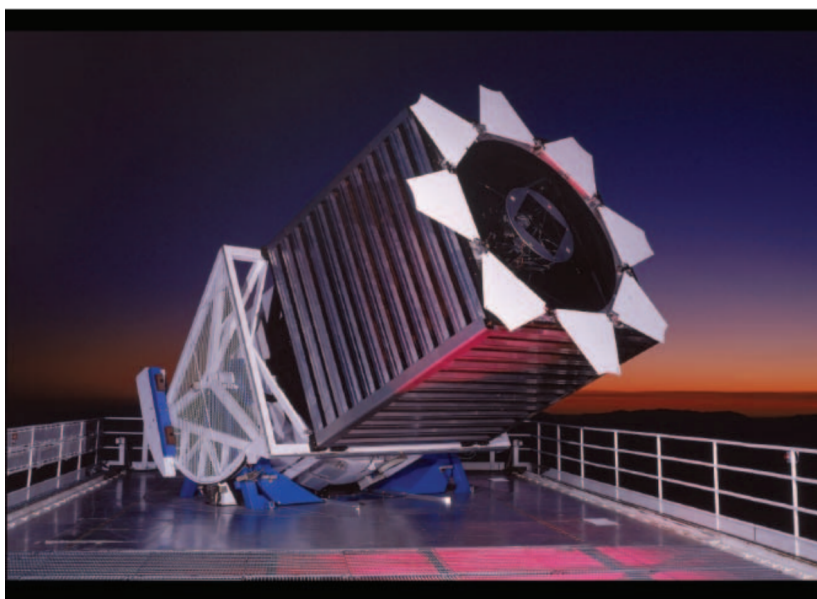
$$M_{\bullet} = \bar{f} \frac{R_{BLR} \sigma^2}{G}\tag{2.3}$$

gdje $\bar{f} = 5.3 \pm 0.6$ predstavlja kalibracijski faktor određen usporedbom masa dobivenih ovim pristupom i onih određenih metodom kartiranja jeke. Emisijska linija čija je širina σ korištena u proračunu je linija Mg II. U ovom radu cilj je bio pokušati reproducirati rezultate referentnog članka koristeći iste relacije i iste podatke. Prilikom proračuna pojedinih parametara pretpostavlja se Λ CDM kozmologija s Hubbleovom konstantom $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ te $\Omega_m = 0.26$.

2.1 Podaci

SDSS je pankromatski i spektralni pregled neba koji koristi 2.5-metarski širokokutni optički teleskop u Novom Meksiku za fotometrijska i spektroskopska promatranja te sadrži spektre više od 5 milijuna objekata, od kojih je kvazara više od 900 tisuća. Fotometrijski dio je umirovljen 2009. godine te se otad izvode samo spektroskopska opažanja.

Fotometrijska kamera se sastoji od 30 CCD čipova rezolucije 2048×2048 piksela



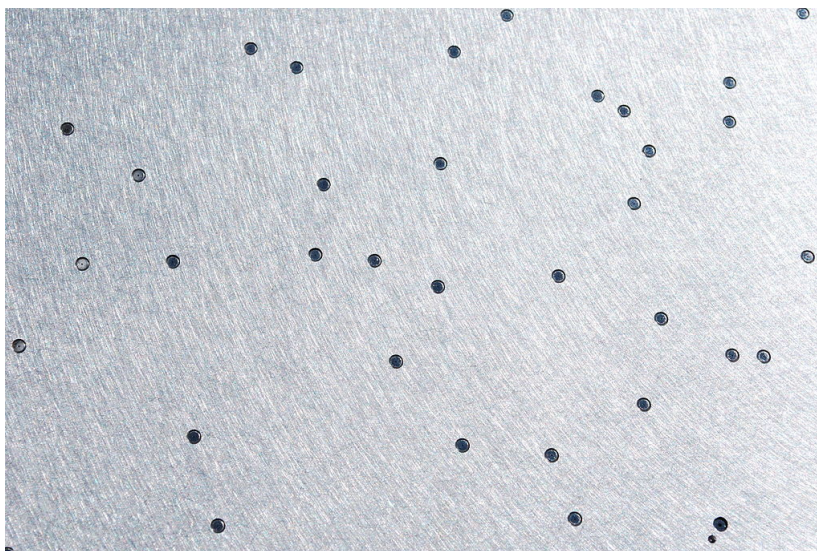
Slika 2.1: 2.5-metarski teleskop projekta *Sloan Digital Sky Survey*. Slikano u smjeru zapada, s otvorenim kućištem teleskopa. Preuzeto iz [21].

i time postiže ukupnu rezoluciju od približno 120 megapiksela. Radi smanjenja šuma kamera je ohlađena na 190 kelvina pomoću tekućeg dušika. Snimke su napravljene s fotometrijskim sustavom od pet filtera (tzv. u, g, r, i, z filteri). Te su snimke potom obrađene kako bi se napravio popis opaženih objekata s parametrima koji opisuju koliko je neki objekt točkast ili izdužen (poput galaksija) te kako svjetlost CCD kamere utječe na magnitudu.

Na zvijezdama, galaksijama i kvazarima se koristeći fotometrijske podatke, vrše spektroskopska mjerenja. SDSS-ov spektrograf funkcionira tako što je za svaku metu provučeno optičko vlakno kroz rupu na aluminijskoj ploči. Svaka rupa je pozicionirana specifično za svaki promatrani izvor tako da je za svako područje određivanja spektra potrebna jedinstvena ploča. Za snimanje spektara se tokom jedne noći koristi između šest i devet ploča te je moguće snimiti tisuću spektara odjednom što je u konačnici otprilike 200 GB podataka svake noći.

Sloan Digital Sky Survey je dosad 17 puta objavio svoje podatke, a podaci korišteni u ovom poglavlju dostupni su unutar trećeg takvog izdanja podataka, službenog naziva *Data Release 3*. To su javno dostupni spektri kvazara kojih je unutar *Data Release 3* dostupno 51 027 te pokrivaju interval valnih duljina 3800-9200 Å⁷. Spektri su spremljeni u datoteke posebnog formata naziva *Flexible Image Transport System* (FITS). Takve datoteke se sastoje od jedne ili više jedinica zaglavlja i podataka (eng.

⁷Valne duljine su u opaženom sustavu, ne u sustavu mirovanja.



Slika 2.2: Prikaz aluminijske ploče s izbušenim rupama kroz koje su provučena optička vlakna. Fotografija autora EdPost, distribuirano putem CC BY-SA 3.0 licence. [22]

Header and Data Units, HDU) koje mogu sadržavati sliku, binarnu tablicu ili ASCII tablicu, a svaki HDU sadrži zaglavlje s informacijama o sadržaju. Spektri unutar *Data Release 3* se sastoje od šest takvih jedinica od kojih su u ovom radu potrebna samo dva - *Primary HDU* i *Line HDU* od kojih prvi sadržava opće podatke o izvoru, a drugi podatke o spektralnim linijama. Detaljan opis sadržaja za svaki HDU je dostupan ovdje [23]. Za rad s FITS datotekama korištena je Python Astropy biblioteka.

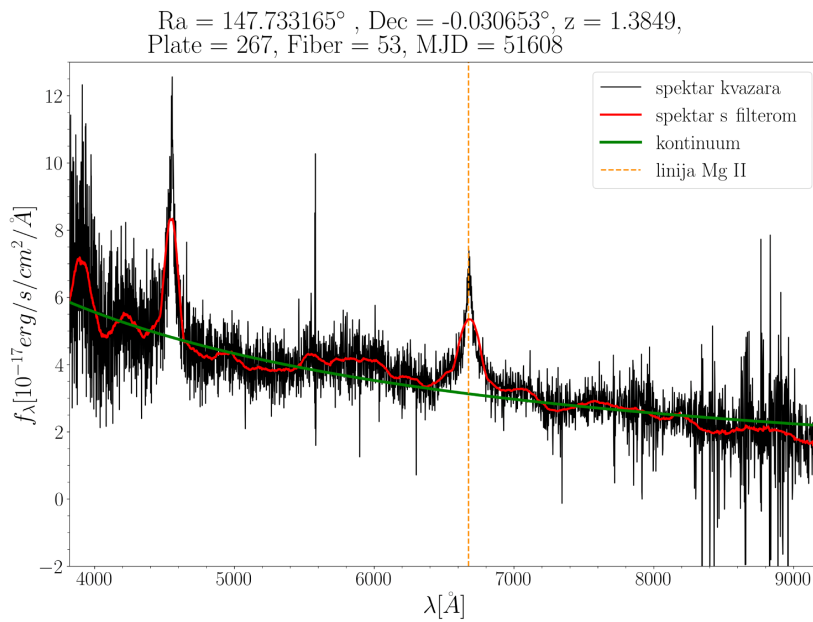
2.2 Analiza

Za 1369 nasumično odabranih kvazara čije su mase središnjih supermasivnih crnih rupa određene u [18] su preuzete FITS datoteke iz SDSS-ove baze za *Data Release 3*. Nakon toga su iz *Primary HDU* za svaki pojedini objekt preuzeti podaci o njegovoj rektascenziji α i deklinaciji δ , kao i broj ploče (*Plate*), broj optičkog vlakna (*Fiber*) i modificirani julijanski datum (MJD) koji služe za pronalazak tih objekata u katalogu dostupnom uz navedeni članak, kao i za usporedbu s njihovim masama i ostalim parametrima. Potom je isti HDU korišten za preuzimanje podataka o toku zračenja po valnim duljinama. U *Data Release 3* nisu dane vrijednosti valnih duljina, nego se one računaju kao:

$$\lambda = 10^{\text{COEFF0} + n \times \text{COEFF1}}, \quad (2.4)$$

gdje je COEFF0 logaritam s bazom 10 središnje valne duljine početnog piksela, COEFF1 logaritam s bazom 10 disperzije među pikselima i n redni broj piksela. Naposljetku su iz *Line HDU* preuzeti podaci o valnim duljinama spektralnih linija koje su vidljive u spektru objekta.

Na spektar je zatim potrebno prilagoditi kontinuirano zračenje pomoću relacije 1.11. Prvo se iz spektra moraju izbaciti sve spektralne linije, što je napravljeno tako da su za svaku identificiranu spektralnu liniju iz spektra uklonjeni podaci u intervalu $\pm 100 \text{ \AA}$ oko njenog vrha. Kako bi se uklonio šum i prilagodba bila što uspješnija, na preostale podatke iz spektra je primijenjen Savitzky-Golay filter [24], dostupan unutar Python Scipy biblioteke. Savitzky-Golay filter radi na principu konvolucije, tako što se na definirani interval podataka (*window_length*) prilagode polinomi zadanog stupnja (*polyorder*) metodom najmanjih kvadrata. Primjer jednog spektra kvazara s

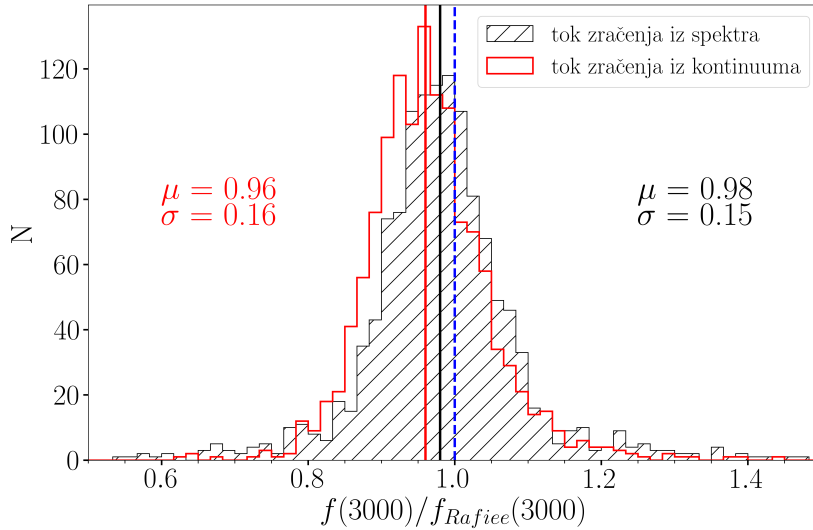


Slika 2.3: Spektar jednog od kvazara čija je masa SMBH određena u ovom radu. Kvazar je centriran na $\alpha = 147.733165^\circ$, $\delta = -0.030653^\circ$ te se nalazi na crvenom pomaku $z = 1.3849$. Snimljen je koristeći ploču broja 267, s optičkim vlaknom broja 53 na modificirani julijanski datum 51608. Crnom bojom je prikazan spektar iz *Data release 3*, a crvenom bojom je prikazan spektar na koji je primijenjen Savitzky-Golay filter s parametrima *window_length* = 171 i *polyorder* = 3. Zelenom bojom je označeno kontinuirano zračenje prilagođeno s relacijom 1.11.

primijenjenim tim filterom i prilagođenim kontinuiranim zračenjem se nalazi na slici 2.3.

2.2.1 Određivanje R_{BLR}

Za određivanje radijusa područja širokih linija, prvo je potrebno izračunati tok zračenja na 3000 \AA u sustavu mirovanja. Za to je prvotno korištena vrijednost kontinuiranog zračenja na toj valnoj duljini, prilagođenog iz relacije 1.11, a potom vrijednost uzeta iz spektra interpolirana kroz tri najbliže vrijednosti oko zadane valne duljine. Kao



Slika 2.4: Omjeri izračunatih vrijednosti toka zračenja na 3000 \AA u sustavu mirovanja s vrijednostima toka zračenja na istoj valnoj duljini preuzetih iz kataloga uz [18]. Crvenom bojom je označen tok zračenja dobiven iz prilagodbe kontinuiranog zračenja opisanog relacijom 1.11, a crnom onaj preuzet iz spektra sadržanom u FITS datoteci dobiven interpolacijom kroz tri točke oko zadane valne duljine. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

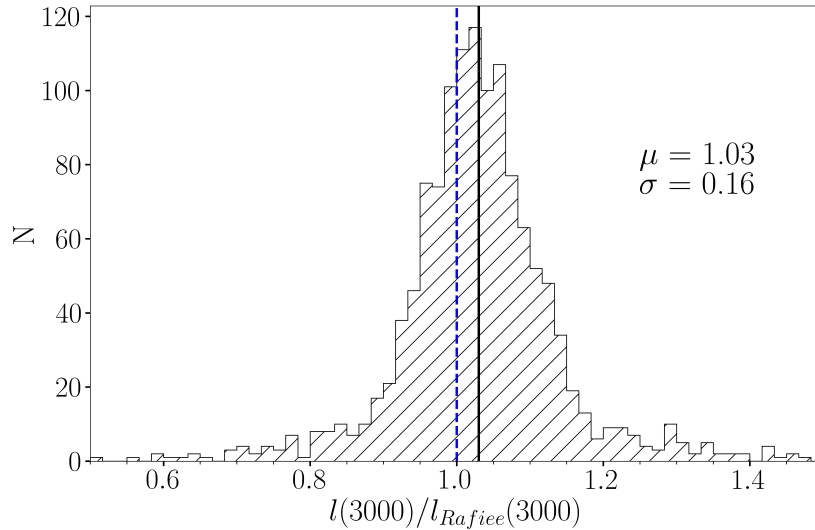
što se vidi iz histograma na slici 2.4, vrijednosti dobivene za tok zračenja iz spektra su bliže onima iz [18] pa se one uzimaju u obzir prilikom daljnje analize.

Sljedeće je potrebno izračunati monokromatski luminozitet na 3000 \AA iz relacije 2.1 za što je potrebno izračunati luminozitet na 3000 \AA . Luminozitet je vezan s tijekom zračenja relacijom:

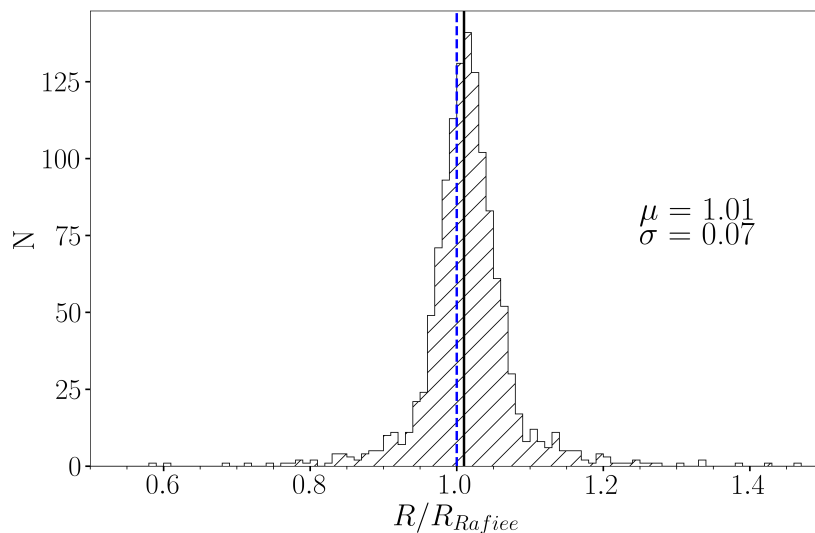
$$L_{\lambda} = 4\pi f_{\lambda} D_L^2, \quad (2.5)$$

pri čemu je D_L luminozitetna udaljenost. Za račun luminozitetne udaljenosti korištena je funkcija *luminosity_distance* iz Python Astropy biblioteke za koju je potreban podatak o crvenom pomaku. Crveni pomak pojedinog kvazara nije preuzet iz *Data Release 3*, nego iz kataloga dostupnog uz [18]. Razlog tomu je što je za crveni pomak dan u *Data Release 3* u tom članku napravljena popravka jer on nije uvijek najprecizniji kako je opisano u odjeljku 4.10.2.1 iz [25]. Popravka je napravljena unakrsnom

korelacijom medijana kompozitnog spektra kvazara sa spektrom iz *Data Release 3*, kako je detaljnije opisano u [26]. Također, zbog toga što su objekti u *Data Release 3* skalirani na tok zračenja za otvore teleskopa promjera 3 kutne sekunde, u [18] je napravljena popravka na luminozitate s korekcijskom faktorom -0.35 mag što je opravdano u odjeljku 4.1.1 iz [27].



Slika 2.5: Omjeri izračunatih vrijednosti monokromatskog luminoziteta na 3000 \AA u sustavu mirovanja s vrijednostima monokromatskog luminoziteta na istoj valnoj duljini preuzetih iz kataloga uz [18]. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.



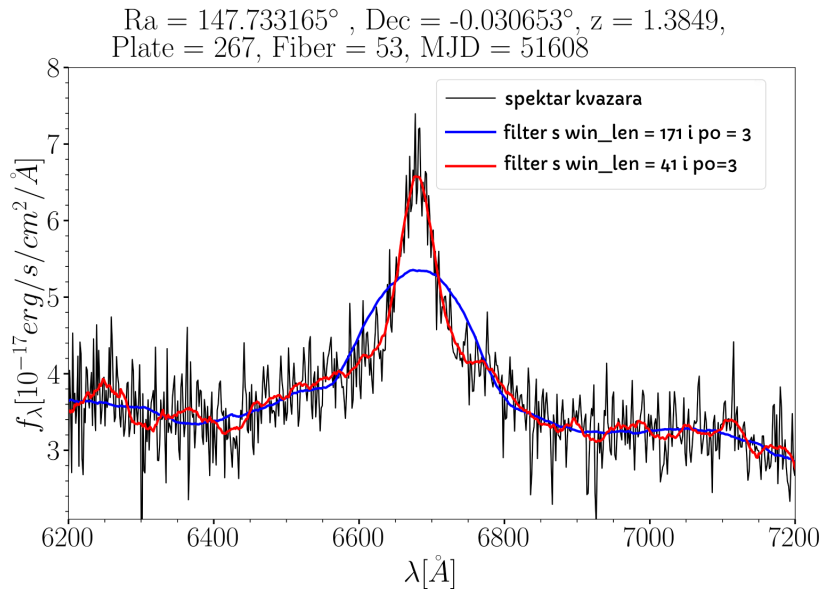
Slika 2.6: Omjeri izračunatih vrijednosti radijusa područja širokih linija s vrijednostima radijusa širokih linija preuzetih iz kataloga uz [18]. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

Uzimajući u obzir te korekcije, sada je moguće izračunati monokromatski lumi-

nozitet na 3000 \AA i radijus područja širokih linija R_{BLR} te usporediti s vrijednostima dobivenim u [18]. Rezultati su prikazani na slikama 2.5 i 2.6 te se vidi dobro slaganje s referentnim vrijednostima iz [18]. Maksimalna razlika u odnosu na vrijednosti iz kataloga iz [18] je $\lesssim 20 \%$ što se čini kao prilično dobar rezultat uzimajući u obzir da model za uklanjanje šuma nije savršen te je izračun iznosa monokromatskog toka zračenja pojednostavljen.

2.2.2 Određivanje širine linije Mg II

Prije računa širine linije na početni spektar kvazara je primijenjen Savitzky-Golay filter s novim parametrima, $window_length = 41$, $polyorder = 7$ jer bolje prati linije spektra, a još uvijek smanjuje šum. Na slici 2.7 je prikazana usporedba oba filtra za



Slika 2.7: Spektar jednog od kvazara čija je masa SMBH određena u ovom radu. Kvazar je centriran na $\alpha = 147.733165^\circ$, $\delta = -0.030653^\circ$ te se nalazi na crvenom pomaku $z = 1.3849$. Snimljen je koristeći ploču broja 267, s optičkim vlaknom broja 53 na modificirani julijanski datum 51608. Crnom bojom je prikazan spektar iz *Data release 3*, crvenom bojom je prikazan spektar na koji je primijenjen Savitzky-Golay filter s parametrima $window_length$ (win_len) = 41 i $polyorder$ (po) = 3, a plavom bojom je prikazan spektar na koji je primijenjen Savitzky-Golay filter s parametrima $window_length$ (win_len) = 171 i $polyorder$ (po) = 3.

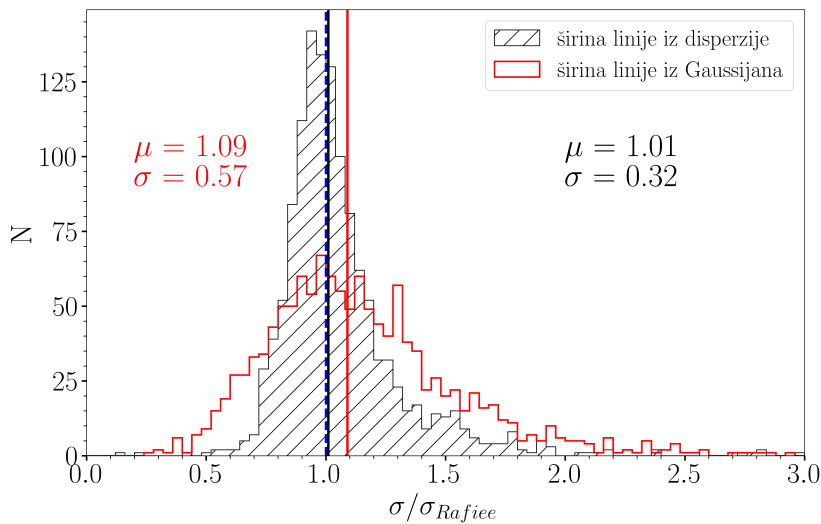
proizvoljno odabrani spektar kvazara, centrirano na liniji Mg II te je vidljivo da drugi filter bolje prati osnovni izgled spektra, odnosno profil spektralne linije što je izrazito važno prilikom određivanja njezine širine.

Od toka zračenja kvazara oduzeto je zračenje kontinuuma. Širina linije je potom određena dvjema metodama, prilagodbom Gaussove funkcije, odnosno određivanjem

njezine pune širine na polovici maksimuma i računom disperzije linija sljedećim relacijama, prezetim iz [18]:

$$\begin{aligned}\sigma^2(\lambda) &= \langle \lambda^2 \rangle - \lambda_0^2, \\ \langle \lambda^2 \rangle &= \frac{\int \lambda^2 P(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda}, \\ \lambda_0 &= \frac{\int \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda},\end{aligned}\tag{2.6}$$

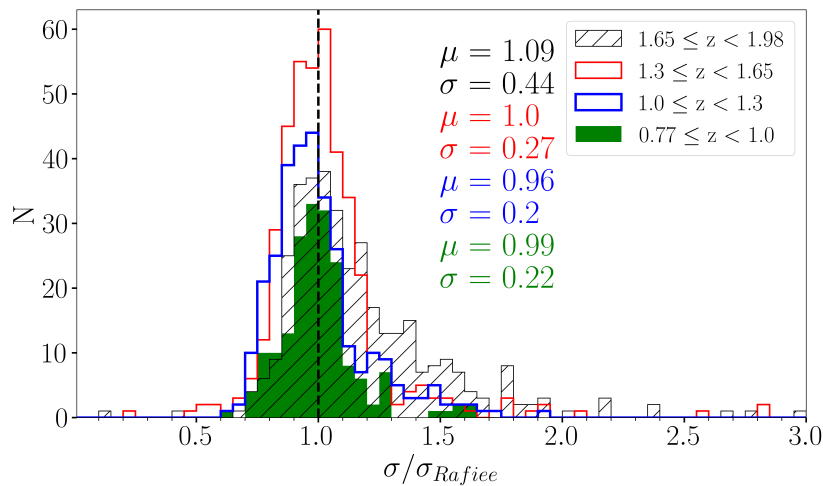
gdje su $\langle \lambda^2 \rangle$ i λ_0 drugi, odnosno prvi momenti profila emisijske linije $P(\lambda)$. Za prilagodbu gausijana na liniju Mg II iz podataka je odabran interval valnih duljina od $\pm 7 \text{ \AA}$ oko vrha emisijske linije, dok je kod računa drugom metodom odabran interval $\pm 33 \text{ \AA}$ oko vrha linije jer su takvim odabirom dobiveni rezultati koji se najbolje poklapaju s onima iz [18]. U tom članku širina linija je određena metodom disper-



Slika 2.8: Omjeri izračunatih vrijednosti širine linija Mg II s vrijednostima širine te linije prezetih iz kataloga uz [18]. Crnom bojom je označena širina dobivena iz disperzije, a crvenom iz FWHM gausijana. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

zije, što je potkrijepljeno tvrdnjom da je relacija između kvadrata korijena srednje vrijednosti (eng. *root mean square*, rms) disperzije linija s vremenskim kašnjenjem kartiranja jeke manje raspršena od iste relacije s kvadratom korijena srednje vrijednosti pune širine na polovici maksimuma gausijana [28]. Račun širine linije tom metodom je također osjetljiviji na "krila" emisijske linije [29]. Kako je prikazano na histogramu na slici 2.8, obje metode mogu poslužiti za određivanje širine emisijske linije, ali su vrijednosti dobivene iz disperzije puno manje raspršene u odnosu na vri-

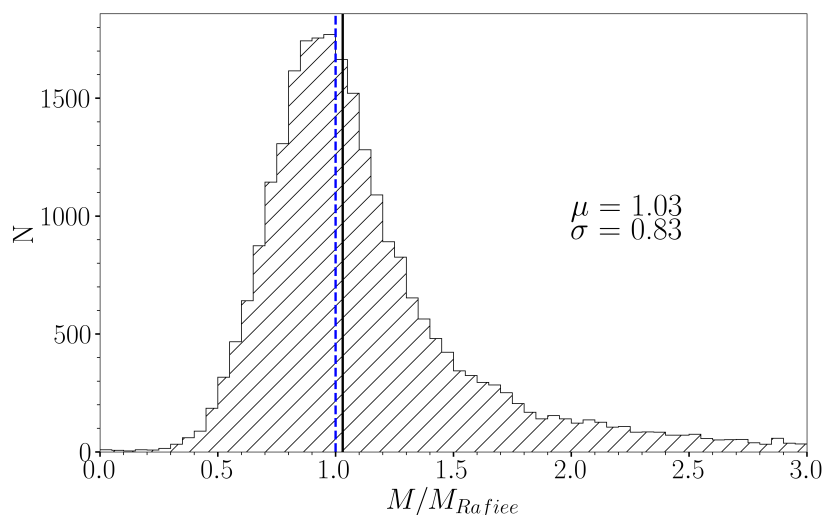
jednosti iz [18] pa se one uzimaju kao relevantne. Također, za obje metode postoji "rep" u histogramu za omjere širina linija $\gtrsim 1.3$ te je ustanovljeno da je on najveći za crvene pomake $1.65 < z < 2$ što je vidljivo i na histogramu na slici 2.9. Priroda tog "repa" nije razriješena jer je za nasumično odabrane spektre kvazara čiji je omjer mase SMBH $\gtrsim 1.3$ ustanovljeno da se ne razlikuju značajno od spektara gdje je omjer mase oko 1. Potencijalno rješenje leži u tome da se za svaki spektar uzme drukčiji interval valnih duljina oko vrha linije Mg II za koji se vrši račun širine relacijama 2.6. Kako je već ranije navedeno, u ovom radu se koristio interval $\pm 33 \text{ \AA}$, dok u članku s čijim vrijednostima se uspoređuje nije navedeno koji interval ili intervali su korišteni.



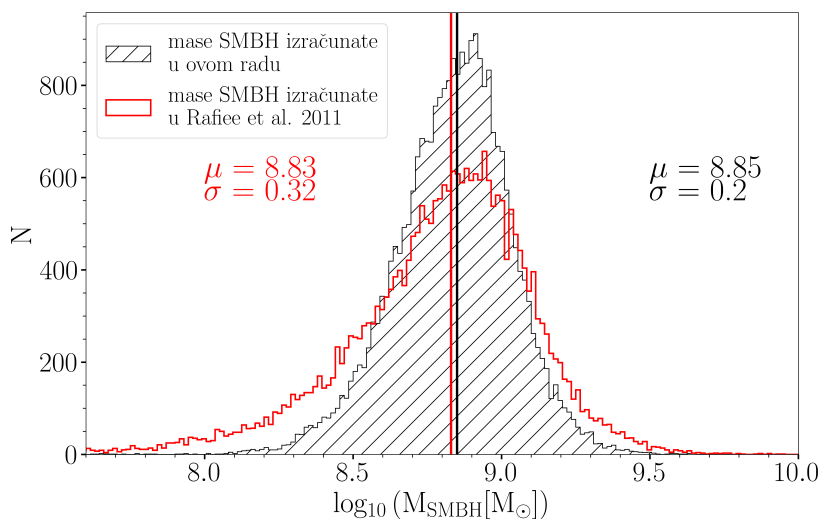
Slika 2.9: Omjeri izračunatih vrijednosti širine linija Mg II, koristeći relacije (2.6) s vrijednostima širine te linije preuzetih iz kataloga uz [18] za različite intervale crvenih pomaka. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

2.3 Rezultati

Nakon kalibracije opisane u odjeljku 2.2, algoritam za račun mase supermasivnih crnih rupa unutar kvazara je izvršen na cijelom katalogu iz [18] te su uspješno izračunate mase za 26 453 kvazara od 27 602. Rezultati su prikazani na slici 2.10. Kao što se i očekivalo, medijan omjera dobivenih vrijednosti mase je ≈ 1 . Zbog kvadratne ovisnosti mase o širini linije, spomenuti "rep" koji je dobiven u histogramu omjera širine linija je ovdje naglašeniji te utječe na povećanje medijana i standardne devijacije, čije vrijednosti se također nalaze na slici 2.10. Također, na slici 2.11 su prikazani histogrami vrijednosti masa izračunatih u ovom radu i onih iz [18]. Ako



Slika 2.10: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH s vrijednostima masa SMBH preuzetih iz kataloga uz [18]. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.



Slika 2.11: Vrijednosti izračunatih masa SMBH u ovom radu i vrijednosti masa SMBH izračunate u [18]. Mase su izražene kao vrijednosti logaritama s bazom 10 od iznosa masa danih u Sunčevim masama. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

se "repovi" izuzmu, oba histograma su centrirana oko jedinice te su mase uglavnom veće od spomenutih 3.3×10^8 Sunčevih masa što je u odjeljku 1.2.4 navedeno kao minimum mase SMBH unutar prosječnih kvazara. Zbog postojanja tih "repova" i nemogućnosti njihovog objašnjenja postoji sumnja u valjanost ovog pristupa te je stoga bilo potrebno testirati drukčiji pristup proračuna masa SMBH.

3 Drugi pristup: metoda opisana u Wu i Shen, 2022.

Drugi pristup proračuna masa supermasivnih crnih rupa je vezan uz članak Wu i Shen, 2022. [30]. U tom članku korišteni su spektri iz SDSS-ove najnovije baze kvazara (*Data Release 16 Quasar Catalog*, DR16Q) koji pokrivaju interval crvenih pomaka $0.1 \lesssim z \lesssim 6$. Zbog širokog raspona crvenih pomaka u proračunima masa koristi se nekoliko emisijskih linija, a to su $H\beta$, Mg II i C IV. Pretpostavljena relacija za masu je:

$$\log \left(\frac{M_{\bullet}}{M_{\odot}} \right) = a + b \log \left(\frac{\lambda L_{\lambda}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right) + 2 \log \left(\frac{\text{FWHM}}{\text{km s}^{-1}} \right) \quad (3.1)$$

gdje su a i b empirijski određeni parametri kroz ranija istraživanja kao npr. [31] i [32] te su njihove vrijednosti dane u tablici 3.1. Ponovno je cilj pokušati reproducirati rezultate masa kakve su dobili autori referentnog članka. Prilikom računa mase sada je korištena Λ CDM kozmologija s Hubbleovom konstantom $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ te $\Omega_m = 0.3$.

	$H\beta$	Mg II	C IV
a	0.91	0.74	0.66
b	0.5	0.62	0.53

Tablica 3.1: Tablica parametara korištenih pri proračunu mase SMBH za pojedine emisijske linije.

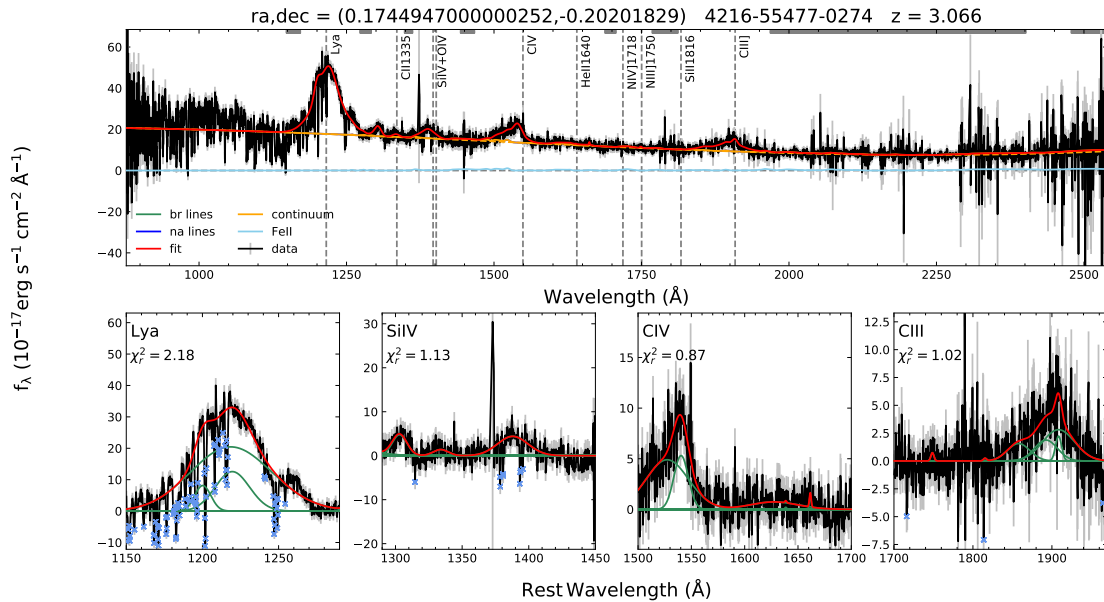
3.1 Podaci

Spektrografi na SDSS teleskopu nadograđeni su 2009. godine u sklopu projekta Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (BOSS) [33] koji je fokusiran na opažanja širenja Svemira putem barionskih akustičnih oscilacija. Tom nadogradnjom je povećana pokrivenost opaženih valnih duljina te iznosi $\sim 3650\text{-}10\,400 \text{ \AA}$. Također, BOSS spektrografi se sastoje od 1000 optičkih vlakana dijametara $2''$ dok se oni stariji sastoje od 640 vlakana čiji je dijametar $3''$. Spektralna rezolucija je ostala otprilike jednaka, ali je smanjen utjecaj šuma.

Spektri pojedinih objekata u DR16Q ponovno su spremljeni u FITS datotekama, ali u drukčijem rasporedu jedinica zaglavlja i podataka [34]. Od četiri ili pet jedinica,

u računu su potrebne dvije - *HDU 0* s osnovnim podacima o izvoru i *HDU 1* koji sadrži podatke o toku zračenja na pojedinim valnim duljinama.

3.2 Analiza i rezultati



Slika 3.1: Gornji panel prikazuje primjer jednog spektra kvazara rekonstruiranog pomoću PyQSOFit algoritma. Kvazar je centriran na $\alpha = 0.1745^{\circ}$, $\delta = -0.2020^{\circ}$ te se nalazi na crvenom pomaku $z = 3.066$. Snimljen je koristeći ploču broja 4216, s optičkim vlaknom broja 274 na modificirani julijanski datum 55477. Crnom bojom je prikazan spektar iz *DR16Q*, a crvenom bojom rekonstruirani spektar. Svijetlo plavi križići predstavljaju podatke koji ne ulaze u model za prilagodbu. Ostalim bojama su prikazane pojedine komponente spektra. U donjem panelu nalaze se pojedine emisijske linije unutar spektra s pripadnim prilagodbama gausijana.

Pri analizi spektara iz *DR16Q*, autori referentnog članka [30] koristili su algoritam PyQSOFit [35]. To je robustan algoritam koji radi prilagodbu zračenja kontinuuma i emisijskih linija na spektre te računa spektralne značajke kvazara, poput monokromatskog luminoziteta ili širine pojedinih emisijskih linija. Algoritam je podijeljen na nekoliko dijelova:

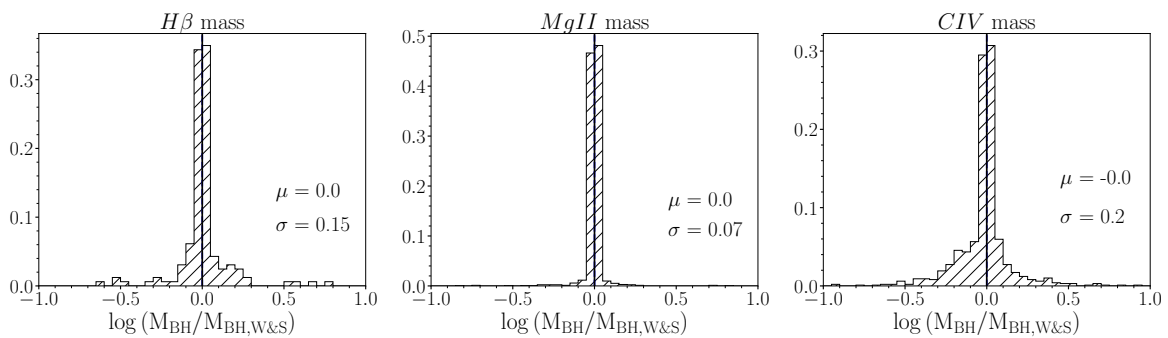
1. Prvo se radi korekcija na opaženi spektar zbog utjecaja prašine Mliječne staze
2. Potom slijedi dekompozicija spektra na komponente koristeći metodu analize glavnih komponenti opisanu u [36]
3. Zatim se kontinuirano zračenje prilagodi na valnim duljinama gdje nema emisijskih linija koristeći različite doprinose (zakon potencije, Fe II, polinomni do-

prinos, itd.)

4. Naposljetku se za pojedine emisijske linije vrši prilagodba jednog ili više gausijana
5. Nakon toga rezultati se spremaju i potom je moguće iz spremljenih podataka preuzeti potrebne parametre za proračun mase

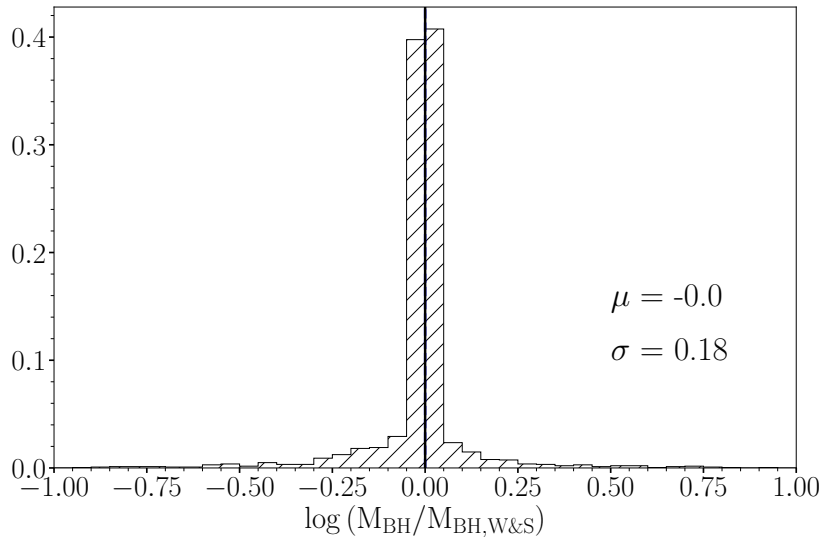
Postoji nekoliko izbornih parametara koje autori članka ne uključuju u analizu kroz ovaj algoritam (poput komponente Balmerovog kontinuuma ili zračenja galaksije) jer bi zbog utjecaja šuma bila smanjena pouzdanost rezultata.

Algoritam kao ulazne parametre prima vrijednosti opaženih valnih duljina s pripadnim vrijednostima toka zračenja i inverzima varijance, kao i vrijednosti crvenih pomaka pojedinog objekta. Autori su radili popravku crvenih pomaka koristeći metodu opisanu u [37] te se takvi crveni pomaci koriste u daljnjem računu. Proračuni masa su za svaki spektar napravljeni koristeći sve tri navedene emisijske linije gdje god je moguće. Za pouzdanu vrijednost mase je odabrana ona dobivena s $H\beta$ za $z < 0.7$ dok su za veće crvene pomake korištene preostale dvije linije na različitim vrijednostima, ovisno o tome jesu li spektri dobiveni BOSS spektrografom ili starijim SDSS spektrografom. Kod BOSS spektrografa je Mg II linija odabrana kao pouzdanija za $0.7 \leq z < 2.0$, a C IV za $z \geq 2.0$ dok je za SDSS spektrograf Mg II linija pouzdanija za $0.7 \leq z < 1.9$ i C IV za $z \geq 1.9$.



Slika 3.2: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH koristeći PyQSOFit algoritam s vrijednostima masa SMBH preuzetih iz kataloga uz [30] za pojedinačne emisijske linije. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

Prvotni cilj je bio pokušati reproducirati rezultate kakvi su dobiveni u referentnom članku koristeći istu metodu (PyQSOFit algoritam) i iste podatke (spektri iz DR16Q). Za nasumično odabran uzorak od 2427 spektra kvazara korišten je PyQSOFit kako bi

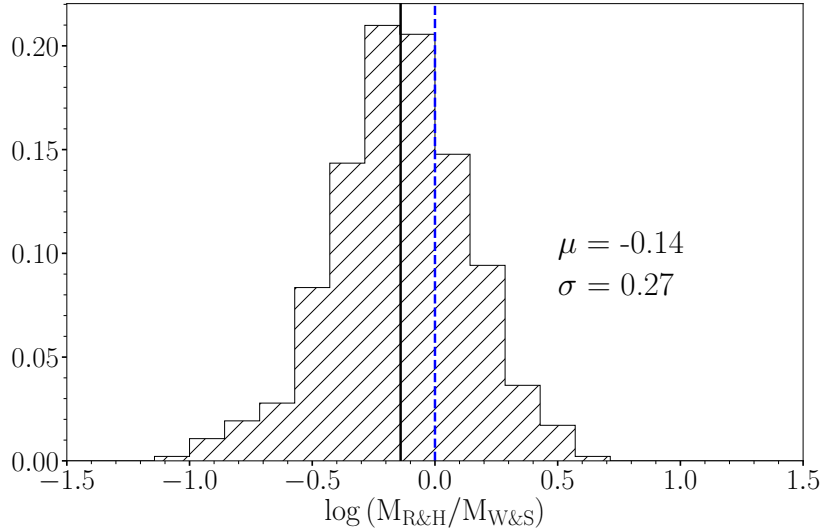


Slika 3.3: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH koristeći PyQSOFit algoritam s vrijednostima masa SMBH preuzetih iz kataloga uz [30] koristeći pouzdane vrijednosti masa. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

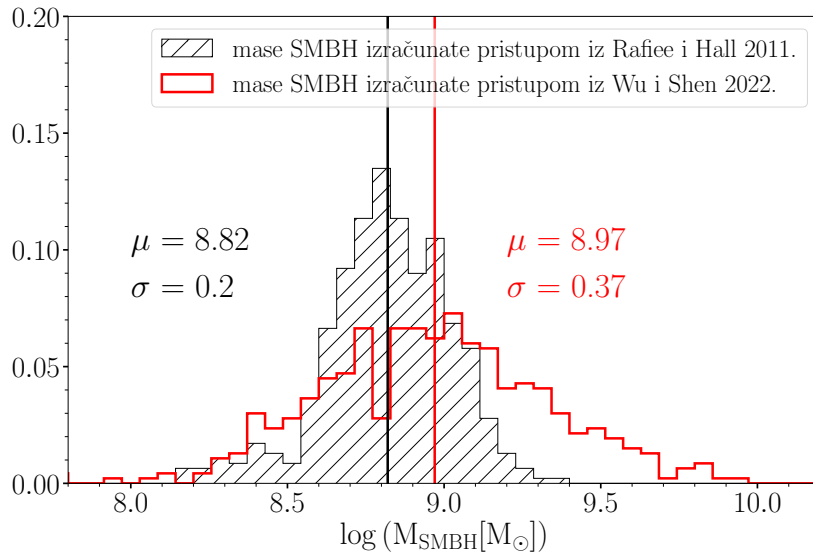
se izračunale mase SMBH. Rezultati su prikazani na slikama 3.2 i 3.3. Od ukupnog uzorka $\sim 85\%$ masa se slaže do 0.1 dex te je najbolje slaganje primijećeno za liniju Mg II pa možemo tvrditi da je većina masa iz kataloga [30] uspješno reproducirana uz minimalna odstupanja. Zbog prevelikog vremenskog trajanja izvršavanja algoritma na odabranom uzorku (~ 11 sati za uzorak od 2427 spektra) račun nije proveden na cijelom katalogu kvazara *DR16Q* u kojem se nalazi 750 414 spektara, ali se odabrani uzorak smatra reprezentativnim.

4 Usporedba oba pristupa

Usporedbom kataloga kvazara iz *Data Release 3* i odabranog uzorka iz *DR16Q* utvrđeno je da se 467 objekata nalazi u oba skupa. Za te kvazare napravljena je usporedba masa SMBH koja se nalazi na slikama 4.1 i 4.2. Prije usporedbe masa, radi kon-



Slika 4.1: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH koristeći pristup opisan u Rafiee i Hall, 2011. s vrijednostima masa SMBH izračunatih koristeći PyQSOFit algoritam. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.



Slika 4.2: Vrijednosti masa SMBH izračunatih koristeći pristup iz Rafiee i Hall, 2011. i vrijednosti masa SMBH izračunatih s PyQSOFit algoritmom. Mase su izražene kao vrijednosti logaritama s bazom 10 od iznosa masa danih u Sunčevim masama. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

zistentnosti su usklađeni kozmološki parametri te oni su postavljeni na vrijednosti

$H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ i $\Omega_m = 0.3$. Iz navedenih grafova je vidljivo da se vrijednosti masa razlikuju čak i do reda veličine. U [18] je navedeno kako proračun masa koristeći prilagodbe Gaussovih krivulja kod određivanja širina emisijskih linija može podcijeniti vrijednosti masa za manje masivne crne rupe, odnosno precijeniti ih za najveće. Zbog toga vjerojatno dolazi do tolikih odstupanja u vrijednostima masa. Također je potrebno uzeti u obzir kako proračun masa koristeći PyQSOFit (u kojemu su širine linija izračunate prilagodbama nekoliko gausijana) koristi sofisticiraniju metodu rekonstrukcije spektra kvazara pa se zbog toga ti rezultati uzimaju kao pouzdaniji. Isto tako, vrijedno je napomenuti da je uzorak od 467 objekata jako malen u usporedbi s brojem objekata u katalogu iz [18] (27 602), odnosno katalogu iz [30] (750 414).

5 Primjena računa masa na spektre iz polja COSMOS

Uzimajući u obzir da je pristup proračuna masa SMBH u kvazarima iz SDSS-ovih spektara pomoću PyQSOFit algoritma (pristup detaljnije opisan u poglavlju 3) izabran kao reprezentativan, ideja je primijeniti ga na spektre iz pregleda neba *Cosmic Evolution Survey* (COSMOS) [38]. Radi se o području neba veličine 2 kvadratna stupnja, centriranom na koordinatama $\alpha = 150.11917$ i $\delta = 2.20583$. To područje je promatrano na raznim valnim duljinama s gotovo svim većim svjetskim teleskopima do crvenog pomaka $z \sim 6$.

Koristeći katalog spektroskopskih crvenih pomaka objekata iz polja COSMOS koji nije javno dostupan (privatna komunikacija, M. Salvato, 2017), napravljena je usporedba koordinata s katalogom spektara kvazara iz SDSS-ovog kataloga *DR16Q*. Pronađeno je da za maksimalan radijus od 0.5 kutnih sekundi postoji poklapanje za 273 objekata koji nemaju spektre dobivene SDSS-ovim spektrografom. Ti objekti snimljeni su s nekoliko različitih spektrografa te je zbog jednostavnosti kalibracije računa odlučeno da će se u analizi koristiti oni koji su dobiveni iz samo jednog izvora, a to je projekt zCOSMOS [39].

5.1 zCOSMOS - promatranja i podaci

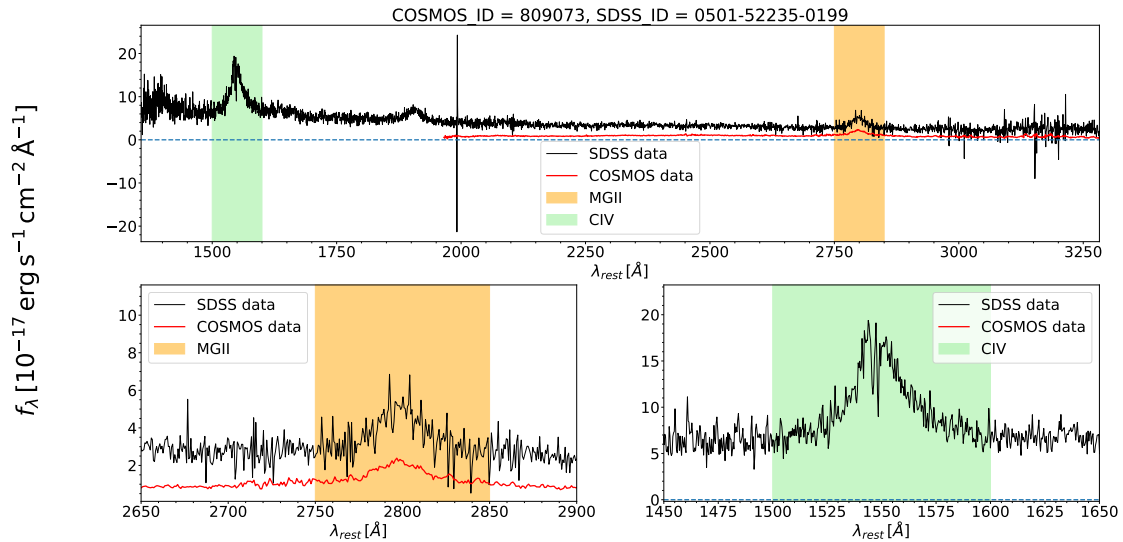
zCOSMOS projekt za svoja promatranja koristi *Visible Multi-Object Spectrograph* (VIMOS) koji je stavljen na *Very Large Telescope (Melipal)* (VLT) u Čileu. Projekt je podijeljen na dva dijela - zBRIGHT i zDEEP. zBRIGHT je promatrao galaksije u cijelom COSMOS polju na crvenim pomacima do $z < 1.2$ dok je zDEEP bio fokusiran na manji broj galaksija na crvenim pomacima $1.4 < z < 3$. Za potrebe ovog rada korišteno je 55 spektara iz zBRIGHT kataloga. Ti spektri snimani su koristeći procjepe veličine 1" s rezolucijom $R \sim 600$ na valnim duljinama 5550 – 9450 Å.

Podaci o spektru su pohranjeni u FITS formatu, gdje druga jedinica zaglavlja i podataka sadrži podatke o valnim duljinama i monokromatskom toku zračenja.

5.2 Analiza i rezultati

Zbog različite tehnike spektroskopije i razlučivosti SDSS i COSMOS spektara, prvo su vizualno uspoređeni spektri kako bi se vidjelo postoje li odstupanja. Utvrđeno

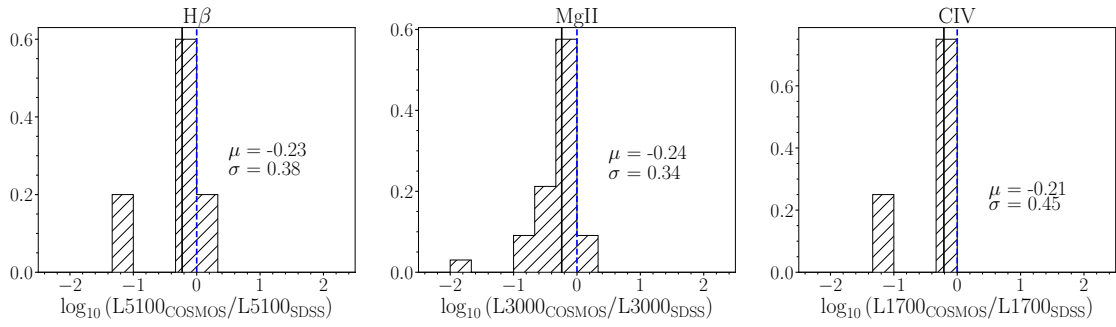
je da velik broj COSMOS spektara ima različite vrijednosti monokromatskog toka zračenja u odnosu na SDSS spektre što je najvjerojatnije uzrok varijabilnosti zračenja. Također, kod nekih COSMOS spektara postoji i veća razlika u crvenim pomacima u odnosu na SDSS spektre. Važno je napomenuti da je maksimalna razlika u crvenim pomacima $\approx 4\%$. Primjeri spektara prikazani su na slikama 5.1.



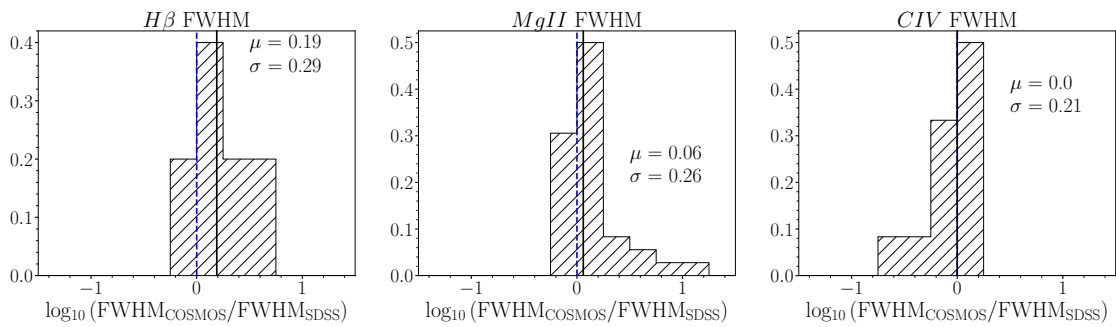
Slika 5.1: Primjer usporedbe zBRIGHT i SDSS spektra za isti kvazar. Navedeni su identifikatori objekta iz oba promatranja. Koordinate na kojima se nalazi su $\alpha \approx 150.762^\circ$, $\delta \approx 1.869^\circ$ i $z \approx 1.804$.

Na zBRIGHT spektre primijenjen je PyQSOFit algoritam za rekonstrukciju spektra i račun masa SMBH. Korišteni su kozmološki parametri $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ i $\Omega_m = 0.3$. Zbog manjeg intervala valnih duljina na kojima su promatrani objekti u zCOSMOS projektu, nekim kvazarima nije bilo moguće odrediti monokromatski luminozitet na 1350 \AA . Zbog toga je za račun mase pomoću linije CIV korištena je vrijednost monokromatskog luminoziteta na 1700 \AA . Rezultati su uspoređeni s vrijednostima masa SMBH (i ostalih parametara) izračunatih za SDSS spektre istih objekata te su prikazani na slikama 5.2, 5.3 i 5.4.

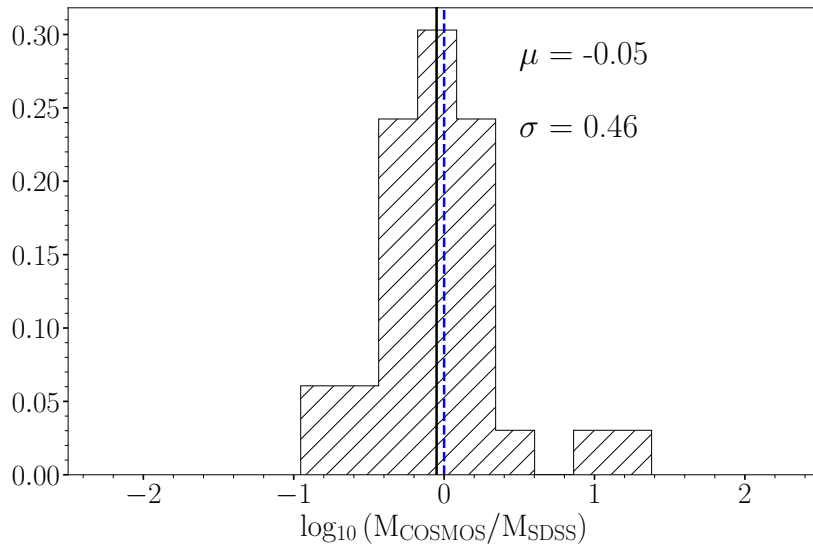
Unatoč tome što neki zCOSMOS spektri imaju različite vrijednosti tokova zračenja i različite širine emisijskih linija, većina masa se podudara, što pokazuje medijan koji je od nule odmaknut tek $\approx 12\%$. Također, razlike u masi idu i do reda veličine, ali je standardna devijacija unutar faktora tri u odnosu na rezultate masa iz SDSS spektara te se $\sim 80\%$ masa slaže do $\sim 0.4 \text{ dex}$.



Slika 5.2: Omjeri izračunatih vrijednosti monokromatskog luminoziteta iz zBRIGHT spektara s vrijednostima iz SDSS spektara. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.



Slika 5.3: Omjeri izračunatih vrijednosti širine emisijskih linija iz zBRIGHT spektara s vrijednostima širine tih linija u SDSS spektrima. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.



Slika 5.4: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH iz zBRIGHT spektara s vrijednostima iz SDSS spektara. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python NumPy biblioteke.

6 Zaključak

U ovom radu računale su se mase supermasivnih crnih rupa u kvazarima. Korištena su dva pristupa proračuna masa, jedan koji prati metodu opisanu u Rafiee i Hall, 2011 [18] i drugi koji prati metodu opisanu u Wu i Shen, 2022 [30]. Oba pristupa su prvotno korištena za proračun masa koristeći spektre iz *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) pregleda neba.

Prvi pristup koristi spektre iz SDSS-ove baze *Data Release 3* te se ti kvazari nalaze na crvenim pomacima $0.7 < z < 2$ pa je za proračun korištena emisijska linija Mg II, kao i monokromatski luminozitet na 3000 \AA . Vrijednosti masa su većinom u intervalu $10^8 - 10^{9.5} M_{\odot}$. Za kalibraciju algoritma korišten je nasumičan uzorak od 1369 kvazara. Na svaki spektar je prilagođen Savitzky-Golay filter radi uklanjanja šuma. Za račun radijusa područja širokih linija bilo je potrebno izračunati tok zračenja na 3000 \AA u sustavu mirovanja koji je određen dvjema metodama, prilagodbom kontinuiranog zračenja i interpolacijom kroz 3 najbliže vrijednosti oko zadane valne duljine. Potonja metoda se pokazala pouzdanijom pa se njeni rezultati uzimaju kao relevantni. Potom je iz toka zračenja određen monokromatski luminozitet kontinuuma na 3000 \AA , kao i radijus područja širokih linija koristeći relacije opisane u odjeljku 2. Širina linije Mg II je također određena dvjema metodama, prilagodbom Gaussove krivulje i računom disperzije linije koristeći drugi i prvi moment profila emisijske linije. Vrijednosti dobivene drugom metodom su manje raspršene u odnosu na one iz [18], ali u obje metode postoji "rep" za omjere širina linija $\gtrsim 1.3$ čija priroda nije razriješena, no utvrđeno je da se on javlja najviše za $1.65 < z < 2$. Mase određene metodom objašnjenom u ovom radu dobro se slažu s onima iz [18], izuzev već spomenutog "repa" koji se iz širine linije kvadratno propagira u masu.

Drugi pristup koristi spektre iz najnovije SDSS-ove baze kvazara *Data Release 16 Quasar Catalog*. Ti kvazari se nalaze na crvenim pomacima $0.1 \lesssim z \lesssim 6$ pa se u računu masa osim linije Mg II koriste i linije C IV, kao i $H\beta$, s pripadajućim monokromatskim luminozitetima na 1350 \AA , odnosno 5100 \AA . Ovaj pristup koristi algoritam PyQSOFit [35] za proračun masa. Taj algoritam je sofisticiraniji od onog vlastito napisanog za prvi pristup proračuna masa jer uzima u obzir utjecaj prašine Mliječne staze, zračenje Fe II, rekonstruira spektre koristeći metodu analize glavnih komponenti, itd. Također, kod prilagodbe širine emisijskih linija koristi se više Gaussovih

krivulja te se ukupna širina računa kao njihov zbroj. Zbog računalne zahtjevnosti algoritma, račun je proveden samo na malom uzorku kvazara i to njih 2427. Uspješno su rekonstruirane vrijednosti masa dobivene u članku [30] te se $\sim 85\%$ masa slaže do 0.1 dex. Te mase su potom uspoređene s masama dobivenima u prvom pristupu. Iako postoji malo veće odstupanje, mase dobivene PyQSOFit algoritmom se uzimaju kao relevantne zbog sofisticiranije metode rekonstrukcije spektra kvazara.

Naposljetku, račun masa algoritmom PyQSOFit je primijenjen na spektre iz pregleda nema Cosmic Evolution Survey (COSMOS). Ti spektri su snimani na kraćem intervalu valnih duljina pa u onima u kojima je prisutna linija C IV najčešće nedostaje podatak o toku zračenja na 1350 Å. Zbog toga je u računu alternativno korištena vrijednost na 1700 Å. Također, važno je napomenuti da su COSMOS spektri snimani različitom tehnikom spektroskopije od SDSS-ovih, kao i to da nisu snimani u istom trenutku kao i SDSS spektri pa zbog varijabilnosti kontinuiranog zračenja kvazara postoje razlike u vrijednostima toka zračenja između spektara. Unatoč tomu, pokazalo se da se $\sim 80\%$ masa slaže u vrijednostima do ~ 0.4 dex.

Literatura

- [1] Frolov, Valeri P.; Zelnikov, A. Introduction to Black Hole Physics. 1st ed. : Oxford University Press, 2011.
- [2] Event Horizon Telescope Collaboration et al. First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole. // *ApJL*. Vol. 875, 1(2019), str. L4.
- [3] Netzer, H. The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei. 1st ed. : Cambridge University Press, 2013.
- [4] Why galaxy M77's active nucleus is hiding, (16.02.2022.), Unified model of AGN, pristupljeno 21. ožujka 2023.,
<https://astronomy.com/news/2022/02/m77s-active-nucleus-is-hiding> 2023.
- [5] Richstone, D. et al. Supermassive black holes and the evolution of galaxies. // *Nature*. Vol. 385, 6701(1998), str. A14.
- [6] Heckman, Timothy M.; Best, Philip N. The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe. // *ARA&A*. Vol. 52, (2014), str. 589-660.
- [7] Sparke, Linda S.; Gallagher, John S. Galaxies in The Universe: An Introduction. 2nd ed. : Cambridge University Press, 2007.
- [8] Novikov, I. D.; Thorne, K. S. Astrophysics of black holes. // Black Holes (Les Astres Occlus) / edited by C. DeWitt and B. DeWitt, New York : Gordon and Breach, 1973. str. 343-450.
- [9] Liu, B. F.; Qiao, E. Accretion around black holes: The geometry and spectra. // *iScience*. Vol. 25, 1(2022), str. 103544
- [10] Harrison, C. Observational constraints on the influence of active galactic nuclei on the evolution of galaxies. Doktorski rad. Durham University, UK, 2014.
- [11] George, I. M.; Fabian, A. C. X-ray reflection from cold matter in Active Galactic Nuclei and X-ray binaries. // *MNRAS*. Vol. 249, (1991). str. 352.

- [12] Telfer, Randal C. et al. The Rest-Frame Extreme-Ultraviolet Spectral Properties of Quasi-stellar Objects. // *ApJ*. Vol. 565, 2(2002), str. 773-785.
- [13] Peterson, B. M. The Broad-Line Region in Active Galactic Nuclei // *Physics of Active Galactic Nuclei at all Scales* / edited by Danielle Alloin, Rachel Johnson and Paulina Lira : Springer, Berlin and Heidelberg, Vol. 693, (2006), str. 77
- [14] Carroll, Bradley W.; Ostlie, Dale A. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2nd ed. Pearson Education Limited, 2014.
- [15] Kawaguchi, T. et al. Temporal $1/f^\alpha$ Fluctuations from Fractal Magnetic Fields in Black-Hole Accretion Flow // *Publ. Astron. Soc. Japan*. Vol. 52, (2000), str. L1.
- [16] Bentz, Misty C. AGN Reverberation Mapping // *Astronomy at High Angular Resolution* / edited by Henri M. J. Boffin, Gaitee Hussain, Jean-Philippe Berger and Linda Schmidtbreick : *Astrophysics and Space Science Library*, Vol. 439, (2016), str. 249
- [17] Bentz, Misty C. et al. The Radius-Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei: The Effect of Host-Galaxy Starlight on Luminosity Measurements // *ApJ*. Vol. 64, 1(2006), str. 133-142.
- [18] Rafiee, A.; Hall, Patrick B. Supermassive Black Hole Mass Estimates Using Sloan Digital Sky Survey Quasar Spectra at $0.7 < z < 2$ // *ApJS*. Vol. 194, 2(2011), str. 42.
- [19] Wandel, A. et al. Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. I. Comparing the Photoionization and Reverberation Techniques // *ApJ*. Vol. 526, 2(1999), str. 579-591.
- [20] Kaspi, S. et al. Reverberation Measurements for 17 Quasars and the Size-Mass-Luminosity Relations in Active Galactic Nuclei // *ApJ*. Vol. 533, 2(2000), str. 631-649.
- [21] Gunn, James E. et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey // *AJ*. Vol. 131, 4(2006), str. 2332-2359.

- [22] SDSS spectrograph plate, (17.05.2012), pristupljeno 19. travnja 2023.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SDSS_spectrograph_plate.JPG
This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.
- [23] Survey Interface File for Spectroscopic Output 1-d Spectrum, (2004), 1D Spectro Image, pristupljeno 19. travnja 2023.
<https://classic.sdss.org/dr3/dm/flatFiles/spSpec.php>
- [24] Savitzky-Golay filter (2005), pristupljeno 20. travnja 2023.
https://en.wikipedia.org/wiki/SavitzkyGolay_filter
- [25] Stoughton, C. et al. Data Processing Factory for the Sloan Digital Sky Survey // Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries / edited by J. Anthony Tyson and Sidney Wolff : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 4836, (2002), str. 339-349.
- [26] Vanden Berk; Daniel E. et al. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey // *AJ*. Vol. 122, 2(2001), str. 549-564.
- [27] Adelman-McCarthy; Jennifer K. et al. The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *ApJS*. Vol. 175, 2(2008), str. 297-313.
- [28] Peterson B. M. et al. Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database // *ApJ*. Vol. 613, 2(2004), str. 682-699.
- [29] Collin S. et al. Systematic effects in measurement of black hole masses by emission-line reverberation of active galactic nuclei: Eddington ratio and inclination // *A&A*, Vol. 456, 1(2006), str. 75-90.
- [30] Wu, Qiaoya; Shen Yue A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 16 // *ApJS*, Vol. 263, 2(2022), str. 42.
- [31] Vestergaard, M.; Peterson, Bradley M. Determining Central Black Hole Masses in Distant Active Galaxies and Quasars. II. Improved Optical and UV Scaling Relationships // *ApJ*. Vol. 641, 2(1999), str. 689-709.

- [32] Shen, Yue et al. A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 // *ApJS*. Vol. 194, 2(2011), str. 45.
- [33] Smee, Stephen A. et al. The Multi-object, Fiber-fed Spectrographs for the Sloan Digital Sky Survey and the Baryon Oscillation Spectroscopic Survey // *AJ*. Vol. 146, 2(2013), str. 32.
- [34] Data model: spec, (2014), pristupljeno 24. travnja 2023.,
https://data.sdss.org/datamodel/files/BOSS_SPECTRO_REDUX/RUN2D/spectra/PLATE4/spec.html
- [35] Guo, H. et al. PyQSOFit: Python code to fit the spectrum of quasars // *Astrophysics Source Code Library*. (2018).
- [36] Yip, C. W. et al. Spectral Classification of Quasars in the Sloan Digital Sky Survey: Eigenspectra, Redshift, and Luminosity Effects // *AJ*. Vol. 128, 6(2004), str. 2603-2630.
- [37] Shen, Yue et al. The Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping Project: Velocity Shifts of Quasar Emission Lines // *ApJ*. Vol. 831, 1(2016), str. 7.
- [38] Scoville, N. et al. The Cosmic Evolution Survey (COSMOS): Overview // *ApJS*. Vol. 172, 1(2007), str. 1-8.
- [39] Lilly, S. J. et al. zCOSMOS: A Large VLT/VIMOS Redshift Survey Covering $0 < z < 3$ in the COSMOS Field // *ApJS*. Vol. 172, 1(2007), str. 70-85.