



UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI  
FAKULTET  
DEPARTMAN ZA FIZIKU



# Korelacije između optičkih spektralnih parametara kvazara iz SDSS baze podataka

- Master rad -

Mentor:  
Prof. dr Tijana Prodanović

Komentor:  
Prof. dr Dragana Ilić

Kandidat:  
Isidora Jankov

Novi Sad, septembar 2019. god.

*The most incomprehensible thing  
about the Universe is that it is  
comprehensible.*

- Albert Einstein -

*Iskoristila bih ovu priliku da se zahvalim od srca profesorici Dragani Ilić na ukazanoj pomoći tokom čitavog procesa istraživanja i pisanja master teze, zanimljivim idejama, posvećenom vremenu i neizmernom strpljenju.*

*Zahvaljujem se i profesorici Tijani Prodanović na svesrdnoj pomoći i korisnim sugestijama.*

# SADRŽAJ

---

<b>Sadržaj.....</b>	<b>4</b>
<b>1. Uvod .....</b>	<b>7</b>
1.1 Motivacija istraživanja .....	7
1.2 Osnovni ciljevi.....	8
1.3 Struktura master teze .....	8
 <b>-PRVI DEO-</b>	
<b>2. Aktivna galaktička jezgra – osnovne osobine .....</b>	<b>11</b>
2.1 Otkriće prvih aktivnih galaksija .....	11
2.2 Klasifikacija AGJ .....	14
2.2.1 Sejfertove galaksije.....	14
2.2.2 Kvazari .....	15
2.2.3 Blazari .....	16
2.2.4 Aktivna galaktička jezgra slabog sjaja .....	17
2.2.5 Radio-galaksije .....	18
2.2.6 Sažetak klase AGJ .....	19
2.3 Izvori energije kod AGJ .....	20
2.4 Unifikacioni model.....	22
<b>3. Optičke spektralne osobine emisionih regiona AGJ .....</b>	<b>25</b>
3.1 Zračenje u kontinuumu .....	26
3.2 Široke emisione linije i širokolinijski region .....	26
3.3 Uske emisione linije i uskolinijski region .....	28
 <b>- DRUGI DEO-</b>	
<b>4. Pregled stanja u oblasti istraživanja.....</b>	<b>30</b>
<b>5. Metode istraživanja.....</b>	<b>34</b>
5.1 Analiza glavnih komponenti.....	34
5.1.1 Sažetak postupka analize glavnih komponenti .....	37
<b>6. Plan istraživanja i očekivani rezultati.....</b>	<b>38</b>

<b>7. Obrada podataka i analiza.....</b>	<b>39</b>
<b>8. Rezultati i diskusija.....</b>	<b>42</b>
8.1 Uzorak 1 ( $z < 0.39$ ) .....	42
8.2 Uzorak 2 ( $z < 0.89$ ) .....	48
8.3 Uzorak 3 ( $0.39 < z < 0.89$ ) .....	50
8.4 Uzorak 4 ( $1.5 < z < 2.25$ ) .....	54
8.5 Poređenje uzoraka .....	57
<b>9. Zaključak.....</b>	<b>58</b>
<b>10. Dodatak A.....</b>	<b>60</b>
10.1 Korelaciona matrica.....	60
10.2 Analiza glavnih komponenti.....	60
<b>11. Literatura.....</b>	<b>63</b>
<b>12. Biografija .....</b>	<b>67</b>

*Posvećeno mom ocu, Slobodanu*

# 1 UVOD

---

Istraživanje spektralnih karakteristika različitih astrofizičkih sredina nam pruža informacije o dinamici, kinematici, geometriji i hemijskom sastavu datih oblasti u svemiru. Kvazari se klasifikuju kao aktivna galaktička jezgra (AGJ) koja su karakteristična po ekstremnom sjaju (mogu biti i do hiljadu puta sjajniji od naše galaksije) i kompaktnosti. Jedna od definišućih karakteristika svakog AGJ, pa tako i kvazara, je prisustvo supermasivne crne rupe u samom centru i akrecionog diska koji je okružuje. Radi se o objektima koji imaju karakterističan spektar koji se proteže od radio do domena gama zračenja. Izučavanje korelacija koje se javljaju između spektralnih karakteristika kvazara nam pruža uvid u fizičke procese koji se dešavaju u ovim ekstremnim sredinama. Pošto su u pitanju objekti koji se mogu detektovati na veoma velikim udaljenostima zbog vrlo visokog sjaja, kvazari su neka vrsta vremenske kapsule koja nam pruža informacije o uslovima koji su vladali u ranom svemiru, što predstavlja jedan od predmeta izučavanja kosmologije. Takođe, pretpostavlja se da se izuzetna aktivnost kvazara i ostalih AGJ može objasniti kao posledica sudara galaksija, što predstavlja ključni element u evoluciji galaksija, te izučavanje ovih objekata predstavlja veoma bitan korak u razumevanju galaktičke evolucije i fenomena pojačanog formiranja zvezda u galaksijama. Upravo iz navedenih razloga, proučavanje kvazara je od velikog značaja za modernu astrofiziku.

## 1.1 MOTIVACIJA ISTRAŽIVANJA

Jedna od glavnih motivacija za odabir ove oblasti istraživanja jeste činjenica da su kvazari objekti sa veoma šarenolikim pejzažem fizičkih karakteristika i mnogi njihovi aspekti nisu još uvek dovoljno istraženi. Pored razumevanja samih fizičkih uslova u ovim sredinama, veoma je intrigantno razmišljati i o široj slici. Naime, kvazari kao najudaljeniji detektovani objekti nam pružaju informacije o mlađom svemiru i primitivnim galaksijama, te postavljaju ograničenja na parametre koji su povezani sa galaktičkom evolucijom i formiranjem struktura na velikim skalama, mogu da služe kao svetionici koji osvetljavaju inače nevidljive objekte, poput oblaka neutralnog gasa, mogu pružiti informacije o epohi rejonizacije, itd. Drugi razlog zbog koga je izabrana ova tema istraživanja je mogućnost da se nauče i isprobaju neki statistički alati, poput analize glavnih komponenti (PCA<sup>1</sup>), koji spadaju u domen mašinskog učenja. Alati bazirani na veštačkoj inteligenciji mogu da pruže neke nove uvide i teško uočljive pravilnosti u sve obimnijim astrofizičkim bazama podataka.

---

<sup>1</sup> PCA – eng. *Principal Component Analysis*

## **1.2 OSNOVNI CILJEVI**

Cilj ovog rada je istraživanje fizičkih procesa koji dovode do nastanka različitih spektralnih karakteristika koje odlikuju spektre AGJ kroz analizu spektara velikog broja kvazara, da se pruži uvod u osnovne osobine, klasifikaciju i teoriju unifikacije AGJ, zatim da se da kratak pregled trenutnog stanja u oblasti istraživanja optičkih spektralnih karakteristika kvazara, potom i kratak opis algoritma analize glavnih komponenti, koji će se koristiti u samom istraživanju. Praktični deo rada će biti posvećen analizi korelacija između optičkih spektralnih karakteristika kvazara na uzorku uzetog iz *The Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) baze podataka, kao i diskusiji fizičkih procesa koji stoje iza tih korelacija.

Razlog iz kog bi ovaj rad mogao da predstavlja uvećanje znanja u ovoj oblasti je prvenstveno izbor uzorka koji obuhvata veliki broj kvazara koji do sada nije obrađivan u ovom kontekstu i korišćenjem ovih metoda, zatim sveobuhvatnost u pogledu crvenih pomaka na kojima se nalaze kvazari kao i spektralnih linija koje su uključene u analizu.

U našu analizu su uključeni parametri širokih i uskih spektralnih linija kod kvazara, a posebno je interesantna analiza uskih spektralnih linija koje potiču iz uskolinijskog regiona AGJ (više detalja o različitim emisionim regionima biće dato u poglavljju 3), za koje smo analizirali Baldvinov efekat. Ovaj efekat predstavlja anti-korelaciju između ekvivalentne širine emisione linije i luminoznosti kontinuma u opsegu talasnih dužina kojem data linija pripada. Baldvinov efekat je još uvek nedovoljno istražen i sumnja se da je on prouzrokovao sasvim drugaćijim fizičkim mehanizmima kod uskih i kod širokih spektralnih linija. Širokolinjski Baldvinov efekat je potvrđen od strane drugih autora, dok je uskolinjski Baldvinov efekat razmatran u vrlo malom broju istraživanja. Još jedna bitan doprinos ovog rada je činjenica da je pre analize podataka uvedena korekcija na doprinos zračenja zvezdane komponente poreklom od galaksije domaćina na zračenje kontinuma koje potiče od samog centralnog izvora AGJ, što nije uzimano u obzir pri analizi Baldvinovog efekta za uske linije od strane drugih autora.

## **1.3 STRUKTURA MASTER TEZE**

Master teza je podeljena na dva dela. Prvi deo obuhvata uvod u neophodne posmatračke i teorijske detalje o aktivnim galaktičkim jezgrima kako bi se drugi deo, koji je posvećen istraživanju, mogao sa lakoćom pratiti. Prvi deo sadrži informacije o osnovnim osobinama aktivnih galaktičkih jezgara (Poglavlje 2), uključujući detalje njihovog otkrića, klasifikacionu šemu, objašnjenje porekla energije koja napaja sjajni centralni izvor zračenja, kao i unifikacioni model aktivnih galaktičkih jezgara. U prvom delu su takođe pružene malo specifičnije informacije o zračenju aktivnih galaktičkih jezgara u optičkom domenu i date su neke osnovne karakteristike glavnih emisionih regiona (Poglavlje 3). U drugom delu master teze je dat detaljan opis istraživanja korelacija između optičkih

spektralnih parametara na uzorku kvazara, uključujući opis trenutnog stanja u oblasti istraživanja (Poglavlje 4), opis korišćenih metoda (Poglavlje 5), plan i ciljevi istraživanja (Poglavlje 6), analizu podataka (Poglavlje 7), prikaz rezultata analize i njihova diskusija (Poglavlje 8), kao i zaključak na samom kraju (Poglavlje 9). U Dodatku A je dat programski kod koji je korišćen za analizu podataka i prikaz rezultata.

PRVI DEO  
- Teorijske osnove AGJ -

## 2 AKTIVNA GALAKTIČKA JEZGRA – OSNOVNE OSOBINE

---

Neki od najsjajnijih izvora zračenja u svemiru su upravo aktivna galaktička jezgra. Luminoznosti ovih objekata se kreću od  $10^{40}$  erg s $^{-1}$  (jezgra nekih bližih galaksija) pa sve do  $10^{48}$  erg s $^{-1}$  (najudaljeniji kvazari). AGJ može biti toliko sjajno da je sjaj okolnih zvezda iz galaksije domaćina zanemarljiv u odnosu na sjaj galaksije kao celine. Ovi objekti ispoljavaju i varijabilnost u zračenju na skalama godina, a ponekad i na skalama dana, časova ili čak minuta. Upravo ova osobina AGJ omogućava izračunavanje njihovih prostornih dimenzija. Na osnovu zakona kauzalnosti, objekat čiji je period promene sjaja  $t$ , mora imati dimenzije regiona koji emitiše zračenje manje od dužine puta koji svetlost pređe za to vreme ( $ct$ ). Iz prethodnog sledi, ukoliko sjaj objekta jako varira u vremenu, radi se o vrlo malim linearnim dimenzijama objekta, odnosno radi se o ultra kompaktnim objektima (veličine Sunčevog sistema). Treba napomenuti da su periodi promene sjaja u različitim spektralnim opsezima različiti. Najbrže promene su u domenu  $X$ -zračenja i kreću se od nekoliko minuta do nekoliko dana, što ukazuje da je oblast emitovanja ovog zračenja i najkompaktnija. Visoke vrednosti luminoznosti ukazuju na veoma masivne objekte, jer da bi se objasnila njihova kompaktnost, gravitacija mora biti enormna kako bi se suprotstavila pritisku zračenja. Ovako jako gravitaciono polje bi moglo da potiče od supermasivne crne rupe<sup>2</sup>. Kao što je u uvodu već pomenuto, AGJ zrače u kontinuumu i spektralnim linijama, od  $\gamma$  i  $X$  područja, do dalekog infracrvenog i radio-dela spektra.

### 2.1 OTKRIĆE PRVIH AKTIVNIH GALAKSIJA

Priča o aktivnim galaksijama započinje još početkom 20. veka, kada je Edvard Fet (*Edward A. Fath*) primetio prve emisione linije kod „spiralnih magličastih“ objekata. Njegovo istraživanje je imalo za cilj da proveri prirodu ovih magličastih objekata, jer se u to vreme nije znalo da li se radi o bliskim gasovitim objektima poput Orionove magline ili se pak radi o nekim udaljenim skupovima zvezda. Za većinu objekata, Fet je ustanovio da se radi o razmazanim izvorima koji su emitovali kontinualne spektre sa apsorpcionim linijama, što ukazuje na udaljene skupove zvezda, a ne na gasovite magline za koje je karakterističan sjajan linijski spektar. Međutim, za jedan objekat, NGC 1068, Fet je dobio kompozitni spektar, odnosno spektar koji je sadržao i emisione i apsorpcione linije. Emisione linije koje su detektovane u NGC 1068 odgovarale su linijama koje su karakteristične za spektre maglina. U godinama koje su usledile, još nekoliko astronoma je primetilo emisione linije u spektrima ovih „spiralnih magličastih“ objekata. Npr. Edvin

---

<sup>2</sup> Supermasivna crna rupa – crna rupa koja ima masu veću od  $10^5$  Sunčevih masa i nalazi se u centrima galaksija. Njihove mase mogu dostići i  $10^{10} M_{\odot}$ .

Habl (*Edwin Hubble*) je 1926. godine ukazao na to da neke retke spiralne galaksije iz svog zvezdanog jezgra emituju spektar karakterističan za planetarne magline (NGC 1068, NGC 4051 i NGC 4151).

Prvi sistematičniji rad na temu ovih specifičnih galaksija je objavljen 1943. godine od strane Karla Sejferta (*Carl K. Seyfert*). On je proučavao spekture šest galaksija sa zvezdanim jezgrima koji sadrže emisione linije poput onih u spektrima planetarnih maglina i zaključuje da su te emisione linije nastale kao posledica energetskih prelaza atoma različitih ionizacionih stanja i da se radi o posebnoj klasi objekata, drugačijoj od običnih galaksija. Sajfert je takođe primetio da su linije vodonika kod nekih od galaksija veoma široke ( $\text{FWHM}^3 \sim 7500 \text{ km s}^{-1}$ ), što je indikator brzine kretanja gasa.

Veliki napredak u ovoj oblasti nastupio je nakon razvijanja radio-tehnike tridesetih (*Karl Jansky*) i početkom četrdesetih godina (*Grote Reber*). Nakon Drugog svetskog rata, nekoliko grupa radio-inženjera (među njima su se istakle grupe iz Kembriđa i Mančestera u Velikoj Britaniji i CSIRO iz Australije) su počele da se bave istraživanjima diskretnih izvora koja su bila podstaknuta slučajnim otkrićem izvora promenljivog sjaja u sazvežđu Labud. Dve godine kasnije, diskretna priroda ovog izvora je bila potvrđena od strane Džona Boltona (*John G. Bolton*) i Gordona Stenlija (*Gordon J. Stanley*). Oni su izračunali da je temperatura sjaja ovog objekta veća od  $4 \times 10^6 \text{ K}$  na 100 MHz i zaključili da je malo verovatno da je to šum termalnog porekla. Bolton (1948) je zatim objavio katalog od 6 diskretnih izvora i uveo nomenklaturu za obeležavanje radio-izvora (Cyg A, Cas A, i sl.). Godinu dana kasnije, izvršeno je i prvo povezivanje diskretnih radio-izvora sa optičkim izvorima (Bolton, Stanley & Slee, 1949). Tako je npr. Taurus A radio-izvor identifikovan kao maglina Rak, a izvor Virgo A je povezan sa optički detektovanim džinovskom eliptičnom galaksijom M 87.

Jedna od prvih velikih pretraga radio neba je rađena na 158 MHz (tzv. 3C katalog<sup>4</sup>), a zatim je rađena i ponovna pretraga na 178 MHz (tzv. 3CR katalog<sup>5</sup>). Većina objekata identifikovanih u ovim istraživanjima je odgovarala već optički detektovanim galaksijama, ali postojali su i neki jaki radio-izvori koji su bili povezani sa zvezdolikim optičkim objektima. Prvi ovakav objekat je bio 3C 48, koji je Alan Sendidž (*Allan Sandage*) 1960. godine snimio i ukazao da se radi o zvezdolikom objektu 16. prividne magnitude. U spektru ovog objekta su zapažene široke emisione linije nepoznatog porekla, a iz fotometrijskih merenja je pokazano da se radi o objektu promenljivog sjaja i da emituje višak ultraljubičastog zračenja u odnosu na normalne zvezde. Misterija ovih neobičnih izvora je bila rešena 1963. godine kada je Martin Šmit (*Maarten Schmidt*) proučavajući objekat 3C 273, shvatio da su te neobične široke emisione linije ustvari linije vodonika iz Balmerove

---

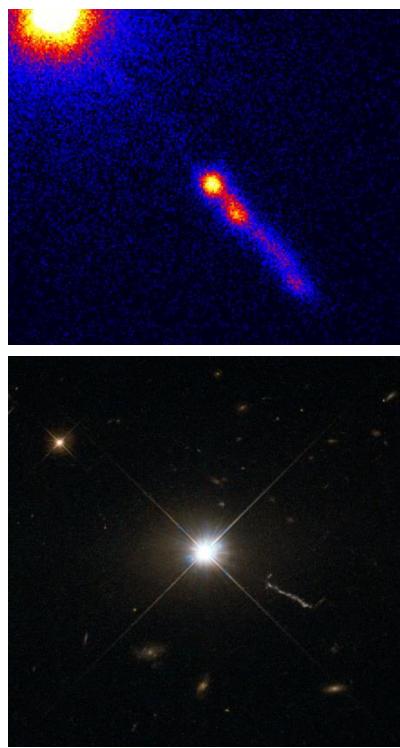
<sup>3</sup> Širina linije se karakteriše veličinom koja se naziva puna širina na polovini maksimuma (*full width at half maximum* - FWHM) i izražava se u  $\text{km s}^{-1}$  jer je širina linije ustvari okarakterisana brzinom kretanja gasa koji je emituje.

<sup>4</sup> 3C Kembriđ katalog – eng. *The third Cambridge catalog*

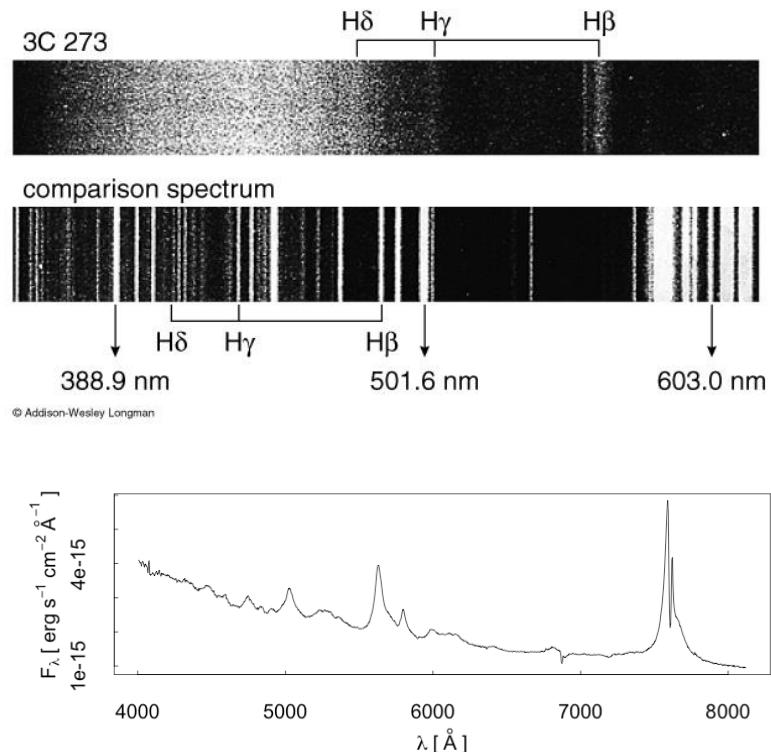
<sup>5</sup> 3CR Kembriđ katalog – eng. *The third Cambridge catalog revised*

serije pomerene ka crvenom delu spektra, tako da je odgovarajući crveni pomak iznosio  $z = 0.158$ . Tada je postalo jasno da se radi o veoma udaljenom objektu, čak 680 Mpc daleko od naše galaksije. Pošto je sada bila procenjena udaljenost, bilo je moguće proceniti i luminoznost. Tu je nastupilo veliko iznenadenje: optičke luminoznosti ovih objekata su bile 1,000 puta veće nego luminoznost čitavog Mlečnog puta! Ovakvi objekti su nazvani kvazi-stelarni radio-izvorovi ili kraće - *kvazari*. Otkriće kvazara je uvod u eru intenzivnijeg istraživanja objekata koji imaju pojačanu aktivnost u jezgru.

Termin *aktivna galaktička jezgra* prvi put je uveo Danijel Vidman (*Daniel Weedman*), kada ga je upotrebio u naslovu svog rada koji je prezentovao na sastanku Američkog astronomskog društva 1974. godine. Ovaj naziv se zadržao kao sveobuhvatni termin za sve objekte koji ispoljavaju aktivnost kao posledicu akrecije materije na supermasivnu crnu rupu. Kako je vreme odmicalo, broj i raznolikost ovih objekata se povećavao i postajalo je sve komplikovanije izvršiti njihovu klasifikaciju. Zbog toga se mnoštvo različitih tipova aktivnih galaktičkih jezgra ponekad naziva i *AGJ zoološki vrt*. U narednom poglavlju će biti predstavljene najbitnije grupe ovih objekata, i treba imati na umu da to nikako ne predstavlja kompletну klasifikaciju (korišćena literatura: Popović & Ilić, 2017; Shields, 1999).



**Slika 2.1** Gore - Kvazar 3C 273 sa svojim džetom, snimljen u X domenu. (*Chandra X-ray Observatory*). Dole – Isti kvazar snimljen u optičkom delu spektra (*Hubble Space Telescope*).



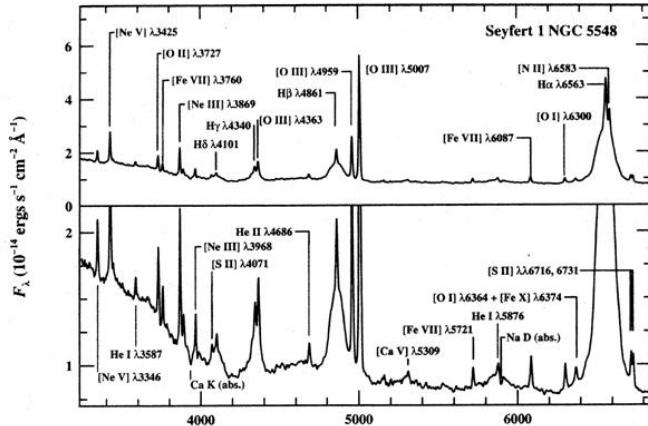
**Slika 2.2** Gore - Rani optički spektar kvazara 3C 273. Dole - moderniji optički spektar istog objekta (*Torrealba et al. 2012, preuzeto iz NASA/IPAC Extragalactic Database*).

## 2.2 KLASIFIKACIJA AGJ

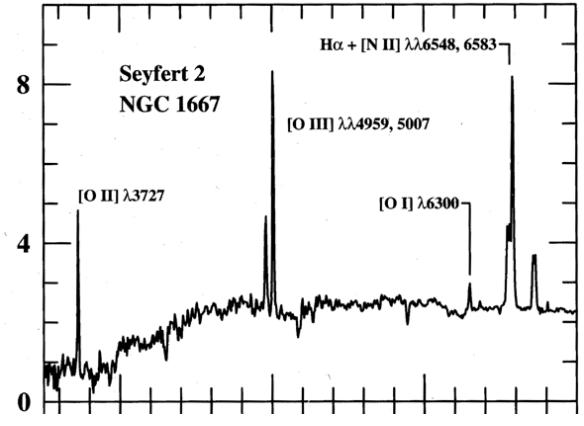
Zbog ogromnog broja različitih načina ispoljavanja aktivnosti, klasifikacija aktivnih galaktičkih jezgara nije lak poduhvat. Ovde će biti dati najosnovniji tipovi i podtipovi AGJ podeljeni na osnovu spektralnih karakteristika.

### 2.2.1 Sejfertove galaksije

Sejfertove galaksije su dobine naziv po Karlu Sejfertu, koji je prvi uočio da jezgra nekih galaksija emituju emisioni linijski spektar. Spektri ovih galaksija se mogu klasifikovati u jednu od dve klase. Prva od njih su galaksije tipa Sejfert 1 i njihovi spektri sadrže široke (linije dozvoljenih prelaza, kao što su linije vodonika i helijuma) i uske linije zabranjenih (npr. [O III] i [S II]) i dozvoljenih prelaza (linije vodonika). Velika širina linija je poreklom od Doplerovog širenja, što ukazuje na to da široke linije nastaju u regionima gde su brzine kretanja gasa od  $1,000 \text{ km s}^{-1}$  do  $5,000 \text{ km s}^{-1}$ , a u ekstremnim slučajevima dostižu čak  $10,000 \text{ km s}^{-1}$ , dok širine zabranjenih linija ukazuju na regije gde su brzine kretanja gasa oko  $500 \text{ km s}^{-1}$ . Sa druge strane, spektri galaksija tipa Sejfert 2 sadrže samo uske linije (dozvoljene i zabranjene) sa karakterističnim brzinama kretanja gasa od oko  $500 \text{ km s}^{-1}$ . Ove galaksije su uglavnom slabijeg sjaja od galaksija tipa Sejfert 1, čiji sjaj dolazi većinom iz samog centralnog izvora (zračenje kontinuuma). Pored razlika u optičkom delu



**Slika 2.3** Optički deo spektra Sejfert 1 galaksije NGC 5548. Izraženje široke i uske emisione linije su obeležene, kao i apsorpcione linije poreklom od galaksije domaćina. Vertikalna skala je uvećana u donjem panelu kako bi se videle slabije izražene karakteristike spektra. Puna širina na polovini maksimuma širokih komponenti iznosi oko  $5,900 \text{ km s}^{-1}$ , dok je širina uskih komponenti otprilike  $400 \text{ km s}^{-1}$  (ljubaznošću Lick Observatory i A. V. Filippenko).



**Slika 2.4** Optički spektar Sejfert 2 galaksije NGC 1667. Obeležene su neke od bitnijih emisionih linija (Ho, Filippenko & Sargent, 1993). Horizontalna i vertikalna osa imaju jedinice kao spektar na Slici 2.3.

spektra, postoje i bitne razlike u X-domenu zračenja. Naime, galaksije tipa Sejfert 1 daleko više zrače u X-domenu u odnosu na Sejfert 2 tip galaksija. Uzrok ove razlike bi mogao da se

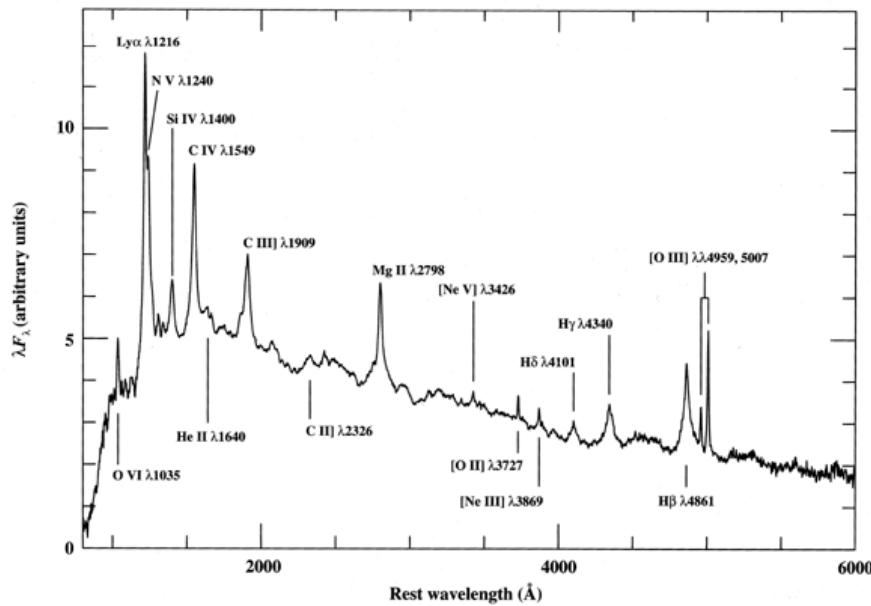
objasni scenarijom u kome X-zraci bivaju apsorbovani od strane materijala koji zaklanja region koji emituje ovo zračenje kod Sejfert 2 tipa galaksija.

Zanimljiva je činjenica da je oko 90% Sejfertovih galaksija koje detektujemo modernim teleskopima spiralna, obično Sb i SBb tipa. Ove galaksije su slabi radio-izvori i često se detektuju u društvu drugih galaksija sa kojima su vrlo verovatno u gravitacionoj interakciji.

Pored osnovnih tipova Sejfertovih galaksija, javila se i potreba za kreiranjem međutipova (Donald E. Osterbrock, 1981), poput Sejfert 1.5 ili Sejfert 1.9, jer su postojale finije razlike u udalu uske i široke komponente vodonikovih linija. Tako npr. klasa Sejfert 1.5 ima veći udeo široke komponente nego što to ima Sejfert 1.9 tip galaksije.

## 2.2.2 Kvazari

Kao što je ranije pomenuto, kvazari imaju veoma visoke luminoznosti što ih čini najsjajnijim među tipovima aktivnih galaktičkih jezgara a ujedno i najjudaljenijim. Njihova absolutna bolometrijska magnituda dostiže  $M_{bol} < -23$  što odgovara luminoznostima od preko  $10^{12} L_\odot$ , a crveni pomak najjudaljenijeg detektovanog kvazara iznosi  $z > 7.5$  (Bañados et al. 2017). Poreklo ovako velike energije je na početku bila velika enigma za astronome, zajedno sa činjenicom da se radi o jako kompaktnim objektima (što je zaključeno iz promenljivosti njihovog sjaja). Procena je bila da je centralni „pogon“ kvazara imao dimenzije reda veličine jedne svetlosne godine ili čak nekoliko svetlosnih meseci. O kakvom mehanizmu se ovde radi biće razjašnjeno u poglavljju 2.3.



Slika 2.5 Spektar dobijen usrednjavanjem spektara 700 kvazara iz kataloga *The Large Bright Quasar Survey* (Francis et al. 1991). Izraženje emisione linije su obeležene na spektru.

Termin *kvazar* (porekлом od *kavzistelarni radio-izvor*) nije možda najilustrativniji termin za ove objekte, ali naziv se zadržao jer su prvi detektovani kvazari bili jaki radio-izvori (3C 48 i 3C 273). Međutim, kasnije je utvrđeno da je zapravo većina kvazara (~90%) radio-slaba, dok je ostalih 10% radio-jako. Iz navedenog razloga, mnogi autori radije koriste termin *kvazistelarni objekat* (QSO). U ovom radu će se koristiti generalni termin *kvazar*,

a ukoliko je potrebno naglašiće se da li se radi o radio-jakom ili radio-slabom kvazaru.

Kvazari su, poput Sejfertovih galaksija, podeljeni na tip 1 i tip 2. Tako da kvazari tipa 1 sadrže u svom spektru i široke i uske linije, dok kvazari tipa 2 sadrže samo uske linije. Sejfertove galaksije i kvazari su objekti sličnih osobina, s tom razlikom da su kvazari mnogo luminozniji i locirani su obično u centrima džinovskih eliptičnih galaksija.

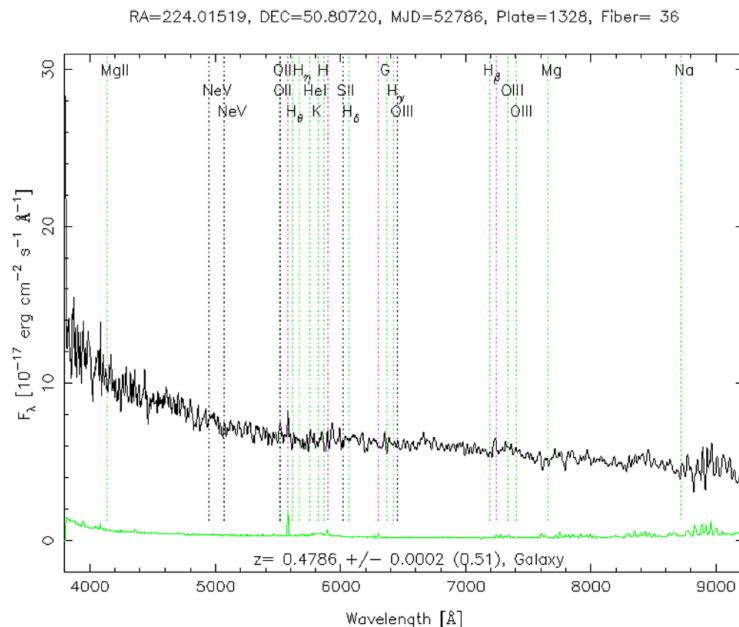
### 2.2.3 Blazari

Blazari su veoma kompaktni i promenljivi radio-jaki objekti čije zračenje je jako polarizovano na radio i optičkim talasnim dužinama. Dobili su naziv po prvom otkrivenom ovakovom objektu, BL Lacertae, prototipu cele klase. Ovaj izvor je prвobитно klasifikovan kao promenljiva zvezda, čiji se prividni sjaj menjao od 16-te do 13-te magnitude, te je otuda i dobio naziv kakav se tipično daje promenljivim zvezdama. Tek decenijama nakon otkrića ovog objekta, utvrđeno je da se radi o jednom novom tipu AGJ.

Blazari su locirani obično u jezgrima eliptičnih galaksija. Oni dosta podsećaju na kvazare, sa tom razlikom da osim monotonog kontinuma nema nijedne emisione spektralne linije na osnovu koje bi se mogao odrediti crveni pomak (Slika 2.6). Kasnije su otkrivene veoma slabe apsorpcione linije koje potiču od matične galaksije. Spektre blazara

odlikuje netermalni optički kontinuum i jaka emisija u  $\gamma$  i radio-domenu. Mnogi blazari imaju prisutan relativistički mlaz čestica, koji zraчи u X ili  $\gamma$ -domenu.

Ovi objekti se mogu podeliti u dve grupe: BL Lac objekte i optički intenzivno promenljive kvazare – OVV kvazari<sup>6</sup> koji se još nazivaju i radio-kvazari sa ravnim spektrom (*Flat Spectrum Radio Quasars* – FSQR). Obe grupe objekata se odlikuju već pomenutim osobinama: polarizovano zračenje, jaki radio-izvori i izuzetno su promenljivog sjaja (može da varira nekoliko puta u toku

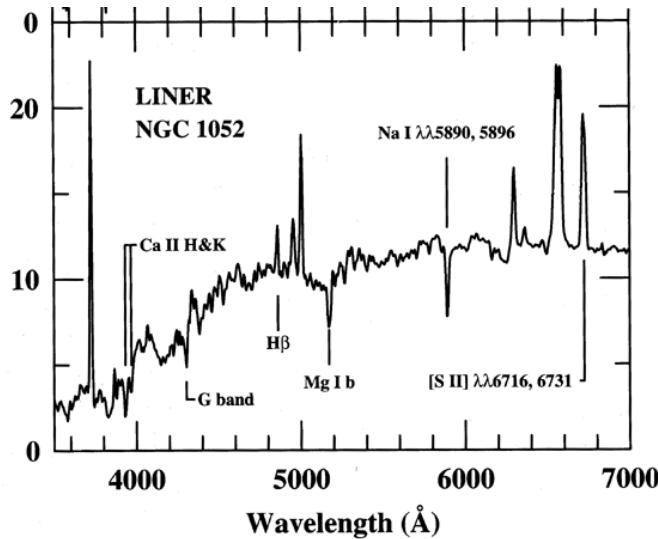


**Slika 2.6** Optički spektar blazara RX J1456+5048 iz SDSS baze. Ovaj objekat se klasificuje kao BL Lac jer se u spektru vidi plavi kontinuum i izuzetno slabe emisione linije ekvivalentnih širina  $< 5 \text{ \AA}$  (Maraschi *et al.* 2008).

<sup>6</sup> OVV – eng. *Optically Violently Variable quasars*

perioda od nekoliko nedelja). Međutim, razlikuju se po tome što OVV objekti u svojim spektrima sadrže i široke optičke emisione linije karakteristične za kvazare, dok su kod BL Lac objekata emisione linije izuzetno retke i teško ih je detektovati. Ovi objekti se razlikuju i po luminoznosti i izgledu kontinualnog spektra.

#### 2.2.4 Aktivna galaktička jezgra slabog sjaja



**Slika 2.7** Optički spektar LINER galaksije NGC 1052. Važnije emisione linije su istaknute (Ho, Filippenko & Sargent, 1993). Na spektru se mogu primetiti i neke jake apsorpcione linije koje su poreklom od matične galaksije a ne od samog AGJ. Ovaj spektar je uporediv sa spektrima datim u poglavlju o Sejfertovim galaksijama. Razlika između Sejfert 2 galaksija i LINER je sledeća: [O III]  $\lambda 5007$  / H $\beta$  odnos flukseva je dosta veći kod Sejfert 2 galaksija, dok su niskojonizovane linije poput [N II]  $\lambda\lambda 6716, 6731$ , [S II]  $\lambda\lambda 6548, 6853$ , [O II]  $\lambda 3727$  i [O I]  $\lambda 6300$  relativno izraženije u spektrima LINER objekata. Na vertikalnoj osi je izražen fluks  $F_\lambda$  [erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup> Å<sup>-1</sup>]. (Ljubaznošću A. V. Filippenko)

Identifikaciju ovih objekata i njihovo diferenciranje od Sejfertovih galaksija i H II regionala koriste se dijagnostički dijagrami (tzv. BPT dijagrami<sup>8</sup>).

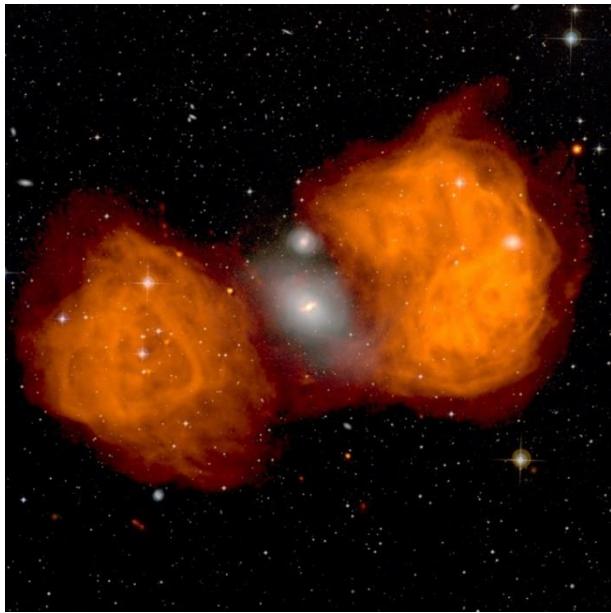
Aktivna galaktička jezgra slabog sjaja ili tzv. LINER<sup>7</sup> galaksije se odlikuju spektrima sa jakim uskim emisionim linijama slično drugim AGJ, međutim stepen jonizacije je ovde manji. Radi se o veoma čestim tipom galaksija, pošto se u trećini bliskih detektovanih galaksija može identifikovati AGJ ovog tipa. Ovi objekti se klasificuju kao AGJ najmanje luminoznosti, s obzirom na to da luminoznost jezgra može biti i do 5 redova veličina manja nego kod standardnih AGJ sa visokim stepenom jonizacije. Zbog niskog stepena jonizacije, u spektrima LINER galaksija možemo očekivati jake linije neutralnih (npr. [O I]  $\lambda 6300$ ) i jedanput ionizovanih elemenata (npr. [N II]  $\lambda\lambda 6548, 6583$ ), dok su linije sa višim stepenima jonizacije veoma slabe (pogledati Sliku 2.7). Spektri LINER galaksija su veoma slični spektrima galaksija tipa Sejfert 2, s tom razlikom da imaju manju stopu akrecije i jače niskojonizovane emisione linije. Za

<sup>7</sup> LINER – eng. Low Ionization Nuclear Emission-line Region

<sup>8</sup> BPT dijagram – dijagram koji pokazuje odnose uskih linija iz zabranjenih prelaza iz spektra dva puta ionizovanog kiseonika i jedanput ionizovanog azota prema H $\beta$  i H $\alpha$  liniji. Ovi odnosi ukazuju na to da li se radi o fotojonizaciji AGJ ili drugom mehanizmu zračenja. Ime je dobio po inicijalima autora Baldwin, Phillips, Terlevich koji su prvi predložili ovakav dijagram.

## 2.2.5 Radio-galaksije

AGJ tipove možemo klasifikovati i na osnovu prisustva radio-zračenja u spektru. Tako postoje radio-jaki i radio-slabi kvazari i Sejfertove galaksije. Radio-jake objekte nazivamo još i radio-galaksije. Radio zračenje se emituje iz centralnog dela aktivnog galaktičkog jezgra, ali i iz perifernih delova postavljenih simetrično u odnosu na AGJ. Ove oblasti se nazivaju još i radio-ovali (*radio lobes*). Divan primer ovih struktura se može videti na Slici 2.8. Na nekim radio-snimcima se može videti da su ovali povezani sa jezgrom tankim i izuzetno pravolinjskim strukturama koje se zovu radio-mlazevi (*radio jets*), putem kojih radio izvor hrani radio-ovale ogromnom količinom materije.



Slika 2.8 Džinovski radio-ovali galaksije Fornax A. Narandžasti ovali prestavljaju oblake gasa koji emituju radio zračenje. (Ed Fomalont (NRAO) et al., VLA, NRAO, AUI, NSF).

centralnih delova galaksije. FR II objekti imaju dosta slabije radio-mlazeve, što znači da oni gube manje energije dok putuju kroz radio-ovale, što rezultuje pojačanom radio-emisijom iz graničnih delova radio-ovala koji se često nazivaju vrele pege (*hot spot*).

Pored FR šeme, radio-galaksije se mogu, poput Sejfertovih galaksija i kvazara, podeliti na tip 1 i tip 2. Tako razlikujemo radio galaksije sa širokim linijama (*Broad Line Radio Galaxies* – BLRG) i radio galaksije sa uskim linijama (*Narrow Line Radio Galaxies* – NLRG). Galaksija domaćin radio-galaksija je uvek džinovska eliptična galaksija, što ih odvaja od Sejfertovih galaksija (pored jačine radio zračenja) čiji su galaksije domaćini obično spiralne galaksije.

Postoji još načina podele radio glasnih AGJ. Recimo, mogu se podeliti na radio-jake izvore sa radio-zračenjem iz kompaktne oblasti koja se poklapa sa jezgrom (*Core Dominant*

– CD) i na izvore sa radio-zračenjem koje je najjače iz radio-ovala (*Lobe Dominant* – LD). Radio-jaka AGJ se mogu podeliti i na osnovu izgleda spektra zračenja u radio-kontinuumu. Tako postoje radio-jaki kvazari sa strmim spektrom (*Steep Spectrum Radio Quasars* – SSRQ) i radio-jaki kvazari sa ravnim spektrom (*Flat Spectrum Radio Quasars* – FSRQ).

## 2.2.6 Sažetak klasa AGJ

U ovom poglavlju je dat veliki broj tipova i podtipova AGJ. Sažetak najvažnijih od njih je prikazan u Tabeli 2.1.

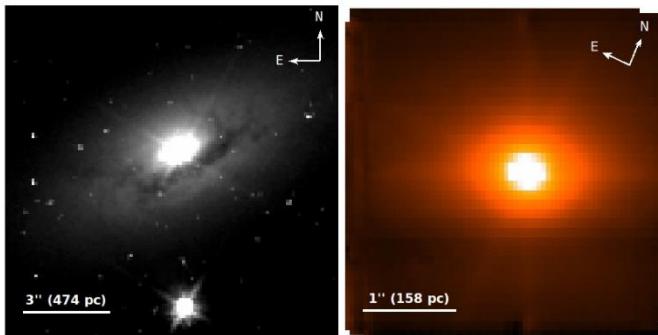
**Tabela 2.1** Najvažniji tipovi i podtipovi AGJ.

Tip	Podtip	Opis
<b>Sejfertove galaksije</b>	Tip-1	široke i uske emisione linije, slabo radio zračenje, emituje X-zračenje, spiralne galaksije, promenljivog sjaja
	Tip-2	samo uske emisione linije, slabo radio zračenje, slabo X-zračenje, spiralne galaksije, nisu promenljivog sjaja
<b>Kvazari</b>	Radio-jaki (QSR)	široke i uske emisione linije, jako radio zračenje, umerena polarizacija, FR II, promenljivog sjaja
	Radio-slabi (QSO)	široke i uske emisione linije, slabo radio zračenje, slaba polarizacija, promenljivog sjaja
<b>Radio-galaksije</b>	BLRG	široke i uske emisione linije, jako radio zračenje, FR II, slaba polarizacija, eliptične galaksije, promenljivog sjaja
	NLRG	samo uske emisione linije, jako radio zračenje, FR I i FR II, nema polarizacije, eliptične galaksije, nisu promenljivog sjaja
<b>Blazari</b>	BL Lac	skoro bez emisionih linija, jako radio zračenje, jaka polarizacija, izuzetno promenljivog sjaja, 90% kod eliptičnih galaksija
	OVV kvazari	široke i uske emisione linije, jako radio zračenje, jaka polarizacija, izuzetno promenljivog sjaja, sjajniji od BL Lac objekata
<b>LINER</b>		slični nisko-luminoznim Sejfert 2 galaksijama, emisione linije niskog stepena ionizacije, u mnogim (možda i većini) spiralnih galaksija, alternativno su možda fenomeni povezani sa zvezdorodnim regionima ili zračenje iz H II regiona

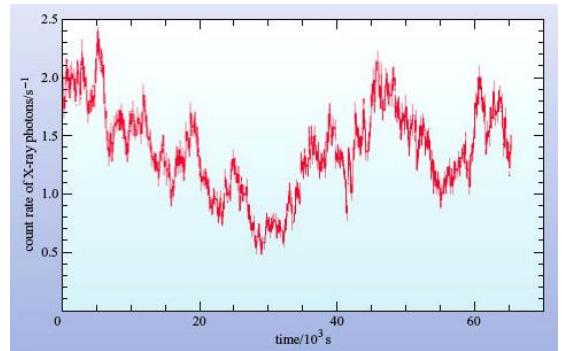
Korišćena literatura: Carroll & Ostile, 2014; Popović & Ilić 2017.

## 2.3 IZVORI ENERGIJE KOD AGJ

Poznavajući luminoznost jednog AGJ, npr. MCG -6-30-15 ( $\sim 10^9 L_\odot$ ) i poredeći to sa luminoznošću nekih od najsjajnijih zvezda u lokalnom svemiru ( $\sim 10^6 L_\odot$ ), pa čak i sa luminoznošću hipotetičkih zvezda prve generacije koje mogu dostići i luminoznost od  $10^7 L_\odot$ , jasno je da u slučaju AGJ poreklo ove energije ne može biti samo rezultat termonuklearnih reakcija koje su izvor energije kod zvezda. Sa druge strane, dimenzije regiona koji emituje X-zračenje (može se izračunati iz varijabilnosti zračenja, Slika 2.10) u slučaju MCG -6-30-15 iznose približno  $\sim 10^{-4}$  pc, što je manje od dimenzija Sunčevog sistema te ne možemo govoriti o nekom kolektivnom zračenju zvezdane komponente neke udaljene galaksije. Uzmimo u obzir još i da Sejfertova galaksija MCG -6-30-15 ima sjaj niži od tipičnog sjaja kvazara ( $\sim 1.3 \times 10^{13} L_\odot$ ), koji višestruko prevazilazi sjaj čitave galaksije Andromeda ( $\sim 10^{10} L_\odot$ ) još više nas udaljavajući od opisa izvora energije preko fuzionih procesa unutar



**Slika 2.9** Levo – Sejfertova galaksija MCG -6-30-15 snimljena u optičkom domenu (HST). Desno – ista aktivna galaksija snimljena u bliskom IC domenu (SINFONI, ESO).



**Slika 2.10** Primer varijabilnosti zračenja Sejfertove galaksije MCG -6-30-15 u X-domenu. (Chandra X-ray Observatory & Lee et al. 2002).

zvezda. Zbog toga je bilo potrebno potražiti neki drugi mehanizam koji bi mogao da objasni tako ogromnu količinu zračenja emitovanu iz tako malog regiona. Svaki sferno-simetrični sistem koji je u termodinamičkoj ravnoteži ima gornju granicu luminoznosti koju može da emituje. Ova granica se naziva Edingtonova luminoznost i predstavlja bitan parametar pri opisu akreacionih procesa (ne samo kod AGJ, već i kod tesno dvojnih sistema). Ona se definiše na sledeći način:

$$L < L_{Ed} \simeq 1.5 \times 10^{31} W \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \quad (2.1)$$

Tako recimo, zamenjujući tipičnu luminoznost kvazara u prethodnu jednačinu dobijamo gornju granicu za masu objekta koja iznosi  $M = 3.3 \times 10^8 M_\odot$ . Tako ogromna masa skoncentrisana u veoma malom prostoru je jasan dokaz da se radi o crnoj rupi.

Na osnovu prethodnog izlaganja, jasno je da je najbolji model za objašnjenje porekla ovako velike količine energije model gde se u centru AGJ nalazi supermasivna crna rupa

okružena velikim akrecionim diskom koji je sastavljen od gasovitog materijala poreklom iz zvezda i međuzvezdane sredine ili je zahvaćen iz međugalaktičkih oblaka. Materija iz akrecionog diska „pada“ na crnu rupu pri čemu se oslobađa ogromna količina gravitacione potencijalne energije.

Za razliku od akrecije materije na neutronsku zvezdu, akrecija materije na crnu rupu nije toliko efikasna. Naime, pri slobodnom padu materije na neutronsku zvezdu mase  $1.4 M_{\odot}$ , osloboдиće se 21% njene energije mirovanja. Međutim, kada posmatramo slobodan pad materije na crnu rupu, ne postoji površina sa kojom bi se ta materija sudarila. Umesto toga, za udaljenog posmatrača će to izgledati kao da materijal usporava kako se približava horizontu događaja (Švarcšildov radijus  $R_S$ ), da bi na kraju prosto nestao. S druge strane, ako se materija kreće spiralno formirajući akrecioni disk, veliki deo njene energije mirovanja se oslobađa kao posledica uticaja viskoznosti u akrecionom disku što dovodi do konverzije kinetičke energije u toplotu i zračenje. Za crnu rupu koja ne rotira, najmanji stabilni radijus za česticu sa masom (tj. unutrašnji radijus akrecionog diska) iznosi  $r = 3R_S$ . Teorija kaže da gravitaciona potencijalna energija na ovom radijusu čini 5.72% mase mirovanja čestice koju razmatramo, tako da bi se taj deo energije i oslobođio pri akreciji. Kod rotirajuće crne rupe je efekat mnogo efikasniji jer je najmanji stabilni radijus  $r = 0.5 R_S$  te je oslobođena gravitaciona potencijalna energija jednaka 42.3% od mase mirovanja upadajućeg materijala.

Definišimo akrecionu luminoznost koja nastaje kao posledica akrecije materijala pri stopi akrecije  $\dot{M}$ :

$$L_{\text{disk}} = \eta \dot{M} c^2 \quad (2.2)$$

gde  $\eta$  predstavlja faktor efikasnosti akrecije,  $0.0572 \leq \eta \leq 0.423$ . Znajući luminoznost možemo izračunati stopu akrecije i obratno. Na osnovu (2.2) i (2.1) možemo zaključiti da je stopa akrecije potrebna za održavanje Edingtonove luminoznosti, tzv. Edingtonova stopa akrecije jednaka:

$$\dot{M}_{Ed} = \frac{L_{Ed}}{\eta c^2} \quad (2.3)$$

Edingtonova stopa akrecije predstavlja maksimalnu moguću stopu akrecije gasa za datu masu crne rupe, pod uslovom da se radi o jednostavnom modelu sistema koji sferno zrači.

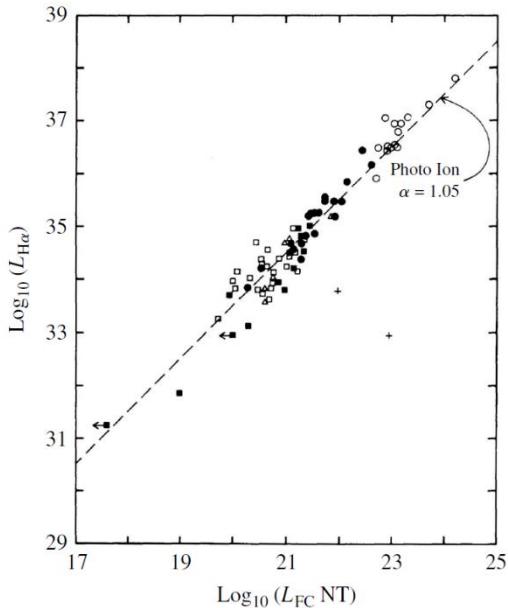
Kako smo utvrdili glavni mehanizam stvaranja zračenja u kontinuumu, spomenimo još fizičke procese koji mu doprinose emitujući najviše u  $\gamma$  i X-domenu, ali i u UV /optičkom i radio-domenu:

- Termalno Plankovo zračenje
- Zakočno zračenje
- Inverzno Komptonovo rasejanje
- Sinhrotronsko zračenje
- Kreacija i anihilacija parova  $e^{\pm}$

## 2.4 UNIFIKACIONI MODEL

U poglavlju 2.2 smo naveli najbitnije tipove aktivnih galaksija koji se razlikuju po tome da li emituju u radio-domenu, po intenzitetu  $X$  zračenja, prisustvu ili odsustvu širokih emisionih linija, stepenu polarizacije zračenja itd. Pored ovih razlika postoji mnogo sličnosti između njih. Naime, svi oni imaju sjajno kompaktno jezgro, zračenje u kontinuumu u širokom opsegu frekvencija i većina ih je promenljivog sjaja. Postavlja se pitanje, da li su svi ovi tipovi aktivnih galaksija zaista fundamentalno različiti ili se radi o sličnjim objektima nego što nam se čini.

Prvi dokaz koji ukazuje na to da se ne radi o fundamentalno različitim objektima je činjenica da je supermasivna crna rupa u centru svakog od njih i da se oko nje formira akrecioni disk odgovoran za veći deo zračenja u kontinuumu. Tako bi neke od razlika između tipova AGJ mogle da poteknu od različite stope akrecije, kao i od različitih masa centralne crne rupe. Još jedan od razloga za prividne razlike u spektrima AGJ može biti posledica toga da centralni izvor energije ne zrači izotropno već njegovo zračenje zavisi od orijentacije u odnosu na pravac posmatranja.



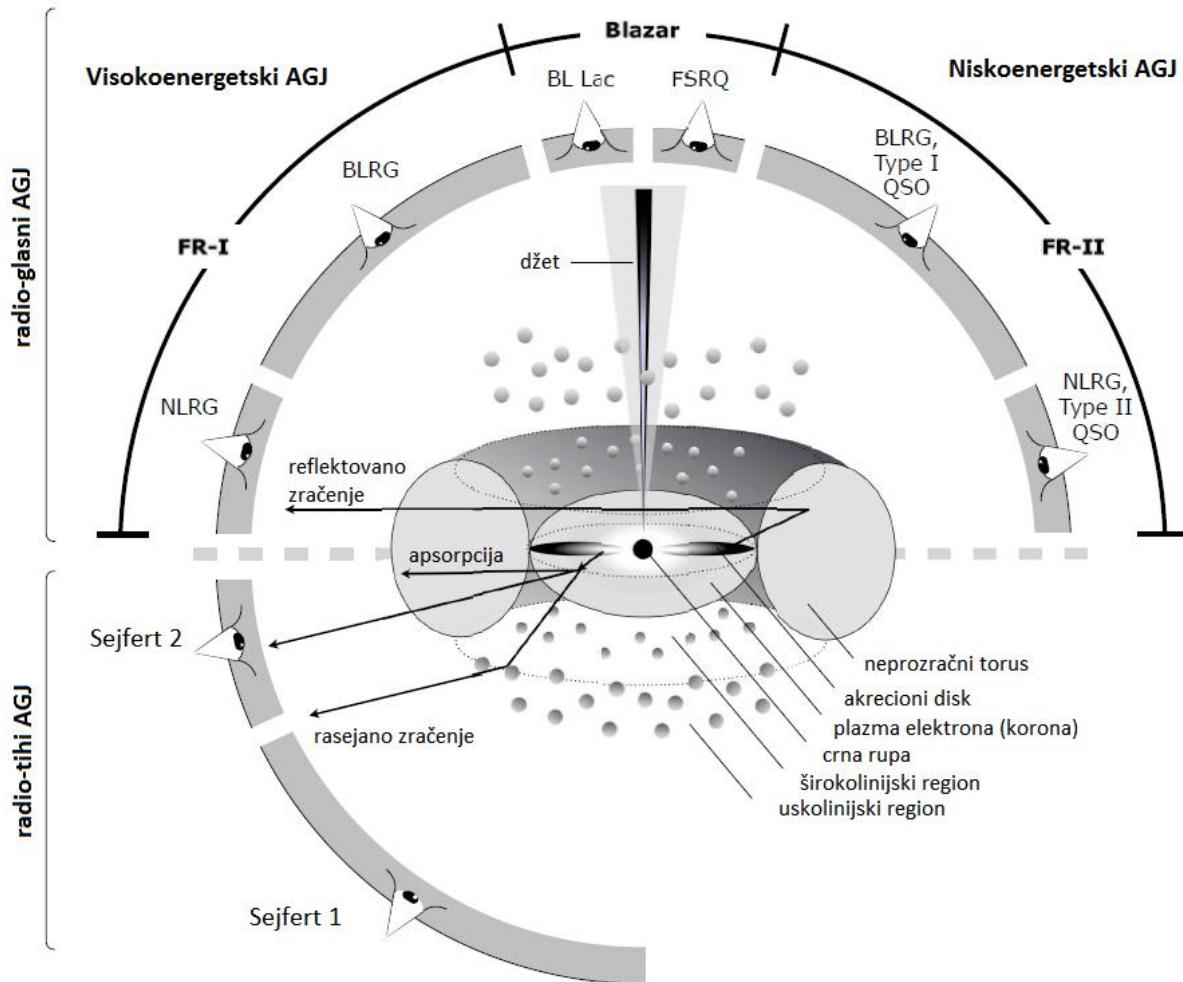
**Slika 2.11** Zavisnost luminoznosti  $\text{H}\alpha$  linije i luminoznosti kontinuumu na 480 nm. „NT“ u indeksu luminoznosti kontinuumu znači da se radi o netermalnom kontinuumu. Simboli predstavljaju kvazare (prazni kružnici), Sejfert 1 galaksije (puni kružnici), Sejfert 2 galaksije (prazni kvadratići), NLRG (trouglići) i dodatne Sejfert 2 i NLRG (puni kvadratići). (*Adaptirano iz Shuder, 1981.*)

koje je zaklonjeno nekim optički debelim materijalom. Taj materijal je najverovatnije torus prašine koji okružuje centralni izvor i zračenje koje dolazi iz njega biva polarizованo pri

Slедеći dokaz koji takođe ide u prilog unifikaciji AGJ ukazuje na zajedničko poreklo širokih i uskih vodonikovih emisionih linija. Naime, otkrivena je skoro savršena linearna zavisnost između luminoznosti  $\text{H}\alpha$  linije i luminoznosti kontinuumu na 480 nm (Slika 2.11). To znači da su rekombinacione linije vodonika koje vidimo u spektru nastale kao posledica fotoionizacije od strane zračenja iz kontinuumu. Ova veza je pronađena kod Sejfert 1 i Sejfert 2 tipa galaksija, kod radio-galaksija tipa 1 i 2 (BLRG i NLRG), kao i kod radio-jakih i radio-slabi kvasara.

Unifikacionom modelu ide u prilog i otkriće Roberta Antonučija (*Robert Antonucci*) i Džozefa Milera (*Joseph Miller*) koji su 1985. godine otkrili tipičan spektar Sejfert 1 galaksije posmatrajući Sejfert 2 galaksiju NGC 1068 u polarizovanom svetlu. Kasnije je ovo otkriće potvrđeno i u drugim slučajevima Sejfert 2 galaksija. Ono što možemo zaključiti iz ovoga jeste to da se unutar Sejfert 2 galaksija krije jezgro Sejfert 1 galaksije

interakciji sa česticama prašine u torusu, otkrivajući refleksiju iz regiona koji je bliži crnoj rupi odakle dolaze široke linije. Ovim posmatranjem je dokazano da su galaksije tipa Sejfert 1 i Sejfert 2 isti objekti, ali da im se spektri razlikuju zbog različitog položaja posmatrača u odnosu na torus. Slično važi i za radio galaksije i kvazare tipa 1 i 2, dok spektar blazara detektujemo onda kada je mlaz relativističkih čestica uparen direktno ka posmatraču (pogledati Sliku 2.12).

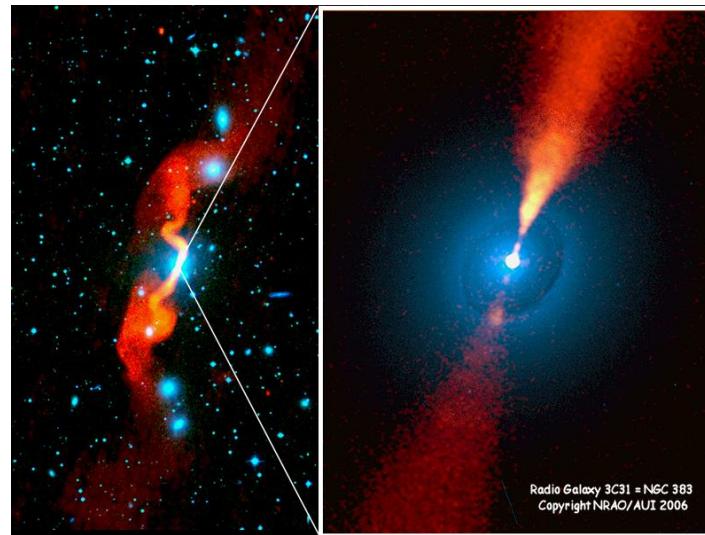


**Slika 2.12** Šematski prikaz unifikacionog modela AGJ. Tip AGJ zavisi od ugla posmatranja, prisustva džeta i energije centralnog izvora. Na ovoj slici ujedno možemo videti i strukturu AGJ. U centru se nalazi crna rupa koja je okružena akrecionim diskom koji postepeno prelazi u neprozračni torus od prašine. Širokolinijski region je zaklonjen torusom, dok se znatno dalje od jezgra nalazi uskolinijski region. Mlaz relativističkih čestica (džet) se nalazi normalno u odnosu na ravan akrecionog diska. Napomena: radio-jaki objekti obično imaju simetrične džetove, što se ne vidi na ovoj šemi. (*adaptirano iz Beckmann & Shrader, 2012*).

Unifikacioni model ujedno pruža i uvid u strukturu AGJ. U samom centru se nalazi supermasivna crna rupa ( $M \sim 10^6 - 10^{10} M_\odot$ ) koja je okružena akrecionim diskom koji se od

centra AGJ prostire i do  $10^{-3}$  pc nakon čega postepeno prelazi u torus prašine. Oko akrecionog diska se nalazi region koji emituje široke emisione linije (širokolinijski region) i zaklonjen je torusom prašine ukoliko se posmatra pod velikim uglovima u odnosu na džet. U ovom regionu, oblaci se kreću izuzetno velikim brzinama ( $\sim 1,000 - 10,000$  km s $^{-1}$ ) i udaljeni su od centra od  $10^{-3}$  do 0.1 pc. Torus prašine se prostire od spoljašnje granice širokolinijskog regiona i dostiže dimenzije od nekoliko pc ili nekoliko desetina pc. Oblast koja emituje uske linije (uskolinijski region) se nalazi iznad torusa i dalje od crne rupe dostižući dimenzije između jednog pc i nekoliko stotina pc. Kako se nalaze dalje od crne rupe, oblaci u uskolinijskom regionu se kreću manjim brzinama ( $\sim 100 - 900$  km s $^{-1}$ ) u odnosu na oblake iz širokolinijskog regiona koji su pod većim uticajem crne rupe. Ukoliko se radi o radio-jakim AGJ, postoji mogućnost postojanja usmerenog mlaza (džeta) relativističkih čestica (Slika 2.13).

Predstavljeni unifikacioni model ima i svoje nedostatke. Očekivalo bi se da se u polarizovanom zračenju svih AGJ tipa 2 vide spektri AGJ tipa 1, međutim to nije slučaj. Objekti kod kojih je ovo uočeno (jedan broj galaksija sa uskim linijama) se nekad označavaju kao „stvarna“ ili „istinska“ AGJ tipa 2. Još jedan od nedostataka je to da je procenat polarizovanog zračenja manji nego predviđeni. Ovi nedostaci bi mogli da se objasne time da AGJ u različitim stepenima evolucije imaju drugačiju strukturu, kao i činjenicom da je struktura torusa prašine možda drugačija nego što se prepostavlja. O ovim temama se još uvek intenzivno raspravlja i predmet je budućih istraživanja. Korišćena literatura u ovom poglavlju: Carroll & Ostile, 2014, Popović & Ilić, 2017.

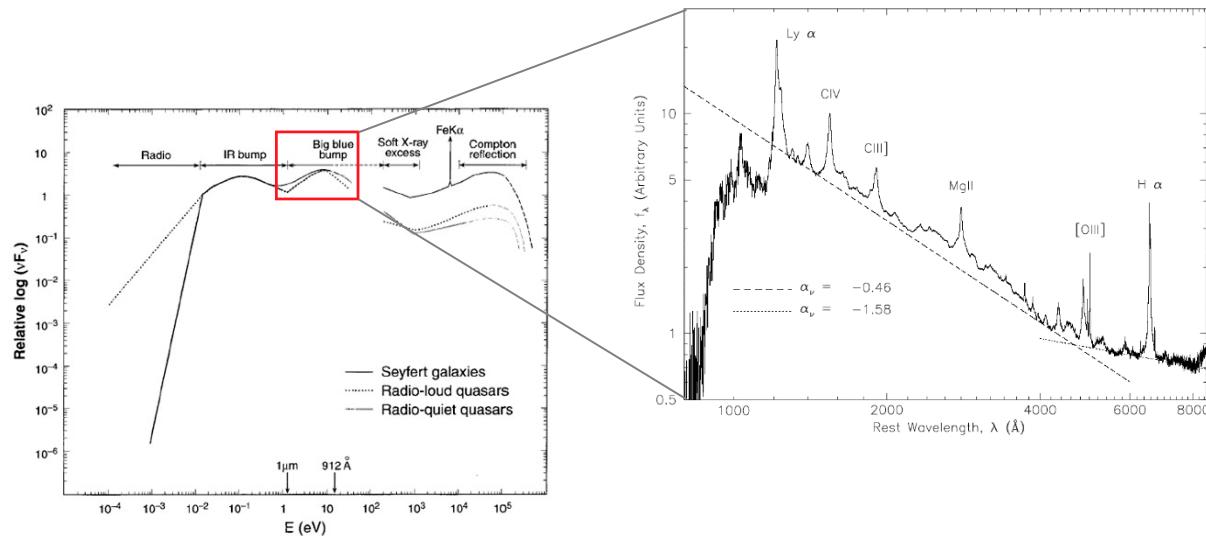


**Slika 2.13** Kompozitna slika radio galaksije 3C 31 (NGC 383). Crvena boja označava radio emisiju, dok plava označava zračenje u vidljivom delu spektra. Na slici desno su vrlo jasno vidljivi džetovi relativističkih elektrona koji emituju sinhrotronsko zračenje i protežu se nekoliko kpc od centra AGJ. Na slici levo se može primetiti da se ti isti džetovi na još većim skalama počinju rasipati i mešati sa međugalaktičkom sredinom. (Preuzeto sa sajta: <https://www.cv.nrao.edu/~abridge/3c31xopt.htm>).

### 3 OPTIČKE SPEKTRALNE OSOBINE OSOBINE EMISIONIH REGIONA AGJ

Kako je naše istraživanje fokusirano samo na proučavanje korelacija između optičkih spektralnih parametara, fokusiraćemo se samo na objašnjenje mehanizama zračenja koji su bitni za optički/UV deo spektra AGJ.

Fizičke osobine gasa u različitim regionima AGJ zavise od njegove lokacije, gustine, linijske gustine i sastava. Ovi parametri određuju stepen ionizacije, udeo prašine, brzinu gasa, i ostale parametre date sredine.



**Slika 3.1** Levo – Šematska reprezentacija spektralne energetske raspodele (*Spectral Energy Distribution - SED*) kontinuuma za različite tipove AGJ. U slučaju radio-slabih izvora, vide se tri glavne komponente: „infracrveno ispuštanje“ (IR bump) koje potiče od zračenja prašine u torusu, zatim „veliko plavo ispuštanje“ (Big blue bump) koje je direktno povezano sa glavnim mehanizmom zračenja u akrecionom disku i region X-zračenja, koji se može interpretirati kao visokoenergetski produžetak „velikog plavog ispuštanja“ zajedno sa stepenim zakonom porekla od Komptonovog rasejanja. Tu je vidljiva i emisiona linija Fe K $\alpha$ . Kod radio-jakih izvora, u radio-domenu dominira sinhrotronski mehanizam zračenja, opisan stepenim zakonom. Crveni kvadrat obuhvata optički/UV deo spektra (Koratkar & Blaes, 1999). Desno – Kompozitni optički/UV spektar kvazara. U proces kreiranja kompozitnog spektra je uključeno preko 2,200 kvazara iz SDSS baze podataka u širokom opsegu crvenih pomaka ( $0 < z < 5$ ). Označka  $\alpha_\nu$  predstavlja spektralni indeks stepenog zakona. (Vanden Berk et al. 2001).

### 3.1 ZRAČENJE U KONTINUUMU

Optičko i ultraljubičasto kontinualno zračenje potiče uglavnom iz akrecionog diska, ali iz delova koji su malo udaljeniji od crne rupe, dok delovi akrecionog diska koji su najbliže crnoj rupi emituju kontinualno X zračenje. Zračenje AGJ u kontinuumu je termalnog porekla i opisano je Plankovim zakonom zračenja crnog tela. Poznavajući Edingtonovu luminoznost AGJ, temperatura koja se dobija preko Plankovog zakona odgovara zračenju crnog tela sa maksimumom u UV domenu. Tako da je značajan deo ukupne energije izračen u vidu UV fotona. Naravno, kontinualno zračenje koje dolazi iz akrecionog diska ne možemo u potpunosti opisati zračenjem crnog tela jer je njegova struktura znatno kompleksnija, te je neophodno razvijati modele koji će uzeti u obzir detalje poput vertikalne komponente akrecionog diska, mogućnost različite strukture na različitim radiusima, da li je optički debo ili ne, itd.

Optičkim/UV spektrom AGJ dominira „veliko plavo ispuštenje“ (Shields, 1978; Malkan & Sargent, 1982; Elvis, 1985) gde je najčešće lociran i maksimum zračenja ( $\sim 1216 \text{ \AA}$ ). Ovaj deo kontinualnog spektra se može aproksimirati stepenim zakonom, kako na nižim tako i na višim frekvencijama, a proteže se u opsegu talasnih dužina  $\sim 1,000 - 4,000 \text{ \AA}$  (Slika 3.1 desno). Pored „velikog plavog ispuštenja“ postoji i „malo plavo ispuštenje“ ili „plavi eksces“ u opsegu talasnih dužina  $\sim 2,200 - 4,000 \text{ \AA}$ . Ovaj deo spektra nije istinsko zračenje kontinuma, već potiče od velikog broja emisionih linija jona Fe II i Balmerovog rekombinacionog kontinuma (Balmerov kvazikontinuum<sup>9</sup>).

### 3.2 ŠIROKE EMISIONE LINIJE I ŠIROKOLINIJSKI REGION

Emisione linije koje imaju punu širinu na polovini maksistema (FWHM) veću od  $1,000 \text{ km s}^{-1}$  klasificuju se kao široke emisione linije. Ove linije generalno nastaju iz dozvoljenih prelaza, a ponekad i iz poluzabranjenih. Neke od najsajnijih širokih emisionih linija u spektrima AGJ su date u Tabeli 3.1

Kada posmatramo odredenu liniju u spektru, znamo da se radi o superpoziciji linija istog prelaza koje nastaju u oblacima širokolinijskog regiona. Kako je ovaj region lociran relativno blizu crne rupe i pod njenim je gravitacionim uticajem, oblici gase iz ovog regiona se kreću u raznim pravcima velikim brzinama, što sa posmatračkog stanovišta izgleda kao da nam se emisioni regioni približavaju i udaljavaju. Tako kinematika ovog regiona utiče na proširenje linije, jer one trpe plavi pomak kada se oblak kreće ka nama i crveni pomak kada se on udaljava od nas. Zbirni efekat je široka emisiona linija koja je superpozicija svih

---

<sup>9</sup> Balmerov kvazikontinuum – kod širokih Balmerovih linija, posle emisije H $\delta$  se često ne mogu uočiti pojedinačne linije, nego se sve ostale linije, iz viših prelaza, superponiraju stvarajući tako emisiju koja doprinosi kontinumu, sa oštrim ispuštenjem na oko  $3,300 \text{ \AA}$ .

pojedinačnih profila. Ovaj efekat nosi naziv Doplerovo širenje. Širine ovih linija mogu da dostignu i  $10,000 \text{ km s}^{-1}$ .

**Tabela 3.1** Široke emisione linije koje su prosečno najjačeg intenziteta u spektrima AGJ. Redosled emisionih linija u tabeli je dat tako da opadaju po intenzitetu počevši od Ly $\alpha$ .

Emisiona linija	$\lambda_0 [\text{\AA}]$
Ly $\alpha$	1216
C IV	1549
H $\alpha$	6562.8
C III]	1909
Mg II	2800
N V	1240
Si IV	1402.8
He II	4686
H8	4861.3

sredini veće gustine nego što su to emisione magline i H II regioni za koje su razradene metode određivanja fizičkih parametara na osnovu merenih odnosa zabranjenih linija. Moglo bi se reći da sam širokolinjski region ima više sličnosti sa zvezdanim atmosferama. Postoje neke procene temperature koje su dobijene na osnovu posmatranja linija jonizovanog gvožđa i one daju gornju granicu od  $35,000 \text{ K}^{10}$ . Donja granica gustine unutar širokolinjskog regiona se može odrediti na osnovu odsustva zabranjene linije [O III]  $\lambda 4363$  jer znamo kritičnu koncentraciju koja je potrebna za dobijanje ove linije sudarnom deekscitacijom i ona iznosi  $\sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Za gornju granicu se može uzeti kritična gustina sudarne deekscitacije širokih linija koja iznosi  $n_c \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Iz vremenskog kašnjenja u varijaciji fluksa širokih emisionih linija u odnosu na variranje fluksa zračenja kontinuma mogu se odrediti dimenzije širokolinjskog regiona i procenjeno je da se kreću između  $10^{-3}$  i  $0.1 \text{ pc}$ . Ukupna masa širokolinjskog regiona se procenjuje u rasponu od  $10^4$  do  $10^5 M_\odot$ , međutim samo mali deo tog gasa doprinosi emisiji u linijama. Važno je spomenuti da je uz pomoć reverberacionog mapiranja<sup>11</sup> ustanovljeno da se širokolinjski region sastoji iz više slojeva sa različitim fizičkim uslovima što uvodi još jedan nivo kompleksnosti u analizu dinamike ovog regiona.

Korišćena literatura: Popović & Ilić, 2017.

Posmatranja su pokazala da fluksovi emisionih linija variraju sa fluksom zračenja kontinuma, uz malo vremensko kašnjenje, odakle se može zaključiti da je gas u širokolinjskom regionu fotoionizovan i optički debeo za ionizujuće zračenje kontinuma. Atomi unutar oblaka u širokolinjskom regionu su pobuđeni na viša ionizaciona stanja, nakon čega dolazi do zahvata elektrona što ima za posledicu niz kaskadnih prelaza na niže energetske nivoe, pri čemu nastaju tzv. rekombinacione emisione linije. Ovaj mehanizam stvaranja linija dominira u širokolinjskom regionu u odnosu na sudarne deekscitacije.

Vrlo je teško odrediti fizičke karakteristike širokolinjskog regiona, poput temperature, elektronske koncentracije i linijske gustine zato što se ovde radi o

<sup>10</sup> Postojanje linija Fe II u spektru ukazuje na temperature od maksimalno  $35,000 \text{ K}$  jer bi na većim temperaturama očekivali i Fe III liniju da se pojavi, a to nije slučaj.

<sup>11</sup> Reverberaciono mapiranje – metod za određivanje dimenzija širokolinjskog regiona na osnovu kašnjenja promena u intenzitetu linija u odnosu na kontinuum.

### 3.3 USKE EMISIONE LINIJE I USKOLINIJSKI REGION

Kao uske emisione linije klasificuju se one linije koje imaju  $\text{FWHM} < 1000 \text{ km s}^{-1}$ , mada prosečna širina ovih linija u uskolinijском regionu iznosi oko  $400 \text{ km s}^{-1}$ . Ove linije mogu da poteknu iz dozvoljenih, poluzabranjenih i zabranjenih prelaza. Recimo dozvoljene i poluzabranjene linije su ustvari uske komponente iz Lajmanove i Balmerove serije, kao i uske komponente linija C IV  $\lambda 1549$ , He II  $\lambda 4686$ , C III]  $\lambda 1909$  i drugih. Zabranjene linije su vrlo interesantne jer mogu da nam pruže informacije o regionu koji ih emituje koristeći se metodama za dijagnostiku plazme. Lista intenzivnih uskih linija je data u Tabeli 3.2.

Za razliku od fluksa emisionih linija širokolinijskog regiona, fluksevi uskih linija ne variraju sa fluksom zračenja kontinuma, čak što više, njihov fluks je relativno stabilan u toku vremena što ukazuje na velike dimenzije uskolinijskog regiona. Procenjuje se da se uskolinijski region nalazi na mnogo većim rastojanjima od centralnog izvora u odnosu na širokolinijski region, i to od  $\sim 1$  do  $\sim 1000$  pc. Na ovim rastojanjima, uskolinijski region nije zaklonjen torusom prašine te je generalno vidljiviji od širokolinijskog regiona koji je obično zaklonjen njime.

**Tabela 3.2** Uske emisione linije koje su prosečno najjačeg intenziteta u spektrima AGJ. Redosled emisionih linija u tabeli je dat tako da opadaju po intenzitetu počevši od Ly $\alpha$ .

Emisiona linija	$\lambda_0 [\text{\AA}]$
Lya	1216
C IV	1549
[O III]	5007
C III]	1909
[O III]	4959
O II	3727
H $\alpha$	6563
[N II]	6548
Mg II	2798
[Si II]	6716
[Ne III]	3869
[Ne V]	3426
H8	4861

fotojonizacije ali i udarnim talasima poreklom od interakcije sa mlazom relativističkih čestica ili vetrova koji dolaze iz centralnog izvora AGJ. Emisione linije koje nastaju u ovom regionu su nastale dominantno kao posledica sudarnih procesa, dok su rekombinacione linije ređe. Zabranjene linije zahtevaju posebne uslove: one nastaju sudarnim procesima ali sredina ujedno mora biti i dovoljno retka kako bi moglo da dode do radijativne deekscitacije sa metastabilnog nivoa. Prisustvo ovih linija očigledno ukazuje na retku sredinu.

Korišćena literatura: Popović & Ilić, 2017.

Pošto uskolinijski region emituje i zabranjene linije, moguće je koristiti se metodama za dijagnostiku plazme i iz odnosa flukseva pojedinih linija proceniti temperaturu i gustinu gasa. Tako se prosečna vrednost

temperature gasa procenjuje na oko  $T \approx 15,000 \text{ K}$ , dok je elektronska gustina oko  $n_e \approx 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Masa uskolinijskog regiona je veća od mase širokolinijskog regiona zbog većih dimenzija i iznosi oko  $\sim 10^6 M_\odot$ . Kod nekih bliskih AGJ, moguće je detektovati uskolinijski region uz dovoljno dobru razdvojnu moć teleskopa. Recimo svemirski teleskop Habi ima dovoljno dobru rezoluciju za to, te je primećeno da oblik ovog regiona nije sfernosimetričan, već je osnosimetričan i to tako da se ose simetrije ove oblasti poklapaju sa osama džetova relativističkih čestica.

Centralni izvor zračenja utiče i na uskolinijski region, tako da je gas u njemu jonizovan procesom

rekonverzije

## DRUGI DEO

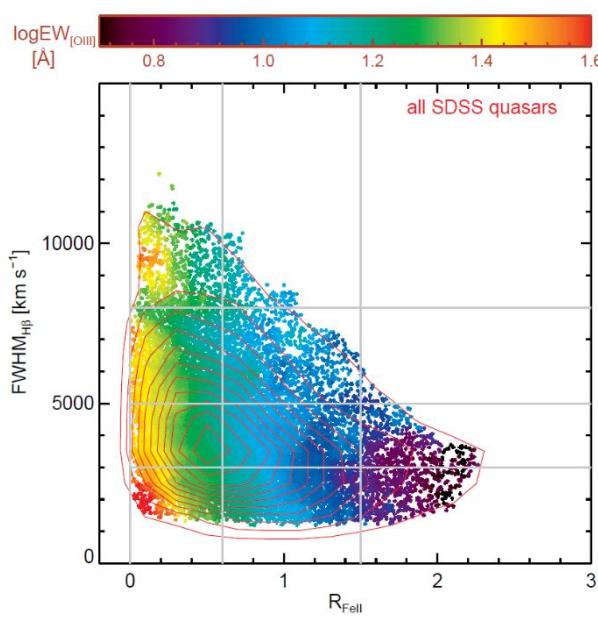
### - Metode, analiza i rezultati istraživanja -

## 4 PREGLED STANJA U OBLASTI ISTRAŽIVANJA

---

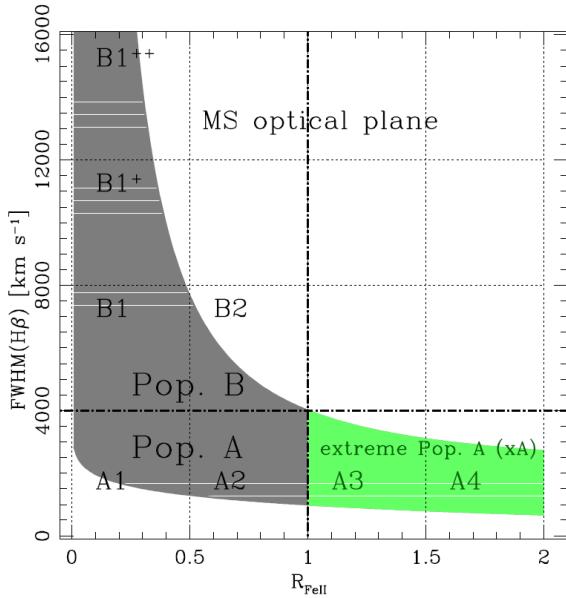
Veliki napredak u razumevanju optičkih spektralnih karakteristika AGJ tipa 1 je postignut u vreme kada su postali dostupni veći uzorci kvazara čiji su spektri imali visok odnos signala i šuma. U jednom od bitnijih istraživanja u kome su iskorišćena ova nova i preciznija merenja spektara, izvršena je analiza optičkih spektralnih parametara na uzorku od 87 kvazara (Boroson & Green, 1992). Analiza glavnih komponenti je primenjena na korelacionu matricu izdvojenih parametara i pokazano je da su glavni trendovi u podacima (prva glavna komponenta) vezani za anti-korelaciju između ekvivalentne širine [O III]  $\lambda 5007 \text{ Å}$  i ekvivalentne širine jednom jonizovanog gvožđa Fe II.

Mnoga istraživanja na bazi analize glavnih komponenti su usledila (Sulentic, et al., 2000; Sulentic, et al., 2000; Dultzin-Hacyan, et al., 1997; Shang, et al., 2003; Tang, et al., 2012; Kuraszkiewicz, et al., 2009; Mao, et al., 2009; Grupe, 2004). Zatim su i raniji rezultati potvrđeni analizom novijih podataka iz SDSS baze (Yip, et al., 2004; Wang, et al., 2006; Zamfir, et al., 2008; Richards, et al., 2011; Kruczak, et al., 2011; Marziani, et al., 2013; Shen & Ho, 2014; Sun & Shen, 2015; Brotherton, et al., 2015).



**Slika 4.1** Raspodela kvazara u optičkoj ravni E1 parametarskog prostora. Na horizontalnoj osi je predstavljena relativna jačina gvožđa Fe II u odnosu na široku H8 liniju ( $R_{\text{FeII}}$ ), dok je na vertikalnoj osi predstavljena širina (FWHM) H8 linije. Crvene konture označavaju raspodelu kvazara iz SDSS baze koja je korišćena u radu u kome je objavljen grafikon, dok tačke označavaju pojedinačne objekte. Tačke su kodirane bojom koja označava jačinu [O III]  $\lambda 5007$  linije (Shen & Ho, 2014).

Pravac u kojem se trenutno ide je unifikacija različitih tipova AGJ, kako sa teorijskog tako i sa empirijskog stanovišta. Recimo, još 2000. godine, grupa naučnika (Sulentic, et al., 2000) je pokušala da definiše parametarski prostor (tzv. *Eigenvector 1*, Slika 4.1) za kvazare tipa 1 koji bi bio analogon Hercsprung-Raselovog (HR) dijagrama za zvezde, s tim da bi se ovde radilo o 4-dimenzionom parametarskom prostoru umesto 2-dimenzionom, kakav je HR dijagram. Ovaj parametarski prostor obuhvata parametre merene u optičkom (FWHM H8 i  $R_{\text{FeII}}$ ), UV (pomeraj brzine centroida C IV  $\lambda 1549$  spektralne linije) i X-domenu zračenja (fotonski indeks mekog X-zračenja). Jedan od bitnijih zaključaka proisteklih iz ovih istraživanja je prisustvo glavnog niza kvazara u ovom parametarskom prostoru koji zavisi od Edingtonovog odnosa (a on je proporcionalan brzini akrecije materijala po jedinici mase), slično kao što je glavni



**Slika 4.2** Optička ravan E1 parametarskog prostora (FWHM H $\beta$  vs.  $R_{\text{Fell}}$ ). Na slici je predstavljen glavni niz kvazara podijeljen na dve glavne populacije (A i B). Oznaka „MS“ potiče od engleskog izraza „Main Sequence“ što u prevodu znači glavni niz. Sam glavni niz kvazara je predstavljen sivom površinom, dok je zelenom bojom označena površina parametarskog prostora koju popunju kvazari koji pripadaju ekstremnom delu populacije A. Na grafiku su obeleženi svi spektralni podtipovi koji imaju značajniju zastupljenost na niskim crvenim pomacima (Marziani, et al., 2019).

fundamentalnija. Autori navode da bi najverovatniji mehanizam koji стоји иза ове podele mogao biti Edingtonov odnos koji ima manje vrednosti za kvazare iz Populacije B.

Pošto se u ovom radu bavimo i Baldvinovim efektom, navodimo trenutno stanje i u ovoj oblasti. Baldvinov efekat predstavlja anti-korelaciju koja se javlja između ekvivalentne širine emisionih linija i luminoznosti kontinuma iz oblasti talasnih dužina date linije. Ovaj trend je prvi put primećen kod C IV linije (Baldwin, 1977). Postoje razlike između Baldvinovog efekta koji se javlja kod širokih i uskih emisionih linija. Razlog tome je činjenica da one potiču iz različitih emisionih regiona sa različitim dinamičkim i geometrijskim osobinama. Mnoga istraživanja su se bavila Baldvinovim efektom za široke linije (pogledati Sliku 4.3 i radove Dietrich, et al., 2002; Shields, 2007; Wu et al., 2009; Bian, et al., 2012), mada je fizičko poreklo ovog efekta još uvek nerešeno (pogledati Rakić et al., 2017). Jedno od mogućih objašnjenja Baldvinovog efekta kod širokih linija je zavisnost oblika kontinuma od luminoznosti, tako da luminozniji objekti imaju mekše UV/X zračenje što dovodi do slabijeg efekta ionizacije i fotoelektričnog zagrevanja gasa u širokolinijskom regionu (pogledati Boroson & Green, 1992; Korista et al., 1998). Poreklo Baldvinovog efekta za uske linije (Slika 4.4) takođe nije razjašnjeno (pogledati Shields, 2007). Nekoliko grupa

autora ga je proučavalo i postoje jasni dokazi da bar neke uske linije ispoljavaju Baldvinov efekat (Boroson & Green, 1992; McIntosh, et al., 1999; Croom, et al., 2002; Dietrich, et al., 2002; Netzer, et al., 2004; Netzer, et al., 2006; Keremedjieva, et al., 2009; Zhang, et al., 2013). Recimo, grupa autora (Kovačević, et al., 2010) je izvršila vrlo precizna spektralna merenja na uzorku  $\sim 300$  kvazara i zabeležila jaku anti-korelaciju između [O III] linije i uske H $\beta$  linije sa luminoznošću kontinuma, gde su korelacioni koeficijenti iznosili -0.36 i -0.43, respektivno. Neki od novijih rezultata koji su povezani sa uskolinijskim Baldvinovim efektom su sledeći:

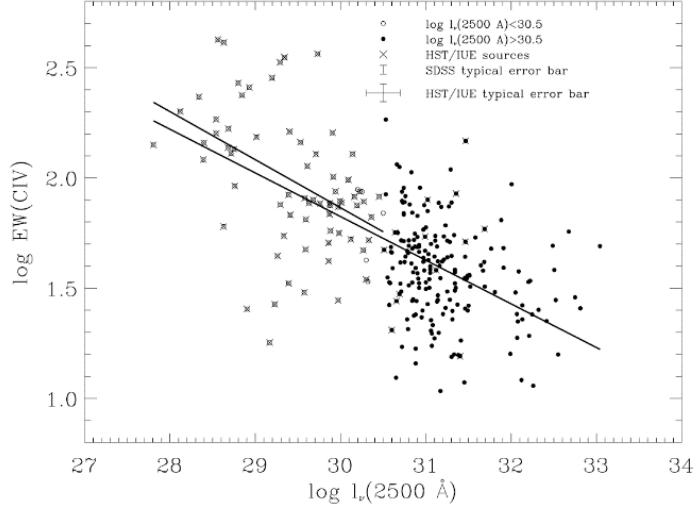
- Za razliku od širokolinijskog Baldvinovog efekta, gde je pokazano da koeficijenti pravca<sup>12</sup> mogu imati različite vrednosti za različite linije, kod uskolinijskog Baldvinovog efekta to nije slučaj (Zhang, et al., 2013). Međutim, naše istraživanje nije potvrdilo ovaj rezultat.
- Pokazano je da koeficijenti pravca Baldvinovog efekta za uske linije ne zavise od jonizacionog potencijala tih linija, niti od njihovih kritičnih gustina (Zhang, et al., 2013).

Što se tiče samog porekla ovog efekta, navećemo nekoliko mogućih razloga koji su diskutovani u pomenutim radovima. Kod veoma sjajnih AGJ prostorne dimenzije uskolinijskog regiona mogu postati uporedive sa dimenzijama galaksije domaćina, tako da je gas iz uskolinijskog regiona vrlo verovatno davno napustio galaksiju, te se može zaključiti da najsjajnija AGJ imaju veoma slab ili čak nepostojeći uskolinijski region (Croom et al. 2002). Međutim, Zhang et al. (2013) diskutuju kako veći deo zračenja koje dolazi iz uskolinijskog regiona potiče ustvari iz regiona koji ne prevaziđa dimenzije centralnog ovala galaksije domaćina. Takođe, gas iz uskolinijskog regiona može biti jako ionizovan ili delimično izbačen iz galaksije što može imati za posledicu smanjenu emisiju iz zabranjenih linija u optičkom domenu (Shields, 2007).

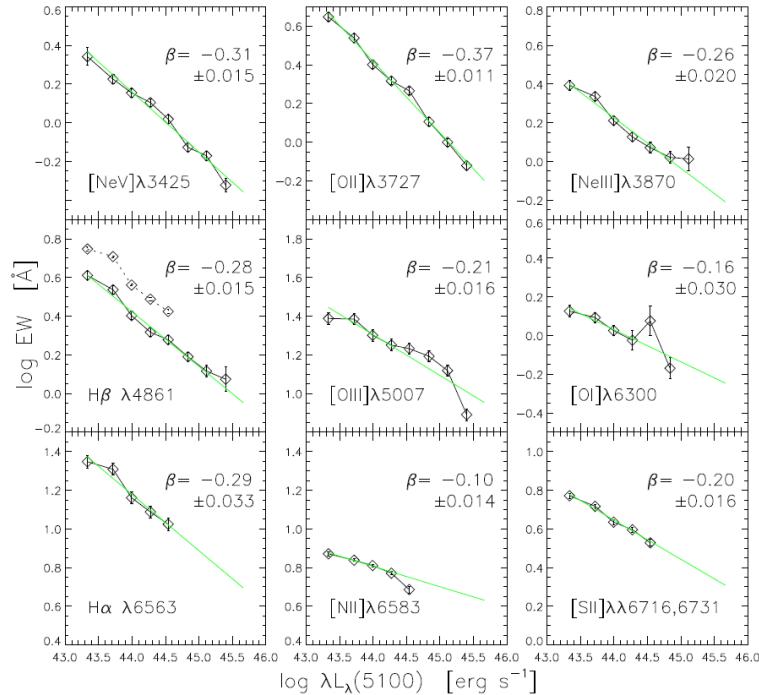
Dakle, da bi se objasnio ovaj efekat, potrebno je uzeti u obzir prostornu skalu uskolinijskog regiona koja je mnogo veća od skale širokolinijskog regiona, ionizaciju gasa od strane mlaza relativističkih čestica, izbacivanje gasa iz galaksije, ekstinkciju luminoznosti kontinuma prouzrokovana prašinom koja se nalazi između širokolinijskog i uskolinijskog regiona (pogledati Heard & Gaskell, 2016), uticaj luminoznosti zvezdane komponente poreklom od matične galaksije na luminoznost kontinuma i vrlo je moguće da postoji još faktora koji utiču drugačije na uskolinijski region nego na širokolinijski region, te su potrebna dalja istraživanja kako bi se utvrdilo fizičko poreklo ovog efekta.

---

<sup>12</sup> Radi se o koeficijentu pravca ( $\beta$ ) dobijenom primenom linearne regresije na uzorak kvazara gde je ekvivalentna širina linije zavisno promenljiva, a luminoznost odgovarajućeg kontinuma je nezavisno promenljiva. Ova veličina služi kao indikator intenziteta ispoljavanja Baldvinovog efekta u nekom uzorku AGJ.



**Slika 4.3** Zavisnost ekvivalentne širine CIV linije od luminoznosti kontinuuma na 2500 Å. EW (CIV) je izražena u Å dok je  $l_\nu$  (2500 Å) izražena u jedinicama  $\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1}$ . Puni kružići predstavljaju kvazare koji imaju  $\log l_\nu$  (2500 Å)  $> 30.5$ , dok prazni kružići reprezentuju kvazare koji imaju  $\log l_\nu$  (2500 Å)  $< 30.5$ . Kratka puna linija je najbolji linearni fit za tačke niže luminoznosti, dok je dugačka puna linija najbolji linearni fit za ceo uzorak. (Wu, et al., 2009).



**Slika 4.4** Zavisnost ekvivalentnih širina različitih uskih emisionih linija od luminoznosti kontinuuma na 5100 Å. Zelenom linijom su obeleženi rezultati linearne regresije primenjene na uzorak kvazara podeljenih po binovima luminoznosti širine 0.3 dex. U gornjem desnom uglu svakog grafika je data vrednost koeficijenta pravca za Baldvinov efekat. U panelu gde je prikazana uska H $\beta$  linija, prikazana je i linerana regresija za usku H $\alpha$  liniju radi lakšeg poređenja (Zhang, et al., 2013).

## 5 METODE ISTRAŽIVANJA

---

Metode koje se koriste za istraživanje korelacija između različitih spektralnih karakteristika kvazara podrazumevaju uglavnom analizu na bazi korišćenja korelacionih koeficijenata i primena linearne regresije na parametre od značaja radi računanja koeficijenata pravaca. Jedan od relativno novih pristupa u ovim analizama je primena analize glavnih komponenti. Ova analiza je značajna jer pruža uvid u trendove koji se javljaju između parametara i daje sveobuhvatniju sliku od računanja koeficijenata korelacije. Na taj način, mi dobijamo informaciju koji parametri imaju najveći uticaj na ukupnu varijansu u podacima.

Upravo iz prethodno navedenih razloga, mi smo se primarno opredelili za analizu glavnih komponenti, a sekundarno smo naša istraživanja potkrepili korelacionim matricama i računanjem koeficijenata pravca za parametre od interesa.

### 5.1 ANALIZA GLAVNIH KOMPONENTI

Zamislimo da želimo da saznamo nešto o nekoj populaciji, uzmimo recimo populaciju studenata fizike sa Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Svaki student je opisan sa mnoštvom parametara (npr. težina, visina, prosečna ocena, broj položenih ispita, rodni grad, itd.). Ako pretpostavimo da je broj studenata veoma veliki, kao i broj parametara koje merimo za svakog studenta, analiza korelacija između ovih parametara bi postala prilično složena. Ukoliko želimo da uočimo neke pravilnosti u populaciji (da li studenti sa boljim prosečnim ocenama ranije završe fakultet ili to nema veze, kakav je profil studenata koji učestvuju u vannastavnim aktivnostima, itd.), tradicionalan način bi bio da se nacrtaju grafici zavisnosti parametara svaki sa svakim i da se traže korelacije na taj način. Ljudski mozak bi mogao da se nosi sa 2 ili 3 parametra bez problema, međutim kako broj parametara raste, svaki od njih je manje ili više u korelaciji sa ostalima te analiza postaje vrlo brzo veoma kompleksna.

Analiza glavnih komponenti je matematički alat koji može da pomogne u ovakvim situacijama. U principu, ova statistička metoda služi za grupisanje parametara koji su uvek međusobno korelisani. Rezultat ovog postupka je kreiranje novih parametara koji su linearna kombinacija originalnih, što dovodi do smanjenja kompleksnosti sistema uz minimalan gubitak informacija o njemu.

Za detaljno objašnjenje analize glavnih komponenti potrebno je malo uvodnog znanja iz statistike i linearne algebre (pogledati Jeff Jauregui, 2012). Smatrajući da je čitalac upoznat sa pojmovima srednje vrednosti, varijanse, kovarijanse, svojstvenog vektora i svojstvenih vrednosti, produžavamo sa objašnjenjem algoritma analize glavnih komponenti i napominjemo da je postupak adaptiran iz rada Jeff Jauregui (2012).

Uzmimo da imamo set podataka koji je sastavljen od  $n$  instanci opisanih sa  $m$  promenljivih (parametara). Prvi korak je da se izračunaju srednje vrednosti svih  $m$  promenljivih i to se može predstaviti kao vektor u prostoru  $\mathbb{R}^m$ :

$$\vec{\mu} = \frac{1}{n} (\vec{x}_1 + \vec{x}_2 + \dots + \vec{x}_n) \quad (5.1)$$

Sledeći korak je da se recenteriraju podaci tako da je srednja vrednost jednaka nuli (drugim rečima, pomeramo tačke u  $\mathbb{R}^m$  tako da je „centar mase“ u koordinatnom početku). Ovo se postiže oduzimanjem srednje vrednosti  $\vec{\mu}$  od svakog vektora  $\vec{x}_i$  koji ima  $m$  komponenti i svaka od njih predstavlja vrednost parametra za jedan objekat (instancu) koji je predstavljen ovim vektorom. Neka je  $B$  matrica dimenzija  $m \times n$  čija je  $i$ -ta kolona  $\vec{x}_i - \vec{\mu}$ :

$$B = [ \vec{x}_1 - \vec{\mu} \quad \dots \quad \vec{x}_n - \vec{\mu} ] \quad (5.2)$$

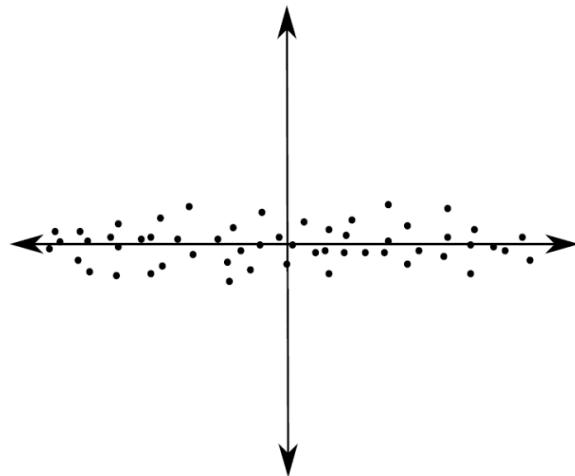
Definišimo matricu kovarijanse  $S$  koja ima dimenzije  $m \times m$ :

$$S = \frac{1}{n-1} BB^T \quad (5.3)$$

Pošto je  $BB^T$  simetrična matrica, i  $S$  će biti simetrična.  $S_{ii}$ , odnosno  $i$ -ta komponenta na dijagonali matrice  $S$  predstavlja varijansu  $i$ -te promenljive.  $S_{ij}$  komponenta, u slučaju da  $i \neq j$ , predstavlja kovarijanstu između  $i$ -te i  $j$ -te promenljive.

Kako bi prethodno izneseno bilo malo bliže čitaocu, poslužićemo se primerom.

**Primer 1.** Neka je  $m = 2$ , odnosno imamo 2 parametra koja želimo da izmerimo za  $n$  instanci. Predstavimo to u prostoru  $\mathbb{R}^m$ :



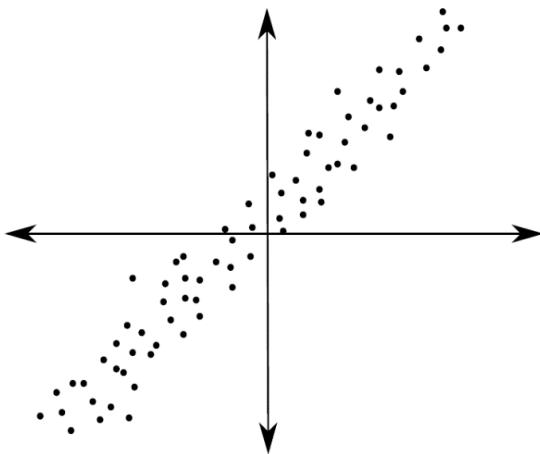
**Slika 5.1** Raspodela tačaka u prostoru  $\mathbb{R}^2$ . Tačke se grupišu oko horizontalne ose.

Kao što se na prethodnoj slici vidi, promenljiva koja reprezentuje horizontalnu osu pokazuje dosta varijacije u podacima, tako da očekujemo da je  $S_{11}$  veliko. Međutim, promenljiva koja je reprezentovana vertikalnom osom pokazuje vrlo malo varijacije u poređenju sa prvom promenljivom. Zato očekujemo da je  $S_{22}$  mnogo manje.

Što se tiče kovarijanse, sa slike se vidi da su ove dve promenljive u velikoj meri nezavisne. Imajući ovo u vidu, naša matrica kovarijanse bi mogla da izgleda ovako:

$$S = \begin{bmatrix} 95 & 1 \\ 1 & 5 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

**Primer 2.** Prepostavimo sada da su naši podaci malo drugačije raspoređeni u istom prostoru  $\mathbb{R}^m$ , gde je  $m = 2$ :



**Slika 5.2** Raspodela tačaka u prostoru  $\mathbb{R}^2$ . Tačke se grupišu oko zamišljene ose.

Sada horizontalni i vertikalni pravac imaju skoro potpuno istu varijansu, i postoji jaka pozitivna korelacija između njih. Matrica kovarijanse bi mogla da izgleda ovako:

$$S = \begin{bmatrix} 50 & 40 \\ 40 & 50 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Prethodna dva primera su, u principu, veoma slična: kod oba primera tačke se grupišu tako da formiraju traku oko neke zamišljene ose, međutim njihove matrice kovarijanse se veoma razlikuju. Analiza glavnih komponenti pruža način da se prepoznaju ovakve geometrijske sličnosti koristeći se čistom algebrrom.

Pošto je  $S$  simetrična matrica, ona može da se ortogonalno dijagonalizuje tako da ona ima samo realne svojstvene vrednosti. Neka su  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$  svojstvene vrednosti

matrice  $S$ , a  $\vec{u}_1, \dots, \vec{u}_m$  njihovi odgovarajući ortonormirani svojstveni vektori. Ovi svojstveni vektori se nazivaju *glavne komponente* seta podataka. Bitno je primetiti sledeću vezu: trag matrice  $S$  predstavlja sumu njenih dijagonalnih elemenata što je ustvari suma varijansi svih  $m$  promenljivih (parametara). Nazovimo tu sumu *ukupna varijansa*  $T$  seta podataka. Sa druge strane, trag simetrične matrice je suma njenih svojstvenih vrednosti:

$$T = \lambda_1 + \dots + \lambda_m \quad (5.6)$$

Sada navodimo fundamentalne uvide koji slede iz prethodno navedenog postupka:

- Pravac u  $\mathbb{R}^m$  definisan sa  $\vec{u}_1$  (prvi glavni pravac) „objašnjava“ ideo  $\frac{\lambda_1}{T}$  od ukupne varijanse  $T$ . Slično, pravac  $\vec{u}_2$  (drugi glavni pravac) „objašnjava“ ideo  $\frac{\lambda_2}{T}$  od ukupne varijanse  $T$ , itd.
- Vektor  $\vec{u}_1 \in \mathbb{R}^m$  označava „najznačajniji“ pravac u setu podataka.
- Među prvcima koji su orotogonalni na  $\vec{u}_1, \vec{u}_2$  je „najznačajniji“ pravac u setu podataka.
- Među prvcima koji su ortogonalni i na  $\vec{u}_1$  i na  $\vec{u}_2, \vec{u}_3$  je „najznačajniji“ pravac u setu podataka, itd.

### 5.1.1 Sažetak postupka analize glavnih komponenti

Ovde dajemo kratak opis postupka analize glavnih komponenti:

1. Sakupiti  $n$  uzoraka  $m$ -dimenzionalnih podataka  $\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_m$  (vektori u  $\mathbb{R}^m$ ). Izračunati srednju vrednost  $\mu$  (5.1), sastaviti matricu  $B$  (5.2) i izračunati matricu  $S$  (5.3).
2. Odrediti svojstvene vrednosti  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$  matrice  $S$  (opadajućim redosledom), kao i set ortogonalnih svojstvenih vektora  $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \dots, \vec{u}_m$ .
3. Interpretacija rezultata: da li je mali broj svojstvenih vrednosti  $\lambda_i$  mnogo veći u iznosu od ostalih? U tom slučaju imamo indikaciju da je moguće smanjiti broj dimenzija u setu podataka. Koje od  $m$  promenljivih su najbitnije na prvoj, drugoj, itd. glavnoj komponenti? Koji parametri su istog a koji suprotnog znaka? Odgovori na ova pitanja pružaju značajne uvide u strukturu razmatranog seta podataka.

## **6 PLAN ISTRAŽIVANJA I OČEKIVANI REZULTATI**

---

Plan istraživanja je sledeći:

- Izdvajanje uzoraka po opsezima različitih crvenih pomaka ( $z$ ) na osnovu pristupnosti izmerenih parametara različitih spektralnih linija;
- Konstrukcija korelacione matrice za svaki uzorak radi izbora spektralnih parametara koji će ući u analizu glavnih komponenti;
- Analiza glavnih komponenti za svaki uzorak;
- Analiza koeficijenata korelacije za sve parametre i sve uzorke;
- Analiza Baldvinovog efekta za uske linije:
  - Oduzimanje doprinosa sjaja zvezdane komponente galaksije domaćina na luminoznost kontinuuma zračenja poreklom iz centralnog izvora AGJ.
  - Izračunavanje koeficijenata pravaca koji su karakteristični za ovaj efekat;
  - Poređenje naših rezultata sa rezultatima dobijenih iz prethodnih istraživanja;

Rezultati koji se očekuju od ovog istraživanja su sledeći:

- Potvrda postojanja korelacija koje su razmatrane u nekim prethodnim istraživanjima;
- Davanje kvantitativnih rezultata vezanih za najznačajnije trendove i korelacije;
- Razmatranje fizičkih procesa koji bi predstavljali uzrok ovih korelacija;
- Testiranje statističkog značaja Baldvinovog efekta za uske linije na našem uzorku kvazara na  $z < 0.39$ .
- Testiranje uticaja sjaja zvezdane komponente galaksije domaćina na koeficijente pravca Baldvinovog efekta za uske linije.

## 7 OBRADA PODATAKA I ANALIZA

---

Koristeći se optičkim spektralnim karakteristikama 105,783 kvazara iz SDSS baze koje su obradili Shen et al. (2011) i naveli u svom katalogu, definisali smo četiri različita uzorka kako bi obuhvatili sva dostupna merenja spektralnih karakteristika različitih linija. Svi uzorci su definisani tako da sadrže samo objekte čiji spektri imaju visok odnos signala i šuma ( $S/N > 10$ ), kako bi imali što pouzdanije izmerene spektralne parametre u analizi. Navodimo neke karakteristike svakog uzorka:

- Uzorak 1 ( $z < 0.39$ ) sadrži 2,224 objekata i obuhvata emisione linije u spektralnom opsegu H $\alpha$  i H $\beta$  linije, uključujući nekoliko uskih zabranjenih linija i to: [N II], [S II], [O III] i uske komponente H $\alpha$  i H $\beta$  linije;
- Uzorak 2 ( $z < 0.89$ ) sadrži 11,192 objekta i obuhvata samo emisione linije iz H $\beta$  spektralnog opsega;
- Uzorak 3 ( $0.39 < z < 0.89$ ) sadrži 4,620 objekata i obuhvata linije u spektralnom opsegu Mg II i H $\beta$  linija;
- Uzorak 4 ( $1.5 < z < 2.25$ ) sadrži 7,375 objekta i obuhvata linije u spektralnom opsegu Mg II i C IV linije.

Sva četiri uzorka sadrže samo kvazare tipa 1. U svakom uzorku, iskoristili smo spektralne parametre za one linije čija su merenja bila dostupna u datom opsegu crvenih pomaka. Finalni brojevi objekata u svakom uzorku su dobijeni tako da su izbačeni objekti koji za parametre od interesa nemaju izmerene vrednosti. Neki od najbitnijih parametara su sledeći: luminoznost kontinuuma, ekvivalentne širine širokih i uskih linija (*equivalent width* - EW), puna širina na polovini maksimuma (*full width at half maximum* - FWHM) širokih emisionih linija, EW gvožđa u optičkom domenu i masa crne rupe.

Za svaki od uzoraka smo konstruisali korelacionu matricu sa Spirmanovim korelacionim koeficijentima. Pored toga što smo je koristili za analizu korelaciju između parametara, korelaciona matrica se pokazala kao koristan alat za eliminaciju jako koreliranih parametara koji ne pružaju nove informacije o uzorku, te nam je olakšala izbor parametara koji su uključeni u krajnju verziju rada i ušli u analizu glavnih komponenti. Parametre koje smo isključili nećemo spominjati u radu.

Nakon izbora parametara, na svaki uzorak je primenjena analiza glavnih komponenti kako bi nam pružila detaljniji uvid u trendove koji su najzastupljeniji u našim podacima.

Uzorak 1 je imao malo detaljniju pripremu i analizu, jer nam je on služio i za testiranje Baldvinovog efekta za uske linije (jedino su na  $z < 0.39$  izmerene uske linije u opsegu talasnih dužina i oko H $\alpha$  i oko H $\beta$ ). Pored korelacione matrice i PCA, izvršena je i linearna regresija kako bi se izračunali koeficijenti pravca koji karakterišu Baldvinov efekat za uske linije, i to: [O III]  $\lambda 5007$ , [N II]  $\lambda 6585$ , [S II]  $\lambda\lambda 6718, 6732$ , uska H $\alpha$  i uska H $\beta$ . Kako bi produbili analizu Baldvinovog efekta, luminoznost kontinuuma je bila podeljena na 11 binova širine 0.2 dex, počevši od  $\log L_{5100} = 43.37$  do  $\log L_{5100} = 45.57$ . Poslednji bin je

morao da se isključi iz analize jer je sadržao samo jedan objekat, te nije bio dovoljno reprezentativan da bi ga uzeli u obzir.

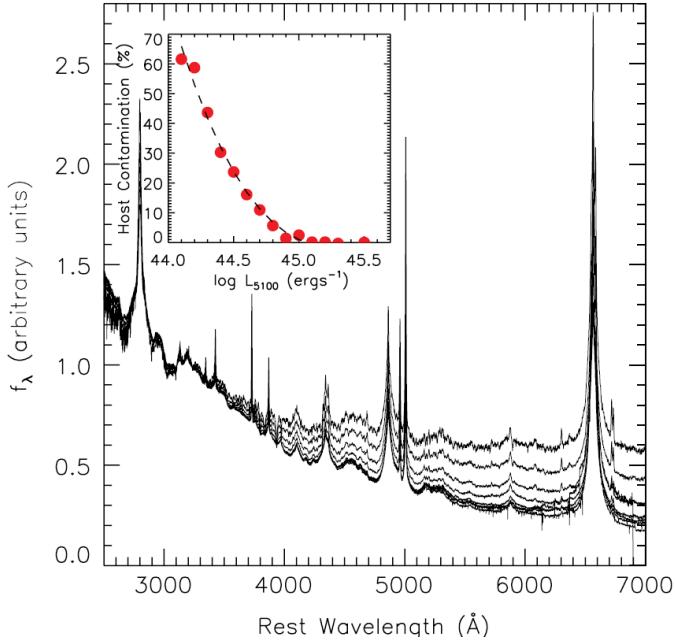
Kako bi eliminisali uticaj sjaja zvezdane komponente galaksije domaćina na luminoznost kontinuuma poreklom iz centralnog izvora AGJ na talasnim dužinama koje proučavamo (okolina 5100 Å) koristili smo empirijsku formulu iz rada Shen et al. (2011) koja je bazirana na srednjim kompozitnim spektrima kvazara koji su generisani za različite binove luminoznosti iz kataloga koristeći se metodom iz rada Vanden Berk et al. (2001):

$$\frac{L_{5100,gal}}{L_{5100,QSO}} = 0.8052 - 1.5502x + 0.9121x^2 - 0.1577x^3 \quad (7.1)$$

gde  $L_{5100,gal}$  predstavlja luminoznost na 5100 Å poreklom od zvezdanog zračenja koje dolazi iz galaksije domaćina, dok  $L_{5100,QSO}$  predstavlja luminoznost na 5100 Å poreklom od zračenja centralnog izvora AGJ (zračenje kontinuuma). Vrednost  $x$  je definisana na sledeći način:

$$x = \log\left(\frac{L_{5100,ukupno}}{\text{erg s}^{-1}}\right) - 44 \quad (7.2)$$

gde  $L_{5100,ukupno}$  predstavlja ukupnu luminoznost na 5100 Å, uključujući i luminoznost galaksije i luminoznost AGJ. Ova vrednost luminoznosti kontinuuma je upravo i data u katalogu Shen et al. (2011).



**Slika 7.1** Levo - Kompozitni spektar za objekte koji su binovani po  $\log L_{5100}$  normalizovan na 3000 Å. Fluks postepeno postaje sve ravniji na većim talasnim dužinama zbog povećanja doprinosa sjaja zvezdane komponente galaksije domaćina kod kvazara nižih luminoznosti, što se vidi iz povećanja zvezdanih apsorpcionih komponenti i intenziteta uskih linija. Mali grafik u gornjem levom uglu predstavlja udeo luminoznosti zvezda iz galaksije domaćina u ukupnoj luminoznosti na 5100 Å pod pretpostavkom da bin najveće luminoznosti ( $\log L_{5100} = 45.5$ ) nije pod uticajem zvezdanog zračenja iz galaksije i da se nagib kontinualnog zračenja AGJ opisanog stepenim zakonom ne menja u razmatranom opsegu luminoznosti. Isprekidana linija predstavlja polinomialni fit (7.1). (Shen et al. 2011).

Kako luminoznost centralnog izvora AGJ raste, uticaj sjaja zvezdane komponente galaksije postaje sve manji te za vrednosti  $\log\left(\frac{L_{5100}}{\text{erg s}^{-1}}\right) > 45.053$  nije bilo potrebno raditi korekciju.

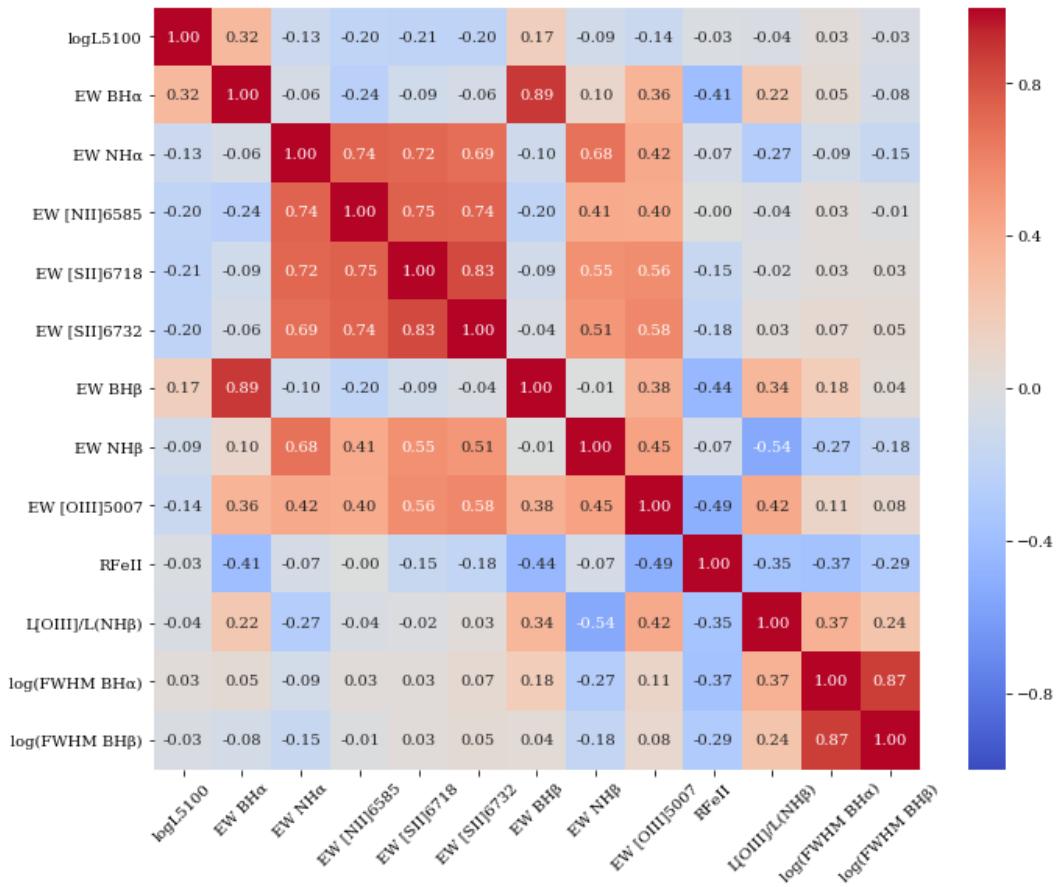
Dakle, u narednom razmatranju luminoznosti kontinuma na 5100 Å za Uzorak 1 su korigovane na uticaj sjaja zvezdane komponente zračenja iz galaksije domaćina, dok za ostale uzorce (Uzorak 2, Uzorak 3 i Uzorak 4) to nije urađeno.

## 8 REZULTATI I DISKUSIJA

---

U ovom poglavlju biće data detaljna analiza rezultata koje smo dobili za svaki uzorak.

### 8.1 UZORAK 1 ( $z < 0.39$ )



**Slika 8.1** Korelaciona matrica za Uzorak 1. Sa desne strane je prikazan slajd sa bojama koji daje vezu između boje i vrednosti koeficijenta korelacije. Crvena boja je vezana za korelacije, a plava boja je vezana za anti-korelacije. Brojevi u matrici predstavljaju Spiranove korelacione koeficijente.

Kao što je ranije pomenuto, ovaj uzorak je napravljen sa ciljem da se izučavaju prvenstveno uske linije iz optičkog dela spektra kvazara. Pored ekvivalentnih širina uskih H $\alpha$ , H $\beta$ , [N II]  $\lambda\lambda 6585$ , [S II]  $\lambda\lambda 6718, 6732$  i [O III]  $\lambda 5007$  linija, ekvivalentnih širina širokih H $\alpha$  i H $\beta$  i punih širina na polovini maksimuma širokih H $\alpha$  i H $\beta$  linija, luminoznosti kontinuma na 5100 Å sa korekcijom na zračenje poreklom od zvezdane komponente galaksije domaćina, postoje i

dodatne veličine koje smo izračunali iz njih i koristili u analizi. Prva od njih je  $R_{\text{FeII}}$  i predstavlja odnos ekvivalentnih širina optičke linije gvožđa Fe II i široke H $\beta$ . Ova veličina je značajna jer predstavlja jedan od parametara iz Eigenvector 1 parametarskog prostora. Još jedna latentna promenljiva koju smo ubacili je odnos luminoznosti [O III] i uske H $\beta$  linije, kako bi proverili korelaciju koju su pronašli Baron & Menard (2019).

Na Slici 8.1 je prikazana korelaciona matrica za sve spektralne parametre iz Uzorka 1. Jedan od očiglednijih rezultata koji se odmah mogu primetiti su korelacije između parametara koji populišu Eigenvector 1 parametarski prostor, koji je uveden i vrlo detaljno razmatran u prethodnim istraživanjima (npr. pogledati Sulentic et al. 2000). Radi se o sledećim korelacijama: anti-korelacija između EW [O III] linije i  $R_{\text{FeII}}$  ( $r = -0.49$ ) i anti-korelacija između FWHM široke H $\beta$  linije i  $R_{\text{FeII}}$  ( $r = -0.29$ ). Najjače korelacije se javljaju između EW širokih H $\alpha$  i H $\beta$  linija ( $r = 0.89$ ), kao i između njihovih uskih komponenti ( $r = 0.68$ ), što je i očekivan rezultat.

Pored ovih korelacija, u matrici se vrlo jasno može primetiti i anti-korelacija između luminoznosti kontinuuma na 5100 Å i ekvivalentnih širina svih uskih linija iz uzorka ([O III], [N II], [S II], uska H $\alpha$  i uska H $\beta$ ). Ova anti-korelacija predstavlja Baldwinov efekat za uske linije iz spektara aktivnih galaktičkih jezgara. Dok je Baldwinov efekat za široke linije (npr. C IV) aktivnih galaktičkih jezgara dobro opisan, uskolinijski Baldwinov efekat je još uvek pod lupom istraživanja i postoji mogućnost da su ova dva efekta prouzrokovana potpuno različitim fizičkim procesima.

Rezultati analize glavnih komponenti, koji su prikazani na Slici 8.2, takođe ukazuju na gore pomenute korelacije/anti-korelacije. Kao što se može primetiti, Baldwinov efekat za uske linije je dominantan trend u našem uzorku jer je ilustrovan na prvoj komponenti (PC1). Prva komponenta objašnjava 31% varijanse u Uzorku 1. Druga glavna komponenta (PC2) otkriva anti-korelaciju između  $R_{\text{FeII}}$  i FWHM široke H $\beta$  (Sulentic, et al., 2000) kao i anti-korelaciju između  $R_{\text{FeII}}$  i EW [O III] λ5007 linije (Boroson & Green, 1992), dakle Eigenvector 1 parametarski prostor je dominantan trend na PC2. Na drugoj komponenti se ističe još jedna korelacija, i to korelacija između odnosa luminoznosti [O III] i uske H $\beta$  linije i FWHM široke H $\alpha$  linije (Baron & Ménard, 2019). Ovo je interesantno jer se baš pojavljuje zajedno sa parametrima iz Eigenvector 1 parametarskog prostora. Otvoreno je pitanje da li je ovaj parametar baš na PC 2 jer je pod uticajem glavnog fizičkog mehanizma koji opisuje Eigenvector 1 (brzina akrecije) ili je nešto drugo u pitanju. PC2 objašnjava 21.66% varijanse u Uzorku 1. U Tabeli 8.1 je dat detaljan prikaz svih svojstvenih vektora i njihovih komponenti.

Slika 8.3 prikazuje Baldwinov efekat kod uskih linija, tačnije zavisnost EW šest razmatranih uskih linija od luminoznosti kontinuuma na 5100 Å ( $L_{5100}$ ). Na svim podacima je primenjena linearna regresija (ispredikana linija na Slici 8.3), dok su tačke koje predstavljaju rezultat binovanja luminoznosti (dijamanti na Slici 8.3) samo povezane crvenom linijom kako bi se lakše video trend koji prate. Rezultati ukazuju da [N II] i [S II] linije imaju najizraženiji Baldwinov efekat.  $P$ -vrednosti nulte hipoteze sugerisu da je Baldwinov efekat značajan kod svih šest razmatranih emisionih linija, međutim potrebne su

detaljnije analize kako bi se isključila mogućnost dobijanja ovako malih  $P$ -vrednosti kao posledica velikog broja objekata u uzorku.  $\text{H}\alpha$  i  $\text{H}\beta$  linije pokazuju najslabiju anti-korelaciju između luminoznosti kontinuma i ekvivalentnih širina.

Kako bi testirali hipotezu o postojanju veze između Baldvinovog efekata kod uskih linija i energije ionizacije ili kritične gustine istih linija, koja je potvrđena u slučaju Baldvinovog efekta kod širokih linija (pogledati Espey & Andreadis 1999; Dietrich et al. 2002), napravili smo grafik ovih zavisnosti (Slika 8.5) i uporedili dobijene rezultate sa rezultatima prethodnih istraživanja uskolinijskog Baldvinovog efekta (Zhang, et al., 2013; Keremedjiev, et al., 2009; Dietrich, et al., 2002).  $P$ -vrednosti nulte hipoteze ovih korelacija ukazuju na to da ne postoji značajna korelacija između koeficijenata pravca uskolinijskog Baldvinovog efekta i ionizacionih potencijala ( $P_0 = 0.87$ ), kao ni između koeficijenata pravca uskolinijskog Baldvinovog efekta i kritičnih gustina ( $P_0 = 0.17$ ). Ovi rezultati su u saglasnosti sa rezultatima iz rada Zhang et al. (2013).

Pored navedenih analiza, uradili smo i analizu Baldvinovog efekta u radio-slabom i radio-jakom uzorku kvazara. Naime, podelili smo naš Uzorak 1 na dva poduzorka:

- Uzorak 1a koji sadrži 405 radio-jakih kvazara izdvojenih na osnovu detekcije od strane radio pregleda neba FIRST (*Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters*) i tu su uključeni i CD (u radio zračenju dominira jezgro) i LB (u radio zračenju dominiraju ovali);
- Uzorak 1b koji sadrži 1,694 radio-slabih objekata za koje FIRST pregled neba nije zabeležio detekciju radio zračenja.

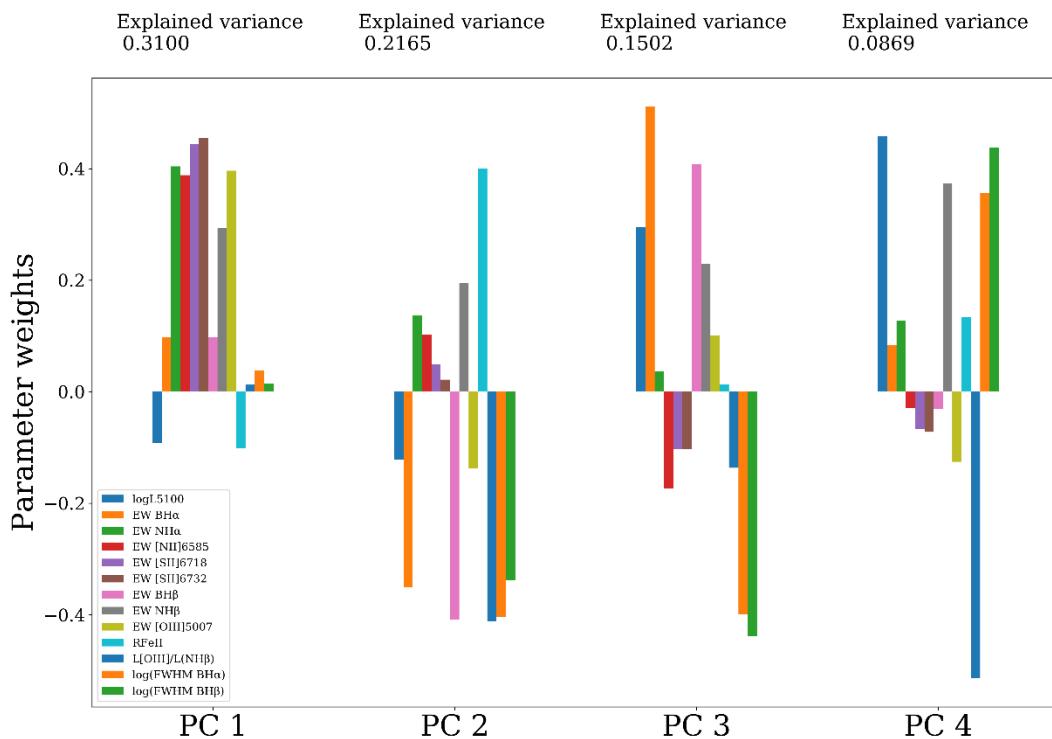
Preliminarni rezultati analize ukazuju na to da koeficijent pravca za Baldvinov efekat ( $\beta$ ) opisuje strmiji nagib kod radio-jakih izvora nego kod radio-slabih izvora (Slika 8.4). U slučaju radio-jakih kvazara [O III]  $\lambda 5007$  ima nagib od -0.29, koreacioni koeficijent ( $r$ ) je -0.24 ( $P_0 = 7.48 \cdot 10^{-7}$ ). S druge strane, u slučaju radio-slabih kvazara ista linija ima  $\beta = -0.16$  i  $r = -0.14$  ( $P_0 = 2.06 \cdot 10^{-8}$ ). Za [N II]  $\lambda 6585$  liniju, rezultati se takođe vidno razlikuju i to tako da za radio-jak poduzorak imamo da je  $\beta = -0.44$  i  $r = -0.32$  ( $P_0 = 4.85 \cdot 10^{-13}$ ), a za radio-slabi poduzorak  $\beta = -0.32$  i  $r = -0.19$  ( $P_0 = 3.02 \cdot 10^{-15}$ ). Poreklo razlika između Uzorka 1a i Uzorka 1b bi moglo da bude posledica toga da kod radio-jakih kvazara mlaz relativističkih čestica u interakciji sa okolnim medijumom može da dovede do povećanja emisije uskih linija (Labiano, 2008). Takođe, zračenje kontinuma bi moglo da bude pojačano kao posledica relativističkih efekata<sup>13</sup> (*relativistic beaming*). Potrebna su dalja istraživanja kako bi se potvrdio uzrok ove razlike između radio-jakih i radio-slabih uzoraka.

Na kraju smo testirali kakav efekat ima uticaj zračenja zvezdane komponente poreklom iz galaksije domaćina na Baldvinov efekat kod uskih linija. Ukoliko se ne uradi korekcija na luminoznost kontinuma, dobija se strmiji nagib prave koja opisuje Baldvinov

<sup>13</sup> Relativistički efekti utiču na prividnu luminoznost koju zrači materija koja se kreće brzinama bliskim brzini svetlosti.

efekat, što znači da uticaj zvezdane svetlosti na ukupnu luminoznost kontinuuma precenjuje luminoznost kontinuuma kod manje sjajnih kvazara, te samim tim precenjuje i intenzitet Baldvinovog efekta.

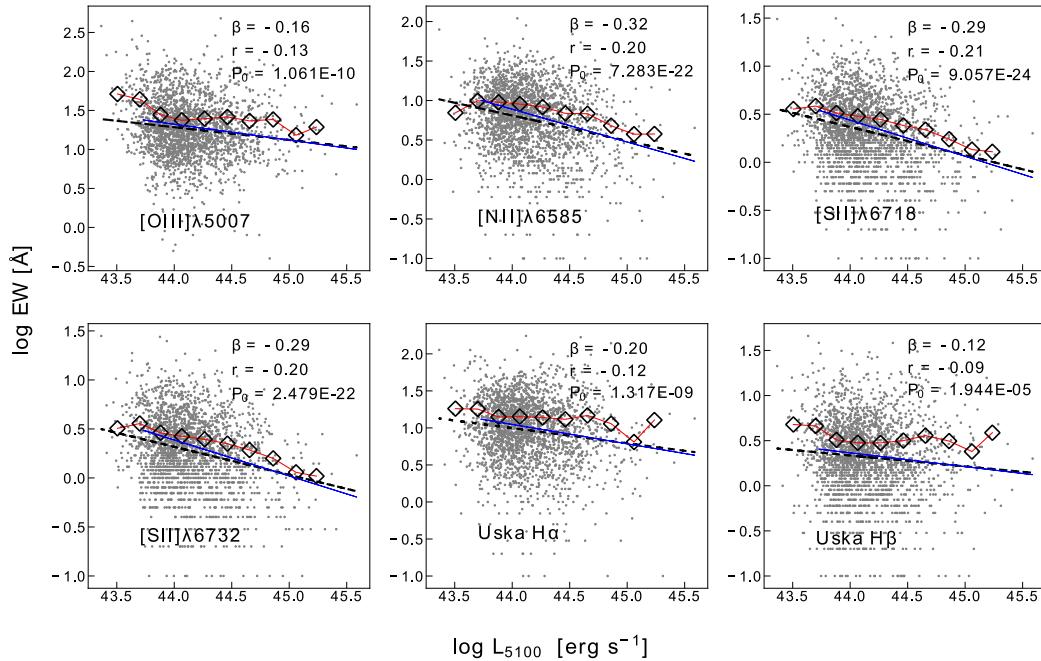
U Tabeli 8.2 su date vrednosti korelacionih koeficijenata sa  $p$ -vrednostima nulte hipoteze za sve uske linije, vrednosti koeficijenata pravca koji su dobijeni iz linearne regresije za uzorak sa i bez korekcije na luminoznost kontinuuma, kao i vrednosti ionizacionih potencijala i kritičnih gustina za pomenute linije. Korelacioni koeficijent i  $p$ -vrednosti nulte hipoteze se ne razlikuju u slučajevima sa i bez korekcije.



**Slika 8.2** Rezultati analize glavnih komponenti primenjene na Uzorak 1. Četiri najznačajnije glavne komponente (svojstveni vektori) su obeležene na horizontalnoj osi, a na vertikalnoj su opisane preko „težine“ svakog od parametara. Svaka glavna komponenta predstavlja linearnu kombinaciju naših 13 parametara, gde su „težine“ ustvari komponente odgovarajućih svojstvenih vektora. Ukoliko su „težine“ minimalno dva parametra istog znaka, radi se o korelaciji, u suprotnom se radi o anti-korelaciji. Parametri sa najvećim apsolutnim vrednostima „težina“ su vezani za najveće korelacije/anti-korelacije. Iznad svake komponente je prikazano koliki ideo svaka komponenta ima u opisu ukupne varijanse u podacima.

**Tabela 8.1** Svojstveni vektori sa svojim komponentama. Svaki svojstveni vektor (glavna komponenta) predstavlja linearnu kombinaciju parametara koji su ušli u analizu glavnih komponenti. Procenti označavaju kumulativnu sumu udela varijanse koji svaka komponenta opisuje.

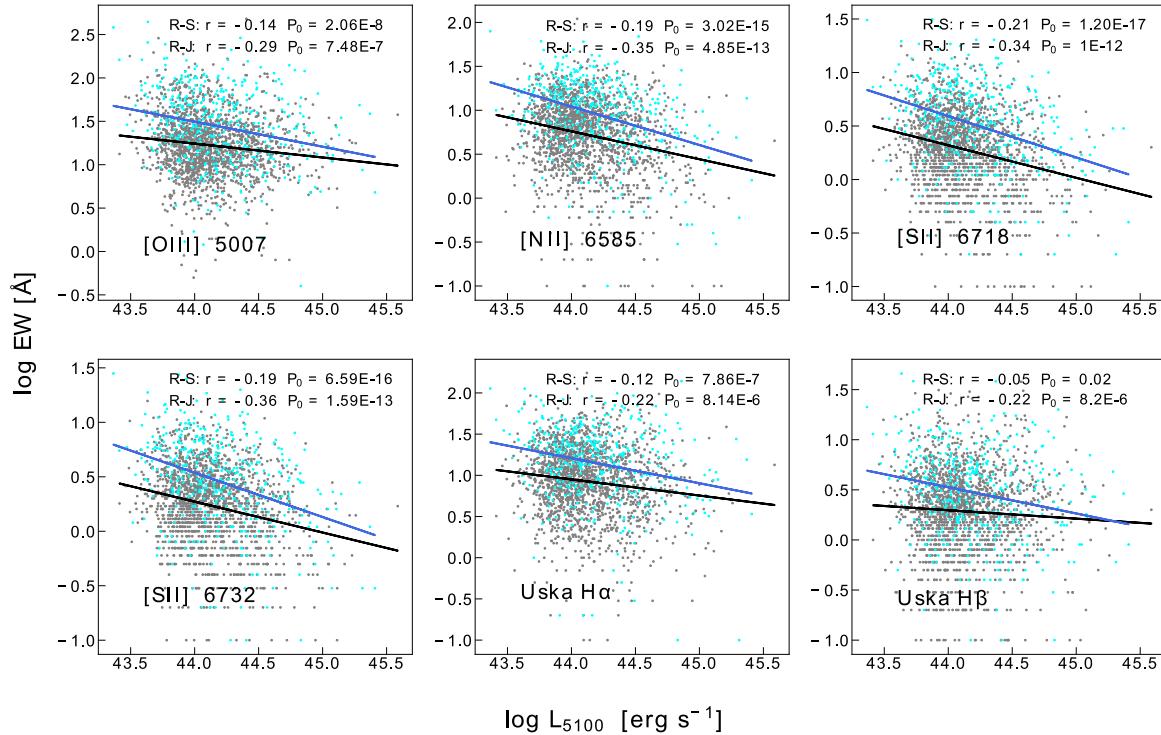
Parametar	PC1	PC2	PC3	PC4
	31.0%	52.6%	67.7%	76.4%
$\log L_{5100}$	-0.092	-0.122	0.294	0.458
EW H $\alpha$ široka	0.098	-0.350	0.511	0.083
EW H $\alpha$ uska	0.404	0.137	0.036	0.128
EW [N II] $\lambda$ 6585	0.388	0.102	-0.174	-0.029
EW [S II] $\lambda$ 6718	0.443	0.048	-0.103	-0.067
EW [S II] $\lambda$ 6732	0.455	0.021	-0.103	-0.072
EW H $\beta$ široka	0.098	-0.409	0.408	-0.031
EW H $\beta$ uska	0.293	0.194	0.229	0.373
EW [O III] $\lambda$ 5007	0.396	-0.137	0.100	-0.126
$R_{\text{FeII}}$	-0.101	0.400	0.013	0.134
L [O III] / L (H $\beta$ uska)	0.012	-0.411	-0.136	-0.514
log (FWHM H $\alpha$ široka)	0.038	-0.404	-0.398	0.357
log (FWHM H $\beta$ široka)	0.015	-0.338	-0.439	0.437



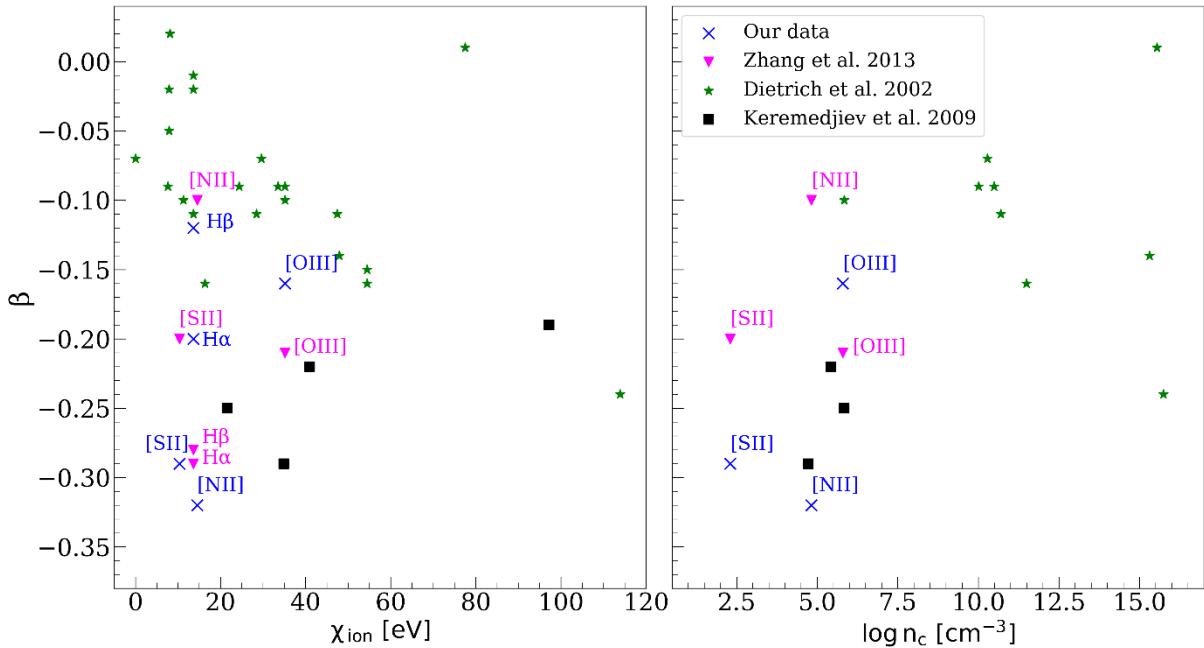
**Slika 8.3** Baldvinov efekat ( $\log L_{5100} - \log \text{EW}$ ) za šest uskih linija za sve kvazare iz Uzorka 1 (sive tačke). Koeficijenti pravca ( $\beta$ ) su dobijeni kao rezultat linearne regresije (crna isprekidana linija) na čitavom Uzorku 1 (sa korekcijom na luminoznost). Dijamanti (povezani sa punom crvenom linijom) predstavljaju tačke koje su rezultat binovanja luminoznosti kontinuuma. Korelacioni koeficijenti ( $r$ ) i  $p$ -vrednosti nulte hipoteze ( $P_0$ ) su takođe istaknuti za sve slučajeve uskih linija. Plava linija predstavlja linearni fit ukoliko se uzmu luminoznosti kontinuuma bez korekcije na uticaj zračenja zvezdane komponente galaksije domaćina.

**Tabela 8.2.** ( $\beta_{cor}$ ) – koeficijent pravca za zavisnost  $\log \text{EW} - \log L_{5100}$  sa korekcijom na luminoznost kontinuuma; ( $\beta$ ) – koeficijent pravca za zavisnost  $\log \text{EW} - \log L_{5100}$  bez korekcije na luminoznost kontinuuma; ( $r$ ) – koeficijent korelacije; ( $P_0$ ) – p-vrednost nulte hipoteze; ( $\chi_{ion}$ ) – ionizaciona energija linije u eV; ( $\log n_c$ ) – logaritam kritične gustine linije u  $\text{cm}^{-3}$ .

Emisiona linija	$\beta_{cor}$	$\beta$	$r$	$P_0$	$\chi_{ion}$	$\log n_c$
[O III] $\lambda 5007$	-0.16	-0.20	-0.14	1.061E-10	35.11	5.80
[N II] $\lambda 6585$	-0.32	-0.42	-0.20	7.283E-22	14.50	4.82
[S II] $\lambda 6718$	-0.29	-0.38	-0.21	9.057E-24	10.36	2.30
[S II] $\lambda 6732$	-0.29	-0.38	-0.20	2.479E-22	10.36	2.30
Uska H $\alpha$	-0.20	-0.26	-0.13	1.317E-09	13.60	$\infty$
Uska H $\beta$	-0.12	-0.15	-0.09	1.944E-05	13.60	$\infty$



**Slika 8.4** Baldvinov efekat ( $\log L_{5100} - \log \text{EW}$ ) za šest uskih linija za radio-jake kvazare (svetlo plave tačke) i radio-slabe kvazare (sive tačke). Plava linija predstavlja najbolji linearni fit za uzorak radio-jakih kvazara, dok crna linija predstavlja najbolji linearni fit za uzorak radio-slabih kvazara. Nagib prave za radio glasne izvore je malo veći i njihove EW su sistematski pomerene ka većim vrednostima. U gornjem desnom uglu su date vrednosti korelacionih koeficijenata i p-vrednosti za slučaj radio-slabih (R-S) i radio-jakih kvazara (R-J). Napomena: luminoznost kontinuuma na 5100 Å je korigovana na uticaj zračenja poreklom od zvezdane komponente galaksije domaćina.



**Slika 8.5** Zavisnost koeficijenta pravca za Baldvinov efekat od ionizacionog potencijala ( $\chi_{ion}$ ) i kritične gustine ( $n_c$ ) odgovarajućih uskih linija. Plavi krstići predstavljaju naše rezultate, dok su rezultati iz radova Zhang et al. (2013); Dietrich et al. (2002); Keremedjieva et al. (2009) predstavljeni ružičastim trouglomima, zelenim zvezdicama i crnim kvadratičicima, respektivno.

## 8.2 UZORAK 2 ( $z < 0.89$ )

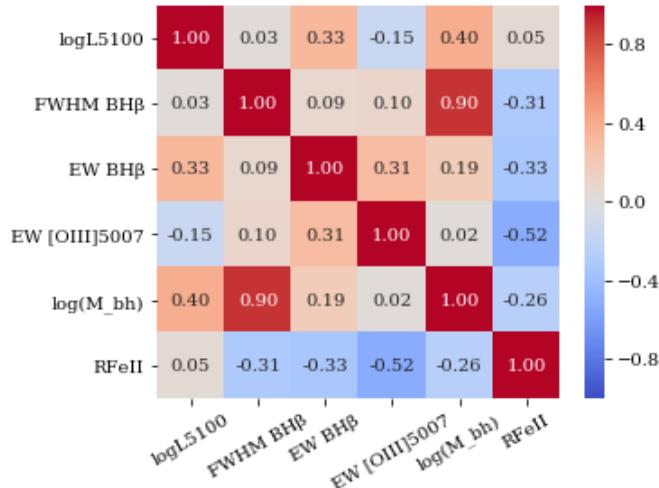
Svrha kreiranja ovog uzorka je bila da se detaljnije razmotre i provere korelacije vezane za široku H $\beta$  i [O III]  $\lambda 5007$  liniju. Pored parametara karakterističnih za H $\beta$  (EW i FWHM) i [O III] liniju (EW), uključili smo i luminoznost kontinuma na 5100 Å, ekvivalentnu širinu gvožđa oko H $\beta$  linije, masu crne rupe izračunatu iz H $\beta$  linije ili široke Mg II linije i  $R_{FeII}$ .

Kao što se vidi na Slici 8.6, najjača korelacija se javlja između FWHM široke H $\beta$  linije i mase crne rupe ( $r = 0.90$ ), što je očekivan rezultat jer je i sama masa crne rupe računata iz ovog parametra. Sledeće po važnosti i jačini su već pomenute anti-korelacije između parametara iz Eigenvector 1 parametarskog prostora, i to: anti-korelacija između [O III] i  $R_{FeII}$  ( $r = -0.52$ ) i anti-korelacija između FWHM H $\beta$  i  $R_{FeII}$  ( $r = -0.31$ ). Luminoznost kontinuma je u korelaciji sa EW široke H $\beta$  linije, što znači da ova linija ne pokazuje Baldvinov efekat u datom opsegu talasnih dužina, dok [O III] linija pokazuje ( $r = -0.13$ ) i to u sličnom iznosu kao kod prethodnog uzorka.

Rezultati analize glavnih komponenti (Slika 8.7) ukazuju na to da je glavni trend u ovom uzorku vezan za korelaciju između mase crne rupe i širine H $\beta$  linije (objašnjava 34.4% varijanse). Drugom komponentom vidno dominira pomenuta anti-korelacija iz E1

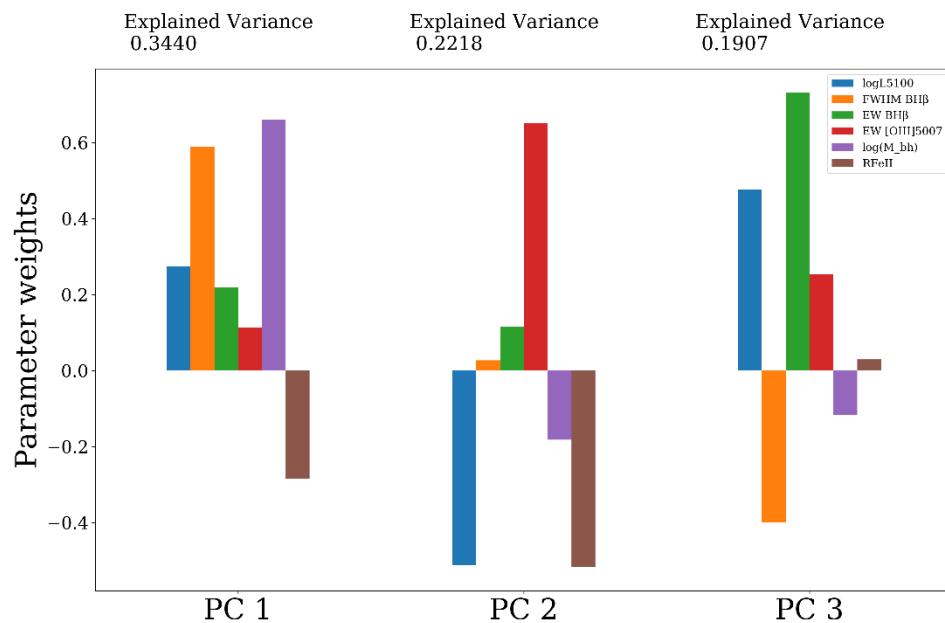
parametarskog prostora zajedno sa Baldvinovim efektom za [O III] liniju (objašnjeno 22.18% varijanse u podacima).

**Tabela 8.3** Svojstveni vektori sa svojim komponentama za Uzorak 2.



Parametar	PC1	PC2	PC3
	34.4%	56.6%	75.6%
<b>log L<sub>5100</sub></b>	0.275	-0.512	0.477
FWHM H $\beta$	0.588	0.027	-0.399
EW H $\beta$	0.219	0.115	0.731
EW [O III] $\lambda 5007$	0.112	0.651	0.253
<b>log M<sub>BH</sub></b>	0.661	-0.182	-0.116
<b>R<sub>FeII</sub></b>	-0.284	-0.516	0.030

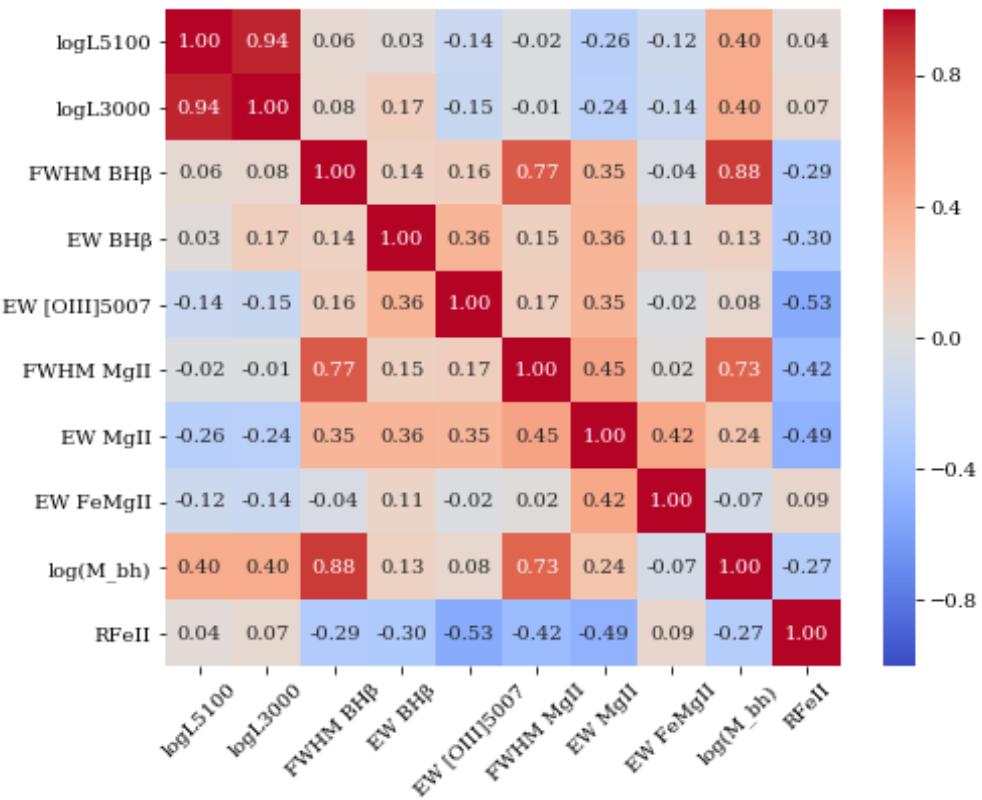
**Slika 8.6** Korelaciona matrica za Uzorak 2.



**Slika 8.7** Rezultati analize glavnih komponenti primjenjene na Uzorak 2.

### 8.3 UZORAK 3 ( $0.39 < z < 0.89$ )

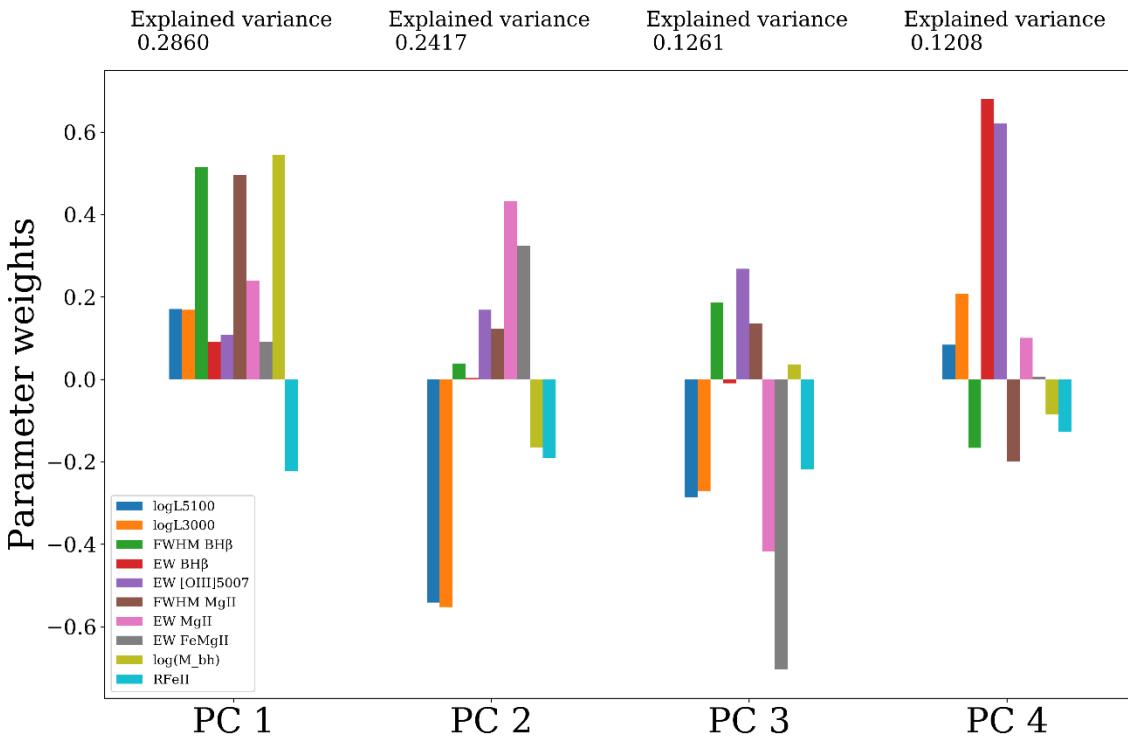
Sledeći uzorak je uzet baš u rasponu crvenih pomaka između 0.39 i 0.89 iz razloga što smo želeli da u ovaj uzorak uključimo i Mg II liniju (nemamo merenja spektralnih parametara ove linije na  $z < 0.39$ ). Dakle, ovde su uzete u obzir široka H $\beta$  linija i široka Mg II linija, kao i uska [O III]  $\lambda 5007$  linija. Uzete su i luminoznosti kontinuuma na 5100 Å i 3000 Å, gvožđe oko H $\beta$  linije kao i gvožđe oko Mg II linije. Takođe, razmatrali smo i masu crne rupe koja je računata iz široke H $\beta$  linije ili Mg II linije.



Slika 8.8 Korelaciona matrica za Uzorak 3.

Iz korelacione matrice (Slika 8.8) se vidi da se najjača korelacija u uzorku javlja između luminoznosti kontinuuma na 3000 Å i na 5100 Å. Kao i u prethodnom uzorku, imamo jaku korelaciju između mase crne rupe i FWHM široke H $\beta$  linije ( $r = 0.88$ ). Jaka korelacija se javlja između širine Mg II linije i H $\beta$  linije ( $r = 0.77$ ), zbog čega se i Mg II linija može koristiti za računanje mase crne rupe, što je evidentno da je rađeno i u ovom uzorku za određene objekte (korelacija između mase crne rupe i širine Mg II linije je značajna, ( $r = 0.73$ )). Korelaciona matrica otkriva i anti-korelacije iz E1 parametarskog prostora i za

ovaj uzorak, potencijalno dodavajući tu i anti-korelaciju između FWHM široke Mg II linije i  $R_{\text{FeII}}$  ( $r = -0.42$ ), koja je jača nego između FWHM H $\beta$  linije i  $R_{\text{FeII}}$  ( $r = -0.29$ ). Ovde bih ukazala i na korelaciju između FWHM i EW široke Mg II linije ( $r = 0.45$ ) koja je zanimljiva iz razloga što se ne javlja u slučaju drugih širokih linija (obično su ova dva parametra nekorelisana). Baldvinov efekat je i u ovom uzorku potvrđen za usku [OIII]  $\lambda 5007$  liniju, ali i za široku MgII  $\lambda 2800$  liniju ( $r = -0.26$  između EW linije i luminoznosti kontinuuma na 3000 Å), što opet napominjemo mogu biti dva potpuno različita efekta.

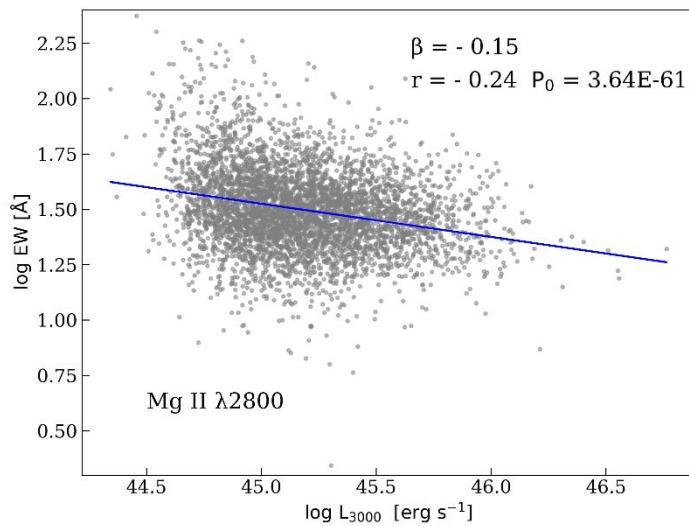


**Slika 8.9** Rezultati analize glavnih komponenti primenjene na Uzorak 3.

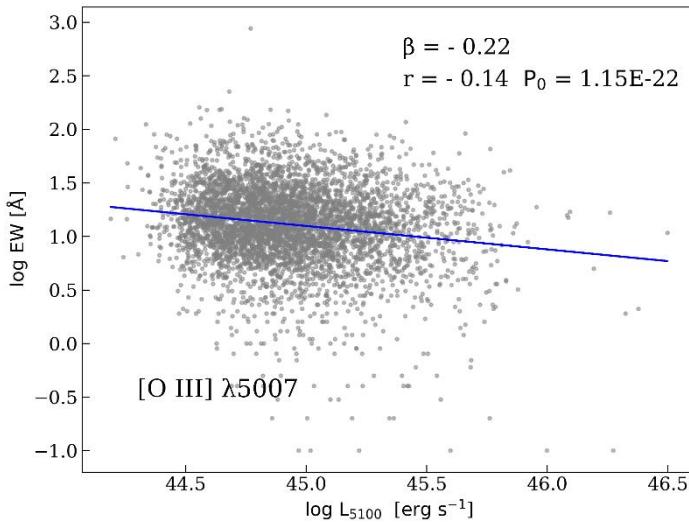
**Tabela 8.4** Svojstveni vektori sa svojim komponentama za Uzorak 3.

<b>Parametar</b>	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>
	<b>28.6%</b>	<b>52.8%</b>	<b>65.4%</b>	<b>77.5%</b>
<b><math>\log L_{5100}</math></b>	0.171	-0.541	-0.286	0.084
<b><math>\log L_{3000}</math></b>	0.169	-0.552	-0.271	0.207
FWHM H $\beta$	0.515	0.038	0.186	-0.166
EW H $\beta$	0.091	0.003	-0.010	0.680
EW [O III] $\lambda$ 5007	0.108	0.168	0.268	0.621
FWHM Mg II	0.495	0.123	0.135	-0.200
EW Mg II	0.240	0.433	-0.418	0.101
EW Fe <sub>MgII</sub>	0.091	0.324	-0.705	0.006
<b><math>\log M_{BH}</math></b>	0.544	-0.165	0.036	-0.085
<b><math>R_{FeII}</math></b>	-0.223	-0.191	-0.219	-0.128

Rezultati analize glavnih komponenti pokazuju kako je najizraženiji trend u podacima vezan za masu crne rupe i širine H $\beta$  i Mg II linije (objašnjava 28.6% varijanse u podacima). PC2, skoro podjednako važna kao i PC1, otkriva Baldvinov efekat za Mg II i [O III] liniju (objašnjeno 24.17% varijanse u podacima). Baldvinov efekat za [O III] i Mg II liniju, zajedno sa koeficijentima pravca i korelacije su ilustrovani na Slici 8.11 i Slici 8.10, respektivno.



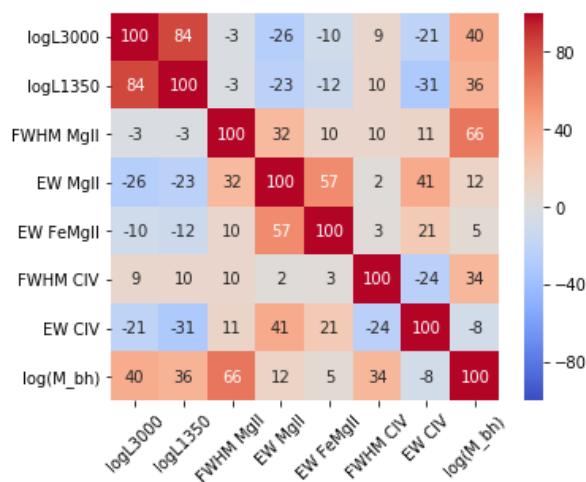
**Slika 8.10** log-log zavisnost ekvivalentne širine Mg II linije i luminoznosti kontinuuma na 3000 Å. Plava linija predstavlja linearni fit primjenjen na ceo Uzorak 3. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.



**Slika 8.11** log-log zavisnost ekvivalentne širine [O III] linije i luminoznosti kontinuuma na 5100 Å. Plava linija predstavlja linearni fit primjenjen na ceo Uzorak 3. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.

## 8.4 UZORAK 4 ( $1.5 < z < 2.25$ )

Poslednji uzorak je namenjen istraživanju korelacija vezanih za C IV i široku Mg II liniju. Pred FWHM i EW ovih linija, uzeti su i sledeći spektralni parametri u obzir: luminoznosti kontinuuma na 3000 Å i na 1350 Å, EW gvožđa oko Mg II linije i masa crne rupe koja je računata iz široke Mg II ili C IV linije.

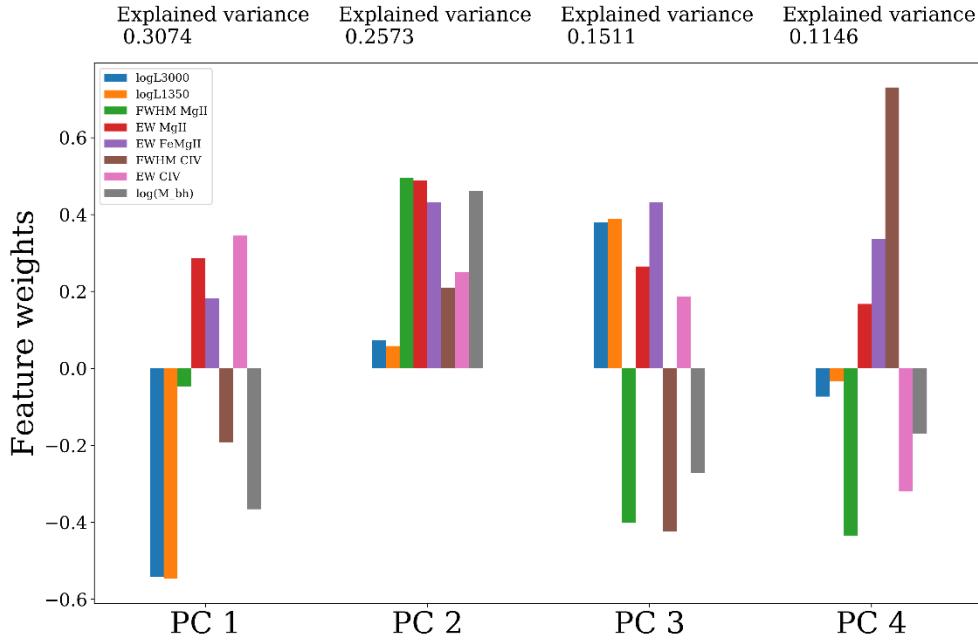


Slika 8.12 Korelaciona matrica za Uzorak 4.

**Tabela 8.5** Svojstveni vektori sa svojim komponentama za Uzorak 4.

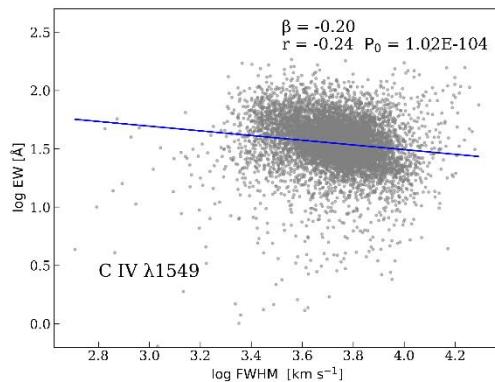
Parametar	PC1	PC2	PC3	PC4
	30.7%	56.5%	71.6%	83.0%
<b>log <math>L_{3000}</math></b>	-0.542	0.074	0.379	-0.073
<b>log <math>L_{1350}</math></b>	-0.547	0.058	0.389	-0.033
FWHM Mg II	-0.047	0.495	-0.401	-0.434
EW Mg II	0.286	0.489	0.265	0.167
EW FeMgII	0.181	0.432	0.431	0.337
FWHM CIV	-0.191	0.210	-0.424	0.730
EW CIV	0.344	0.250	0.187	-0.319
<b>log <math>M_{bh}</math></b>	-0.366	0.462	-0.272	-0.170

Iz korelacione matrice se može primetiti da se najveća korelacija javlja između luminoznosti kontinuuma na 3000 Å i 1350 Å ( $r = 0.84$ ). Jaka korelacija se javlja između mase crne rupe i FWHM široke Mg II linije ( $r = 0.66$ ), kao i između FWHM C IV linije i mase crne rupe ( $r = 0.34$ ). Razlog koji stoji iza ovih korelacija je ponovo činjenica da se mase crnih rupa računaju upravo pomoću širina ovih linija. Primećujemo i korelacije između mase crne rupe i obe luminoznosti kontinuuma ( $r = 0.40$  i  $r = 0.36$ ). Ove korelacije se i očekuju, pošto zračenje iz kontinuuma u kvazarima potiče od akrecije materije na crnu rupu, tako da možemo zaključiti da što se radi o masivnijoj crnoj rupi to će ovaj proces biti intenzivniji kao i luminoznost zračenja u kontinuumu. I u ovom uzorku se može primetiti širokolinijski Baldwinov efekat, i to za široku Mg II liniju ( $r = -0.26$ ) kao i za C IV liniju ( $r = -0.31$ ) i predstavljen je na Slici 8.17 i Slici 8.16, respektivno. Naglašavamo da se i u ovom uzorku javlja interesantna korelacija između FWHM i EW Mg II linije ( $r = 0.32$ , Slika 8.15), dok su kod C IV linije ova dva parametra u anti-korelaciji ( $r = -0.24$ , Slika 8.14).

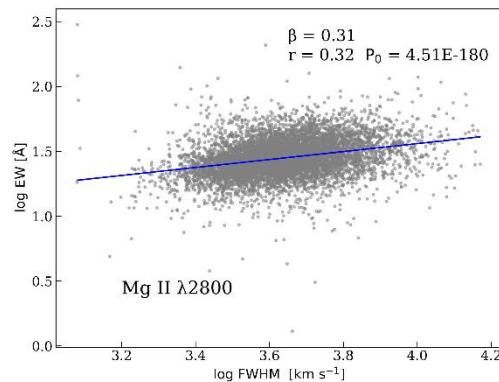


**Slika 8.13** Rezultati analize glavnih komponenti primenjene na Uzorak 4.

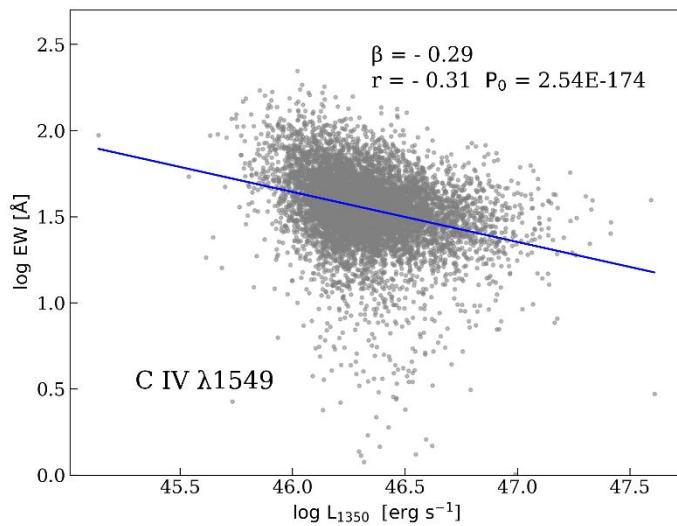
Analiza glavnih komponenti na ovom uzorku otkriva da je najdominantniji trend upravo Baldvinov efekat (opisuje 30.74% varijanse u podacima). Druga glavna komponenta predstavlja vezu koja se javlja između luminoznosti kontinuma i mase crne rupe, čiji je uzrok gore pomenut. Na trećoj glavnoj komponenti se vidi zavisnost između širina linija i mase crne rupe, zbog čega se i mase računaju baš iz ovih parametara.



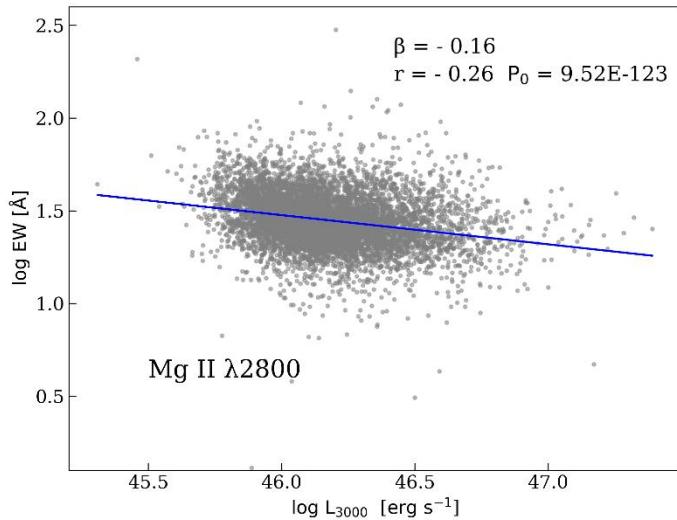
**Slika 8.14** log-log zavisnost EW od FWHM CIV linije. Plava linija predstavlja linearni fit primenjen na ceo Uzorak 4. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.



**Slika 8.15** log-log zavisnost EW od FWHM široke Mg II linije. Plava linija predstavlja linearni fit primenjen na ceo Uzorak 4. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.



**Slika 8.16** log-log zavisnost ekvivalentne širine C IV linije i luminoznosti kontinuuma na  $1350 \text{ \AA}$ . Plava linija predstavlja linearni fit primjenjen na ceo Uzorak 4. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.



**Slika 8.17** log-log zavisnost ekvivalentne široke Mg II linije i luminoznosti kontinuuma na  $3000 \text{ \AA}$ . Plava linija predstavlja linearni fit primjenjen na ceo Uzorak 4. U gornjem desnom uglu su dati iznosi koeficijenta pravca i Spirmanov koeficijent korelacije, kao i p-vrednost nulte hipoteze.

## 8.5 POREĐENJE UZORAKA

Uzorci koje smo do sada analizirali se razlikuju po mnogim parametrima, međutim postoje određeni parametri koji su zajednički za neke od uzoraka te je moguće izvršiti nekakvo poređenje. Poređenje koje će biti predstavljeno ovde tiče se prvenstveno Baldvinovog efekta, kako za široke linije (Mg II i H $\beta$ ), tako i za usku liniju [O III]  $\lambda$ 5007. Pošto su uzorci definisani tako da sadrže objekte na različitim crvenim pomacima, zanimljivo je izvršiti njihovo poređenje kako bi se proverilo da li se ispoljavaju neki uticaji evolucije na parametre koji opisuju Baldvinov efekat.

Sve linije koje su se pojavljivale u najmanje dva uzorka smo uvrstili u Tabelu 8.6 i izlistali Spirmanove korelacione koeficijente.

Osvrnjimo se prvo na [O III] liniju. Ovde ima smisla porediti Uzorak 1 i Uzorak 3 pošto tako možemo da sagledavamo situaciju u različitim opsezima crvenih pomaka. Ukoliko posmatramo vrednost  $\beta$  bez korekcije za luminoznost, možemo primetiti da nagib koga ovaj koeficijent opisuje postaje malo strmiji kako idemo ka većim crvenim pomacima. Međutim, nije jasno da li se radi o stvarnom efektu koji je statistički značajan, pošto je koeficijent korelacije između EW ove linije i luminoznosti kontinuma na 5100 Å ostao nepromenjen. Zbog toga su potrebna detaljnija istraživanja i to za veći opseg crvenih pomaka koji uključuju [O III] liniju.

Široka H $\beta$  linija pokazuje inverzan Baldvinov efekat, i on je izraženiji bez korekcije na luminoznost kontinuma na 5100 Å. Opet, uporedimo Uzorak 1 i Uzorak 3, ovde se vidi već osetnija razlika. U Uzorku 1 je izražen inverzan Baldvinov efekat, dok u Uzorku 3 EW linije i luminoznost kontinuma uopšte nisu korelisani. Može se primetiti da  $r$  raste u Uzorku 2 u odnosu na Uzorak 1, a zatim drastično opada u Uzorku 3. Ako se podsetimo korelacione matrice za Uzorak 3 (Slika 8.8), primećuje se da je H $\beta$  u boljoj korelaciji sa luminoznosti kontinuma na 3000 Å, nego na 5100 Å.

I na kraju, Baldvinov efekat za Mg II liniju se može porediti za Uzorak 3 i Uzorak 4. Međutim, ne primećuju se značajne promene u koeficijentima  $\beta$  i  $r$ , što bi značilo da evolucija AGJ nema uticaja na Baldvinov efekat Mg II linije.

**Tabela 8.6** Poređenje parametara koji opisuju Baldvinov efekat za različite uzorke. ( $\beta$ ) - koeficijent pravca za zavisnost log EW – log L bez korekcije na luminoznost kontinuma. Kod Mg II linije se koristila luminoznost kontinuma na 3000 Å, dok se kod H $\beta$  i O III  $\lambda$ 5007 koristila luminoznost kontinuma na 5100 Å; ( $\beta_{cor}$ ) – isto kao  $\beta$  s tim da nije rađena korekcija na luminoznost kontinuma; ( $r$ ) – Spirmanov korelacioni koeficijent za zavisnost EW – log L.

Emisiona linija	Uzorak 1			Uzorak 2		Uzorak 3		Uzorak 4	
	z < 0.39			z < 0.89		0.39 < z < 0.89		1.5 < z < 2.25	
	$\beta_{cor}$	$\beta$	$r$	$\beta$	$r$	$\beta$	$r$	$\beta$	$r$
[O III] $\lambda$ 5007	-0.16	-0.20	-0.14	-0.17	-0.15	-0.22	-0.14	-	-
H $\beta$ $\lambda$ 4861	+0.11	+0.15	+0.17	+0.17	+0.33	-0.02	+0.03	-	-
Mg II $\lambda$ 2800	-	-	-	-	-	-0.15	-0.24	-0.16	-0.26

## 9 ZAKLJUČAK

---

Ovaj master rad predstavlja sveobuhvatnu studiju osnovnih mehanizama zračenja aktivnih galaktičkih jezgara u optičkom domenu kao i samu analizu nekih od spektralnih karakteristika ovih objekata na različitim crvenim pomacima. Korišćen je katalog spektralnih karakteristika kvazara iz SDSS baze (Shen, et al., 2011), odakle su uzeti podaci za kreiranje uzoraka. Za svaki uzorak je konstruisana korelaciona matrica, zatim je primenjena analiza glavnih komponenti. Za prvi uzorak je urađena detaljnija analiza iz razloga što je on kreiran tako da sadrži objekte na niskim crvenim pomacima ( $z < 0.39$ ) i zbog toga jedino on sadrži izmerene spektralne parametre za uske linije u oblasti H $\alpha$  i H $\beta$  linija. Ova osobina Uzorka 1 nam je dozvolila da detaljno analiziramo Baldvinov efekat (anti-korelacija između EW širine emisione linije i luminoznosti kontinuma u opsegu talasnih dužina kojem ta linija pripada) za uske linije kao i da testiramo da li uticaj zvezdanog zračenja poreklom iz matične galaksije ima uticaja na koeficijent pravca Baldvinovog efekta za različite uske linije. Ovde navodimo neke zaključke koji su proistekli iz naše analize svih uzoraka:

- Potvrđene su korelacije između parametara iz Eigenvector 1 parametarskog prostora na Uzorku 1, Uzorku 2 i Uzorku 3;
- Uskolinijski Baldvinov efekat je prisutan kod svih šest uskih linija ([O III]  $\lambda 5007$ , [N II]  $\lambda 6585$ , [S II]  $\lambda\lambda 6718, 6732$ , uske komponente H $\alpha$  i H $\beta$  linija) koje smo proučavali, međutim svaka od njih ima različit koeficijent pravca za Baldvinov efekat;
- Koeficijenti pravca i koeficijenti korelacije ukazuju da je najznačajniji Baldvinov efekat kod [N II]  $\lambda 5685$  i [S II]  $\lambda\lambda 6718, 6732$  linija, dok je u slučaju uskih H $\alpha$  i H $\beta$  linija on najmanje izražen i to sa najmanjim statističkim značajem;
- Kada se primeni korekcija luminoznosti kontinuma na uticaj sjaja zvezdane komponente zračenja galaksije domaćina, nagib prave koji opisuju Baldvinov efekat postaje manje strm, ali i dalje prisutan kod svih razmatranih uskih linija;
- Energije ionizacije, kao ni kritične gustine proučavanih uskih linija nisu korelisane sa koeficijentima pravaca za Baldvinov efekat. Ovo nam ukazuje da se Baldvinov efekat za uske linije ne može objasniti na isti način kao Baldvinov efekat za široke linije tj. da uskolinijski Baldvinov efekat verovatno nema veze sa pojmom da sa porastom luminoznosti kontinuum ima mekše UV/X zračenje, te imamo smanjenu emisiju u visokojonizovanim linijama;
- Uzorak radio-jakih izvora na  $z < 0.39$  ima jače izražen Baldvinov efekat nego uzorak radio-slabih izvora u istom opsegu crvenih pomaka. Moguće objašnjenje je da je ovo posledica relativističkih efekata i blizine relativističkog mlaza čestica koji interaguje sa okolnim medijumom, povećavajući emisiju uskih linija kod radio-jakih izvora;

- Potvrđena korelacija između odnosa luminoznosti [OIII] linije i uske H $\beta$  sa FWHM H $\alpha$  linije, ukazujući na povezanost između parametara karakterističnih za uskolinjski i širokolinjski region (Baron & Ménard, 2019).
- Široke H $\beta$  i H $\alpha$  linije ne pokazuju Baldvinov efekat ni u jednom uzorku u kome su razmatrane;
- Potvrđen širokolinjski Baldvinov efekat za Mg II (Uzorak 3, Uzorak 4) i C IV liniju (Uzorak 4).

Potrebna su detaljnija istraživanja kako bi se proverilo da li su varijacije u kontinuumu odgovorne za uskolinjski Baldvinov efekat, kao što je predloženo od strane grupe autora Zhang et al. (2013) ili se radi o nekom drugom mehanizmu. Takođe, potrebna su dalja istraživanja koja se tiču ispitivanja uticaja evolucije AGJ na Baldvinov efekat, odakle bi potencijalno mogla da proisteknu nova saznanja o uslovima u AGJ i njihovoj evoluciji. Rezultati poređenja parametara koji opisuju Baldvinov efekat u radio-jakim i radio-slabim uzorcima iziskuje detaljnija istraživanja kako bi se proverilo da li su relativistički efekti odgovorni za poreklo ovih velikih razlika između uzoraka.

# 10 DODATAK A

---

U ovom dodatku biće navedeni kodovi u programskom jeziku Python koji su bili korišćeni za analizu opisanu u drugom delu master rada (Poglavlja 5, 6, 7 i 8).

## 10.1 KORELACIONA MATRICA

```
import seaborn as sns

from astropy.io import fits

# učitavanje .fit fajla koji sadrži rezultate pretrage kataloga Shen
# et al. (2011).

with fits.open('filepath.fit') as data:
    data = pd.DataFrame(data[1].data)

corr = data.corr(method='spearman')

fig, ax = plt.subplots(figsize=(11,9))
sns.heatmap(data=corr, annot=True, cmap='coolwarm', fmt='.2f', vmin=-1, vmax=1)
plt.xticks(rotation=45)
plt.show()
```

## 10.2 ANALIZA GLAVNIH KOMPONENTI

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.io import fits
from sklearn import decomposition

with fits.open('filepath.fit') as data:
    data = pd.DataFrame(data[1].data)
```

```

def standardize(feature):
    """Funkcija koja vrši klasičan statistički proces
    standardizacije različitih promenljivih.

    """
    new_feature = []
    mu = feature.mean()
    std = feature.std()
    for f in feature:
        new_value = (f-mu)/std
        new_value=float(new_value)
        new_feature.append(new_value)
    return pd.Series(new_feature)

def pca_results(data, pca):
    """ Funkcija koja generiše vizualizaciju analize glavnih
    komponenti koja se koristila u radu. Kod je adaptiran i preuzet sa
    sajta: https://analyticsdefined.com/implementing-principal-component-analysis/. Autor
    Sarmah, 2017.

    """
    # Dimension indexing
    dimensions = ['PC {}'.format(i) for i in
range(1,len(pca.components_)+1)]

    # PCA components
    components = pd.DataFrame(np.round(pca.components_, 5), columns =
data.keys())
    components.index = dimensions

    # PCA explained variance
    ratios =
pca.explained_variance_ratio_.reshape(len(pca.components_), 1)
    variance_ratios = pd.DataFrame(np.round(ratios, 4), columns =
['Explained Variance'])

```

```

variance_ratios.index = dimensions

# Create a bar plot visualization
fig, ax = plt.subplots(figsize = (18,12))

# Plot the feature weights as a function of the components
components.plot(ax = ax, kind = 'bar', fontsize=18)
ax.set_ylabel("Parameter weights", fontsize=30)
ax.set_xticklabels(dimensions, rotation=0,fontsize=30)
ax.legend(fontsize='11.3')

# Display the explained variance ratios#
for i, ev in enumerate(pca.explained_variance_ratio_):
    ax.text(i-0.40, ax.get_ylim()[1] + 0.05, "Explained variance\n%.4f"% (ev), fontsize=20)

#fig.savefig('pca_master.png', dpi=300)

# Return a concatenated DataFrame
return pd.concat([variance_ratios, components], axis = 1)

# Normalizacija vrednosti
data.reset_index(drop=True,inplace=True)
standardized_data = pd.DataFrame()
for feature in data.columns:
    standardized_data[feature] = standardize(data[feature])

# Primena funkcije koja izvršava analizu glavnih komponenti
pca = decomposition.PCA(n_components=4).fit(standardized_data)
pca_samples = pca.transform(standardized_data)
# generisanje vizualizacije
pca_results = pca_results(standardized_data, pca)

```

## 11 LITERATURA

---

- Baldwin, J. A., 1977. Luminosity Indicators in the Spectra of Quasi-Stellar Objects. *Astrophysical Journal*, Tom 214, pp. 679-684.
- Baron, D. & Ménard, B., 2019. Black hole mass estimation for active galactic nuclei from a new angle. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 487(3), pp. 3404-3418.
- Bian, W.-H., Fang, L.-L., Huang, K.-L. & Wang, J.-M., 2012. The C IV Baldwin effect in quasi-stellar objects from Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 427(4), pp. 2881-2888.
- Boroson, T. A. & Green, R. F., 1992. The emission-line properties of low-redshift quasi-stellar objects. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Tom 80, pp. 109-135.
- Brotherton, M. S., Runnoe, J. C., Shang, Z. & DiPompeo, M. A., 2015. Bias in C IV-based quasar black hole mass scaling relationships from reverberation mapped samples. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 451(2), pp. 1290-1298.
- Carroll, B. W. & Ostlie, D. E., 2014. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Croom, S. M. i drugi, 2002. The correlation of line strength with luminosity and redshift from composite quasi-stellar object spectra. *Monthly Notice of the Royal Astronomical Society*, 337(1), pp. 275-292.
- Dietrich, M. i drugi, 2002. Continuum and Emission-Line Strength Relations for a Large Active Galactic Nuclei Sample. *The Astrophysical Journal*, 581(2), pp. 912-924.
- Dultzin-Hacyan, D. i drugi, 1997. *A Correlation Analysis for Emission Lines in 52 AGN*. s.l., Astronomical Society of the Pacific Conference Series, p. 262.
- Elvis, M., 1985. *Einstein IPC Spectra of Quasars: First Results*. s.l., s.n.
- Espey, B. & Andreadis, S., 1999. *Observational Evidence for an Ionization-Dependent Baldwin Effect*. s.l., Astronomical Society of the Pacific Conference Series.
- Grupe, D., 2004. A Complete Sample of Soft X-Ray-selected AGNs. II. Statistical Analysis. *The Astronomical Journal*, 127(4), pp. 1799-1810.
- Heard, C. Z. P. & Gaskell, C. M., 2016. The location of the dust causing internal reddening of active galactic nuclei. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461(4), pp. 4227-4232.
- Jauregui, J., 2012. *Principal component analysis with linear algebra*. [Na mreži] Available at: <http://www.math.union.edu/~jauregуй/PCA.pdf> [Poslednji pristup Avgust 2019].

Keremedjiev, M., Hao, L. & Charmandaris, V., 2009. The Mid-Infrared Narrow-Line Baldwin Effect Revealed by Spitzer. *The Astrophysical Journal*, 690(2), pp. 1105-1111.

Korista, K., Baldwin, J. & Ferland, G., 1998. Quasars as Cosmological Probes: The Ionizing Continuum, Gas Metallicity, and the W $\lambda$ -L Relation. *The Astrophysical Journal*, 507(1), pp. 24-30.

Kovačević, J., Popović, L. Č. & Dimitrijević, M. S., 2010. Analysis of Optical Fe II Emission in a Sample of Active Galactic Nucleus Spectra. *The Astrophysical Journal Supplement*, 189(1), pp. 15-36.

Kruczek, N. E. i drugi, 2011. C IV Emission and the Ultraviolet through X-Ray Spectral Energy Distribution of Radio-quiet Quasars. *The Astronomical Journal*, 142(4), p. 130.

Kuraszkiewicz, J., Wilkes, B. J., Schmidt, G. & Smith, P. S., 2009. Principal Component Analysis of the Spectral Energy Distribution and Emission Line Properties of Red 2MASS Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 692(2), pp. 1180-1189.

Labiano, A., 2008. Tracing jet-ISM interaction in young AGN: correlations between [O III]  $\lambda$  5007 Å and 5-GHz emission. *Astronomy and Astrophysics*, 488(3), pp. L59-L62.

Malkan, M. A. & Sargent, W. L. W., 1982. The ultraviolet excess of Seyfert 1 galaxies and quasars. *Astrophysical Journal*, Tom 254, pp. 22-37.

Mao, Y.-F., Wang, J. & Wei, J.-Y., 2009. Extending the Eigenvector 1 space to the optical variability of quasars. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 9(5), pp. 529-537.

Marziani, P. i drugi, 2019. Quasars: From the Physics of Line Formation to Cosmology. *Atoms*, 7(1), p. 18.

Marziani, P., Sulentic, J. W., Plauchu-Frayn, I. & del Olmo, A., 2013. Low-ionization Outflows in High Eddington Ratio Quasars. *The Astrophysical Journal*, 764(2), p. 150.

McIntosh, D. H. i drugi, 1999. A Statistical Study of Rest-Frame Optical Emission Properties in Luminous Quasars at 2.0<=z<=2.5. *The Astrophysical Journal*, 514(1), pp. 40-67.

Netzer, H., Mainieri, V., Rosati, P. & Trakhtenbrot, B., 2006. The correlation of narrow line emission and X-ray luminosity in active galactic nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, 453(2), pp. 525-533.

Netzer, H. i drugi, 2004. Near-Infrared Spectroscopy of High-Redshift Active Galactic Nuclei. II. Disappearing Narrow-Line Regions and the Role of Accretion. *The Astrophysical Journal*, 614(2), pp. 558-567.

Peterson, B. M., 2006. *The Broad-line region in active galactic nuclei*. [Na mreži] Available at: <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Sept16/Peterson/frames.html> [Poslednji pristup avgust 2019].

Popović, L. Č. & Ilić, D., 2017. *Aktivna galaktička jezgra*. Beograd: Matematički fakultet - Univerzitet u Beogradu.

Rakić, N. i drugi, 2017. The intrinsic Baldwin effect in broad Balmer lines of six long-term monitored AGNs. *Astronomy & Astrophysics*, Tom 603, p. A49.

Richards, G. T. i drugi, 2011. Unification of Luminous Type 1 Quasars through C IV Emission. *The Astronomical Journal*, 141(5), p. 167.

Shang, Z. i drugi, 2003. The Baldwin Effect and Black Hole Accretion: A Spectral Principal Component Analysis of a Complete Quasar Sample. *The Astrophysical Journal*, 586(1), pp. 52-71.

Shen, Y. & Ho, L. C., 2014. The diversity of quasars unified by accretion and orientation. *Nature*, Tom 513, pp. 210-213.

Shen, Y. i drugi, 2011. A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7. *The Astrophysical Journal Supplement*, 194(2), p. 45.

Shields, G. A., 1978. Thermal continuum from accretion disks in quasars. *Nature*, 272(5655), pp. 706-708.

Shields, G. A., 1999. A Brief History of Active Galactic Nuclei. *The Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 111(760), pp. 661-678.

Shields, J. C., 2007. *Emission-Line versus Continuum Correlations in Active Galactic Nuclei*. s.l., Astronomical Society of the Pacific Conference Series.

Sulentic, J., Marziani, P. & Zamfir, S., 2011. The Case for Two Quasar Populations. *Baltic Astronomy*, Tom 20, pp. 427-434.

Sulentic, J. W. i drugi, 2007. C IV λ1549 as an Eigenvector 1 Parameter for Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 666(2), pp. 757-777.

Sulentic, J. W., Marziani, P. & Dultzin-Hacyan, D., 2000. Phenomenology of Broad Emission Lines in Active Galactic Nuclei. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Tom 38, pp. 521-571.

Sulentic, J. W., Zwitter, T., Marziani, P. & Dultzin-Hacyan, D., 2000. Eigenvector 1: An Optimal Correlation Space for Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, Tom 536, pp. L5-L9.

Sun, J. & Shen, Y., 2015. Dissecting the Quasar Main Sequence: Insight from Host Galaxy Properties. *The Astrophysical Journal Letters*, 804(1), p. L15.

Tang, B. i drugi, 2012. The Optical and Ultraviolet Emission-line Properties of Bright Quasars with Detailed Spectral Energy Distributions. *The Astrophysical Journal Supplement*, 201(2), p. 38.

Vanden Berk, D. E. i drugi, 2001. Composite Quasar Spectra from the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal*, 122(2), pp. 549-564.

Wang, J., Wei, J. Y. & He, X. T., 2006. A Sample of IRAS Infrared-selected Seyfert 1.5 Galaxies: Infrared Color  $\alpha(60, 25)$ -dominated Eigenvector 1. *The Astrophysical Journal*, 638(1), pp. 106-119.

Wu, J. i drugi, 2009. Probing the origins of the CIV and Fe Ka Baldwin effects. *The Astrophysical Journal*, 702(1), pp. 767-778.

Yip, C. W. i drugi, 2004. Spectral Classification of Quasars in the Sloan Digital Sky Survey: Eigenspectra, Redshift, and Luminosity Effects. *The Astronomical Journal*, 128(6), pp. 2603-2630.

Zamfir, S., Sulentic, J. W. & Marziani, P., 2008. New insights on the QSO radio-loud/radio-quiet dichotomy: SDSS spectra in the context of the 4D eigenvector1 parameter space. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 387(2), pp. 856-870.

Zhang, K., Wang, T.-G., Gaskell, C. M. & Dong, X.-B., 2013. The Baldwin Effect in the Narrow Emission Lines of Active Galactic Nuclei. *The Astrophysical Journal*, 762(1), p. 51.

## 12 BIOGRAFIJA

---



Rođena sam 11.08.1993. godine u Novom Sadu. U rodnom gradu, 2008. godine, završavam osnovnu školu „Branko Radičević“, zatim iste godine upisujem prirodno-matematički smer u gimnaziji „Jovan Jovanović Zmaj“, takođe u Novom Sadu. Nakon položenog maturskog ispita 2012. godine upisujem fiziku na Prirodno-matematičkom fakultetu Univerziteta u Novom Sadu i opredeljujem se za modul astronomija sa astrofizikom. Tokom studija sam provela jedan semestar na Univerzitetu u Groningenu u Holandiji. Diplomirala sam 5. oktobra 2018. godine stekavši titulu diplomiranog fizičara. Iste, 2018. godine upisujem master akademske studije fizike, modul astrofizika takođe na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Tokom master studija sam učestvovala na internacionalnoj konferenciji „12th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics“ u Vrđniku, gde sam prezentovala poster na temu: „Exploring quasar emission line properties using machine learning“. Rad na posteru je prerastao u naučni rad pod nazivom: „Narrow lines correlations in an SDSS sample of type 1 quasars“ koji će biti objavljen u časopisu „Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso“<sup>14</sup> (IF = 0.833).

---

<sup>14</sup> Link za sajt časopisa: <https://www.ta3.sk/caosp/caosp.php?view=home>

**UNIVERZITET U NOVOM SADU  
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET**

**KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA**

*Redni broj:*

**RBR**

*Identifikacioni broj:*

**IBR**

*Tip dokumentacije:* Monografska dokumentacija

**TD**

*Tip zapisa:* Tekstualni štampani materijal

**TZ**

*Vrsta rada:* Master rad

**VR**

*Autor:* Isidora Jankov 317m/18

**AU**

*Mentor/komentor:* dr Tijana Prodanović / dr Dragana Ilić

**MN**

*Naslov rada:* Korelacijske između optičkih spektralnih parametara kvazara iz SDSS baze podataka

**NR**

*Jezik publikacije:* srpski (latinica)

**JP**

*Jezik izvoda:* srpski/engleski

**JI**

*Zemlja publikovanja:* Srbija

**ZP**

*Uže geografsko područje:* Vojvodina

**UGP**

*Godina:* 2019

**GO**

*Izdavač:* Autorski reprint

**IZ**

*Mesto i adresa:* Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

**MA**

<i>Fizički opis rada:</i>	Broj poglavlja/ Broj strana/ Broj tabela/ Broj slika/ Broj referenci:
<b>FO</b>	12 / 71 / 9 / 38 / 50
<i>Naučna oblast:</i>	Fizika
<b>NO</b>	
<i>Naučna disciplina:</i>	Astrofizika
<b>ND</b>	
<i>Predmetna odrednica / ključne reči:</i>	Aktivna galaktička jezgra, kvazari, analiza glavnih komponenti, Baldvinov efekat
<b>PO</b>	
<b>UDK</b>	
<i>Čuva se:</i>	Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu
<b>ČU</b>	
<i>Važna napomena:</i>	nema
<b>VN</b>	
<i>Izvod:</i>	Istraživanje osobina emisionih linija i korelacija između različitih spektralnih karakteristika kvazara predstavlja važan korak u procesu razumevanja fizičkih mehanizama koji potiču iz različitih regiona aktivnih galaktičkih jezgara. Ova master teza sadrži uvod u osnovne strukturalne i optičke spektralne karakteristike aktivnih galaktičkih jezgara, kao i opis istraživanja sprovedenog na uzorcima kvazara tipa 1 uzetih iz "The Sloan Digital Sky Survey Data Release 7" kataloga kvazara (Shen et al. 2011) u cilju ispitivanja korelacija koje se javljaju između njihovih optičkih spektralnih parametara.
<i>Datum prihvatanja teme od NN veća:</i>	
<b>DP</b>	
<i>Datum odbrane:</i>	11.09.2019.
<b>DO</b>	
<i>Članovi komisije:</i>	
<b>KO</b>	
<i>Predsednik:</i>	Prof. dr Dušan Mrđa, redovni profesor
<i>član:</i>	Prof. dr Tijana Prodanović, redovni profesor
<i>član:</i>	Prof. dr Dragana Ilić, vanredni profesor (Univerzitet u Beogradu)
<i>član:</i>	Prof. dr Srđan Rakić, redovni profesor

**UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS**

**KEY WORDS DOCUMENTATION**

*Accession number:*

**ANO**

*Identification number:*

**INO**

*Document type:* Monograph publication

**DT**

*Type of record:* Textual printed material

**TR**

*Content code:* Final paper

**CC**

*Author:* Isidora Jankov

**AU**

*Mentor/comentor:* dr Tijana Prodanović / dr Dragana Ilić

**MN**

*Title:* Optical spectral parameters correlations of SDSS quasars

**TI**

*Language of text:* Serbian (Latin)

**LT**

*Language of abstract:* English

**LA**

*Country of publication:* Serbia

**CP**

*Locality of publication:* Vojvodina

**LP**

*Publication year:* 2019

**PY**

*Publisher:* Author's reprint

**PU**

*Publication place:* Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4,  
Novi Sad

<i>Physical description:</i>	12 / 71 / 9 / 38 / 50
<b>PD</b>	
<i>Scientific field:</i>	Physics
<b>SF</b>	
<i>Scientific discipline:</i>	Astrophysics
<b>SD</b>	
<i>Subject/ Key words:</i>	Active galactic nuclei, quasars, principal component analysis, Baldwin effect
<b>SKW</b>	
<b>UC</b>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
<b>HD</b>	
<i>Note:</i>	none
<b>N</b>	
<i>Abstract:</i>	Investigation of quasar emission line properties and relationships between spectral parameters is important for understanding the physical mechanisms that originate inside different regions of the active galactic nuclei. This master thesis contains introduction to basic structural and optical spectral properties of active galactic nuclei, as well as the investigation of the correlations between optical spectral parameters of type 1 quasars taken from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 Quasar Catalog (Shen et al., 2011).
<b>AB</b>	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
<b>ASB</b>	
<i>Defended on:</i>	11.09.2019.
<b>DE</b>	
<i>Thesis defend board:</i>	
<b>DB</b>	
<i>President:</i>	Prof. dr Dušan Mrđa, full professor
<i>Member:</i>	Prof. dr Tijana Prodanović, full professor
<i>Member:</i>	Prof. dr Dragana Ilić, associate professor (University of Belgrade)
<i>Member:</i>	Prof. dr Srđan Rakić, full professor