

Mase središnjih supermasivnih crnih rupa u kvazarima

Luka Matijević*

mentor: prof.dr.sc. Vernesa Smolčić†

Fizički odsjek, Prirodoslovno-matematički fakultet, Bijenička 32, Zagreb

(Dated: 21. siječnja 2023.)

U ovom radu korištena je metoda kartiranja jeke kako bi se odredile mase supermasivnih crnih rupa unutar 26453 kvazara čiji spektri su snimljeni Sloan Digital Sky Survey pregledom neba te su javno objavljeni u *Data Release 3*. Mase je moguće odrediti zbog empirijske poveznice između radijusa područja širokih linija unutar aktivnih galaktičkih jezgara i luminoziteta kontinuiranog zračenja na 3000 Å u sustavu mirovanja. Tok zračenja na 3000 Å je određen interpolacijom 3 najbliže vrijednosti oko zadane valne duljine, što se pokazalo pouzdanijim od vrijednosti dobivenih prilagodbom zračenja kontinuuma. Za određivanje masa ovom metodom je korištena širina linije Mg II. Umjesto računa širine prilagodbom Gaussove krivulje, korištena je metoda disperzije linija koja se pokazala pouzdanijom. Prilikom računanja parametara za određivanje mase, na spektar kvazara je prilagođen Savitzky-Golay filter radi uklanjanja šuma. Pokazano je da se vrijednosti masa dobivene ovom metodom dobro slažu s vrijednostima prethodno određenima sličnom metodom.

1. UVOD

U današnje vrijeme dobro je poznato da gotovo svaka od poznatih masivnih galaksija u svemiru u svom središtu sadrži supermasivnu crnu rupu (eng. *supermassive black hole*, SMBH) [Richstone et al. (1998)]. Crne rupe u središtima galaksija koje aktivno nakupljaju materiju zovu se aktivne galaktičke jezgre (eng. *active galactic nucleus*, AGN).

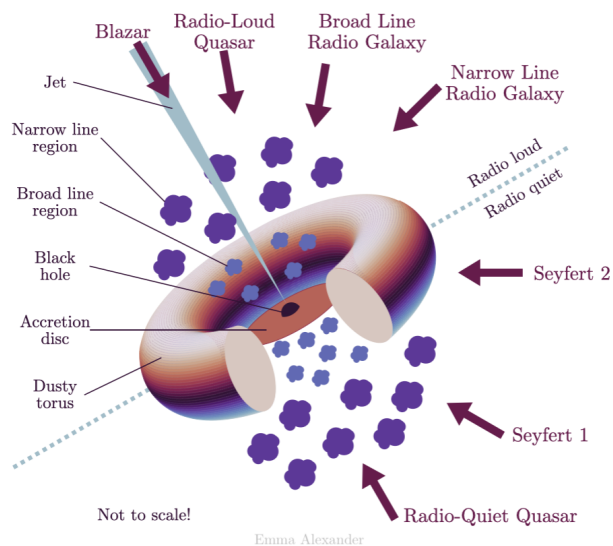
Središnji dio aktivne galaktičke jezgre je akrecijski disk u orbiti oko rotirajuće supermasivne crne rupe. Oko akrecijskog diska nalazi se torus neutralnog plina i prašine, a iz središta AGN-a, okomito na disk, ponekad izlaze relativistički mlazovi. Oni su najvjerojatnije uzrokovani snažnim magnetskim poljima koja se stvaraju priljevom materije u disk [Sparke and Gallagher: *Galaxies in The Universe: An Introduction*].

Faza aktivnih galaktičkih jezgara je zapravo povremen proces tijekom života supermasivne crne rupe i vjeruje se da ga pokreće stapanje crnih rupa ili sekularni procesi unutar galaksije [Heckman and Best (2014)].

Ovisno o luminozitetu i kutu promatranja aktivne galaktičke jezgre dijele se u razne podtipove (Seyfert 1 i 2, blazari, kvazari, itd.) što je grafički skicirano na slici 1.

Kvazari su podtip aktivnih galaktičkih jezgara čiji je luminozitet veći od luminoziteta galaksije u kojoj se nalaze te su jedni od najsjaajnijih izvora u svemiru. Luminozitet prosječnog kvazara iznosi $L = 5 \times 10^{39}$ W što znači da takvi objekti emitiraju 10^5 puta više energije nego prosječna galaksija poput Mliječne staze [Carroll and Ostlie: *An Introduction to Modern Astrophysics*]. Međutim, postoji gornja granica na luminozitet svakog sferno-simetričnog tijela u hidrostatskoj ravnoteži. On mora biti manji od Eddingtonovog luminoziteta:

$$L_{Ed} \simeq 1.5 \times 10^{31} \text{ W} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right),$$



Slika 1: Prikaz unificiranog modela AGN-ova. Akrecijski disk je okružen debelim torusom prašine koja zaklanja pogled u središte aktivne galaktičke jezgre. Razlika među pojedinim podtipovima AGN-ova ovisi o orijentaciji pravca gledanja i luminozitetu. Ilustracija autorice Emme Alexander, distribuirano putem CC BY 4.0 licence. [1]

što znači da je donja granica mase supermasivne crne rupe unutar prosječnog kvazara:

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

Kvazari se lako prepoznaju po optičkom spektru u kojemu se nalaze široke i uske linije nastale emisijom plina u blizini supermasivne crne rupe. Uske linije se javljaju zbog plina na udaljenostima nekoliko desetaka parseka¹,

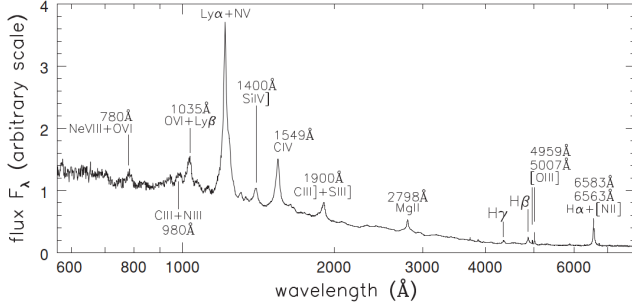
* luka.matijevic10@hotmail.com

† vs@phy.hr

¹ 1 pc = 3.0857 × 10¹⁶ m

dok je kod širokih plin na udaljenostima ≈ 0.01 pc. Zbog tako malih udaljenosti plina, odnosno njegovom položaju duboko unutar potencijalne jame SMBH, emisijske linije u spektru izgledaju dopplerovski proširene za nekoliko tisuća km s^{-1} te se zbog toga ta područja zovu područja širokih linija (eng. *broad line region*, BLR). Područja u kojima se javljaju uske linije se analogno zovu područja uskih linija (eng. *narrow line region*, NLR).

Obje vrste linija imaju izražen crveni pomak prema vid-



Slika 2: Primjer tipičnog ultraljubičastog i optičkog spektra kvazara s označenim spektralnim linijama.

Preuzeto iz Telfer et al. (2002).

ljivom spektru zbog recesijske brzine apsorbirajućeg materijala ili, na većim udaljenostima, zbog širenja Svemira. Takve široke i uske linije su posljedica fotoionizacije zračenja kontinuuma. Zračenje kontinuuma kvazara može se opisati sljedećom relacijom:

$$f_{\lambda} = C_{\lambda} \lambda^{-\alpha-2}, \quad (1)$$

gdje je α spektralni indeks, a C_{λ} normalizacijska konstanta [Netzer: *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*]. Spektralni indeks se određuje tako da se prethodna relacija prilagodi na spektar kvazara bez spektralnih linija, odnosno na zračenje kontinuuma.

Postoje određene varijacije u kontinuiranom zračenju čija priroda još nije potpuno poznata, ali se pretpostavlja da dolaze od magnetskih rekombinacija u akrecijskom disku [Kawaguchi et al. (2000)]. Te varijacije su kasnije primjećene u zračenju širokih emisijskih linija. Vremensko kašnjenje τ_{BLR} varijacija u širokim linijama u usporedbi s promjenom u kontinuumu predstavlja srednji slobodni put svjetlosti od akrecijskog diska do BLR. Pošto se pretpostavlja da je akrecijski disk kompaktan, vremensko kašnjenje ustvari daje prosječan radijus područja širokih linija R_{BLR} . Mjerenje tog parametra naziva se metoda kartiranja jeke te se koristi pri određivanju mase SMBH [Bentz (2016)]. Pošto je za metodu kartiranja jeke potrebno vidjeti široke linije u spektru AGN-a, ta metoda je jedino primjenjiva za tipove aktivnih galaktičkih jezgara kod kojih je to područje u pravcu gledanja, kao kod npr. kvazara.

Metoda kartiranja jeke pokazuje korelaciju između R_{BLR} i monokromatskog luminoziteta kontinuuma λL_{λ} [Bentz et al. (2006)]. Također, ta metoda pokazuje korelaciju između širina emisijskih linija σ s pripadajućim vre-

menkim kašnjenjem τ_{BLR} [Onken and Peterson (2002)], što pokazuje virijalizaciju plina u području širokih linija. Ta poveznica omogućuje procjenu mase crne rupe iz $\frac{GM}{R} \propto \sigma^2$ pretpostavljajući da širina virijalizirane emisijske linije prati virijalizirano kretanje emitiranog plina [Kollatschny (2003)]. Prema tome, masa supermasivne crne rupe može se zapisati kao:

$$\mathcal{M}_{SMBH} = \bar{f} \frac{R_{BLR} \sigma^2}{G}, \quad (2)$$

gdje je $\bar{f} = 5.3 \pm 0.6$ geometrijski kalibracijski faktor dobiven uspoređujući ovu metodu s drugim metodama određivanja masa, a G je gravitacijska konstanta. Kašnjenje varijacija u emisiji širokih spektralnih linija s varijacijama u kontinuumu može se procijeniti kao:

$$\tau_{BLR} = (29.44_{-5.51}^{+6.78}) l^{0.5}, \quad (3)$$

gdje je τ_{BLR} izražen u danima i:

$$l(\lambda) = \frac{\lambda L_{3000}}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}}, \quad (4)$$

je kvazarov monokromatski luminozitet kontinuuma na 3000 Å u sustavu mirovanja [Rafiee and Hall (2011)]. Radijus područja širokih linija tada se može odrediti kao:

$$R_{BLR} = c \tau_{BLR}, \quad (5)$$

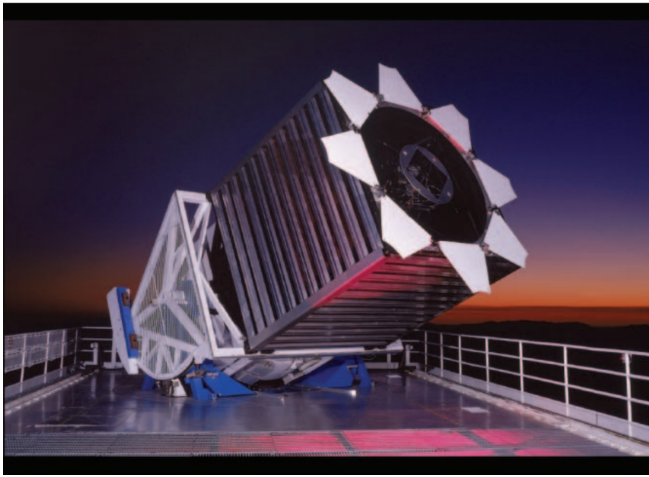
gdje je c brzina svjetlosti u vakuumu.

U ovom radu koristit će se metoda kartiranja jeke, uz gore objašnjene relacije, kako bi se odredile mase supermasivnih crnih rupa unutar kvazara te će se rezultati usporediti s onima dostupnima u Rafiee and Hall (2011), gdje je masa izračunata za 27602 kvazara na crvenim pomacima $0.7 < z < 2$. Za emisijsku liniju, čiju je širinu potrebno odrediti, koristit će se linija Mg II, čiji je vrh na 2799 Å u sustavu mirovanja. Također, pretpostavlja se Λ CDM kozmologija s Hubbleovom konstantom $H_0 = 71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ te $\Omega_m = 0.26$ kako bi se izračunale potrebne kozmološke konstante.

2. PODACI

Sloan Digital Sky Survey (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 su otad dostupna samo spektroskopska opažanja.

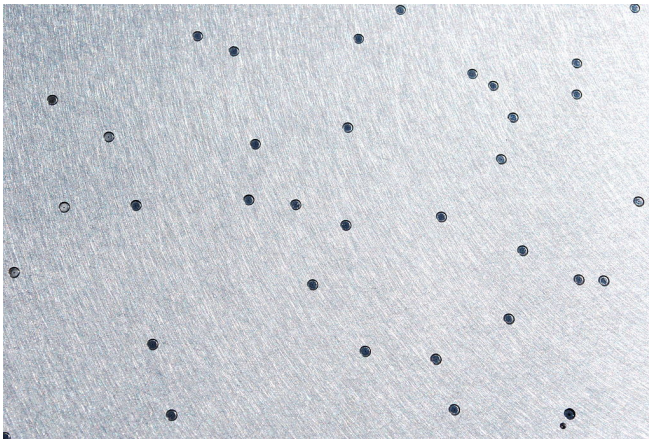
Fotometrijska kamera se sastoji od 30 CCD čipova rezolucije 2048×2048 piksela i time postiže ukupnu rezoluciju od približno 120 megapiksela. Radi smanjenja šuma kamera je ohlađena na 190 kelvina pomoću tekućeg dušika. Snimke su napravljene s fotometrijskim sustavom od pet filtera (tzv. u, g, r, i, z filteri). Te su snimke potom obrađene kako bi se napravio popis opaženih objekata s



Slika 3: 2.5-metarski teleskop projekta Sloan Digital Sky Survey. Slikano u smjeru zapada, s otvorenim kućištem teleskopa. Preuzeto iz Gunn et al. (2006).

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



Slika 4: Prikaz aluminijske ploče s izbušenim rupama kroz koje su provučena optička vlakna. Fotografija autora EdPost, distribuirano putem CC BY-SA 3.0 licence. [2]

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 javno objavio svoje podatke, a podaci koji se koriste u ovom seminaru dostupni su unutar trećeg takvog izdanja podataka, služ-

benog naziva *Data Release 3*. To su javno dostupni spektri kvazara koji pokrivaju interval valnih duljina 3800-9200 Å² koji 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. *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 [3]. Za rad s FITS datotekama korištena je Python Astropy biblioteka [4].

3. ANALIZA

Za 1369 nasumično odabranih kvazara čije su mase središnjih supermasivnih crnih rupa određene u Rafiee and Hall (2011) 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:

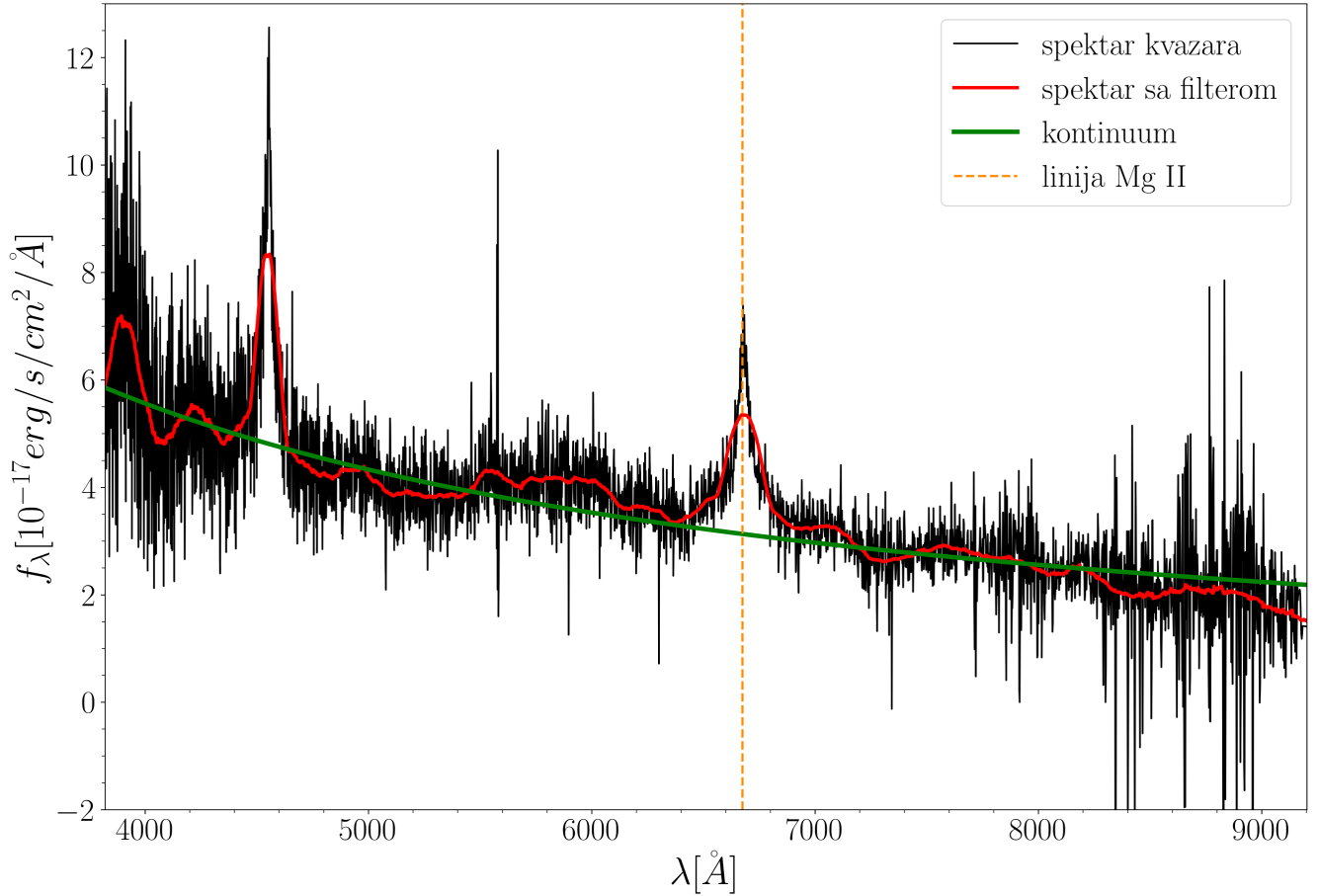
$$\lambda = 10^{\text{COEFF0} + n \times \text{COEFF1}},$$

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). 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 ± 100 Å oko njenog vrha. Kako bi se uklonio šum i prilagodba bila što uspješnija, na preostale podatke iz spektra je primjenjen Savitzky-Golay filter [5], dostupan unutar Python Scipy biblioteke [6]. Savitzky-Golay filter radi na principu konvolucije, tako što se na definirani interval podataka (*window_length*) prilagode polinomi zadanog stupnja (*polyorder*) metodom najmanjih kvadrata. Korištene vrijednosti tih parametara su *window_length* = 171 i *polyorder* = 3. Primjer jednog spektra kvazara s primjenjenim tim filterom i prilagođenim kontinuiranim zračenjem se nalazi na slici 5.

² Valne duljine su u opaženom sustavu, ne u sustavu mirovanja.

Ra = 147.733165°, Dec = -0.030653°, z = 1.3849,
Plate = 267, Fiber = 53, MJD = 51608



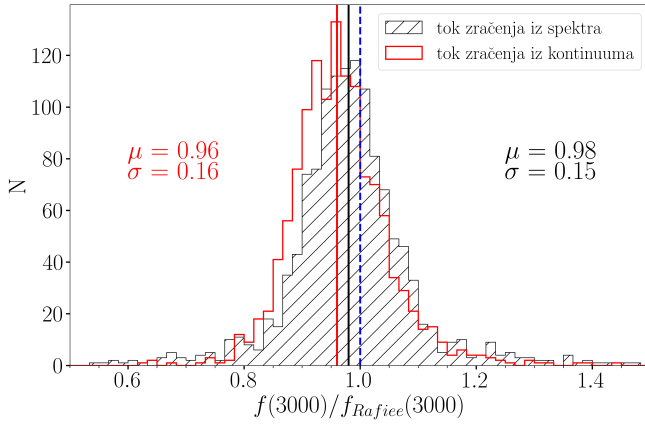
Slika 5: Spektar jednog od kvazara čija je masa SMBH određena u ovom radu. Kvazar je centriran na $\alpha = 147.733165^\circ$, $\delta = -0.030653^\circ$ te se nalazi na crvenom pomaku $z = 1.3849$. Snimljen je koristeći ploču broja 267, s optičkim vlaknom broja 53 na modificirani julijanski datum 51608. Crnom bojom je prikazan spektar iz *Data release 3*, a crvenom bojom je prikazan spektar na koji je primjenjen Savitzky-Golay filter s parametrima $window_length = 171$ i $polyorder = 3$. Zelenom bojom je označeno kontinuirano zračenje prilagođeno s relacijom 1.

3.1. Određivanje R_{BLR}

Za određivanje radijusa područja širokih linija, prvo je potrebno izračunati tok zračenja na 3000 Å u sustavu mirovanja. Za to je prvotno korištena vrijednost kontinuiranog zračenja na toj valnoj duljini, a potom vrijednost uzeta iz spektra interpolirana kroz tri najbliže vrijednosti oko zadane valne duljine. Kao što se vidi iz histograma na slici 6, vrijednosti dobivene za tok zračenja iz spektra su bliže onima iz Rafiee and Hall (2011) pa se one uzimaju u obzir prilikom daljnje analize. Sljedeće je potrebno izračunati monokromatski luminozitet na 3000 Å iz relacije (4) za što je potrebno izračunati luminozitet na 3000 Å. Luminozitet je vezan s tokom zračenja relacijom:

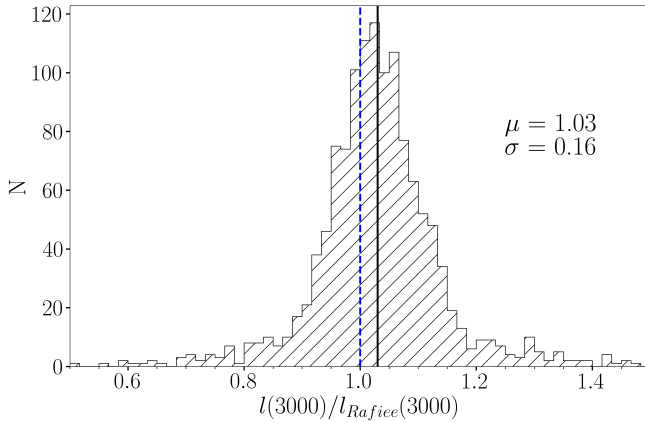
$$L_\lambda = 4\pi f_\lambda D_L^2, \quad (6)$$

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 Rafiee and Hall (2011). 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 Stoughton et al. (2002). Popravka je napravljena unakrsnom korelacijom medijana kompozitnog spektra kvazara sa spektrom iz *Data Release 3*, kako je detaljnije opisano u Vanden Berk et al. (2001). Također, zbog toga što su objekti u *Data Release 3* skalirani na tok zračenja za otvore teleskopa promjera 3 kutne sekunde, u Rafiee and Hall (2011) je napravljena popravka na luminozitetu s korekcijskom faktorom -0.35 mag što je opravdano u



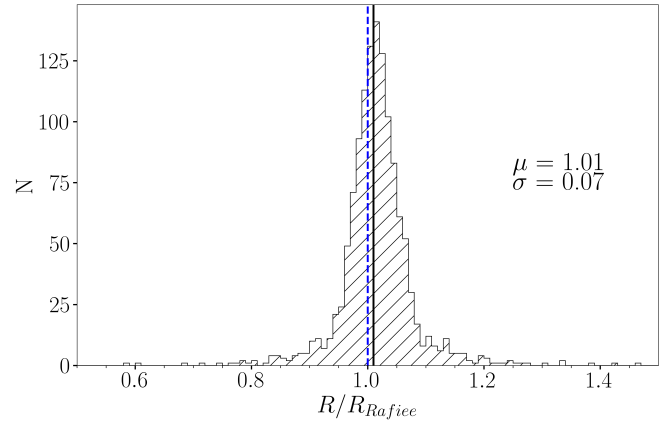
Slika 6: Omjeri izračunatih vrijednosti toka zračenja na 3000 Å u sustavu mirovanja s vrijednostima toka zračenja na istoj valnoj duljini preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011). Crvenom bojom je označen tok zračenja dobiven iz kontinuuma, a crnom onaj iz spektra dobiven interpolacijom kroz tri točke oko zadane valne duljine. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.

odjeljku 4.1.1 iz Adelman-McCarthy et al. (2008).



Slika 7: Omjeri izračunatih vrijednosti monokromatskog luminoziteta na 3000 Å u sustavu mirovanja s vrijednostima monokromatskog luminoziteta na istoj valnoj duljini preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011). Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.

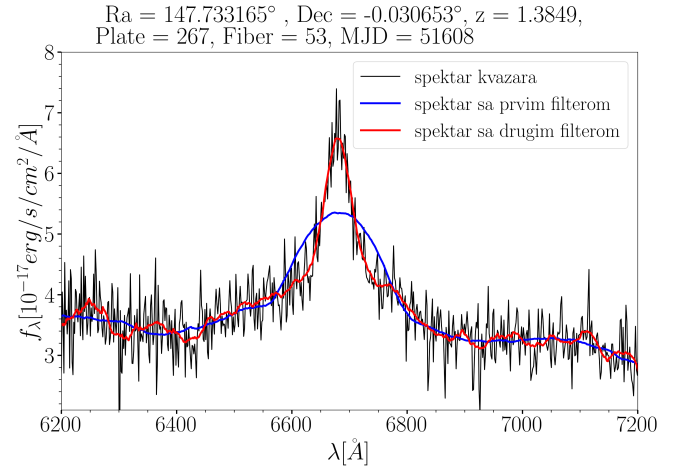
Uzimajući u obzir te korekcije, sada je moguće izračunati monokromatski luminozitet na 3000 Å i radijus područja širokih linija R_{BLR} te usporediti s vrijednostima dobivenim u Rafiee and Hall (2011). Rezultati su prikazani na slikama 7 i 8.



Slika 8: Omjeri izračunatih vrijednosti radijusa područja širokih linija s vrijednostima radijusa širokih linija preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011). Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.

3.2. 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 9 je prikazano



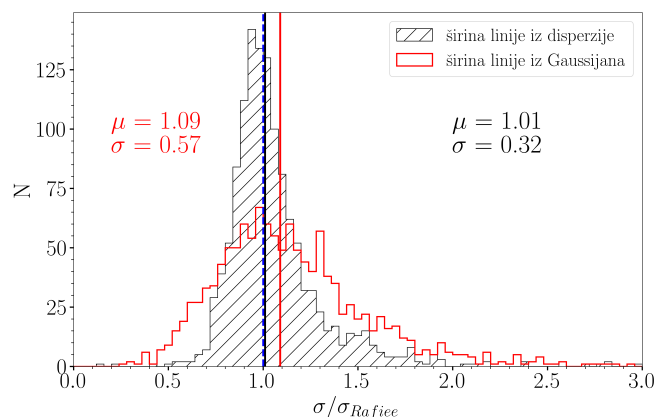
Slika 9: Spektar jednog od kvazara čija je masa SMBH određena u ovom radu. Kvazar je centriran na $\alpha = 147.733165^\circ$, $\delta = -0.030653^\circ$ te se nalazi na crvenom pomaku $z = 1.3849$. Snimljen je koristeći ploču broja 267, s optičkim vlaknom broja 53 na modificirani julijanski datum 51608. Crnom bojom je prikazan spektar iz *Data release 3*, crvenom bojom je prikazan spektar na koji je primjenjen Savitzky-Golay filter s parametrima *window_length* = 41 i *polyorder* = 3, a plavom bojom je prikazan spektar na koji je primjenjen Savitzky-Golay filter s parametrima *window_length* = 171 i *polyorder* = 3.

zana usporedba oba filtra za 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 izrazitno 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 (eng. *Full Width at Half Maximum*, FWHM) i računom disperzije linija sljedećim relacijama, preuzetim iz Rafiee and Hall (2011):

$$\begin{aligned}\sigma^2(\lambda) &= \langle \lambda^2 \rangle - \lambda_0^2, \\ \langle \lambda^2 \rangle &= \frac{\int \lambda^2 P(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda}, \\ \lambda_0 &= \frac{\int \lambda P(\lambda) d\lambda}{\int P(\lambda) d\lambda},\end{aligned}\quad (7)$$

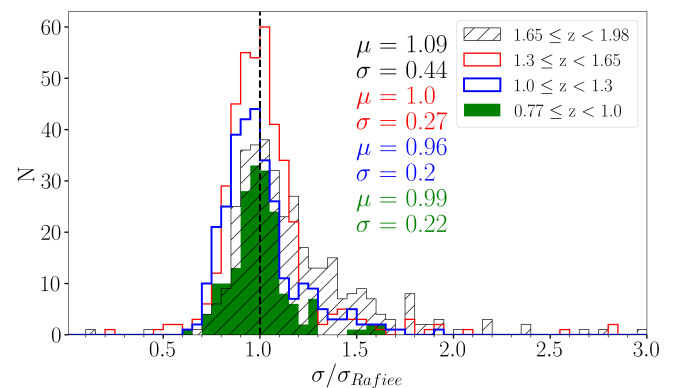
gdje su $\langle \lambda^2 \rangle$ i λ_0 drugi, odnosno prvi momenti profila emisijske linije $P(\lambda)$. Za prilagodbu Gausijana na liniju Mg II iz podataka je odabran interval valnih duljina od $\pm 7 \text{ \AA}$ oko vrha emisijske linije, dok je kod računa drugom metodom odabran interval $\pm 33 \text{ \AA}$ oko vrha linije jer su takvim odabirom dobiveni rezultati koji se najbolje poklapaju s onima iz Rafiee and Hall (2011). U



Slika 10: Omjeri izračunatih vrijednosti širine linija Mg II s vrijednostima širine te linije preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011). Crnom bojom je označena širina dobivena iz disperzije, a crvenom iz FWHM Gaussijana. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.

tom članku širina linija je određena metodom disperzije, 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 pola maksimuma Gaussijana [Peterson et al. (2004)]. Račun širine linije tom metodom je također osjetljiviji na "krila" emisijske linije

[Collin et al. (2006)]. Kako je prikazano na histogramu na slici 10, obje metode mogu poslužiti za određivanje širine emisijske linije, ali su vrijednosti dobivene iz disperzije puno manje raspršene u odnosu na vrijednosti iz Rafiee and Hall (2011) 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 11. 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 7. 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.

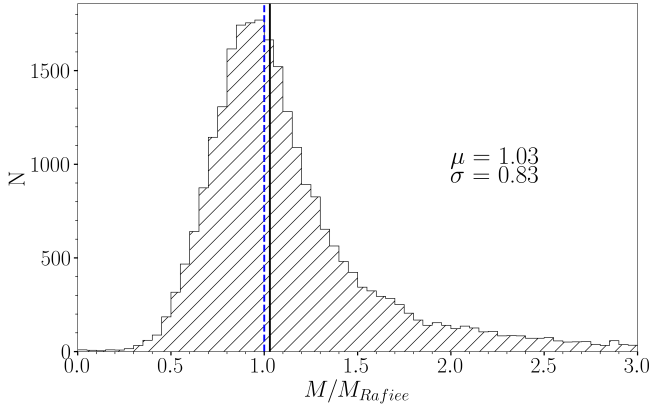


Slika 11: Omjeri izračunatih vrijednosti širine linija Mg II, koristeći relacije (7) s vrijednostima širine te linije preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011) za različite intervale crvenih pomaka. Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.

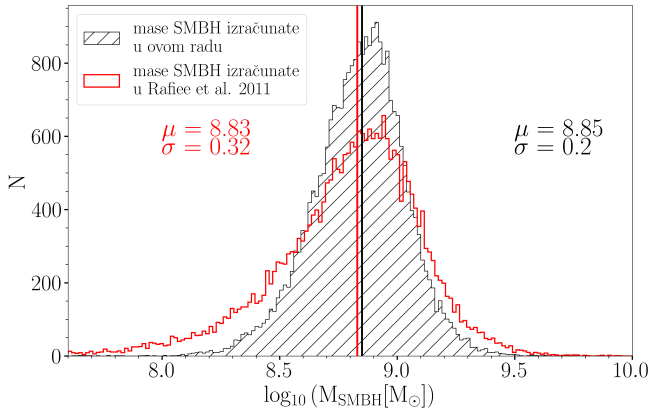
4. REZULTATI

Nakon kalibracije opisane u odjeljku 3, algoritam za račun mase supermasivnih crnih rupa unutar kvazara je izvršen na cijelom katalogu iz Rafiee and Hall (2011) te su uspješno izračunate mase za 26453 kvazara od 27602. Rezultati su prikazani na slici 12. 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 12. Također, na slici 13 su prikazani histogrami vrijednosti masa izračunatih u ovom radu i onih iz Rafiee and Hall (2011). Oba histograma u određenoj mjeri prate normalnu raspodjelu te su mase uglavnom veće od

spomenutih 3.3×10^8 Sunčevih masa što je u odjeljku 1 navedeno kao minimum mase SMBH unutar prosječnih kvazara.



Slika 12: Omjeri izračunatih vrijednosti masa SMBH s vrijednostima masa SMBH preuzetih iz kataloga uz Rafiee and Hall (2011). Također su navedene vrijednosti medijana i standardne devijacije, izračunate funkcijama *median* i *std* unutar Python Numpy biblioteke.



Slika 13: Vrijednosti izračunatih masa SMBH u ovom radu i vrijednosti masa SMBH izračunate u Rafiee and Hall (2011). 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.

5. ZAKLJUČAK

Za 26453 kvazara na crvenim pomacima $0.7 < z < 2$ iz Rafiee and Hall (2011) su izračunate mase supermasivnih crnih rupa te su uspoređene s vrijednostima dobivenima u tom članku. Račun masa je određen metodom kartiranja jeke u korelaciji sa spektralnim značajkama kvazara za što je bilo potrebno izračunati radijus područja širokih linija, kao i širinu emisijske linije Mg II. 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 1. Širina linije Mg II je također određena dvjema metodama, prilagodbom Gaussove krivulje i računom disperzije linije koristeći drugi moment profila emisijske linije. Vrijednosti dobivene drugom metodom su manje raspršene u odnosu na one iz Rafiee and Hall (2011), ali u obje metode postoji "rep" za omjere širina linija ≈ 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 Rafiee and Hall (2011), izuzev već spomenutog "repa" koji se iz širine linije kvadratno propagira u masu.

-
- [1] Emma Alexander @ Wikimedia. Unified model of AGN. 2022. This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International license., .
- [2] EdPost @ Wikimedia. SDSS spectrograph plate. 2012. This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license., .
- [3] <https://classic.sdss.org/dr3/dm/flatFiles/spSpec.html>, .
- [4] <https://www.astropy.org>, .
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/SavitzkyâGolay_filter, .
- [6] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.savgol_filter.html, .
- [7] Jennifer K. Adelman-McCarthy, Marcel A. Agüeros, Sahar S. Allam, Carlos Allende Prieto, Kurt S. J. Anderson, et al. The Sixth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *ApJS*, 175(2):297–313, April 2008. doi:10.1086/524984.
- [8] Misty C. Bentz. AGN Reverberation Mapping. In Henri M. J. Boffin, Gaitee Hussain, Jean-Philippe Berger, and Linda Schmidtobreick, editors, *Astronomy at High Angular Resolution*, volume 439 of *Astrophysics and Space Science Library*, page 249, January 2016. doi:10.1007/978-3-319-39739-9_13.
- [9] Misty C. Bentz, Bradley M. Peterson, Richard W. Pogge, Marianne Vestergaard, and Christopher A. Onken. The Radius-Luminosity Relationship for Active Galactic Nuclei: The Effect of Host-Galaxy Starlight on Luminosity Measurements. *ApJ*, 644(1):133–142, June 2006. doi:10.1086/503537.
- [10] Bradley W. Carroll and Dale A. Ostlie. *An Introduction to Modern Astrophysics*, pages 1187–1251. Pearson, London, UK, 2014. ISBN 978-1-292-02293-2.
- [11] S. Collin, T. Kawaguchi, B. M. Peterson, and M. Vestergaard. Systematic effects in measurement of black hole masses by emission-line reverberation of active galactic nuclei: Eddington ratio and inclination. *A&A*, 456(1):75–90, September 2006. doi:10.1051/0004-6361:20064878.
- [12] James E. Gunn, Walter A. Siegmund, Edward J. Mannery, Russell E. Owen, Charles L. Hull, et al. The 2.5 m Telescope of the Sloan Digital Sky Survey. *AJ*, 131(4):2332–2359, April 2006. doi:10.1086/500975.
- [13] Timothy M. Heckman and Philip N. Best. The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe. *ARA&A*, 52:589–660, August 2014. doi:10.1146/annurev-astro-081913-035722.
- [14] Toshihiro Kawaguchi, Shin Mineshige, Mami Machida, Ryoji Matsumoto, and Kazunari Shibata. Temporal $1/f^\alpha$ Fluctuations from Fractal Magnetic Fields in Black-Hole Accretion Flow. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 52:L1, April 2000. doi:10.1093/pasj/52.1.L1.
- [15] W. Kollatschny. Accretion disk wind in the AGN broad-line region: Spectroscopically resolved line profile variations in Mrk 110. *A&A*, 407:461–472, August 2003. doi:10.1051/0004-6361:20030928.
- [16] Hagai Netzer. *The Physics and Evolution of Active Galactic Nuclei*, pages 1–23. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013. ISBN 978-1-107-02151-8.
- [17] Christopher A. Onken and Bradley M. Peterson. The Mass of the Central Black Hole in the Seyfert Galaxy NGC 3783. *ApJ*, 572(2):746–752, June 2002. doi:10.1086/340351.
- [18] B. M. Peterson, L. Ferrarese, K. M. Gilbert, S. Kaspi, M. A. Malkan, et al. Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database. *ApJ*, 613(2):682–699, October 2004. doi:10.1086/423269.
- [19] Alireza Rafiee and Patrick B. Hall. Supermassive Black Hole Mass Estimates Using Sloan Digital Sky Survey Quasar Spectra at $0.7 < z < 2$. *ApJS*, 194(2):42, June 2011. doi:10.1088/0067-0049/194/2/42.
- [20] D. Richstone, E. A. Ajhar, R. Bender, G. Bower, A. Dressler, et al. Supermassive black holes and the evolution of galaxies. *Nature (London)*, 385(6701):A14, October 1998.
- [21] Linda S. Sparke and John S. Gallagher. *Galaxies in The Universe: An Introduction*, pages 365–406. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2007. ISBN 978-0-521-85593-8.
- [22] Christopher Stoughton, Jennifer Adelman, James T. Annis, John Hendry, John Inkmann, et al. Data Processing Factory for the Sloan Digital Sky Survey. In J. Anthony Tyson and Sidney Wolff, editors, *Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries*, volume 4836 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, pages 339–349, December 2002. doi:10.1117/12.457014.
- [23] Randal C. Telfer, Wei Zheng, Gerard A. Kriss, and Arthur F. Davidsen. The Rest-Frame Extreme-Ultraviolet Spectral Properties of Quasi-stellar Objects. *ApJ*, 565(2):773–785, February 2002. doi:10.1086/324689.
- [24] Daniel E. Vanden Berk, Gordon T. Richards, Amanda Bauer, Michael A. Strauss, Donald P. Schneider, et al. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey. *AJ*, 122(2):549–564, August 2001. doi:10.1086/321167.