

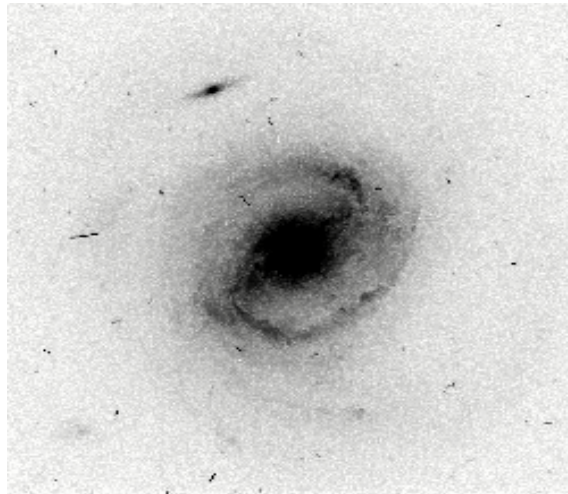
UNIVERZITET U BEOGRADU

MATEMATIČKI FAKULTET

- MAGISTARSKA TEZA -

# Kinematičke i fizičke osobine emisionih oblasti aktivne galaksije Mrk 817

Dragana Ilić



Beograd 2005.

Ovaj magistarski rad je rađen u okviru projekta Ministarstva nauke i zaštite životne sredine P101196 "Astrofizička spektroskopija vangalaktičkih objekata", pod rukovodstvom dr Luke Č. Popovića, kome se iskreno zahvaljujem na kvalitetnoj i nesebičnoj pomoći. U toku ovog istraživanja, provela sam dosta noći na Nacionalnoj opservatoriji Rožen u Bugarskog, gde je posmatran deo obrađenog materijala. Ovom prilikom želim da se zahvalim Katji i Kostu na toplom gostoprimstvu i pomoći pri dugotrajnim i zamornim posmatranjima. U toku rada boravila sam i na Astrofizičkom institutu u Potsdamu (AIP), te se zahvaljujem na gostoprimstvu koje mi je ovaj institut ukazao.

Posebno želim da se zahvalim Ediju Bonu i Predragu Jovanoviću za savete i sugestije pri obradi i analizi ovog materijala, kao i na korisnim diskusijama pri pisanju samog rada. Hvala Jeleni Pašalić na pažljivom čitanju i lekturi ovog teksta.

Takođe, zahvaljujem se porodici, prijateljima i kolegama koji su mi pomogli da ovaj rad uspešno završim.

U Beogradu, 12.11.2005.

Dragana Ilić

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Jezgra aktivnih galaksija</b>	<b>6</b>
2.1	Klasifikacija aktivnih galaktičkih jezgara . . . . .	6
2.2	Opšte osobine aktivnih galaktičkih jezgara . . . . .	11
2.3	Unificirani model AGJ . . . . .	16
2.4	Emisione linije u spektru aktivnih galaktičkih jezgara . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Kinematičke i fizičke osobine emisionih oblasti</b>	<b>29</b>
3.1	Centralni izvor kontinuuma . . . . .	29
3.2	Masa u centru aktivnog galaktičkog jezgra . . . . .	31
3.3	Fotojonizacija . . . . .	32
3.4	Širokolinijska emisiona oblast . . . . .	36
3.5	Uskolinijska emisiona oblast . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Aktivna galaksija Markarian 817 (Mrk 817)</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Posmatrački podaci i način obrade</b>	<b>60</b>
5.1	Posmatrački materijal . . . . .	60
5.2	Obrada podataka . . . . .	64
<b>6</b>	<b>Analiza spektara i osobine emisionih oblasti aktivne galaksije Mrk 817</b>	<b>68</b>
6.1	Karakteristike BLR: Bolcmanov plot . . . . .	69
6.2	Osobine NLR: elektronska temperatura i koncentracija . . . . .	73
6.3	Analiza promene fluksa i oblika profila $H\beta$ linije . . . . .	74
6.4	Dekompozicija profila na Gausove funkcije . . . . .	77
6.4.1	Metod fita na Gausove funkcije: osnovne pretpostavke . . . . .	77
6.4.2	Rezultati analize pomoću više Gausijana . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Model širokolinijske emisione oblasti kod Mrk 817</b>	<b>83</b>
7.1	Dvo-komponentni model . . . . .	84
<b>8</b>	<b>Spektro-fotometrijska struktura aktivne galaksije Mrk 817</b>	<b>89</b>
<b>9</b>	<b>Zaključak</b>	<b>91</b>
<b>10</b>	<b>Literatura</b>	<b>93</b>

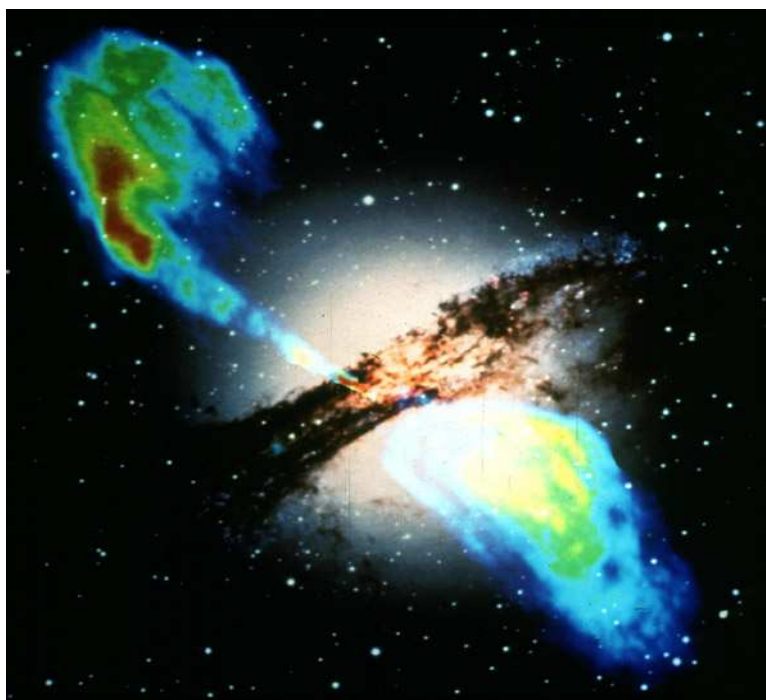
# 1 Uvod

Aktivna galaktička jezgra (AGJ) predstavljaju verovatno najspektakularnije objekte na nebu. Iako aktivne galaksije čine svega 2% ukupne populacije galaksija, njihovo izučavanje je trenutno jedno od najaktuelnijih u savremenoj astrofizici. AGJ oslobađaju veliku količinu energije (u nekim slučajevima čak i nekoliko desetina hiljada puta više nego normalne galaksije) iz veoma male zapremine, manje od jednog kubnog parseka. Njihova luminoznost dostiže vrednosti  $L \approx 10^{42} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$ . Zračenje ovih objekata je posmatrano duž celog elektromagnetnog spektra i u velikom opsegu talasnih dužina je velikog intenziteta i konstantno. AGJ zrače u kontinuumu i spektralnim linijama od  $\gamma$ - i X-područja do dalekog infracrvenog dela spektra. Takođe, neki od ovih objekata su i jaki radio-izvori. U optičkom i ultraljubičastom delu spektra prisutne su emisije (a ponekad i apsorpcione) linije čiji ukupan fluks dostiže vrednosti od nekoliko desetina procenata fluksa kontinuuma i čije širine ukazuju na veoma dinamične procese u emisionim oblastima.

Aktivne galaksije su posmatrane u svim frekventnim domenima i u većini slučajeva se vide samo kao sjajni tačkasti izvori. Radio-posmatranja su pokazala još jednu zanimljivu osobinu AGJ. To su promenjive strukture, tzv. mlazevi materije koji izlaze iz jezgra i dostižu rastojanja od nekoliko megaparseka pokazujući superluminalno kretanje i do 10 brzina svetlosti. Takođe, ovi mlazevi se mogu uočiti kod nekih aktivnih galaksija i u optičkim linijama.

Koji fizički mehanizmi dovode do formiranja radio-mlazeva, kako i gde nastaju jake emisije linije i šta dovodi do oslobađanja ogromnog kontinualnog zračenja su pitanja koja su još uvek otvorena. Preovladava mišljenje da ogromna energija koju zrače aktivna galaktička jezgra dolazi od akrecije materije u super-masivnu crnu rupu. Da bismo saznali osnovne osobine ovih objekata moramo razumeti fiziku u blizini crne rupe, tj. fiziku u jakom gravitacionom polju.

Sa druge strane aktivna galaktička jezgra čini vrlo zanimljivim njihova povezanost sa kosmologijom, jer su zbog svoje velike luminoznosti i neobičnog izgleda spektra relativno lako uočljivi objekti i na velikim rastojanjima. Izmereno je da su najsajajnije aktivne galaksije najbrojnije na crvenom pomaku  $z = 2$ . Činjenica da je njihova luminoznost funkcija crvenog pomaka ukazuje na to da su ovi objekti veoma korisni za kosmološka istraživanja. Takođe, pomoću aktivnih galaksija proučavaju se objekti koji se nalaze između posmatrača i njih. Tako, na primer, skoro sve što smo saznali o međugalaktičkoj materiji je iz apsorpcionih linija udaljenih kvazara. Proučavanje aktivnih galaktičkih jezgara je usko povezano i sa fenomenom gravitacionih sočiva. Gravitaciona sočiva su uglavnom obične galaksije koje pojačavaju zračenje izvora koji se nalaze iza njih, a u najvećem broju slučajeva pojačani izvori su kvazari, odnosno aktivna galaktička jezgra.



Slika 1: Aktivna galaksija Kentuarus A (Cen A, odnosno NGC 5128): optička i radio-slika izvora.

Sve do sada navedeno čini proučavanje aktivnih galaktičkih jezgara veoma interesantnim, kako sa kosmološkog, tako i sa stanovišta fizike koja opisuje procese u centru galaksija. Analiza spektara je još jedan široko zastupljen pristup proučavanju AGJ. Spektroskopija je vrlo moćan metod za ispitivanje osobina objekta koji zrači. Tako se u slučaju aktivnih galaktičkih jezgara, koja imaju vrlo karakterističan spektar sa jako izraženim emisionim linijama, pomoću izučavanja spektara dobija se predstava o njihovoj komplikovanoj kinematičkoj i fizičkoj strukturi. Unutar AGJ postoji više emisionih oblasti, sa različitim kinematičkim i fizičkim osobinama, koje doprinose formiranju ukupne spektralne raspodele zračenja. Obradom, analizom i modeliranjem ukupnog spektra moguće je razdvojiti uticaje pojedinih emisionih oblasti i tako odrediti njihove karakteristike i položaj unutar jezgra.

U ovom radu biće prikazano istraživanje centralne emisione oblasti aktivne galaksije Mrk 817. Mapiranje emisione oblasti je urađeno na osnovu spektrofotometrijskih posmatranja ove aktivne galaksije dobijenih pomoću četiri različita teleskopa: teleskopi "Isak Njutn" i "Vilijam Heršel" sa opservatorije na Kanarskim ostrvima, teleskop "Šain" sa Krimске astrofizičke opservatorije i 2m teleskop na opservatoriji Rožen u Bugarskoj. Na osnovu spektroskopskih merenja primećeno je da aktivna galaksija Mrk 817 ima vrlo izražene i široke i uske emisione linije, za koje se smatra da potiču iz dve različite kinematičke oblasti. Druga

osobina koja izdvaja ovu galaksiju je neobična asimetrija u uskim linijama, koja je jasno vidljiva s obzirom na visoku rezoluciju korišćenih spektara. Zabranjene uske [OIII]  $\lambda\lambda$  4959, 5007 linije imaju složenu strukturu i izraženu asimetriju ka plavom, što može ukazivati na izbacivanje gasa u uskolinijskom emisionom regionu. Cilj ovog rada je da se objasni komplikovana kinematička i fizička struktura emisione oblasti ove galaksije, odnosno širokolinijskog i uskolinijskog emisionog regiona. U radu će biti opisana aktivna galaktička jezgra, njihove osobine i klasifikacija, kao i osobine galaksije Mrk 817 i rezultati dobijeni u dosadašnjim istraživanjima te galaksije. Dalje će biti opisan način obrade podataka (opisani su osnovni koraci koje je potrebno primeniti i odgovarajuće procedure programskog paketa IRAF), kao i analize spektara (jedan od metoda je dekompozicija na Gausove komponente). U poslednjem delu biće opisan model strukture jezgra aktivne galaksije (dvokomponentni model = akrecioni disk + sferna emisiona oblast) kojim su fitovane široke emisione linije galaksije Mrk 817, kao i sumirani zaključci ovog istraživanja.

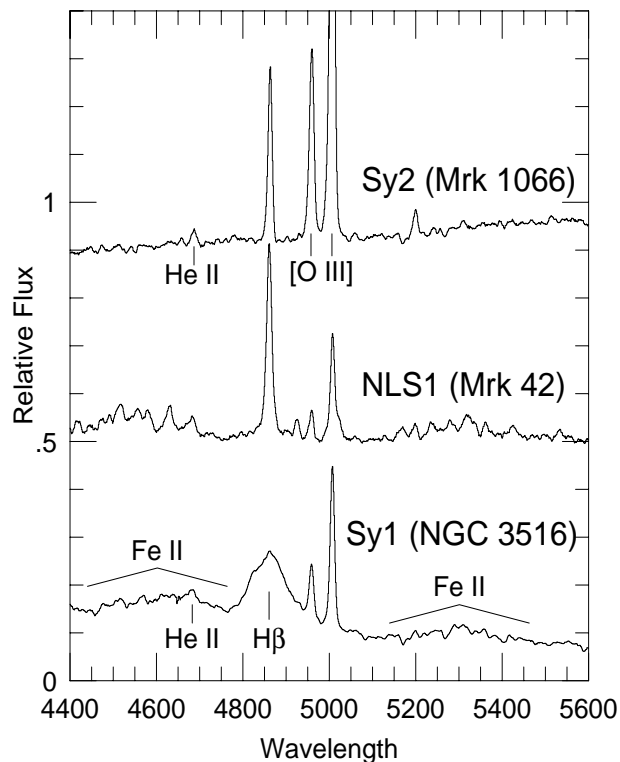
## 2 Jezgra aktivnih galaksija

Jezgra galaksija koja imaju neobično snažan izvor zračenja u centru nazivaju se aktivna galaktička jezgra. AGJ može biti toliko sjajno da je sjaj okolnih zvezda zanemarljiv u ukupnom sjaju galaksije. Sa druge strane, AGJ je malih dimenzija što je zaključeno na osnovu brze promene sjaja. Sjaj jezgra se često dramatično menja za manje od nekoliko meseci. Dakle, posmatrane brze promene sjaja AGJ ukazuju da su emisije oblasti unutar jezgra prečnika manjeg i od jednog parseka. Najnovija istraživanja na osnovu promena u kontinuumu i emisionim linijama pokazuju da su u uzorku od 17 kvazara dimenzije širokolinijskog emisionog regiona u intervalu od 1.4 do 227 svetlosnih dana u zavisnosti od luminoznosti u optičkom delu spektra (Kaspi et al. 2000). Jasno je da se radi o vrlo kompaktnim objektima koji još uvek nisu direktno posmatrani. Shodno tome, jedini način da se proučavaju AGJ i njihove osobine je indirektno - proučavanjem zračenja.

### 2.1 Klasifikacija aktivnih galaktičkih jezgara

Postoje mnoge osobine koje izdvajaju AGJ od ostalih galaksija, međutim nemaju sva AGJ iste osobine. Još je Edvin Hابل (Edwin Hubble) posmatrao galaksije sa emisionim linijama. Karl Sejfert (Carl Seyfert) je 1943. godine otkrio prvu klasu zvezdanih sistema sa aktivnim jezgrom (Sejfert 1943). Sejfertove galaksije su spiralne galaksije (obično galaktički morfološki tip Sb i SBb) čije je jezgro izuzetno sjajno i čiji spektar ima jake emisije linije mnogostruko jonizovanih atoma, što ukazuje na postojanje nezvezdanog jonizacionog kontinuuma. Razlikuju se dva osnovna tipa Sejfertovih galaksija. Spektar Sejfert 1 galaksije sadrži široke dozvoljene emisije linije i uske zabranjene linije (dozvoljene linije imaju izrazito široka krila, odakle sledi da brzine, koje dovode do doplerovskog širenja linija, idu i do nekoliko hiljada km/s, dok su uske linije proširene doplerovskim brzinama reda nekoliko stotina km/s). Energija koju zrače je, grubo govoreći, ravnomerno raspoređena duž celog spektra dostupnog posmatranjima (od  $\nu \approx 1\text{GHz}$  do  $\gamma$  zraka), odnosno promena fluksa sa frekvencijom se može predstaviti stepenim zakonom oblika  $F_\nu = k\nu^{-\alpha}$  gde je  $\alpha$  spektralni indeks i ima vrednost  $\alpha \approx 1$ . Shodno tome, radio emisija Sejfert 1 galaksija je mala. Kod ovih objekata je  $M_{\text{bol}} \leq -21$  (Osterbrock 1989). Drugi osnovni tip Sejfertove galaksije nema široke emisije linije, već su i dozvoljene i zabranjene linije uske i približno iste širine. Kontinuum ovih galaksija je dosta manji i strmiji ( $\alpha \geq 1.5$  od bliskog infracrvenog do UV dela elektromagnetnog spektra) i X zračenje je generalno dosta slabije. Za ove objekte je  $M_{\text{bol}} \leq -20$  (Osterbrock 1989). Jezgro tipične Sejfert 2 galaksije je uglavnom jače u radio-području nego jezgro Sejfert 1 galaksije i podseća na jezgro

radio-galaksije, ali znatno je manje sjajno. Oko jedne trećine Sejfertovih galaksija čine Sejfertove galaksije tipa 2. Napomenimo da u zavisnosti od odnosa intenziteta uskih i širokih linija Sejfertove galaksije se mogu deliti na tipove između Sy1 i Sy2 (Osterbrock & Koski 1976, Osterbrock 1981, 1989). Galaksije kod kojih se jezgro uskih linija slabo nazire su Sejfertove galaksije tipa 1.2. Sejfert 1.5 galaksije imaju široke dozvoljene linije sa istaknutim uskim vrhom. Sejfert 1.8 galaksije imaju uske emisione linije sa slabim, ali izraženim širokim krilima. Sejfert 1.9 galaksije karakterišu uske emisione linije sa nešto slabijim krilima nego Sejfert 1.8 galaksije. Kao poseban podtip Sejfertovih galaksija, izdvajaju se i Sejfert 1 galaksije sa uskim linijama (*Narrow Line Seyfert 1 - NLS1*). To su galaksije čiji spektar jezgra izgleda isto kao kod Sejfert 1 galaksija (jaka Fe II emisija i [OIII] linije relativno slabe u odnosu na H $\beta$  liniju), s tim da su dozvoljene linije mnogo uže nego kod tipičnih Sejfert 1 galaksija (Osterbrock & Pogge 1985).



Slika 2: Spektar Sejfertovih galaksija u oblasti talasnih dužina 4400 - 5600 Å. Na gornjoj slici prikazan je spektar Sejfert 2 galaksije Mrk 1066, a na donjoj spektar Sejfert 1 galaksije NGC 3516. U sredini je spektar NLS1 galaksije Mrk 42 (Pogge 2000).

Formalno, aktivne galaksije se klasifikuju kao NLS1 galaksije ako su im dozvoljene linije neznatno šire od uskih zabranjenih linija i ako zadovoljavaju sledeće



kriterijume (Pogge 2000):

$$F([OIII]\lambda 5007)/F(H\beta) < 3,$$

$$FWHM(H\beta) < 2000 \text{ km s}^{-1},$$

gde je sa  $F$  označen fluks a sa  $FWHM$  širina linije na polovini maksimalnog intenziteta.

Mnoge galaksije imaju jezgra koja podsećaju na jezgro Sejfert 2 galaksija, s tim da zabranjene linije (tipičnih širina od 200 do 400 km/s) tih aktivnih jezgara nastaju u slabije jonizovanim emisionim oblastima. Galaksije sa ovakvim jezgrom su dobile naziv baš na osnovu ove osobine i nazivaju se LINERs galaksije (*Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions*), u prevodu nisko-jonizujuće emisione oblasti. LINERs jezgra se nalaze u centru 80 % Sa i Sb galaksija, pa i u malom broju Sc i eliptičnih galaksija. LINERs galaksije su dugo razmatrane kao poseban fenomen, ali danas je opšte prihvaćeno da predstavljaju Sejfertove galaksije slabe luminoznosti. Kod nekih LINERs galaksija detektovana je široka  $H\alpha$  linija, tako da je i ove objekte moguće podeliti kao Sejfertove galaksije na dva tipa, u zavisnosti od širine emisionih linija (Ho et al. 1997a,b). Posmatrački, LINERs galaksije se definišu kao aktivne galaksije za koje važe sledeći odnosi flukseva uskih zabranjenih linija (Osterbrock 1989, Krolik 1999):

$$[OII]\lambda 3727/[OIII]\lambda 5007 \geq 1,$$

$$[OI]\lambda 6300/[OIII]\lambda 5007 \geq 1/3,$$

ili

$$[OIII]\lambda 5007/H\beta < 3,$$

$$[OI]\lambda 6300/H\alpha > 0.05,$$

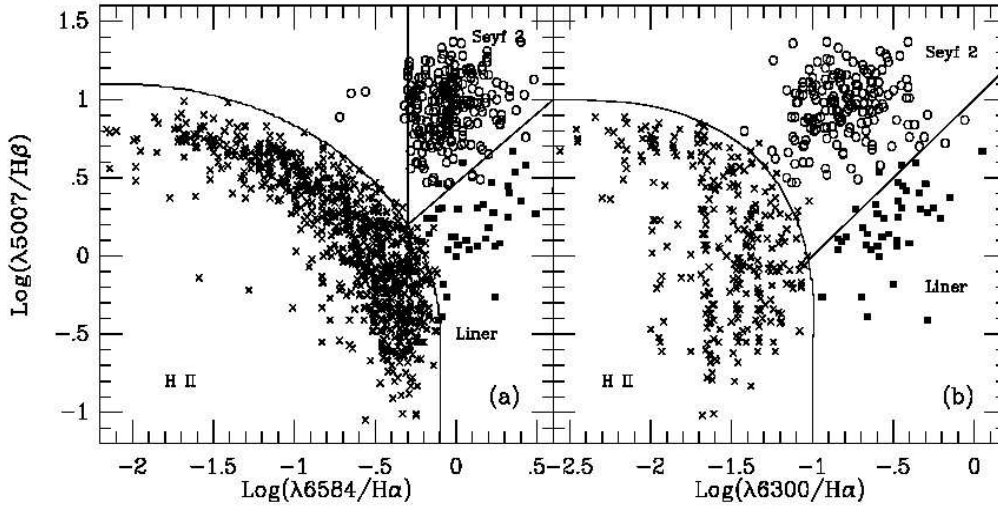
$$[SiII]\lambda\lambda 6716, 6731/H\alpha > 0.4,$$

$$[NII]\lambda 6583/H\alpha > 0.5.$$

Drugu definiciju je bolje koristiti jer se tako izbegava problem uklanjanja efekta pocrvenjenja vangalaktičkih objekata (tzv. "reddening" efekat - promena kolor indeksa zračenja zbog apsorpcije i rasejanja fotona viših učestanosti)<sup>1</sup>. Na slici 3 su prikazani odnosi  $[OIII]\lambda 5007/H\beta$  emisionih linija naspram odnosa  $[NII]\lambda 6854/H\alpha$  i  $[OI]\lambda 6300/H\alpha$  emisionih linija za Sejfert 2 galaksije, LINERs galaksije i HII regione, gde se vidi da su sva tri tipa objekata jasno razdvojena (Véron et al. 1997). Grafici predstavljaju poznate dijagnostičke dijagrame (Veilleux & Osterbrock 1987) pomoću kojih se na osnovu odnosa uskih emisionih linija može lako zaključiti kom tipu pripada odgovarajuće AGJ.

---

<sup>1</sup>detaljnije u poglavlju 2.4



Slika 3: Logaritamski grafici odnosa uskih linija ( $[OIII]\lambda 5007/H\beta$  vs.  $[NII]\lambda 6584/H\alpha$  i  $[OIII]\lambda 5007/H\beta$  vs.  $[OI]\lambda 6300/H\alpha$ ) za HII regione (krstići), LINERs galaksije (kvadratići) i Sejfert 2 galaksije (kružići). Sve tri grupe objekata su jasno razvrstane na ovim dijagramima (Véron et al. 1997).

Sa razvojem radio-astronomije, kako su radio-teleskopi postajali osjetljiviji, detektovano je sve više vanagalaktičkih radio-izvora. Većina ovih izvora su prepoznati kao eliptične galaksije, poznate kao radio-galaksije (Spinard et al. 1985). Uz pomoć radio-interferometara posmatrano je i samo jezgro radio-galaksija, koje takođe pokazuje neobičnu aktivnost. Pored kompaktnog radio-izvora u jezgru, skoro sve radio-galaksije poseduju dve odvojene nepravilne oblasti koje zrače u radio-domenu (*radio lobes*). Ove oblasti su često postavljene simetrično u odnosu na jezgro (ponekad se vidi samo jedna) i mogu biti udaljene od stotinu pa do par miliona parseka. Na nekim radio-snimcima vidi se da su ove oblasti povezane sa jezgrom tankim i izuzetno pravolinijskim strukturama koje se zovu radio-mlazevi (*radio jets*). Smatra se da putem radio-mlazeva AGJ hrani ogromnom količinom materije ove zasebne radio-oblasti. Ovi mlazevi vidljivi su i u optičkom domenu, ali na mnogo manjim skalama. Radio-galaksije su podeljene na dva morfološki različita tipa: FR I i FR II (Fanaroff & Riley 1974). Ta podela je izvršena na osnovu relativnog položaja maksimuma površinskog sjaja ("vrela pege" - *hot spots*) u "radio-lobovima". Tako na primer, kod FR I tipa radio-galaksija, rastojanje između dva maksimuma površinskog sjaja je manje od polovine maksimalnog prečnika radio-izvora, dok je kod FR II tipa to rastojanje veće od polovine maksimalnog prečnika izvora (Binney & Merrifield 1998). Pored radio-aktivnosti, kod radio-galaksija su detektovane i emisije linije u optičkom i UV delu spektra. Kao i Sejfert galaksije, mogu se podeliti na osnovu spektra na uskolinijske radio-galaksije (*NLRG - Narrow Line Radio Galaxy*) koje emituju uske linije karakteristične za Sejfert 2 galaksije, i široko-linijske radio-galaksije (*BLRG*

- *Broad Line Radio Galaxy*) koje emituju široke linije detektovane u Sejfert 1 galaksijama. Većina radio galaksija posmatranih na optičkim talasnim dužinama su obične eliptične galaksije, ali kod 10 % radio-galaksija, detektovano je izuzetno sjajno jezgro (Spinard et al. 1985). Ovakve galaksije, i radio i Sejfert, koje sadrže tako sjajno jezgro nazivaju se jednim imenom N galaksije.

Među jakim radio-izvorima primećeni su "zvezdoliki" objekti, koji su u vidljivom delu spektra detektovani kao tačkasti izvori, i koji se nisu mogli svrstati među eliptične galaksije. U početku je smatrano da ovi vrlo sjajni kvazi-zvezdani radio izvori ili skraćeno kvazari, predstavljaju neobičnu novu klasu zvezda unutar naše galaksije. Međutim, optički spektar ovih objekata je pokazivao jake, široke emisione linije (slične onima kod Sejfert 1 galaksija) koje nisu mogle da se vide kod običnih zvezda. Martin Šmit (Martin Schmidt) je 1963. godine dokazao da su ovi objekti ipak vangalaktički, zaključivši da njihove linije imaju samo veliki kosmološki crveni pomak (Schmidt 1963). Prema tome, na osnovu Hablovog zakona, ovi objekti se nalaze na velikim rastojanjima i imaju veoma veliku luminoznost, reda  $10^{47}$  erg  $s^{-1}$ , odnosno  $10^{14} L_{\odot}$ . Definicija kvazara je da su to objekti koji imaju zvezdolik izgled i čiji spektar pokazuje široke emisione linije značajno pomerene ka crvenom i sa apsolutnom magnitudom manjom od -23 ( $M_B < -23$ ) (Osterborck 1989). U ovu klasu AGJ mogu se svrstati i kvazi-zvezdani objekti ili QSOs (*Quasi-Stellar Objects*), koji imaju iste posmatrane karakteristike kao i kvazari, osim što nisu jaki radio-izvori. Ova radio-slaba AGJ su vrlo slična Sejfert 1 galaksijama. Prema tome, razlika između ove dve klase AGJ je poprilično veštačka, ali je običaj da se objekti sa apsolutnom magnitudom manjom od -23 označavaju kao kvazari ili QSO a AGJ manjeg sjaja kao Sejfert galaksije. Kako bi se pravila razlika između kvazara i QSO sve češće se obeležavaju kao radio-jaki kvazari (*Radio-Loud (RL) quasars*) i radio-slabi kvazari (*Radio-Quiet (RQ) quasars*).

Posebnu klasu AGJ čine objekti pod nazivom BL Lacerte (Lacs). Za prvi posmatrani ovakav objekat IZw87 se mislilo da je neka nova ekstremno promenljiva zvezda. Otud je i dato ime koje se daje zvezdama (Zwicky 1966). Međutim, kasnije je pokazano da je to još jedan tip AGJ. To su jezgra eliptičkih galaksija, koja se odlikuju brzim promenama sjaja i polarizovanim zračenjem, sa netermalnim optičkim kontinuumom i jakim radio emisijom (Miller et al. 1978). Često se zajedno sa ovom grupom jezgara stavlja i drugi tip AGJ, a to su optički intenzivno promenljivi kvazari - OVV's (*Optically Violently Variable quasars*). Ovi objekti imaju dosta osobina kao i BL Lacs: oni su jaki radio-emiteri, čiji sjaj može da se promeni više puta u vremenskom periodu od nekoliko nedelja i čije je radio i optičko zračenje jako polarizovano. Jedina osobina koja ih razdvaja je da kod OVV's postoje široke optičke emisione linije karakteristične za kvazare, dok kod BL Lacs emisione linije uopšte nisu detektovane. Sa druge strane, emisione linije nekog objekta moguće je lako detektovati kada je pozadinski kontinuum slab, a u slučaju jakog kontinuumu one su praktično nevidljive. Dakle moguće je da jedan

objekat posmatran u različito vreme bude svrstan i među BL Lacs i među OVVs. Zato se ovi objekti često grupišu u jednu klasu i nazivaju blazari.

Tip galaksije u kojoj se nalazi aktivno jezgro je različit za različite tipove AGJ. Kod bliskih AGJ, slabog intenziteta, kao što su LINERs i Sejfertova jezgra, lako je snimiti sliku okolne galaksije i ona je najčešće obična spiralna galaksija (Sb i SBb tip), sa uobičajenim sklopom centralnog ovala, zvezdanog diska i ponekad prečke (izuzetak su neka LINERs jezgra koja se nalaze u eliptičkim galaksijama). Takođe, radio-galaksije je relativno lako snimiti, i one su skoro sve gigantske eliptične galaksije (NLRG su uglavnom galaksije tipa cD, D ili E, dok su BLRG galaksije tipa N) (Binney & Merrifield 1998). Galaksije u kojima se nalazi kvazar je malo teže snimiti, s obzirom da se najčešće ne mogu videti zbog visokog sjaja centralnog izvora. Ali, uz pomoć Hablovog teleskopa u Zemljinoj orbiti (*Hubble Space Telescope*), kao i velikih teleskopa na Zemlji, otkriveno je da se oko kvazara nalazi zvezdani omotač. Poslednja istraživanja 19 bliskih galaksija ( $z < 0.2$ ) u čijem centru se nalazi QSO, pokazuju da kod 10 galaksija dominira disk, odnosno da se radi o spiralnim galaksijama, dok su ostale eliptične galaksije (Jahnke et al. 2004).

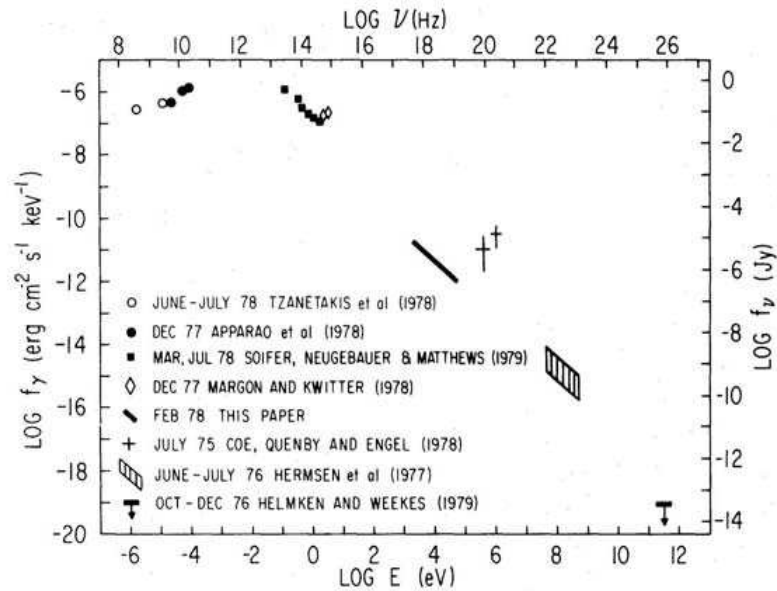
## 2.2 Opšte osobine aktivnih galaktičkih jezgara

Kroz nabrojane tipove definisane su skoro sve osobine koje mogu imati aktivna galaktička jezgra. Jezgra su pre svega vrlo malih ugaonih dimenzija. Uopšte dimenzije AGJ zavise od talasne dužine u kojoj se posmatra dati objekat. Na primer, u radio-području AGJ mogu imati izduženu strukturu koja ukazuje na prisustvo radio-mlazeva, dok u optičkom ima kompaktniji sferni oblik. Sa druge strane, detekcija okolne galaksije zavisiće od odnosa luminoznosti jezgra i same galaksije, kao i od udaljenosti objekta. Kod galaksija sa velikim crvenim pomakom, UV deo spektra će biti pomeren u vidljivi deo, a tu su galaksije uglavnom slabog sjaja. Ugaone dimenzije bilo kojeg tipa AGJ zavise od posmatranog fluksa kao  $\propto F_{\text{obs}}^{1/2}$ , tako da galaksije koje su posmatrane kao najsjajnije imaju i najveće ugaone dimenzije, s tim što treba imati u vidu da su te dimenzije i dalje vrlo male da bi AGJ bila direktno posmatrana. Međutim, neke emisije oblasti kod najbližih AGJ mogu biti direktno posmatrane.

Druga osobina AGJ, koja je već pomenuta, je njihova vrlo velika luminoznost. Do sada su izmerene luminoznosti u opsegu od  $\sim 10^{42}$  do  $\sim 10^{48}$  erg s<sup>-1</sup>. Odnosno, ako se zna da je karakteristična luminoznost normalnih galaksija  $\sim 10^{44}$  erg s<sup>-1</sup>, detektovana su AGJ snage koja ide od 1% snage obične galaksije pa do 10 hiljada puta veće snage od tipičnih galaksija. Međutim, ove granice treba uzeti sa rezervom, jer je moguće da postoje i AGJ manje snage (takozvani "mini-AGJ") koja

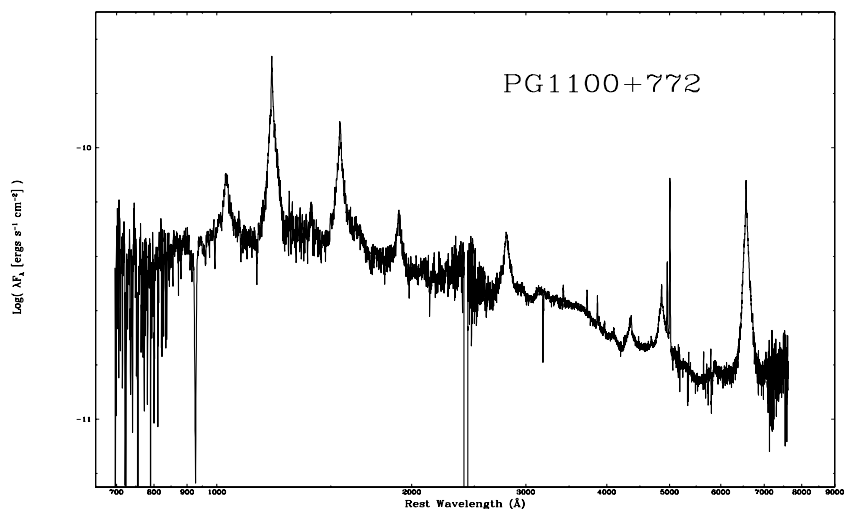
jednostavno nisu detektovana zbog toga što su slabiji izvori od okolnog zvezdanog omotača. Takođe, mnoga AGJ su zaklonjena debelim slojem gasa i prašine koji apsorbuje deo zračenja, pa je moguće da je njihova stvarna luminoznost veća.

AGJ se odlikuju zračenjem kontinuuma u širokom frekventnom opsegu. Da bi se shvatilo šta se podrazumeva pod tim, najbolje je uporediti spektar kontinuuma AGJ sa spektrom normalnih galaksija. Tipična galaksija je u stvari skup zvezda tako da i njen spektar predstavlja spektar zvezda, odnosno, to je spektar crnog tela. To znači da se gotovo celokupna snaga te galaksije izrači u vrlo malom opsegu frekvencija. Jedini izuzetak predstavlja emisija međuzvezdane materije u infracrvenom delu spektra, koja malo proširuje spektralni opseg iz kojeg dolazi zračenje, ali ona se javlja jedino kod spiralnih galaksija. Sa druge strane, spektar kod skoro svih tipova AGJ izgleda potpuno drugačije. Ako predstavimo spektar AGJ u jedinicama  $\log F_\nu$  i  $\log \nu$ , što je i uobičajen način prezentovanja, dobiće se spektar koji se može opisati stepenim zakonom (vidi sliku 4), a kod nekih AGJ spektar je poprilično ravan od infracrvenog do X dela elektromagnetnog spektra. U radio-području luminoznost AGJ je po pravilu za red veličine veća nego kod normalnih galaksija dok ukupan sjaj može biti i za nekoliko redova veličina veći. Deo snage koji se emituje u X-području je tri ili četiri puta veći, a registrovane su i neke podklase AGJ koje imaju  $\gamma$  fluks veliki kao fluks na znatno manjim frekvencijama. Opseg u kojem se prostire kontinualno zračenje je širine reda veličine od  $10^5$  Hz i premda, iako postoje slabi lokalni maksimumi zračenja, jasno je da se nijedan opseg talasnih dužina ekstremno ne izdvaja.



Slika 4: Spektralna raspodela emisije kvazara 0241+622 ( $z=0.044$ ). Na višim frekvencijama od  $10^{13}$  Hz fluks  $F_\nu$  se menja približno po zakonu  $\nu^{-1}$  (Worall et al. 1980).

Emisione linije aktivnih galaktičkih jezgara su zanimljive iz dva razloga. Prvo, one su često veoma široke sa  $FWHM \sim 10^4 \text{ km s}^{-1}$ , gde  $FWHM$  (*Full Width at Half Maximum*) predstavlja širinu linije na polovini maksimalnog intenziteta linije. Samim tim spektar AGJ se vrlo lako detektuje među spektrima većine zvezda i galaksija, gde su linije relativno slabe i uglavnom apsorpcione. Drugo, s obzirom na sadašnje znanje iz oblasti atomske fizike vrlo su pogodne za proučavanje i određivanje fizičkih uslova u kojima se emiteri nalaze.



Slika 5: Primer spektra sa izraženim emisionim linijama u optičkom i ultraljubičastom domenu u slučaju aktivnog galaktičkog jezgra PG 1100+722.

Ukoliko se posmatra spektar AGJ u velikom opsegu talasnih dužina i ukoliko uopšte postoje emisione linije, skoro uvek će lako biti detektovane Ly $\alpha$  linija, linije iz Balmerove serije, dublet CIV  $\lambda\lambda 1548, 1550$ , [OIII]  $\lambda\lambda 4959, 5007$  linija i mnoge druge koje su znatno slabije. Vrlo često se detektuje i Fe K $\alpha$  linija sa energijom od 6.4 keV u X-području. Specifičnost ovih linija je da postoji velika razlika u njihovoj širini na polovini maksimalnog intenziteta, odnosno  $FWHM$  varira od  $10^2$  do  $10^4 \text{ km s}^{-1}$ . Kod nekih objekata linije imaju veoma široka krila, koja se prostiru nekoliko hiljada km/s od centra, dok kod drugih, linije nisu nikad šire od par stotina km/s. Interesantno je da se u obe klase objekata javljaju i dozvoljene i zabranjene linije, s tim da su zabranjene linije uvek uske. Često se kod širokih linija u njihovom centru izdvaja veoma jaka komponenta.

Fizičko objašnjenje pojavljivanja širokih i uskih emisionih linija je postojanje dve oblasti emitujućeg gasa, različite dinamike, gustine, jonizacije, optičke debljine i prenosa zračenja, u kojima se formiraju ove linije<sup>2</sup>. Te emisione oblasti su dobile ime upravo po uskim i širokim linijama, tako da postoje:

<sup>2</sup>detaljnije u poglavlju 3.2 i 3.3

- **Širokolinijska oblast**, u daljem tekstu BLR (*Broad Line Region*), koja se sastoji od većeg broja relativno malih oblaka gasa (dimenzije su u opsegu od nekoliko svetlosnih dana do nekoliko svetlosnih nedelja), koji se nalaze u blizini crne rupe ( $< 1$  pc). Oblaci se sastoje od jonizovanog gasa relativno velike gustine (elektronska koncentracija  $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ), čije se čestice kreću velikim brzinama, i po nekoliko hiljada km/s. Tu se formiraju široke emisione linije.
- **Uskolinijska oblast**, u daljem tekstu NLR (*Narrow Line Region*) koja se prostire do 1 kpc od centralnog izvora. Gustina u ovoj oblasti je manja ( $n_e \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ), kao i brzina kretanja emitera, nego u BLR (najviše do 1000 km/s). Iz ove oblasti potiču uske emisione linije, često iz zabranjenih prelaza.

Promenljivost je još jedna osobina koja se vezuje za aktivna galaktička jezgra. Međutim, ovo je delimično tačno. U vidljivom delu spektra, većina AGJ pokazuje promenljivost za razliku od "normalnih" galaksija. Neka posmatranja ukazuju da je amplituda promene fluksa duplo veća u X-području. Naravno, vrlo je teško govoriti o promenljivosti jer to u mnogome zavisi od vremenskog intervala u kojem je posmatran dati objekat. U većini slučajeva, AGJ imaju promene emisije bez neke uočljive periode. Posledica toga je da se i sama amplituda promene fluksa vrlo teško meri. Postoji jedna grupa AGJ koja je izrazito promenljiva u svim oblastima spektra, gde je ta promenljivost u korelaciji sa jakom polarizacijom, kompaktnom radio-strukturom i jakim  $\gamma$  zračenjem (ta aktivna galaktička jezgra se nazivaju blazari).

Većina AGJ emituje zračenje koje je linearno polarizovano, gde je polarizacija reda  $\simeq 0.5 - 2\%$ . Jedan deo AGJ, koja pokazuju jaku promenljivost ili koja imaju samo uske linije, je snažno linearno polarizovan, čak i do 10%. Među njima, ona čiji fluks jako varira, odlikuju se i jakim promenama jačine i pravca polarizovanosti. Naravno, detekcija polarizacije zavisi od talasne dužine. Radio-zračenje može biti par desetina procenata polarizovano, dok kod X-zračenja još nije detektovana polarizacija.

Mnoga aktivna galaktička jezgra su jaki radio-izvori. Danas većinu poznatih radio-izvora čine AGJ i fenomen radio-emisije dobro je izučen. Ali treba imati u vidu da iako je zračenje AGJ u radio-području intenzivno, ono nikad ne čini više od 1% bolometrijske luminoznosti.

Ove osobine, kao i tipovi galaksija, sumirane su u Tabeli 1. Pod osobinom da je AGJ tačkastog oblika podrazumeva se da se u vidljivom delu spektra vidi kao tačkast izvor. Širok kontinuum podrazumeva da je luminoznost AGJ uporediva u infracrvenom, vidljivom i X-području. Široke i uske linije ukazuju na to da li postoje linije široke nekoliko hiljada ili nekoliko stotina km/s. Radio-zračenje znači da je relativno veliki deo sjaja emitovan u radio-području i da čini na primer

Tabela 1: Klasifikacija AGJ i njihove osobine.

Tip AGJ	Tačkast oblik	Širok kontinuum	Široke linije	Uske linije	Radio zračenje	Promenljivost	Polarizovanost
Sejfert 1	Da	Da	Da	Da	Slabo	Neke	Slaba
Sejfert 2	Ne	Da	Ne	Da	Slabo	Ne	Neke
LINER	Ne	Ne	Ne	Da	Ne	Ne	Ne
BLRG	Da	Da	Da	Da	Da	Neke	Slaba
NLRG	Ne	Ne	Ne	Da	Da	Ne	Ne
RL kvazari	Da	Da	Da	Da	Da	Neke	Neke
RQ kvazari	Da	Da	Da	Da	Slabo	Slaba	Slaba
BL Lac	Da	Da	Ne	Ne	Da	Da	Da
OVV	Da	Da	Da	Da	Da	Da	Da



hiljaditi deo ukupnog sjaja. AGJ se smatra promenljivim, ako varira u optičkom domenu, a polarizovanim ako je optičko zračenje u najmanjem iznosu od bar nekoliko procenata linearno polarizovano.

### 2.3 Unificirani model AGJ

Da bismo opisali model aktivnih galaktičkih jezgara potrebno je dati odgovore na sledeća pitanja:

- Kakva je priroda centralnog dela i koji je mehanizam odgovaran za proizvodnju ogromne količine energije?
- Kako se objašnjava velika raznolikost AGJ-a?
- Koja je kosmološka evolucija ovih objekata?
- Koja je veza između normalnih galaksija i galaksija sa aktivnim jezgrom?

Dati odgovore na ova pitanja, koji bi bili sadržani u samo jednom modelu, je zahtevan i težak posao. Jedna od prvih pretpostavki je bila da su ovi objekti supermasivne zvezde ( $M > 10^3 M_\odot$ ), verovatno brzrotirajuće, koje održava pritisak jakog magnetnog polja. Problem ovog modela je kako održati stabilnost i kako objasniti njihov nastanak, ali i činjenica da je tako velike energije nemoguće dobiti termonuklearnim reakcijama. Sa druge strane, evolucija centralne oblasti galaksije prirodno vodi do nastanka masivne crne rupe u samom centru te oblasti, na primer velikim brojem sudara zvezda. Međutim, crnu rupu nije moguće direktno detektovati i tako potvrditi ovu teoriju, već je moguće samo na osnovu efekata koje izaziva u svojoj okolini zaključiti da se tu nalazi. U opštem slučaju, vrlo masivan i kompaktn objekat okružuju objekti (zvezde i oblaci gasa) koji se kreću kvazi-keplerovski. Ovakva kretanja su primećena u centru naše galaksije, ali i u drugim bliskim galaksijama, za koje je na osnovu dinamike zvezda procenjena masa u samom centru.

U slučaju aktivnih galaksija, moguće je proceniti masu koja je potrebna da bi se oslobodila toliko velika energija ( $L \approx 10^{44} - 10^{48} \text{erg s}^{-1}$ ) pomoću Edingtonovog uslova stabilnosti. Edingtonova luminoznost je gornja granica emitovane energije sferno simetričnog objekta u hidrostatičkoj ravnoteži. Uslov stabilnosti dobija se iz uslova da je gravitaciona sila veća ili jednaka pritisku zračenja fotona rasejanih na elektronima Tomsonovim rasejanjem

$$\frac{GMm_p}{r^2} \geq \frac{\langle \sigma_T L_\nu \rangle_\nu}{4\pi r^2}$$

gde je  $m_p$  masa protona,  $\sigma_T$  efektivni presek Tomsonovog rasejanja a  $r$  je rastojanje od centra. Odatle sledi da je ukupna luminoznost manja od neke granice određene masom samog objekta

$$L < L_{\text{Edd}} = 3.28 \times 10^4 (M/M_\odot) L_\odot.$$

U slučaju da je luminoznost objekta veća od Edingtonove luminoznosti, zračenje bi razduvalo materiju koja ga stvara. Na primer, da bi sjajna Sejfert 1 aktivna galaksija imala luminoznost  $\simeq 10^{12}L_{\odot}$  potrebno je da u centru ima crnu rupu mase  $\geq 3 \times 10^7 M_{\odot}$ . Odavde direktno sledi moguće objašnjenje širokog opsega luminoznosti AGJ, a to je da se u njihovom centru nalaze crne rupe različitih masa ( $M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ ), u čijoj okolini se izrači energija bliska graničnoj Edingtonovoj luminoznosti. Međutim, kod AGJ može doći do promene luminoznosti za nekoliko redova veličine u vremenskom periodu od nekoliko dana, a nema mehanizma koji bi doveo do promene mase crne rupe koja bi odgovarala tolikoj promeni luminoznosti. Dakle, masa crne rupe ne može biti jedini faktor koji određuje luminoznost aktivnog galaktičkog jezgra.

Najvažniji faktor koji utiče na luminoznost okoline neke crne rupe je brzina kojom materija upada u nju, odnosno brzina akrecije. Radijus, posle kojeg nijedna čestica ne može da pobegne od pada u crnu rupu (krećući se brzinom svetlosti  $c$ ) naziva se Švarcšildov radijus i iznosi

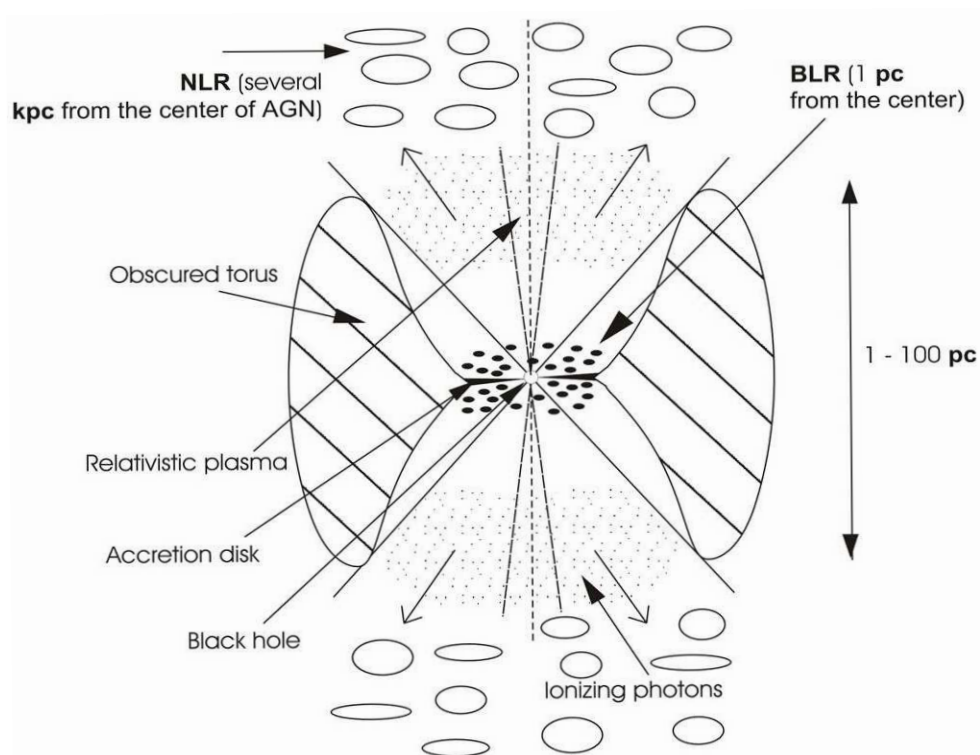
$$R_{\text{Sch}} = \frac{2GM_{\text{BH}}}{c^2} \approx 10^{-13}(M_{\text{BH}}/M_{\odot})\text{pc},$$

pa je za crnu rupu (*black hole* - BH) mase  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$  Švarcšildov radijus  $R_{\text{Sch}} \approx 10^{-5}\text{pc}$ . Najverovatniji mehanizam stvaranja energije je iz odgovarajuće mase (Osterbrock 1989). Na primer, ako dovedemo masu  $m$  iz beskonačnosti do radijusa  $5R_{\text{Sch}}$ , dobijamo energiju jednaku  $mc^2/10$ , što je značajan deo ukupne energije. Pod ovim uslovima, akrecija od  $1M_{\odot}$  godišnje omogućava proizvodnju energije od  $6 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ . Dakle, to je veoma efikasan proces.

Iako je u principu moguće da su svi različiti tipovi aktivnih galaktičkih jezgara fizički gledano objekti u kojima dominiraju suštinski različiti mehanizmi, danas je opšte prihvaćeno da su to fizički veoma slični objekti i da razlika u njihovim posmatranim osobinama može biti opisana pomoću tri faktora: (i) neki objekti su značajno sjajniji nego drugi objekti; (ii) neki objekti proizvode mlazeve, dok drugi to ne rade; (iii) neko AGJ pokazuje različite posmatračke karakteristike u zavisnosti od ugla pod kojim je posmatrano. Poslednja navedena osobina ukazuje na jaku anizotropiju zračenja AGJ.

Na slici 6 prikazana je geometrija aktivnog galaktičkog jezgra. U samom centru nalazi se supermasivna crna rupa ( $M \sim 10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ ) oko koje se nalazi gas i prašina u obliku torusa. Materija ne upada direktno u supermasivnu crnu rupu već obrazuje akrecioni disk u njenoj najbližoj okolini. Zračenje koje dolazi iz centra apsorbuje gasni torus u svim pravcima, osim unutar konusa oko ose simetrije torusa, koja se poklapa sa osom rotacije crne rupe. Kada se posmatraju aktivna galaktička jezgra koja su nagnuta u odnosu na pravac posmatranja tako da se može videti unutar konusa, dobiju se posmatrački efekti kao kod Sejfert 1 galaksija ili QSO, u zavisnosti od luminoznosti. Tada se posmatra i širokolinijska oblast (BLR). Kada je ugao između pravca posmatranja i ose simetrije torusa

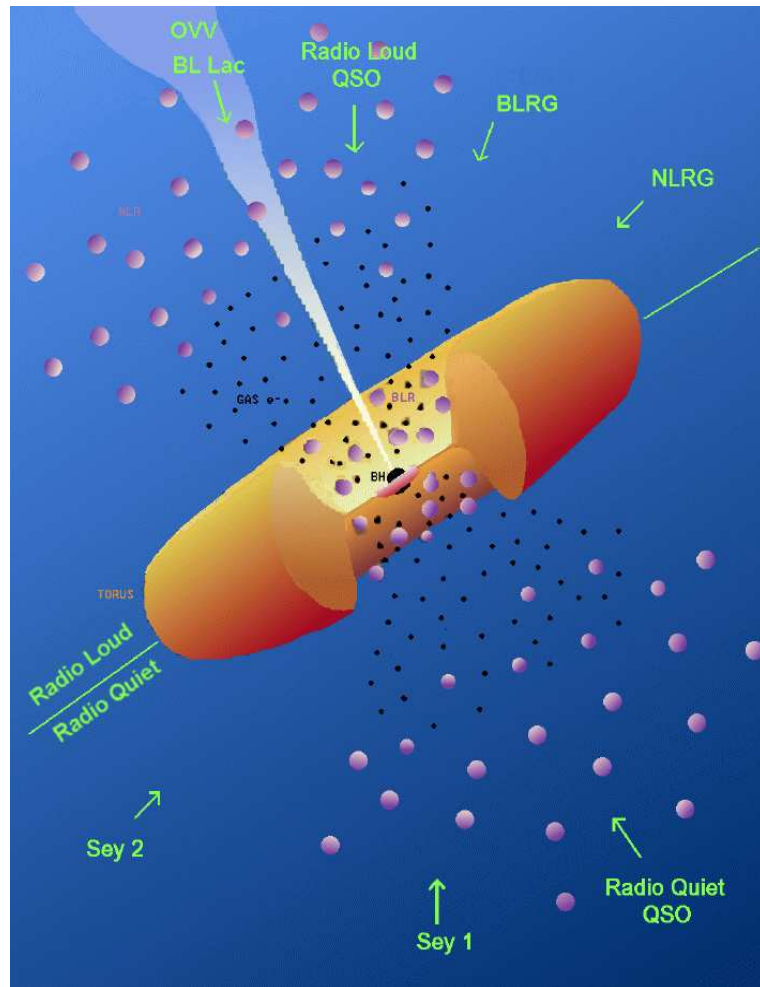
AGJ veći, tako da ne možemo da vidimo unutar konusa, tada ih klasifikujemo kao Sejfert 2 galaksije, jer u tom slučaju u spektru objekta dominira emisija koja dolazi iz uskolinijske oblasti (NLR). Ovo predstavlja osnove tzv. "unificiranog modela" aktivnih galaktičkih jezgara, po kojem u zavisnosti od orijentacije galaksije u odnosu na pravac posmatranja, vidimo različite tipove AGJ.



Slika 6: Šematski prikaz unificiranog modela aktivnog galaktičkog jezgra. Crna rupa se nalazi u središtu, a oko nje se nalazi akrecioni disk koji postepeno prelazi u neprovidni torus. BLR - širokolinijska emisiona oblast, NLR - uskolinijska emisiona oblast. Jonizujuće fotone su unutar konusa čija se osa poklapa sa osom akrecionog diska. Osa simetrije je predstavljena isprekidanom linijom. Unutar užeg konusa na slici izbacuju se relativistički mlazovi plazme.

Ovaj model je široko prihvaćen tek kada su Miler i Antonuči (Miller & Antonucci 1983) snimili spektar polarizovanog zračenja Sejfert 2 galaksije NGC 1068. Zračenje je bilo polarizovano tako da je vektor električnog polja bio normalan na osu konusa emisije. Oni su pronašli da dozvoljene linije u polarizovanom spektru imaju široka krila i da liče na linije viđene u Sejfert 1 galaksijama. Značaj ovog rezultata je sledeći: galaksija NGC 1068 je tipa Sejfert 2 galaksija, i trebalo bi da bude nagnuta tako da ne možemo da vidimo oblasti u kojima nastaju krila širokih linija. Ipak, fotoni emitovani duboko unutar konusa, kreću se unutar njega i bivaju rasejani na slobodnim elektronima i usmereni ka nama. Da bi se rasejali na ovaj način, svetlost mora biti polarizovana tako da joj je vektor električnog

polja normalan na ravan koja sadrži pravac posmatranja i početni pravac u kojem su emitovani fotoni. Prema tome, mereći spektar komponente zračenja galaksije NGC 1068 koja je polarizovana na taj način, Miler i Antonuči su snimili rasejano zračenje koje dolazi duboko iz konusa. Unificirani model na taj način uspešno objašnjava pojavu emisije iz širokolinijskog regiona, koja je obično zaklonjena u Sejfert 2 galaksijama.



Slika 7: Različiti tipovi aktivnih galaktičkih jezgara u zavisnosti od ugla između ose rotacije crne rupe i pravca posmatranja.

Unificirani model takođe objašnjava razliku u jačini celokupnog zračenja AGJ, velike promenljivosti kod blazara, kao i veliku polarizovanost. Zamislimo da mlazevi čestica izbijaju duž konusa, kao što je prikazano na slici 7. Kada je mlaz usmeren u pravcu posmatranja, sistem klasifikujemo kao blazar, jer u tom slučaju posmatramo veoma mali radijus, duboko unutar jezgra aktivne galaksije, tako da posmatrani sjaj može vrlo brzo da se menja. Blizu jezgra mlazevi se kreću relativistički, a u slučaju blazara, ovo kretanje je usmereno direktno ka

nama, tako da je sinhrotronsko zračenje primetno doplerovski pomerenom ka većim frekvencijama. Dominacija sinhrotronskog zračenja nad optičkim delom spektra objašnjava nedostatak linija kod BL Lacs galaksija. Kada je pravac posmatranja AGJ pod takvim uglom da ih ne posmatramo duž mlazeva, na snimku galaksije dominiraju "radio lobes" i takvu galaksiju klasifikujemo kao radio-galaksiju. U poređenju sa blazarima, njih ima mnogo više, prosto zato što je mala verovatnoća da se aktivna galaksija posmatra baš u pravcu radio-mlazeva. Usko-linijske radio-galaksije (NLRG) su aktivne galaksije koje su više nagnute u odnosu na pravac posmatranja (ugao između ose konusa i pravca posmatranja je veliki) tako da ne vidimo daleko unutar konusa, dok su široko-linijske radio-galaksije (BLRG) manje nagnute tako da se detektuju oblasti bliže centru, koje emituju široke linije.

Unificirani model predviđa da je emisija u infracrvenom i X-području izotropna, budući da mlazevi ne zrače u toj oblasti, a akrecioni torus koji zaklanja centralni izvor u optičkom domenu, je prozračan za ta zračenja. Pošto se luminoznosti u infracrvenom i X-području razlikuju po nekoliko redova veličina (između najslabijih i najsjajnijih AGJ), jasno je da se AGJ pored različite orijentacije razlikuju i po luminoznosti.

## 2.4 Emisione linije u spektru aktivnih galaktičkih jezgara

Spektri AGJ predstavljaju najvernije otiske fizičkih procesa koji produkuju i prenose zračenje iz ovih izuzetno zanimljivih sistema. Njihova jedinstvenost ih odvajaju od ostalih vangalaktičkih objekata. U spektru AGJ prisutne su sve vrste elektromagnetnog zračenja:  $\gamma$  i X zraci, ultraljubičasto, optičko, infracrveno i radio zračenje. Emisione oblasti tako kompaktnog izvora kao što je AGJ se ne mogu razdvojiti, tako da posmatrani spektar predstavlja superponirano zračenje iz centralne oblasti i zračenja iz oblaka gasa.

Jedna od važnih osobina AGJ je da u svom spektru imaju jake emisione linije. Njihovo proučavanje je interesantno zbog toga što ih možemo koristiti za određivanje fizičkih uslova u oblastima koje ih emituju, odnosno proučavati kinematiku i fiziku emisionog gasa kod AGJ. Ukupna energija izračena u emisionim linijama čini 10 – 20% od ukupne izračene energije u optičkoj i bliskoj UV oblasti, odnosno u proseku 1 – 2% od ukupne bolometrijske luminoznosti AGJ. Postavlja se pitanje kako i gde nastaju tako jake i raznolike emisione linije. Postojeći model AGJ sadrži kompaktn centralni izvor koji emituje kontinualno zračenje na visokim frekvencijama. Ovi visokoenergetski fotoni predstavljaju snažan izvor jonizacije u oblastima koje se nalaze malo dalje od centra. Pored postizanja visokog stepena jonizacije, višak energije ovih fotona povećava kinetičku energiju oslobođenih elektrona i samim tim povećava ukupnu temperaturu gasa. U tim oblacima gasa tipične temperature su reda  $10^4$  K, dok elektronske koncentracije

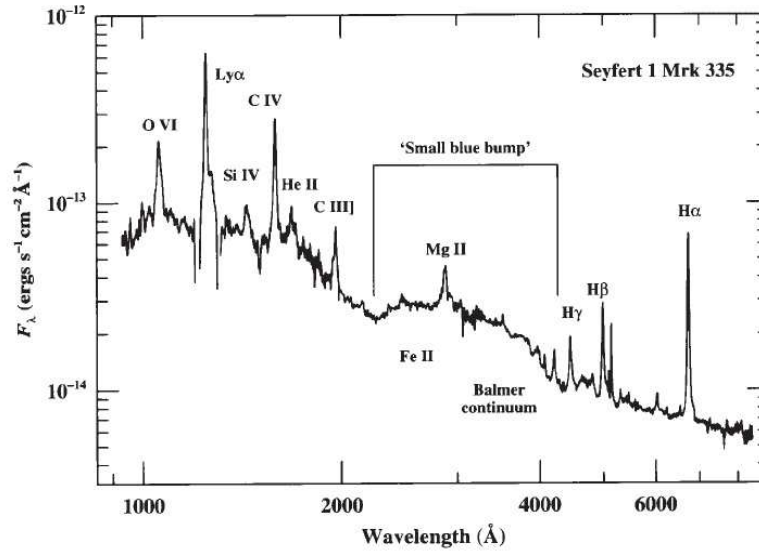
značajno variraju od oblasti do oblasti i kreću se u opsegu od  $10^3 - 10^{10} \text{cm}^{-3}$  (neke osobine emisionih linija, na primer u slučaju semizabranjene linije CIII]  $\lambda 1909$ , ukazuju na to da elektronske koncentracije mogu biti i veće u pojedinim emisionim oblastima).

U spektrima aktivnih galaktičkih jezgara prisutne su različite emisione linije u optičkom, UV, pa i u X-području. One su uglavnom klasifikovane na široke, pretežno dozvoljene, i uske, uglavnom zabranjene linije. Činjenica da postoje linije različitog oblika i intenziteta ukazuje na to da su fizički i kinematički uslovi različiti u oblastima gde se one formiraju, odnosno da različite linije nastaju u fizički različitim oblastima.

**Široke emisione linije** (*BEL - Broad Emission Lines*) su one linije čija je širina na polovini maksimuma intenziteta FWHM (*Full Width Half Maximum*) najmanje  $1000 - 2000 \text{ km s}^{-1}$ . Najčešće su od širokih linija u spektru AGJ prisutne linije vodonika, helijuma, ugljenika, azota, kiseonika, silicijuma i magnezijuma:  $\text{Ly}\alpha$ ,  $\text{H}\alpha$ ,  $\text{H}\beta$ ,  $\text{Pa}\alpha$ ,  $\text{Pa}\beta$ ,  $\text{Br}\alpha$ , HeII  $\lambda 1640$ , HeII  $\lambda 4686$ , HeI  $\lambda 5876$ , HeI  $\lambda 10830$ , CIII]  $\lambda 1909$ , CIV  $\lambda\lambda 1548, 1551$ , NV  $\lambda\lambda 1239, 1243$ , OVI  $\lambda\lambda 1032, 1038$ , OIV]  $\lambda 1400$ , OI  $\lambda 1305$ , OI  $\lambda 8446$ , SiIV  $\lambda\lambda 1394, 1403$ , MgII  $\lambda\lambda 2796, 2804$ . Takođe, prisutne su i mnoge linije iz FeII multipleta, koji se uglavnom nalaze u sledeće četiri oblasti:  $2200 - 2600 \text{ \AA}$ ,  $3000 - 3400 \text{ \AA}$ ,  $4500 - 4600 \text{ \AA}$ ,  $5250 - 5350 \text{ \AA}$ . Jedini uslov da se ove linije detektuju je da snimljeni podaci pokrivaju određeni opseg talasnih dužina i da je odnos signal/šum dovoljno veliki da ih možemo uopšte videti. Za razliku od emisionih linija u tipičnim galaktičkim maglinama, kao što su HII regioni, BELs su uglavnom linije koje nastaju u dozvoljenim prelazima.

Među gore nabrojanim linijama nalazi se nekoliko dubleta. Pošto su najčešće linije u dubletu proširene više nego što je razlika njihovih talasnih dužina, često se dubleti tretiraju kao jedna linija. Tako se na primer, za CIV  $\lambda\lambda 1548, 1551$  dublet uzima da je centralna talasna dužina  $1549 \text{ \AA}$ , za NV  $\lambda\lambda 1239, 1243$  da je na  $1240 \text{ \AA}$ , za OVI  $\lambda\lambda 1032, 1038$  na  $1034 \text{ \AA}$ , SiIV  $\lambda\lambda 1394, 1403$  na  $1400 \text{ \AA}$ , a za MgII  $\lambda\lambda 2796, 2804$  dublet da je na  $2800 \text{ \AA}$ .

Odnosi intenziteta ovih linija su približno isti kod različitih AGJ.  $\text{Ly}\alpha$  linija je generalno najjačeg intenziteta, zatim sledi dva puta manjeg intenziteta CIV  $\lambda 1549$  linija, koja je ponekad jaka kao i  $\text{Ly}\alpha$ .  $\text{H}\alpha$  je jaka skoro kao i CIV  $\lambda 1549$ . Dva puta manje od nje su CIII]  $\lambda 1909$  i MgII  $\lambda 2800$ , a nešto slabije su NV  $\lambda 1240$ , SiIV/OIV blend, HeII i  $\text{H}\beta$ . Ostale linije su još slabije. Iz ovako generalnog razmatranja, treba izdvojiti multiplete gvožđa, pre svega zato što je njihov fluks teško izmeriti, ali je sigurno da se njihov relativni fluks menja od objekta do objekta. Razlog tome je veliki broj FeII linija, koje se, s obzirom da su proširene nekoliko  $1000 \text{ km s}^{-1}$ , kod nekih objekata spajaju u svakoj grupi multipleta i formiraju neki vid kontinuuma. Linije blizu  $3000 \text{ \AA}$  su dodatno izmešane sa Balmerovim kontinuumom, tako da formiraju jedinstvenu pojavu, koja se naziva "plavi eksces" (*Small blue bump*).



Slika 8: "Plavi eksces", spoj Balmerovog kontinuuma i FeII multiplleta, je vrlo izražen kod Sejfert 1 galaksije Mrk 355 i jasno se vidi i u logaritamskoj skali (Zheng et al. 1995).

Postoje korelacije između relativnog intenziteta emisionih linija i luminoznosti (u smislu da su više jonizovane linije intenzivnije u slučaju slabije luminoznosti), ali su prilično slabe (Boroson & Green 1992). Sa druge strane, postoji jaka korelacija između ekvivalentne širine CIV  $\lambda 1549$  linije i luminoznosti. Primećen je efekat da sa povećanjem luminoznosti najsjajnijih kvazara, ekvivalentna širina ove linije opada (Baldwin 1977), poznat kao Baldwinov efekat. Proučavanjem ovog efekta na velikom uzorku radio-jakih kvazara, pokazano je da stvarno postoji korelacija i da u slučaju ovog tipa objekata važi

$$W(CIV\lambda 1549) \propto L_{\nu}^{-\frac{2}{3}}$$

(Baldwin et al. 1989). U slučaju drugih širokih linija i tipova aktivnih galaktičkih jezgara Baldwinov efekat je dosta slabiji.

Emisione linije koje nazivamo **uske emisione linije** (NEL - Narrow Emission Lines) su u principu uske samo u poređenju sa već definisanim širokim emisionim linijama. Njihova širina na polovini maksimalnog intenziteta može biti i nešto manja od  $1000 \text{ km s}^{-1}$ . Od uskih linija najistaknutije su zabranjene linije [OIII]  $\lambda\lambda 4959, 5007$ , [OIII]  $\lambda 4363$  i [OII]  $\lambda 3727$ , zatim su tu [NII]  $\lambda\lambda 6548, 6583$  dublet, [OI]  $\lambda 6300$  i [SII]  $\lambda\lambda 6716, 6731$  dublet. Linije neutralnog vodonika Lajmanove i Balmerove serije, kao i CIV  $\lambda 1549$  takođe imaju usku komponentu u emisionom linijskom spektru AGJ.

Neke od najčešćih zabranjenih i dozvoljenih linija, prisutnih u aktivnim galaktičkim jezgrima, date su u Tabeli 2. Podaci o talasnim dužinama, za ove i

Tabela 2: Emisione linije koje su najčešće prisutne u spektrima aktivnih galaktičkih jezgara i njihove laboratorijske talasne dužine.

Emisiona linija	$\lambda_o$ [Å]	Emisiona linija	$\lambda_o$ [Å]
Ly $\alpha$	1215.67	[OI]	6300.30
Ly $\beta$	1025.72	[OI]	6363.78
Ly $\gamma$	972.54	[OII]	3727.32
H $\alpha$	6562.79	[OII]	3729.32
H $\beta$	4861.32	OIII]	1660.81
H $\gamma$	4340.46	OIII]	1666.15
H $\delta$	4101.73	[OIII]	2322.59
H $\epsilon$	3970.07	OIII	3132.79
Pa $\alpha$	18751.01	[OIII]	4363.21
Pa $\beta$	12818.07	[OIII]	4958.91
Pa $\gamma$	10938.09	[OIII]	5006.84
HeI	3888.65	OIV]	1401.16
HeI	5875.96	OVI	1031.91
HeI	10830.24	OVI	1037.61
HeII	1640.00	[NeIII]	3868.75
HeII	4686.68	[NeIII]	3967.46
CII]	2326.93	[NeIV]	2421.86
CIII]	1908.73	[NeIV]	2424.50
CIV	1548.19	[NeV]	3345.76
CIV	1550.77	[NeV]	3425.79
[NII]	5754.59	MgII	2795.53
[NII]	6548.09	SiIII	1892.03
[NII]	6583.36	SiIV	1393.76
NIII]	1748.64	SiIV	1402.77
NIV]	1486.50	[SII]	4074.64
NV	1238.82	[SII]	6715.18
NV	1242.80	[SII]	6730.74
OI	1302.16	FeII	2373.74
OI	8446.35	FeII	2382.04
[OI]	5577.34		



druge spektralne linije, mogu se naći u on-line bazi podataka "NIST Atomic Spectra Database"<sup>3</sup>, kao i u "Kurucz Atomic Line Database" u okviru "Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics"<sup>4</sup>.

Za razliku od širokih linija, kod uskih emisionih linija FWHM se sa povećanjem luminoznosti AGJ značajno smanjuje, toliko da se skoro ne mogu detektovati u najsjajnijim kvazarima. Štaviše, za ultraljubičaste uske linije FWHM se smanjuju sa porastom luminoznosti mnogo brže nego za uske linije u optičkom delu spektra. Samim tim, raspodela FWHM uskih linija po luminoznosti ne može dati korisne informacije o luminoznosti kao što može kod širokih linija. Jedino u slučaju jezgara slabe luminoznosti uske linije su dovoljno izražene, ali u tom slučaju okolna galaksija značajno utiče i na kontinuum i na emisione linije. Procesi koji se dešavaju u zvezdama dodatno otežavaju određivanje relativnih intenziteta ovih linija. Takođe, kod objekata kod kojih se javljaju i široke i uske komponente u emisionim linijama dodatno je komplikovano izmeriti fluks pojedinih komponenti. Kada su prisutne široke linije, one generalno dominiraju u ukupnom fluksu, tako da je greška u određivanju fluksa širokih linija zbog prisutnosti uskih linija obično  $\sim 10\%$  ili i manje. Nasuprot tome, greška u određivanju fluksa uske komponente može biti i  $100\%$ , baš zbog superponiranja sa širokom komponentom.

Efekat pocrvenjenja (*reddening*) može imati veliki uticaj na fluks zračenja van-galaktičkih objekata. Zbog ekstinkcije fotona viših učestanosti od strane prašine, smanjuje se fluks kako kontinuumu tako i emisionih linija u plavom delu spektra (dolazi do promene kolor indeksa na većim frekvencijama), ukupno zračenje je crvenije. Prašina koja izaziva ovaj efekat, može se nalaziti u našoj Galaksiji, tada govorimo o tzv. Galaktičkom pocrvenjenju, ali takođe prašina unutar galaksije koju posmatramo može izazvati isti efekat i tada ga nazivamo unutrašnji ili sopstveni efekat pocrvenjenja. Uticaj je mnogo veći na UV nego na optičke linije, i naravno teško ga je pouzdano ukloniti. Jedan mogući metod određivanja sopstvenog efekta pocrvenjenja u emisionim linijama je poređenje flukseva dve rekombinacione linije (kao što su HeII  $\lambda 1640$  i HeII  $\lambda 4686$ ) koje su potpuno razdvojene i na čiji relativni odnos intenziteta ne utiču temperatura i gustina plazme u kojoj nastaju, već samo verovatnoće prelaza (u navedenom primeru uzete su ove linije jonizovanog helijuma zato što im je gornji nivo isti, dok im donji nivoi nisu previše naseljeni da bi imali veliku optičku dubinu). Međutim, ni ovaj metod nam ne može garantovati da smo odstranili uticaj pocrvenjenja u ostalim elementima, osim kod HeII. Drugi metod merenja ekstinkcije posmatrane AGJ je pomoću odnosa Balmerovih linija, na primer  $H\alpha/H\beta$  ili  $H\beta/H\gamma$ . Ovaj metod se najčešće koristi zato što su Balmerove linije jake i skoro uvek su obuhvaćene prilikom posmatranja. U AGJ relativni odnos Balmerovih linija nema vrednosti predviđene atomskom teorijom, pa je opadanje intenziteta Balmerovih linija mnogo strmije. Na osnovu te razlike određuje se sopstveni koeficijent ekstinkcije AGJ (Osterbrock

---

<sup>3</sup><http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.html>

<sup>4</sup><http://cfa-www.harvard.edu/amdata/ampdata/kurucz23/sekur.html>

1989). Efekat pocrvenjenja na odnos  $I(H\alpha)/I(H\beta)$  linija može se izraziti kao

$$C = 3.1 \times \left( \frac{F(H\alpha)}{F(H\beta)} - \frac{I(H\alpha)}{I(H\beta)} \right),$$

gde je  $C$  mera količine pocrvenjenja ( $E(B-V)=0.77 C$ ),  $I(\lambda)$  označava početni (nepocrvenjen) fluks, a  $F(\lambda)$  je izmeren fluks. Odnos fluksa Balmerovih linija naziva se Balmerov dekrement. Odnos  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija u slučaju AGJ kod kojih su pored rekombinacionih uzeti u obzir i sudarni procesi iznosi  $I(H\alpha) : I(H\beta) = 3.08$  (Osterbrock 1989)<sup>5</sup>. Na osnovu mere  $C$  može se uraditi korekcija fluksa na bilo kojoj talasnoj dužini pomoću relacije

$$\log I(\lambda) = \log F(\lambda) + C \times f(\lambda).$$

Ovde je  $f(\lambda)$  kriva pocrvenjenja koja daje ekstinkciju na nekoj  $\lambda$  u odnosu na onu na talasnoj dužini  $H\beta$  linije (Miller & Mathews 1972, Osterbrock 1989).

Međutim, pre otklanjanja efekta sopstvenog pocrvenjenja neophodno je ukloniti uticaj međuzvezdanog gasa i prašine u našoj galaksiji. Galaktička ekstinkcija je dosta proučavana jer utiče na posmatranja skoro u svim pravcima na nebeskoj sferi. Uobičajeno je da se kriva ekstinkcije  $f(\lambda)$  određuje poređenjem intenziteta dve emisije linije čiji intenzitet zavisi samo od verovatnoća prelaza (na primer [SII] linije  $\lambda 4069$  i  $\lambda 10287$ , ili pomoću Balmerovih linija, kao u prethodno opisanom metodu) ili poređenjem fluksa dve zvezde istog spektralnog tipa. Galaktička ekstinkcija zavisi od talasne dužine. Obično je kriva ekstinkcije opisana pomoću dva parametra: ekstinkcijom u fotometrijskom opsegu  $V^6$ ,  $A(V)$ , i merom relativne ekstinkcije između  $B$  i  $V$  fotometrijskih opsega  $R_V$ , koja se definiše kao

$$R_V = \frac{A(V)}{A(V) - A(B)} = \frac{A(V)}{E(B - V)}.$$

Vrednost parametra  $R_V$  varira od 2.6 do 5.5, sa srednjom vrednošću od 3.1 (Savage & Mathis 1979, Schlegel et al. 1998). Posmatranja ukazuju na to da je  $R_V \approx 3.1$  za skoro sve međuzvezdane oblake u našoj galaksiji. U zavisnosti od pravca posmatranja aktivne galaksije relevantni koeficijenti ekstinkcije ( $A(V)$ ,  $A(B)$ ) neophodni za uklanjanje efekta galaktičkog pocrvenjenja mogu se naći u NED bazi (NASA's Extragalactic Database<sup>7</sup>) ili u radu Burstein & Heiles (1982).

Uske emisije linije pružaju mogućnost da se iz odnosa flukseva pojedinih linija proceni temperatura i gustina gasa u uskolinijskom emisionom regionu. Neki joni, od kojih su [OIII] i [NII] najbolji primer, imaju strukturu energetskih nivoa

<sup>5</sup>Napomenimo da ovo ne važi u slučaju kada sudarni procesi igraju dominantnu ulogu (vidi poglavlje 3.4)

<sup>6</sup>Fotometrijski sistem koji se uglavnom koristi pri merenju magnitude nekog objekta je UBV sistem. Efektivna talasna dužina fotometrijskog opsega  $V$  je  $5500 \text{ \AA}$  (FWHM  $\sim 890 \text{ \AA}$ ), a efektivna talasna dužina fotometrijskog opsega  $B$  je  $4400 \text{ \AA}$  (FWHM  $\sim 980 \text{ \AA}$ ).

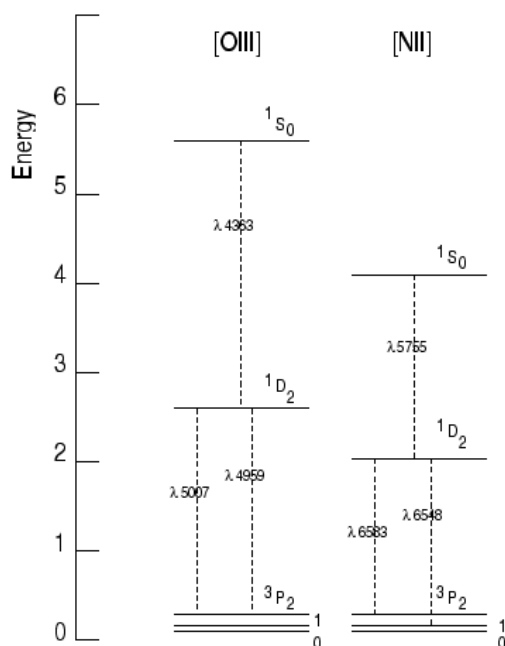
<sup>7</sup><http://nedwww.ipac.caltech.edu>

takvu da se emisijske linije koje nastaju sa dva različita gornja energetska nivoa sa različitim energijama ekscitacije, javljaju u talasnom domenu dostupnom posmatranjima i za objekte velikog crvenog pomaka  $z = 3$ . Energetski Grotrijan dijagrami ovih jona prikazani su na slici 9, gde se može videti da u slučaju [OIII], linija  $\lambda 4363$  dolazi sa gornjeg  $^1S$  nivoa, dok linije  $\lambda 4959$  i  $\lambda 5007$  dolaze sa nivoa  $^1D$ . Odnos brzina ekscitacije na  $^1S$  i  $^1D$  energetske nivoe jako zavise od temperature, tako da se odnos flukseva linija emitovanih sa ovih nivoa može iskoristiti za merenje elektronske temperature sistema. U slučaju aproksimacije male gustine (zanemaruje se sudarna deekscitacija), optički retke i izotermalne sredine, dobija se da odnos flukseva ovih linija zavisi od temperature na sledeći način (Osterbrock 1989)

$$\frac{F(\lambda 4959) + F(\lambda 5007)}{F(\lambda 4363)} = \frac{7.73 \times e^{(3.29 \times 10^4)/T}}{1 + 4.5 \times 10^{-4}(N_e/T^{1/2})} \quad (1)$$

Slična zavisnost se dobija za slučaj [NII] linija  $\lambda 6548$ ,  $\lambda 6583$  i  $\lambda 5755$  (Osterbrock 1989):

$$\frac{F(\lambda 6548) + F(\lambda 6583)}{F(\lambda 5755)} = \frac{6.91 \times e^{(2.50 \times 10^4)/T}}{1 + 2.5 \times 10^{-3}(N_e/T^{1/2})} \quad (2)$$



Slika 9: Šema energetskih nivoa najnižeg terma [OIII] i [NII] jona. Emisijske linije u optičkom delu su prikazane isprekidanim linijama i samo najverovatniji prelazi su obeleženi.

Mereći fluks ovih linija, direktno iz formule (1) ili (2) dobijamo temperaturu sredine. Naravno, iako su ove linije velikog intenziteta postoje problemi u tačnom

određivanju njihovog fluksa. Ali pogodne su zbog toga što se ne mora vršiti popravka usled galaktičke ekstinkcije.

Za određivanje elektronske gustine mogu se koristiti efekti sudarne deekscitacije, upoređujući fluks dveju linija istog jona emitovanih sa različitih energetskih nivoa, čije su energije ekscitacije približno jednake tako da odnos brzina ekscitacije na ova dva nivoa zavisi samo od jačina sudara. Ako ova dva nivoa imaju različite verovatnoće radijativnog prelaza ili verovatnoće sudarne deekscitacije, relativne naseljenosti ova dva nivoa, odnosno fluksevi linija koje se emituju, zavisice samo od elektronske gustine. Najbolji primer za to su odnosi linija [OII]  $\lambda 3729/\lambda 3726$ , kao i [SII]  $\lambda 6716/\lambda 6731$ . U slučaju [OII] linija, njihov odnos u aproksimaciji male gustine ( $N_e \rightarrow 0$ ), u kojoj svakoj sudarnoj ekscitaciji sledi radijativna deekscitacija, odnos flukseva ove dve linije je  $F(\lambda 3729)/F(\lambda 3726) = 1.5$ . Sa druge strane, u slučaju aproksimacije velike gustine, sudarne ekscitacije i deekscitacije dominiraju, pa je odnos flukseva ovih linija određen Bolcmanovom jednačinom i iznosi  $F(\lambda 3729)/F(\lambda 3726) = 0.30$ . Rešavanjem ravnotežne jednačine, uključujući i ostale bliske prelaze istog jona, dobija se jednačina promene odnosa flukseva sa elektronskom gustinom

$$\frac{F(\lambda 3729)}{F(\lambda 3726)} \sim \frac{T^{1/2}}{N_e},$$

na osnovu koje je moguće odrediti  $N_e$  kada plazma ne zadovoljava aproksimaciju velike ni male gustine. Isto razmatranje važi i za slučaj [SII] linija. U slučaju kad imamo gas velike gustine, mogu se koristiti i odnosi flukseva linija dvaput jonizovanog kiseonika ( $\lambda 4959$ ,  $\lambda 5007$ ,  $\lambda 4363$ ).

Emisione linije u aktivnim galaktičkim jezgrima su uglavnom nepravilnog oblika. Dominantan uzrok pomeranja, širenja i asimetrije profila spektralnih linija u AGJ je Doplerov efekat. Različiti vidovi kretanja atoma i jona u plazmi (najviše termalno kretanje i kretanje plazme kao celine) dovode do prividnog pomeranja frekvencije zračenja. U slučaju da je emisiona oblast u obliku diska, što se i javlja kod AGJ gde se akrecioni disk formira oko crne rupe, jonizovan gas se kreće kvazi-keplerovski i periodično se približava i udaljava od posmatrača. Ovaj efekat se u spektru odražava pomeranjem talasne dužine spektralne linije ka plavom, odnosno ka crvenom u odnosu na referentnu talasnu dužinu (kada je emiter u mirovanju). Odnosno, usled diskolikog oblika emisione oblasti, spektralne linije će imati dve komponente, pomerene ka plavom, odnosno ka crvenom u odnosu na laboratorijsku talasnu dužinu.

Pored kretanja emitera, na profil spektralne linije mogu uticati i drugi faktori. U slučaju AGJ, emisione oblasti se nalaze pod uticajem jakog gravitacionog polja masivnog jezgra (na primer, kod Sejfert galaksija masa jezgra je  $10^6 - 10^8 M_\odot$ ), tako da sistematski gravitacioni crveni pomak može imati primetan uticaj na oblik spektralne linije. Jako gravitaciono polje može dovesti do pomeranja emisione linije ka crvenom, širenja i asimetrije, ali u kojoj meri zavisi od optičke debljine

emisione oblasti, talasne dužine spektralne linije, mase jezgra, kao i od udaljenosti emisione oblasti od jezgra. Tako, na primer, u slučaju optički guste sredine i  $H\beta$  linije, pomeranje ka crvenom i asimetrija nisu zanemarljivi za rastojanja manja od  $10^2 R_g$ . Takođe, asimetrija u crvenom krilu linije raste sa povećanjem talasne dužine (Popović et al. 1995).

## 3 Kinematičke i fizičke osobine emisijih oblasti

Prihvaćen model aktivnog galaktičkog jezgra predviđa da se u centru nalazi supermasivna crna rupa sa akrecionim diskom, koji su okruženi neprozračnim torusom. Pored torusa, u blizini crne rupe, nalaze se još dve emisijne oblasti, a to su širokolinijska i uskolinijiska emisijna oblast, odnosno BLR i NLR oblast, respektivno, koje su jonizovane od strane zračenja iz centra. Takođe, iz centralnog dela materija se izbacuje usmerenim relativističkim mlazovima duž ose akrecionog diska.

### 3.1 Centralni izvor kontinuuma

Jedan od izvora energije u centru je akrecija materije (atoma i jona) u crnu rupu. Gravitacionim kolapsom u crnu rupu oslobađa se ogromna energija:  $L = \eta \dot{M} c^2$ , gde je  $\dot{M}$  brzina akrecije, a  $\eta$  je efikasnost procesa, odnosno deo mase koja se pretvori u energiju i ne upadne u crnu rupu. Na primer, ako je  $\eta = 10\%$ , za AGJ luminoznosti  $L = 10^{12} L_{\odot}$  potrebno je da brzina akrecije bude  $\dot{M} = 0.7 M_{\odot}$  godišnje. Međutim, gravitacioni kolaps nije jedini mehanizam zračenja centralnog izvora AGJ, budući da se emituje zračenje u svim frekventnim područjima. Potencijalni mehanizmi zračenja koji dovode do stvaranja prvenstveno  $\gamma$  i X zraka, ali i zračenja većih talasnih dužina, su:

- Zakočno zračenje: ovo zračenje je rezultat promene brzine naelektrisanih čestica tokom međusobne interakcije (najčešće elektron-proton interakcije ili interakcije elektron-jezgro).
- Inverzno Komptonovo rasejanje: rasejavanjem fotona na visokoenergetskim elektronima oni dobijaju energiju na račun kinetičke energije elektrona. Tu su najbitniji sudari relativističkih elektrona i niskoenergetskih fotona (na primer fotoni na radio-frekvencijama).
- Sinhrotronsko zračenje: relativistički elektroni, krećući se helikoidalno oko linija sile magnetnog polja, zrače u visokom stepenu linearno polarizovano sinhrotronsko zračenje.
- Kreacija/anhilacija para  $e^{\pm}$ : proces stvaranja parova (elektron - pozitron) iz visokoenergetskih  $\gamma$  fotona.

Za proizvodnju visokoenergetskih fotona navedenim mehanizmima, potrebna je određena koncentracija relativističkih elektrona u akrecionom disku. Akrecija materije nije dovoljan mehanizam zagrevanja elektrona. Jedan mogući dodatni

mehanizam je postojanje nehomogenog magnetnog polja, čiji je gradijent dovoljno veliki.

Kao što je već pomenuto, centralni izvor aktivnih galaktičkih jezgara emituje kontinualno zračenje duž celog elektromagnetnog spektra. Proučavajući spektar ovog zračenja, odnosno pokušavajući da ga fitujemo teorijskim krivama definisanim za različite mehanizme zračenja, dolazimo do saznanja o fizičkim, kinematičkim i geometrijskim karakteristikama AGJ. Kontinuum se može opisati stepenim zakonom  $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$  u skoro svim oblastima talasnih dužina, s tim što su nagibi različiti u raznim oblastima.

**Radio-područje.** Iako je veliki broj AGJ otkriven u radio-oblasti, kod većine AGJ je radio-zračenje teško detektovati. Konvencionalna mera kojom se opisuje "radio-glasnost" AGJ je veličina  $R$ , definisana kao  $R \equiv F_{\nu_r}/F_\nu(4400\text{\AA})$ , gde je  $\nu_r$  frekvencija u radio-području na kojoj posmatramo AGJ, a  $F_\nu(4400\text{\AA})$  fluks kontinuumu meren u vidljivom delu spektra na 4400 Å. Kada je prisutna, radio-emisija u opštem slučaju dolazi iz kompaktnog izvora, i spektralna raspodela je skoro ravna, spektralni indeks je u opsegu  $0.5 \leq \alpha \leq 1$ . Zračenje u radio-području je snažno linearno polarizovano, tako da je dominantni mehanizam zračenja sinhrotronski.

**Infracrveno-područje.** Od talasne dužine  $\lambda \approx 100\text{ }\mu\text{m}$  pa do optičkog dela spektra elektromagnetnog zračenja, spektralni indeks zračenja je  $\alpha = 1 - 1.2$ . Posmatranja u bliskoj infracrvenoj oblasti pokazuju višak emisije između 2  $\mu\text{m}$  i 1 mm. Ovaj opseg sadrži oko 3% ukupne emitovane energije. Veći deo ove emisije (ako ne i sva) je termalnog porekla i potiče od čestica prašine koja se nalazi oko aktivnog jezgra na rastojanju od 10 pc do 1 kpc i koju zagrevaju ultraljubičasti i optički fotoni iz centra.

**Vidljivo i UV područje.** Raspodela zračenja u ove dve oblasti se može opisati stepenim zakonom, pri čemu se spektralni indeks menja u opsegu  $-2 \leq \alpha \leq 1.5$ , a u maksimumu raspodele ima vrednost  $\alpha \simeq 0 - 0.5$ . Globalno posmatrano spektar kontinuumu ima izbočen oblik, sa maksimumom u bliskoj UV oblasti (slika 10). Kod većine objekata ovaj maksimum u okolini 10 eV je širok i ravan, i često se naziva "velika plava izbočina" (*Big Blue Bump*). Model tankog akrecionog diska predviđa termalnu emisiju, i u slučaju kada su temperature diska reda  $10^4\text{K}$ , termalna emisija ima maksimum u UV oblasti i dobro fituje posmatrani oblik kontinuumu u ovim oblastima. Problem nastaje kada posmatramo širi opseg talasnih dužina, i ka dužim i ka kraćim  $\lambda$ . Tada fluks, koji predviđa model jednostavnog akrecionog diska, opada sve više i razlika u odnosu na posmatrani fluks postaje sve veća, što ukazuje da su potrebni dodatni mehanizmi zračenja da objasne i infracrveni i meki X kontinuum AGJ.

**X i  $\gamma$  područje.** X-zračenje je posmatrano u oblasti 0.5-100 keV. Između 2 keV i 100 keV spektar ( $F_\nu$ ) se opisuje stepenim zakonom gde je spektralni indeks  $\alpha \approx 0.7 - 0.9$  u zavisnosti od toga da li imamo RL ili RQ aktivna galaktička jezgra.

Jačina X-zračenja je nešto veća kod RL objekata. Kod RQ objekata, na  $\simeq 6.4$  keV javlja se emisiona linija Fe  $K\alpha$ , čija je FWHM ponekad  $\simeq 350$  eV, a nekad se jedva nazire sa širinom manjom od 50 eV (postoji korelacija između luminoznosti i jačine Fe  $K\alpha$  linije; linija je slabija za sjajnije objekte u X-području).

Poreklo emisije X-zraka je i dalje nejasno. Verovatno je u pitanju zračenje netermalnog porekla, gde, pored slabe sinhrotronske emisije visoko energetskih elektrona, veliki uticaj sigurno ima inverzno Comptonovo rasejanje. Posmatranja u X-području su neophodna, zato što nam daju informacije o oblastima vrlo blizu crne rupe.

Jedino u slučaju RL objekata izmeren je fluks  $\gamma$ -zračenja iznad 100 MeV koji je uporediv sa fluksom u ostalim frekventnim oblastima, ako ne i za red veličine veći. Izgled spektra u opsegu 100 MeV - 1 GeV se opisuje tipičnim stepenim zakonom spektralnog indeksa  $1 \pm 0.5$ .

### 3.2 Masa u centru aktivnog galaktičkog jezgra

Masa crne rupe u centru galaksija može se proceniti pomoću nekoliko metoda. Kod mirnih (normalnih) galaksija centralne mase se određuju dinamičkim modeliranjem ili iz kinematike zvezda ili kretanja gasa na rastojanju  $\lesssim 1 - 10$  pc od centra (metod se bazira na Njutnovim zakonima uz pretpostavku da se kretanje odvija pod uticajem gravitacione sile masivne crne rupe). Ovaj metod može se primeniti i na AGJ, jedino što one moraju biti dovoljno blizu ( $d \lesssim 100$  Mpc), kako bi radijus uticaja crne rupe ( $r_h = GM_{\text{BH}}/\sigma_*^2$ , gde je  $\sigma_*$  disperzija brzina zvezda u okolini centra galaksije) mogao biti vidljiv sadašnjim teleskopima ( $0.1'' \lesssim \theta \lesssim 1''$ ). Kod slabo aktivnih galaksija sopstvena kretanja i radijalne brzine  $\text{H}_2\text{O}$  megamasera se koriste za izvođenje precizne vrednosti centralne mase. Kod aktivnih galaksija, kod kojih se javljaju široke emisione linije, moguće je masu crne rupe odrediti pomoću reverberacionog mapiranja širokolinijske oblasti ili pomoću korelacije između radijusa BLR i luminoznosti<sup>8</sup>. Ovaj, i još par metoda, u stvari određuju dimenzije centralne oblasti AGJ (reverberacioni metod se tu izdvaja iz prostog razloga što ne zavisi od visoke ugaone rezolucije, pa se može primeniti i na jako udaljene izvore), a za procenu mase koristi se prosta računica bazirana na teoremi virijala, koja je opisana dalje u tekstu.

Najprostiji i u mnogim slučajevima najpouzdaniji metod procene mase zasniva se na primeni teoreme virijala. Teorema virijala predstavlja transformisani oblik opšte jednačine kretanja i izvodi se za sisteme i sa prekidnom i neprekidnom raspodelom mase. U specijalnom slučaju, ako imamo stacionaran, sferno-simetričan sistem koji se sastoji od  $N$  objekata uzajamno gravitaciono vezanih,

---

<sup>8</sup>detaljnije u poglavlju 3.4



ukupna kinetička energija sistema jednaka je polovini gravitacione potencijalne energije

$$2T + U = 0.$$

Pretpostavimo da imamo sistem od  $N$  objekata iste mase  $m$  i brzine  $v_i$ . Ukupna masa sistema je  $M = Nm$ , pa je ukupna kinetička energija sistema, uz pretpostavku da imamo slučajnu/izotropnu raspodelu brzina

$$T = \frac{1}{2}M\langle v^2 \rangle.$$

Sa druge strane, ako se uzme da je  $R$  radijus ovog sistema, gravitaciona potencijalna energija ovog sistema može se predstaviti u obliku

$$U = -\frac{GM^2}{2R}.$$

Iz teoreme virijala dalje sledi da je ukupna masa ovog sistema

$$M = 2\frac{R\langle v^2 \rangle}{G}.$$

Prema tome, mereći srednju kvadratnu brzinu i radijus sistema može se odrediti ukupna masa, i tako dobijena masa naziva se **virijalna masa**. Osnovna pretpostavka ovog metoda je da su kretanja objekata u sistemu gravitaciono vezana. Dodatna pretpostavka je da su širine linija, koje se koriste za određivanje brzina objekata u nekom sistemu, određene samo efektima gravitacije.

### 3.3 Fotojonizacija

Nekoliko godina posle otkrića aktivnih galaktičkih jezgara ustanovljen je i najvažniji mehanizam koji podstiče stvaranje njihovih karakterističnih emisionih linija. To je fotojonizacija od strane kontinualnog zračenja iz okoline centra AGJ. Osnovni dokazi koji idu u prilog ovoj teoriji su sledeće dve činjenice:

1. Ekvivalentne širine linija se malo razlikuju od objekta do objekta, za različite vrednosti luminoznosti. To ukazuje na to da je stvaranje linija proporcionalno ukupnom oslobađanju energije.
2. Posmatran je širok opseg jonizacionih stanja, a kontinuum obezbeđuje dovoljno fotona, sa energijama u jako širokom opsegu, potrebnih za tako različite jonizacione potencijale.

U poslednje vreme detaljni modeli bazirani na fotojonizaciji opisuju dobro posmatrane linije i daju dobre vrednosti za jačine linija sa samo nekoliko slobodnih parametara. Takođe, promene intenziteta nekih širokih linija su proporcionalne promeni fluksa kontinuuma, sa nekim vremenom kašnjenja. Takvo kašnjenje nastaje zbog neophodnog vremena da fotoni predju put između kontinualnog izvora i oblasti koja emituje linije, i u skladu su sa predviđanjima fotojonizacionog modela.

Jasno je da izvor jonizacije oblasti koje emituju linijski spektar ne mogu biti vrele zvezde, kao što je slučaj kod HII regiona, gde imamo slične emisione linije. Pre svega, zračenje sa zvezda ne bi moglo da proizvede tako širok opseg jonizacija, koje su posmatrane kod NLRG i Sejfert 2 galaksija, sa emisionim linijama slabo jonizovanih elemenata, kao što su [OI] i [SII], ali i izraženim linijama visoko jonizovanih elemenata, kao što su [NeV] ili [Fe VII]. Naravno, za to je potreban izvor sa mnogo "jačim" spektrom, koji zrači u UV domenu, ali i na mnogo višim frekvencijama.

Iako su dokazi poprilično jasni, da većina AGJ emituje linije usled apsorpcije kontinualnog zračenja AGJ, moguće je da postoje neki objekti u kojima je primarni izvor energije mehanička energija udarnih talasa. Kontinualno zračenje detektuje se direktno i lako se procenjuje koliko je energije dostupno za nastanak linija, dok su dokazi za postojanje udarnih talasa i dalje indirektni, te je ova teorija još uvek dosta nesigurna. U praksi, ova razmatranja se svode na to da se pretpostavi određeni tip udarnih talasa i za njega se određuje koje emisione linije mogu da nastanu, zatim se proverava kako se ta predviđanja slažu sa posmatranjima, u odnosu na fotojonizacioni model, pri čemu se koristi isti broj slobodnih parametara pri računu oba modela. Takođe, u nekim radio-galaksijama posmatrano je da se uskolinijska oblast prostire i dalje od radio-mlazeva, što isključuje mogućnost da su udarni talasi, koji se prostiru duž radio-mlazeva, uzrok ekscitacije te oblasti.

Veliki nedostatak fotojonizacionog modela je činjenica da se uske linije skoro nikad ne menjaju, tako da ne važi zaključak o povezanoj promenljivosti linija i kontinuuma, kao kod širokih linija. Naravno, iako model uspešno opisuje posmatranja, to ne mora da znači da jedinstveno opisuje nastanak svih linija. Moguće je da neka podgrupa linija nastaje i udarnim talasima. Na primer, postoje slučajevi da se čvorovi u radio-mlazevima poklapaju sa pojačanjem površinskog sjaja oblasti uskih linija, što ukazuje na to da barem lokalno udarni talasi mogu izazvati emisiju linija.

Fotojonizaciona teorija može se testirati poređenjem broja fotona emitovanih od strane centralnog izvora i ukupnog broja rekombinacija u jonizovanom gasu. Broj jonizujućih fotona mora odgovarati broju rekombinacija, koje su naravno direktno povezane sa ukupnim brojem  $H\beta$  fotona emitovanih u gasu. Između luminoznosti u  $H\beta$  liniji,  $L_{H\beta}$  i luminoznosti kontinuuma po jediničnom intervalu

talasnih dužina,  $L_\lambda$  važi sledeća veza (Osterbrock 1989):

$$L_{H\beta} = L_\lambda(\lambda 4861)W_0(H\beta) = L_\lambda(\lambda 4861)\frac{d\nu}{d\lambda}W_0(H\beta),$$

gde je  $W_0(H\beta)$  ekvivalentna širina  $H\beta$  linije. Ako uzmemo da se kontinualno zračenje može opisati pomoću stepenog zakona

$$L_\nu \sim \nu^{-n}$$

i da je luminoznost u  $H\beta$  liniji data izrazom (Osterbrock 1989)

$$L_{H\beta} = h\nu_{H\beta} \frac{\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)}{\alpha_B(H^0, T)} \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu$$

ova relacija postaje

$$W_0 = \frac{\lambda_{H\beta}}{n} \frac{\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)}{\alpha_B(H^0, T)} \left(\frac{\nu_0}{\nu_{H\beta}}\right)^{-n} = \frac{568}{n} (5.33)^{-n}$$

gde su numeričke vrednosti date u Å i izračunate za temperaturu  $T = 10^4$  K, iako odnos rekombinacionih koeficijenata ( $\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)/\alpha_B(H^0, T)^9$ ) praktično ne zavisi od temperature (Osterbrock 1989). Mereći ekvivalentnu širinu,  $W_0$ ,  $H\beta$  linije i pomoću ove relacije, moguće je izračunati stepen  $n$ , kojim se opisuje kontinualno zračenje centralnog izvora i videti kako se slaže sa posmatranim spektrom.

Fotojonizacija zagreva sredinu jonizujući atome fotonima veće energije od jonizacionog praga. Oslobođeni elektroni odnose energetska razliku fotona i relevantnog jonizacionog potencijala, koju brzo izgube preko Kulonove interakcije sa ostalim elektronima. Postoje i drugi procesi zagrevanja sredine, mada su oni manje važni u oblastima emisije linija. U slučaju da je gas visoko jonizovan, Komptonovo rasejanje nije zanemarljivo u odnosu na fotojonizaciju. Na drugoj strani spektra, slobodno-slobodna apsorpcija obezbeđuje značajnu količinu energije. A kada je temperatura dovoljno niska i značajan deo gasa je jonizovan, moguće je da se stvori dovoljno negativnih jona vodonika  $H^-$  koji će obezbediti značajnu neprozračnost u crvenoj i infracrvenoj oblasti spektra.

Stvaranje linija zavisi od gustine (ili pritiska) gasa koji emituje linije, stanja jonizacije, temperature, raspodele naseljenosti određenih atomskih nivoa, intenziteta pozadinskih fotona i mogućnosti da stvoreni fotoni uspeju da pobegnu. Da bi se predvideo ukupni linijski spektar, svaki od ovih parametara mora biti određen. U većini slučajeva koristi se jednačina toplotne ravnoteže, dok je za kaskadnu rekombinaciju neophodna i jednačina jonizacione ravnoteže. Isto tako, pretpostavlja se da su procesi vremenski nepromenljivi, iako to nije svaki put odgovarajuća pretpostavka.

---

<sup>9</sup> $\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}$  je efektivni rekombinacioni koeficijent  $H\beta$  linije, dok je  $\alpha_B$  ukupan rekombinacioni koeficijent neutralnog vodonika, u koji nisu uračunati procesi rekombinacije na osnovni nivo.

Jednačina jonizacione ravnoteže se za pojedine elemente svodi na jednačinu ravnoteže naelektrisanja:

$$n_e = \sum_{Z,j} (j-1)n_{Z,j},$$

gde je  $n_e$  elektronska koncentracija, a  $n_{Z,j}$  koncentracija  $j$ -tog jonizacionog stanja hemijskog elementa sa atomskim brojem  $Z$ . Rezultat ove jednačine zavisi od atomskih parametara i račun se dosta komplikuje čim atom ili jon imaju više elektrona. Isto tako, atomski podaci se razlikuju i pitanje je koji su najpouzdaniji. Stvar se olakšava korišćenjem Milne-ove relacije, koja kaže da u stanju termodinamičke ravnoteže, svi procesi i njima inverzni procesi moraju biti ujednačeni. Tako se efikasni presek za radijativnu rekombinaciju može izvesti iz efikasnog preseka za fotojonizaciju. U praksi se za efikasni presek  $\alpha_{rec,Z,j}$  procesa radijativne rekombinacije jona hemijskog elementa sa atomskim brojem  $Z$ , iz  $j+1$  u  $j$  stanje jonizacije, koristi sledeći izraz:

$$\alpha_{rec,Z,j} \simeq 2 \times 10^{-13} (Z-j+1)^2 T_4^{-1/2} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}.$$

Temperatura sredine  $T_4$  je u jedinicama od  $10^4$  K. Od nje zavisi brzina zahvaćenog elektrona.

Parametar kojim se obično određuju osobine fotojonizovanog gasa je jonizacioni parametar  $U$  (ranije obeležavan sa  $\Gamma$ ). Postoji više definicija ovog parametra, one su konceptualno iste, ali svaka definicija ima svoje tehničke prednosti i mane. Za procenu jonizacione ravnoteže najkorisniji je sledeći oblik jonizacionog parametra

$$U = \int \frac{J_\nu d\nu}{ch\nu n_H}.$$

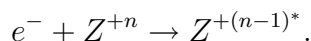
Ovde je  $J_\nu$  srednji intenzitet zračenja (u jedinicama energije po jedinci površine, vremena, prostornog ugla i u jediničnom frekventnom intervalu),  $n_H$  je koncentracija vodonika,  $c$  je brzina svetlosti,  $h$  je Plankova konstanta, a integral je po svim jonizacionim potencijalima vodonika (Krolik 1999). Ovako formulisan predstavlja odnos koncentracije jonizujućih fotona i jonizovanog vodonika. S obzirom da brzina fotojonizacije zavisi od broja fotona, a ne od njihove energije, ovaj oblik je vrlo zgodan jer predstavlja integral po celom opsegu jonizacija. Drugi zgodan način definisanja parametra jonizacije je

$$\Xi \equiv \frac{J_{\text{jon}}}{2.3n_H k_B T c},$$

gde je  $J_{\text{jon}}$  srednji intenzitet zračenja na talasnoj dužini jonizacije vodonika,  $T$  je temperatura sistema, a  $k_B$  Bolcmanova konstanta. Ovaj oblik daje odnos pritisaka jonizujućeg zračenja i gasa.

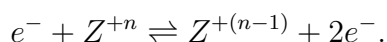
Najdominantniji proces emisije fotona iz fotojonizovanih atoma je radijativna rekombinacija, budući da je to inverzan proces fotojonizacije. Postoji par sličnih procesa koji mogu biti relevantni za formiranje linija u aktivnim galaktičkim jezgrima. To su sledeći procesi (Krolik 1999):

- Dielektrična rekombinacija: za razliku od radijativne rekombinacije, ovde se ne emituje nijedan među-foton, tako da je početna energija rekombinacionog atoma veća od njegovog jonizacionog potencijala:



Ovde je  $Z^{+n}$  n-puta jonizovan element sa atomskim brojem  $Z$ , a  $Z^{+(n-1)*}$  je (n-1) puta jonizovan element u ekscitovanom stanju. Energija ekscitacije je raspoređena na dva elektrona, tako da oba mogu biti u vezanom stanju. Kasnije, ovi elektroni se deekscituju posebnim radijativnim rekombinacijama.

- Rekombinacija pomoću tri tela: to je inverzan proces sudarne jonizacije pomoću elektrona iz n-puta u (n-1) puta jonizovan element  $Z$ :



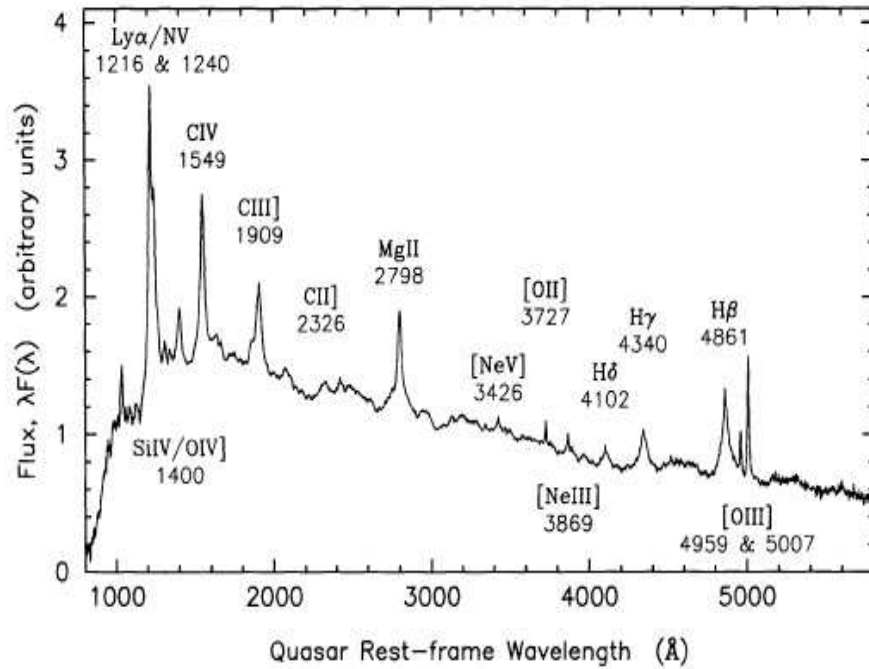
Ovaj proces je bitan samo u slučaju velikih gustina, jer zahteva tri tela (dva elektrona i jedan jon), ali se dešava u emisionim oblastima AGJ.

- Izmena naelektrisanja: ovaj proces je vrlo efikasan u slučaju kada su u sistemu bliske energije stanja  $Z^{+j}, Y^{+l}$  i  $Z^{+j\pm 1}, Y^{+l\pm 1}$ . Efikasan presek može biti poprilično veliki ukoliko je rezonanca skoro postignuta, a posebno u slučaju kada je  $j = 1$  i  $l = 0$  (ili obrnuto), postiže se polarizacija koja dodatno uvećava efikasan presek. Kako su energije skoro iste, ove reakcije mogu ići u oba smera i na niskim temperaturama, i vrlo brzo se postiže ravnoteža.

### 3.4 Širokolinijska emisiona oblast

Širokolinijska oblast (BLR) je oblast jonizovanog gasa, koja se nalazi u blizini crne rupe ( $< 1$  pc) i čije dimenzije su u opsegu od nekoliko svetlosnih dana do nekoliko svetlosnih nedelja. Gustine gasa u ovoj oblasti su velike (elektronska koncentracija  $n_e \sim 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ), čestice gasa imaju različite stepene jonizacije i kreću su velikim brzinama, i po nekoliko hiljada km/s.

Osnovna karakteristika ove oblasti je da se tu formiraju široke emisione linije (slika 10), čija je FWHM u opsegu od par hiljada km/s do 10 000 km/s. Linije su proširene doplerovskim širenjem usled kretanja gasa u gravitacionom polju. Kako su brzine reda 10% brzine svetlosti, rastojanje od crne rupe može biti i 100  $R_g$  ( $v \propto r^{-1/2}$ ). Temperature gasa su reda nekoliko  $10^4 - 10^5$  K što se da zaključiti



Slika 10: Kombinovan spektar kvazara u vidljivom i UV opsegu talasnih dužina. (Francis et al. 1991)

na osnovu sličnih relativnih inteziteta linija kao i kod HII regiona i planetarnih maglina.<sup>10</sup>

Dve činjenice ukazuju na to da su koncentracije unutar BLR  $n_e > 10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Prva je odsustvo [OIII] $\lambda$ 4363 u širokolinijskoj oblasti. Kako je kritična gustina za sudarnu deekscitaciju nivoa  $^1S_0$  kod  $O^{++}$  približna  $10^8 \text{ cm}^{-3}$ , dobijamo donju granicu gustine unutar BLR. Druga činjenica je prisustvo široke CIII] $\lambda$ 1909 linije. Kritična gustina za sudarnu deekscitaciju nivoa  $^3P_1$  kod  $C^{++}$  iznosi  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , tako da te gustine mogu biti i preko  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ . Široke linije su prilično glatke, što ukazuje na to da su formirane od strane velikog broja malih oblaka (dimenzija  $R \sim R_\odot$  i koncentracije  $n_e > 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ) ili nastaju u jednoj koherentnoj strukturi. Poređenje fluksa kontinuuma i BLR fluksa pokazuje da je svega 10 % kontinualnog zračenja apsorbovano od strane BLR oblaka. Takođe, deo centralne oblasti aktivne galaksije koji zauzima BLR je jako mali, par milionitih delova veličine celokupne centralne oblasti. Masa BLR, neophodna da se proizvede posmatrana luminoznost, je reda nekoliko solarnih masa. Čak i u slučaju najsjajnijih AGJ, masa BLR je zanemarljiva u odnosu na masu centralnog izvora, jer je manja od  $10 M_\odot$ .

<sup>10</sup>Zbog velike elektronske koncentracije kod BLR nije moguće primeniti prostu dijagnostiku temperature i gustine, merenjem odnosa zabranjenih linija, kao kod HII regiona i planetarnih maglina.

Široke emisione linije su često pomerene ka plavom delu spektra, a naročito visoko-jonizovane linije, i to je vrlo značajan kriterijum za izbor teorijskog modela (pomeraj ka plavom odmah navodi na ideju da je prisutno izbacivanje materije ka posmatraču). Profili širokih emisionih linija se dosta razlikuje i među linijama i među objektima. Često je prisutna asimetrija profila, s tim da su podjednako zastupljene asimetrija ka plavom i ka crvenom delu spektra. Naročito su interesantna proučavanja krila emisionih linija, jer zbog svoje naglašenosti, širine, asimetrije ili kockastog izgleda ukazuju na to da potiču iz oblasti različitih karakteristika nego oblast gde se formiraju jezgra linija.

Evidentno je da je širokolinijska oblast kompleksna i da se sastoji od više slojeva, koji se nalaze na različitom rastojanju od centralnog izvora kontinuuma i vrlo verovatno imaju različite geometrije, kinematiku i termodinamičke parametre (Sulentic et al. 2000, Wandel et al. 1999, Krolik 1999). Kao posledica toga, te BLR podoblasti emituju emisione linije različitih karakteristika, odnosno primetno različitih širina. Analizirajući široke emisione linije i razlažući ih na komponente, moguće je proučavati pojedinačne podoblasti širokolinijskog regiona.

Širokolinijska oblast je jedini deo AGJ gde se mogu precizno odrediti doplerovska kretanja gasa. Ako se pretpostavi da je materija koja emituje linije gravitaciono vezana i da usled toga ima brzine bliske keplerovskim, moguće je odrediti masu u centru AGJ. Iako je pretpostavka keplerovskog kretanja neophodna za procenu mase u centru na osnovu posmatranih osobina BLR, ovakva procena može dati približno dobre rezultate i za druge modele u kojima gas nije gravitaciono vezan, gde su brzine gasa izazvane zvezdanim vetrom ili pritiskom zračenja. U tom slučaju emisivnost mlaza gasa opada brzo od centra AGJ, pa se i najveći deo emisije dešava blizu samog početka mlaza, gde su brzine velike i bliske brzinama potrebnim da se pobegne iz crne rupe, a te brzine su reda veličine keplerovskih (Murray & Chiang 1998). Najveći izazov u određivanju mase iz emisionih linija, dimenzija širokolinijske oblasti i pravilno povezivanje profila linije sa brzinama emisionog gasa.

Pouzdan metod određivanja dimenzija širokolinijske oblasti je reverberaciono mapiranje (Blandford & McKee 1982, Netzer & Peterson 1997). Metod reverberacije<sup>11</sup> koristi kašnjenje promene intenziteta emisionih linija, kao posledicu promene kontinualnog zračenja, da bi se odredile dimenzije i kinematika emisione oblasti. Kašnjenje nastaje jer je fotonu potrebno određeno vreme da bi prešao put od izvora kontinuuma do gasa koji emituje linije. Ovaj metod je moguće primeniti na ograničen broj aktivnih galaktičkih jezgara, jer zahteva promenljive izvore i set spektara dobro pokriven u jednom vremenskom periodu (od nekoliko meseci pa do nekoliko godina). Takve podatke je teško obezbediti i postoje za svega četrdesetak galaksija, i to uglavnom Sejfertovih galaksija prosečne luminoznosti.

Alternativni metod određivanja virijalne mase zasniva se na određivanju ras-

---

<sup>11</sup>Reč reverberacija dolazi od engleske reči *reverberation*, što znači odjek, eho, odražavanje.

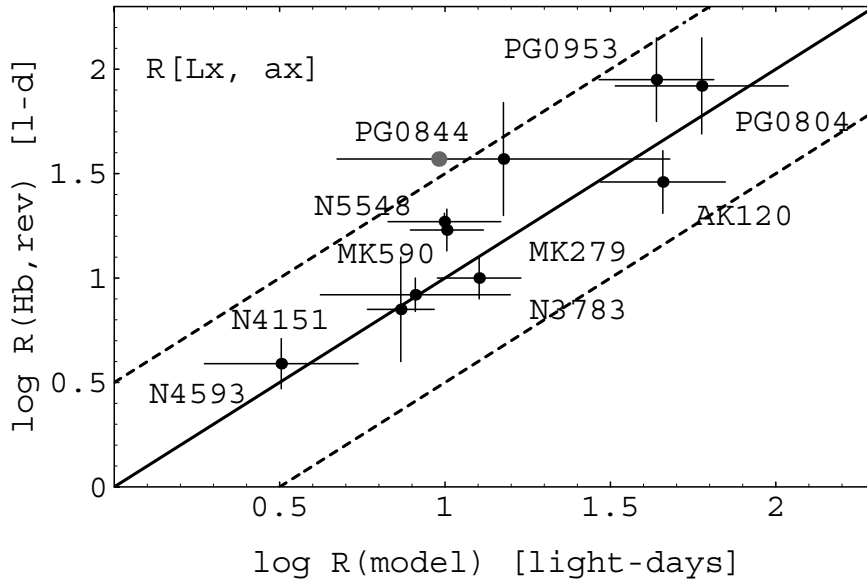
tojanja BLR od centralne mase, koristeći fotojonizacionu teoriju (Netzer 1990) i širine emisionih linija kao indikatore brzina gasa. Ovaj metod samo pretpostavlja da je gas gravitaciono vezan, ali ne zavisi od izbora geometrije širokolinijske oblasti, tako da se može primeniti i na model diska i na model oblaka (Rokaki et al. 1992). Odnos linija se koristi za određivanje uslova u jonizovanom gasu koji emituje linije, posebno za gustinu i jonizacioni parametar  $U$  (broj jonizujućih fotona po elektronu)

$$U = \frac{Q}{4\pi r^2 n_e c} = \frac{L_{\text{ion}}}{4\pi r^2 \bar{E} n_e c},$$

gde je

$$Q = \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{L_{\nu}}{h\nu} d\nu$$

broj jonizujućih fotona,  $L_{\text{ion}}$  je jonizujuća luminoznost,  $\bar{E} = L_{\text{ion}}/Q$  je srednja energija jonizujućeg fotona,  $r$  je radijus, a  $n_e$  elektronska koncentracija. Ako se proceni luminoznost jonizujućeg spektra, iz gornje jednačine se može naći rastojanje jonizovanog gasa od izvora kontinuuma. Wandel (Wandel 1997) je pokazao da se dimenzije BLR oblasti određene iz osnovnog fotojonizacionog modela vrlo dobro slažu sa reverberacionim dimenzijama.



Slika 11: Reverberacione dimenzije BLR u odnosu na dimenzije određene standardnim fotojonizacionim modelom (Wandel 1997).

Ova istraživanja pokazuju da se dimenzije širokolinijske oblasti menjaju skoro kao koren luminoznosti, što se slaže sa predviđanjima osnovnog fotojonizacionog modela, ako se pretpostavi da kod različitih AGJ BLR imaju slične vrednosti



za jonizacioni parametar i gustinu (Kaspi et al. 2000). Fotojonizacioni metod određivanja dimenzija BLR je indirektan, za razliku od reverberacionog metoda, i sadrži mnoge pretpostavke (npr. emisija u linijama sigurno dolazi iz gasa čija se gustina i jonizacioni parametar menjaju, pa model koji pretpostavlja da se BLR sastoji iz samo jedne oblasti pojednostavljuje stvarnu situaciju). Zbog toga prost fotojonizacioni metod daje nesigurne rezultate za parametre širokolinijske oblasti. Ali, pošto se taj metod može koristiti kod velikog broja AGJ (čak i kada imamo spektroskopska posmatranja slabe rezolucije ili samo jedno posmatranje) potrebno ga je kalibrisati pomoću metoda reverberacije. Tako je moguće precizno odrediti dimenzije BLR i virijalnu masu velikog broja aktivnih galaksija znajući širinu  $H\beta$  linije (Wandel et al. 1999, Peterson et al. 2004).

Za procenu mase pomoću osnovnog fotojonizacionog modela širokolinijska oblast se modelira pomoću jednog tankog sloja u obliku ljuske, za koju se pretpostavlja da je srednja vrednost proizvoda  $Un_e$  ista za sve objekte. Pomoću definicije za jonizacioni parametar i pretpostavke virijalne disperzije brzina, dobija se najjednostavniji izraz za fotojonizacionu procenu virijalne mase:

$$M_{\text{ph}} \approx \frac{R_{\text{ph}} v^2}{G} = K \left( \frac{L_{\text{ion}}}{U n_e \bar{E}} \right)^{1/2} (v_{\text{FWHM}})^2,$$

gde je  $K = f_k G^{-1} (4\pi c)^{-1/2}$  a  $f_k$  je faktor koji predstavlja odnos efektivne disperzije brzina i projektovane radijalne brzine, koja se izvodi iz Doplerovog širenja emisionih linija. Rastojanje  $R_{\text{ph}}$  se određuje iz definicije jonizacionog parametra. Ako se disperzija brzina poveže sa FWHM dobija se da je  $\langle v^2 \rangle = \frac{3}{4} v_{\text{FWHM}}^2$ , pa je  $f_k = \frac{3}{4}$  (Netzer 1990). Što se tiče jonizacione luminoznosti, tačnu vrednost te veličine je dosta teško proceniti. Pretpostavka koja se često koristi je da je ona proporcionalana vidljivoj luminoznosti, a faktor proporcionalnosti se određuje kalibracijom pomoću metoda reverberacije. Detaljnije procene jonizacione luminoznosti mogu se odrediti korišćenjem vrednosti dobijenih iz bliske UV i X-oblasti, mada i te metode imaju određene nedostatke (npr. nisu izmerene za mnoga AGJ). Znači, ako izrazimo jonizacionu luminoznost preko izmerene luminoznosti  $L$  dobijamo da je rastojanje  $R_{\text{ph}}$  dato sledećim izrazom

$$R_{\text{ph}} \approx 13 \left( \frac{f_L L_{44}}{U n_e \bar{E}_1} \right)^{1/2} \text{ svetlosnih dana},$$

gde su  $L_{44} = L/10^{44} \text{ergs}^{-1}$ ,  $f_L = L_{\text{ion}}/L$ , a  $\bar{E}_1$  je energija u Ridbergovim energetskim jedinicama. Dalje dobijamo da je virijalna masa data izrazom

$$M_{\text{ph}} \approx (2.8 \times 10^6 M_{\odot}) f \left( \frac{L_{44}}{U n_e} \right)^{1/2} v_3^2,$$

gde je  $f = f_k f_L^{1/2} \bar{E}_1^{-1/2}$  i  $v_3 = v_{\text{FWHM}}/10^3 \text{ km s}^{-1}$ . Upoređujući dimenzije BLR dobijene iz fotojonizacionog i metoda reverberacije može se odrediti faktor proporcionalnosti jonizacione luminoznosti  $f_L$  i tako kalibrisati ovaj metod određivanja virijalne mase i dimenzija širokolinijske oblasti aktivnih galaktičkih jezgara.

Reverberacioni metod određivanja dimenzija BLR i virijalne mase zasniva se na posmatranju kašnjenja promene intenziteta emisionih linija, nakon promene kontinualnog zračenja, zbog toga što je zračenju potrebno neko vreme da pređe put od izvora kontinuuma do gasa gde nastaju emisione linije. Masa u centru AGJ određuje se tako što se pretpostavi da su oblaci unutar BLR oblasti gravitaciono vezani, pa važi sledeća relacija

$$M \approx G^{-1}v^2r ,$$

gde je  $r$  radijus koji se određuje iz kašnjenja signala, a  $v$  brzina koja se procenjuje iz širine na polovini intenziteta (FWHM) emisione linije (Gaskell 1988, Wandel et al. 1999). Za precizno određivanje vremena kašnjenja signala  $\tau$  koristi se usrednjen spektar nekog objekta, definisan kao

$$\bar{F}(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i(\lambda) ,$$

kao i spektar ostatka, tzv. RMS spektar (*Root-Mean-Square Spectrum*), koji je definisan kao

$$\sigma(\lambda) = \left[ (N - 1)^{-1} \sum_{i=1}^N [F_i(\lambda) - \bar{F}(\lambda)]^2 \right]^{1/2} ,$$

gde je  $F_i(\lambda)$  i-ti spektar nekog seta od  $N$  podataka. RMS spektar je vrlo zgodan zato što prikazuje varijacije oko srednjeg spektra, i automatski odstranjuje konstantne karakteristike spektra, kao što su uske emisione linije ili Galaktička apsorpcija. U stvari, najveća prednost RMS spektra je što prikazuje delove emisione linije koji se zapravo menjaju.

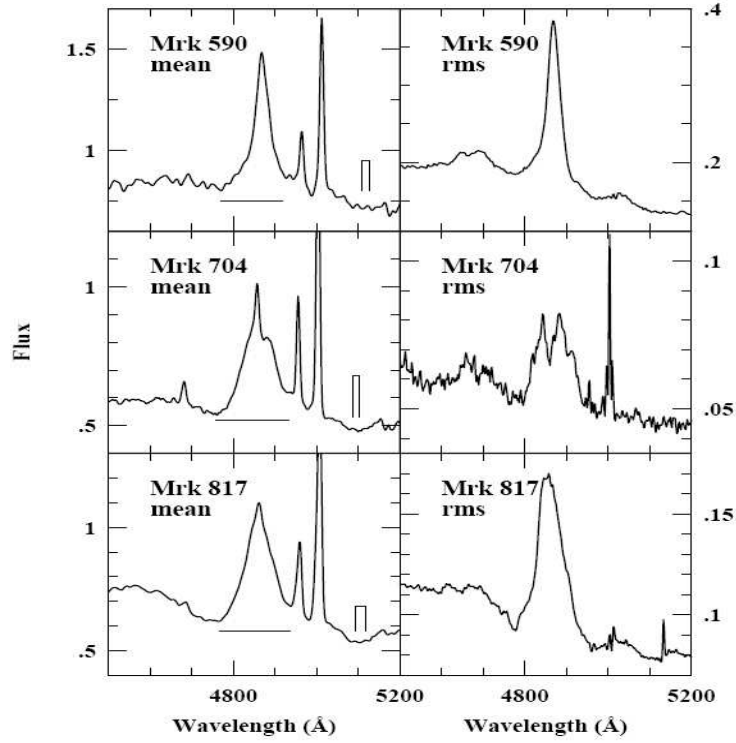
RMS profil emisione linije  $H\beta$  daje disperziju brzine u promenljivom delu gasa, koja se koristi za određivanje BLR dimenzija, odnosno procenu virijalne mase

$$M_{\text{rev}} \approx (1.45 \times 10^5 M_{\odot}) \left( \frac{c\tau}{\text{sv. dan}} \right) v_{\text{rms},3}^2 .$$

Ovde je  $v_{\text{rms},3} = v_{\text{FWHM}}(\text{rms})/10^3 \text{ km s}^{-1}$ ,  $\tau$  je vremensko kašnjenje, tako da je  $R_{\text{BLR}} \sim c\tau$ .

Određujući virijalne mase pomoću metoda reverberacije i upoređujući ih sa masama dobijenih pomoću fotojonizacionog metoda, mogu se odrediti faktori proporcionalnosti  $f_L$ , odnosno  $f$  i tako kalibrisati fotojonizacioni metod kao mnogo primenjiviji za određivanje virijalne mase u centru AGJ. Za očekivati je da se dobije da postoji jaka korelacija između tih masa i da je faktor  $f$  blizak jedinici, odnosno da postoji linearna veza  $M_{\text{rev}} \propto M_{\text{ph}}$ .

Reverberacioni metod je primenjen na četrdesetak aktivnih galaksija koje je bilo moguće posmatrati duži vremenski period (Kaspi et al. 2000, Peterson et al. 2004). Rezultati pokazuju da su dimenzije širokolinijske oblasti u intervalu  $(1 - 387)$  svetlosnih dana, a da su mase crne rupe u opsegu  $(0.13 - 55) 10^7 \times M_{\odot}$ .



Slika 12: Usrednjeni (leva kolona) i "RMS" (desna kolona) spektar aktivnih galaksija Mrk 590, Mrk 704 i Mrk 817 u okolini  $H\beta$   $\lambda 4861$  linije (Peterson et al. 1998).

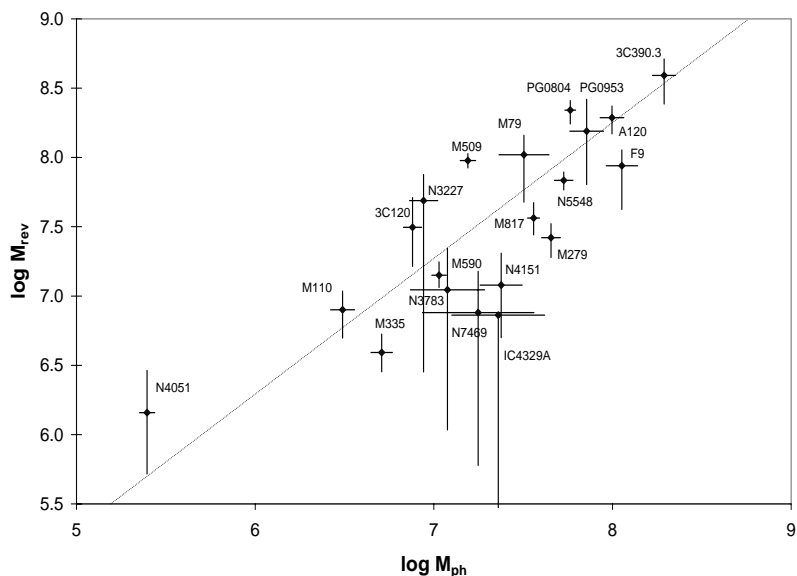
Korisno je pomoću ovih razmatranja izraziti radijus širokolinijske oblasti  $R_{\text{BLR}}$  preko luminoznosti AGJ. Već je pomenuto u tekstu da su predviđanja osnovnog fotojonizacionog modela (uz pretpostavke da različite AGJ imaju slične vrednosti za jonizacioni parametar i gustinu unutar BLR) da se dimenzije širokolinijske oblasti menjaju skoro kao koren luminoznosti. Međutim, ovaj rezultat je teorijski dobijen korišćenjem pomenutih pretpostavki, pa se eksperimentalno dobija sledeća veza između radijusa BLR i luminoznosti (Kaspi et al. 2000):

$$R_{\text{BLR}} = (32.9^{+2.0}_{-1.9}) \left( \frac{\lambda L_{\nu}(5100\text{\AA})}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{0.700 \pm 0.033} \text{ svetlosnih dana} .$$

Druga veza koja sledi iz ovih razmatranja je relacija masa-sjaj u obliku:

$$M \propto L^{0.5 \pm 0.1} .$$

Ovo je vrednost koju su dobili Kaspi i saradnici (Kaspi et al. 2000), dok se kod nekih autora javljaju i druge vrednosti eksponenta u ovom izrazu:  $0.91 \pm 0.25$  (Koratkar & Gaskell 1991) i  $0.77 \pm 0.07$  (Wandel et al. 1999). Relacija masa-sjaj može se prikazati preko Eddingtonove luminoznosti. Ako se bolometrijska



Slika 13: Virijalna masa dobijena iz reverberacionih razmatranja u odnosu na virijalnu masu određenu fotojonizacionim metodom. Tačkasta linija predstavlja najbolji linearan fit  $M_{\text{rev}} \propto M_{\text{ph}}$  (Wandel et al. 1999).

luminoznost grubo proceni kao  $L_{\text{bol}} \approx 9\lambda L_{\nu}(5100 \text{ \AA})$ , dobije se da je Eddingtonov odnos

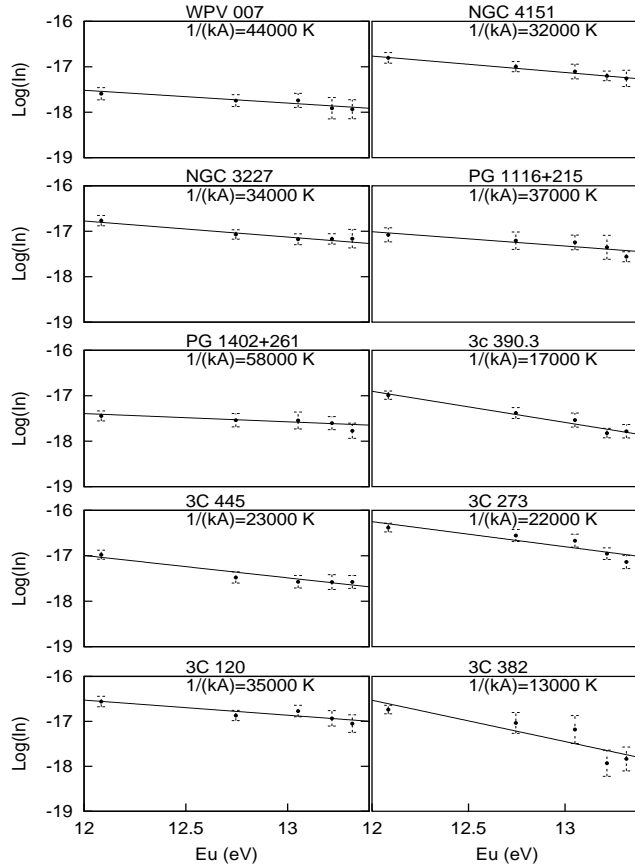
$$\frac{L_{\text{bol}}}{L_{\text{Edd}}} \approx 0.13 \left( \frac{\lambda L_{\nu}(5100 \text{ \AA})}{10^{44} \text{ erg s}^{-1}} \right)^{0.5}.$$

Ovaj izraz ukazuje na to da se Eddingtonov odnos povećava sa porosatom luminoznosti. Ovo je vrlo zanimljiv rezultat, jer ukazuje na to da se brzina akrecije mase u crnu rupu povećava sa povećanjem sjaja mnogo brže nego centralna masa, što znači da su karakteristike diska dosta različite kod izvora sa malom i velikom luminoznošću i ukazuje na činjenicu da se energija AGJ proizvodi u akreciji, tj. prilikom pada materije u crnu rupu.

Ove relacije su bitne jer se dalje mogu koristiti u proceni radijusa, odnosno mase crne rupe za ostala aktivna galaktička jezgra, za koja nije moguće obezbediti dovoljan broj posmatranja za primenu metoda reverberacije, već je jedino određena luminoznost datog objekta.

Jedan mogući metod određivanja fizičkih procesa i parametara gasa unutar BLR je Boltzmanov plot (*Boltzmann plot*) primenjen na Balmerove linije (Popović 2003). Značajni atomski procesi koji se odvijaju u BLR su fotojonizacija, rekombinacija i sudarna ekscitacija, koja je posebno značajna u slučaju velikih gustina. Ovi procesi, kao i procesi prenosa zračenja treba da se uzmu u obzir pri tumačenju odnosa linija vodonika. Za plazmu unutar BLR ne važi lokalna termodinamička ravnoteža (LTE - *Local Thermodynamical Equilibrium*). Ipak moguće je da po-

stoji delimična lokalna termodinamička ravnoteža (PLTE - *Partial Local Thermodynamical Equilibrium*) u smislu da je naseljenost visoko-ekscitovanih energetskih stanja ( $n \geq 3$ ) povezana sa naseljenošću sledećeg osnovnog nivoa jona Saha-Bolcmanovom relacijom ili ukupnom naseljenošću svih podnivoa osnovnog stanja, odnosno temperatura ekscitacije može biti zamenjena elektronskom temperaturom.



Slika 14: Bolcmanov plot za Balmerove linije. Na vrhu svakog grafika date su odgovarajuće temperature, odnosno  $1/(kA)$  (Popović 2003).

Ako pretpostavimo da se radi o optički retkoj plazmi, debljine  $l$ , ukupni intenzitet emisione linije je dat izrazom

$$I_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \int_0^l N_u dx \approx \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} l \frac{N_0}{U(T)} \exp(-E_u/kT_e),$$

gde je  $\lambda$  talasna dužina prelaza,  $g_u$  je statistička težina gornjeg nivoa,  $A_{ul}$  je verovatnoća prelaza,  $U(T)$  je particiona funkcija,  $N_0$  je ukupna koncentracija emitera,  $E_u$  je energija gornjeg nivoa,  $T_e$  je elektronska temperatura. Ako je plazma u PLTE, naseljenost nivoa je određena Bolcmanovom raspodelom, odnosno

temperaturom ekscitacije  $T_e$ . Ovu temperaturu moguće je odrediti Bolcmanovim plotom ako se uzmu prelazi iz iste spektralne serije pomoću relacije (Popović 2003)

$$\log(I_n) = \log \frac{I_{ul} \times \lambda}{g_u A_{ul}} = B - AE_u,$$

gde je  $I_{ul}$  relativni intenzitet prelaza sa gornjeg na donji nivo ( $u \rightarrow l$ ) a  $B$  i  $A$  su konstante, od kojih se  $A$  odnosi na temperaturu, pa se i naziva temperaturski parametar.

Ukoliko se  $\log(I_n)$  može aproksimirati opadajućom linearnom funkcijom od  $E_u$ , onda to ukazuje da unutar BLR bar donekle postoji PLTE, i da je, ukoliko je prisutna PLTE, naseljenost koja zadovoljava Bolcmanovu raspodelu jednodnačno određena temperaturom ekscitacije. Tada možemo proceniti elektronsku temperaturu iz poslednje jednačine  $T_e = 1/(kA)$ , gde je  $k$  Bolcmanova konstanta. Takođe, ukoliko postoji PLTE, na osnovu elektronske temperature može se proceniti i elektronska gustina u BLR. U slučaju optički retke plazme minimalna elektronska koncentracija se može proceniti iz formule (Griem 1997)

$$N_e \sim 7 \times 10^{18} z^6 n_c^{-17/2} (kT_e/E_H)^{1/2} \text{ cm}^{-3}$$

gde je  $z$  naelektrisanje koje vidi optički elektron ( $z = 1$  za neutralne emitere),  $n_c$  je glavni kvantni broj gornjeg nivoa (u slučaju  $H\alpha$  linije  $n_c = 3$ ) a  $E_H$  je jonizaciona energija vodonika. Međutim, verovatnije je da je plazma u BLR optički gusta, pa je elektronska gustina manja za faktor  $N_{\text{esc}}$ , koji označava srednji broj rasejanja fotona pre nego što foton napusti datu sredinu i taj broj zavisi od optičke dubine (za  $H\alpha$  liniju optička dubina varira u opsegu  $\tau(H\alpha) \sim 64 - 4.5 \times 10^4$  u zavisnosti od stepena jonizacije). Ako se pretpostavi da je  $N_{\text{esc}}$  približno isto za sve linije Balmerove serije onda je kritična vrednost elektronske gustine  $N'_e = N_e/N_{\text{esc}}$  (Osterbrock 1989).

U slučaju da je konstanta  $A$  mnogo mala ( $A < 0.2$ ), onda se elektronska temperatura ne može odrediti pomoću Bolcmanovog plot, iako je plazma možda u PLTE. U tom slučaju, Bolcmanov plot se koristi kao indikator postojanja PLTE ili B-tipa rekombinacije<sup>12</sup> u BLR (linearno opadanje  $\log(I_n)$  sa porastom  $E_u$  se pojavljuje i u slučaju B-tipa rekombinacije Balmerovih linija (Osterbrock 1989)). Pre određivanja odnosa fluksa Balmerovih linija treba od profila širokih linija oduzeti satelitske i uske linije. Takodje, treba uzeti u obzir i uticaj Galaktičkog i sopstvenog pocrvenjenja, jer ukoliko je taj uticaj veliki, dobijene elektronske temperature su znatno manje od stvarne vrednosti.

Kinematika i geometrija širokolinijskog regiona još uvek nije do kraja definisana. Osnovna prepreka u proučavanju te oblasti je da su i kod najbližih AGJ ugaone dimenzije oblasti oko jezgra reda  $10^{-6}$  lučnih sekundi. Prema tome,

---

<sup>12</sup>B-tip rekombinacije se sreće u plazmama velike optičke gustine i pretpostavlja da emitovani foton biva apsorbovan i reemitovan više puta pre nego što napusti datu sredinu.

spektroskopija je najdirektniji metod proučavanja geometrije BLR. Na osnovu proučavanja profila emisionih linija iz ove oblasti moguće je izvesti nekoliko osnovnih činjenica o prirodi BLR unutar aktivnih galaktičkih jezgara:

1. *Postoji jak dokaz o prisustvu diskolike komponente barem u nekim AGJ.* Naime, postoji relativno mali skup AGJ, čiji spektar poseduje Balmerove linije sa dva pika, svega oko 4% na rastojanju  $z < 0.33$  (Eracleous et al. 2004). Takve linije se najčešće povezuju sa rotirajućim keplerovskim diskom.
2. *Postoji jak dokaz o izbacivanju gasa kod mnogih AGJ.* Neke emisione linije su snažno asimetrične ka plavom delu spektra, ukazujući na to da je uglavnom posmatrano izbacivanje materije u nama bližoj oblasti AGJ. Apsorpcija blago pomenena ka plavom u odnosu na kosmološki crveni pomak galaksije je vrlo česta kod aktivnih galaktičkih jezgara. Postoje mnogi dokazi da ova apsorpcija, uglavnom detektovana u UV i X-području, nastaje na sličnim rastojanjima kao i široke emisione linije.
3. *Postoji jak dokaz da je gravitaciono ubrzavanje od strane centralnog izvora izuzetno značajno.* Dimenzije oblasti koja emituje linije mogu biti određene metodom reverberacionog mapiranja. Izračunate dimenzije su različite za svaku emisionu liniju. Visoko jonizovane linije javljaju se bliže centralnom izvoru nego linije koje karakterišu slabo jonizovan gas, dakle postoji jonizaciona stratifikacija unutar BLR. Osim toga, visoko jonizovane linije su šire i relacija između dimenzija i disperzije brzina emisionih oblasti stvarno liči na relaciju dobijenu iz teoreme virijala  $r \propto \Delta V^{-2}$ .

Razumevanje strukture BLR je neophodno za razumevanje celog fenomena aktivnih galaksija. Najpre, da bi se što tačnije odredila masa supermasivne crne rupe, ali i da bi se razumelo kako funkcionišu procesi akrecije i izbacivanja materije u aktivnim galaktičkim jezgrima.

Do sada je predloženo nekoliko dinamičkih modela, koji se zasnivaju na određenom vidu kretanja emitujućeg gasa (radijalno izbacivanje gasa, rotacija, itd.). Uglavnom svi modeli dobro opisuju emisione profile nekih određenih objekata ili linija, ali do sada ne postoji neki zadovoljavajući opšti model. Pomenimo ovde nekoliko modela širokolinijske oblasti koji su u optičaju:

1. *Dvojna crna rupa.* Pretpostavka ovog modela je da u centru AGJ postoje dve crne rupe, a samim tim da postoje i dve širokolinijske oblasti, sa različitim karakteristikama, određenim osobinama crnih rupa. Ovaj model objašnjava prisustvo dva pika u nekim linijama kao i prisustvo dve različite komponente u krilima pojedinih linija (Gaskell 1988, 1996). Nedostatak ovog modela je što u jednom takvom sistemu teško mogu opstati stabilne širokolinijske oblasti.

2. *Oblaci gasa.* Stratifikacija BLR objašnjava se postojanjem velikog broja oblaka sa različitim osobinama, sferno-simetrično raspoređenih oko crne rupe. Asimetrija linija se objašnjava pokretljivošću oblaka i rasejavanjem zračenja na njima. Veliki nedostatak ovog modela je to što je, da bi se postigao glatak profil linije, neophodno postojanje ekstremno velikog broja oblaka ( $10^7$ - $10^8$ ), kao i činjenica da su oblaci termodinamički nestabilni ako se nalaze u ravnoteži zračenja sa sredinom koja ih okružuje (Baldwin et al. 1995, Goad & Wanders 1996).
3. *Disk.* Ovaj model predviđa da široke linije nastaju unutar relativističkog keplerovskog akrecionog diska<sup>13</sup> koji okružuje supermasivnu crnu rupu (Chen et al. 1999). Najveća prednost ovog modela je što objašnjava profile linija sa dva značajno razdvojena pika, ali i velike elektronske gustine potrebne za nastanak FeII<sub>opt</sub> i drugih nisko-jonizovanih linija, kao što je CaII. Takođe, rezultati reverberacionog mapiranja su u saglasnosti sa ovim modelom. Sa druge strane, postojanje emisionih linija sa jednim pikom se objašnjava činjenicom da one nastaju u daljim oblastima diska ili su vidljive zbog toga što je akrecioni disk postavljen skoro normalno na pravac posmatranja. Mana ovog modela je što ne objašnjava asimetriju pomaka određenih komponenti, kao i to što su objekti koji imaju linije sa izražena dva pika uglavnom radio-glasni izvori, koji imaju najslabiju emisiju u FeII<sub>opt</sub> (Chen & Halpern 1989).
4. *Konusno izbacivanje materije.* Moguće objašnjenje izražene asimetrije krila širokih emisionih linija, kao i postojanje pikova je izbacivanje materije u obliku konusa, simetrično u oba smera. Problem ovog modela je to što je uglavnom prisutna izrazita asimetrija ka plavom delu spektra, a model predviđa i postojanje toka materije koji se udaljava od posmatrača, koji je retko posmatran u emisionim linijama (Zheng et al. 1990, Marziani et al. 1996).
5. Mnogi autori razmatraju BLR kao da se sastoji iz dve podoblasti, definisane kao izuzetno širokolinijska oblast (VBLR - *Very Broad Line Region*), koja doprinosi krilima emisionih linija i među-oblast (ILR - *Intermediate Line Region*), gde se formira jezgro linija (Brotherton et al. 1994, Sulentic et al. 2000, Popović et al. 2004). Unutrašnji delovi BLR čine VBLR. VBLR obuhvata gas sa najvećim brzinama i vrlo verovatno je taj gas optički proziran (jedna činjenica koja na to ukazuje je da je FWHM rms spektra H $\beta$  linije manja nego srednja FWHM), vrlo velike gustine ( $n_e \sim 10^{11} - 10^{13}$ ) i visokog stepena jonizacije ( $U \approx 0.1 - 1$ ). Među-oblast, ILR, je oblast koja čini prelaz između BLR i NLR, odnosno obuhvata spoljašne delove BLR. U ovoj oblasti su brzine gasa nešto niže, dok je stepen jonizacije i dalje visok.

---

<sup>13</sup>ili je to neki vid spljoštene sredine koja okružuje akrecioni disk



Karakteristike širokih emisionih linija se dosta razlikuju od objekta do objekta, međutim i osobine linija iste galaksije mogu varirati, što ukazuje na to da je emisivnost različitih linija različita unutar BLR. Pokazano je da postoje bitne razlike između profila linija radio-glasnih i radio-tih aktivnih galaksija (Sulentic et al. 2000). Specijalno, smatra se da visoko-jonizovane linije (HIL - *High Ionization Lines*), kao što su  $\text{Ly}\alpha$ , CIV  $\lambda 1550$  i HeII  $\lambda 4686$ , i nisko-jonizovane linije (LIL - *Low Ionization Lines*)<sup>14</sup>, kao što su Balmerove i FeII linije, nastaju unutar dinamički različitih komponenti široko-linijske oblasti (Sulentic et al. 2000). Razlika između HIL i LIL je posebno izražena kod radio-tih aktivnih galaktičkih jezgara. Statistički značajno reverberaciono proučavanje BLR ukazuje na to da postoji antikorelacija između jonizacionog stanja i vremena kašnjenja promene intenziteta linija usled promene kontinuuma, kao i antikorelacija između vremena kašnjenja i širine linije, što potvrđuje hipotezu da je FWHM svake linije indikator rastojanja od centralnog izvora. Na osnovu ovih činjenica, evidentno je da je širokolinijska oblast slojevita fotojonizovana sredina u kojoj se emisione linije formiraju u različitim fizičkim uslovima, kao i u širokom opsegu rastojanja od centralnog izvora.

### 3.5 Uskolinijska emisiona oblast

Uskolinijska oblast je udaljena od centralnog izvora od nekoliko desetina pc pa do 1 kpc i sastoji se od velikog broja oblaka gasa različitih koncentracija. Gustine u ovoj oblasti su znatno manje nego u širokolinijskoj oblasti ( $n_e \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ), što stvara uslove za formiranje velikog broja rekombinacionih emisionih linija, koje uglavnom potiču iz zabranjenih prelaza. Brzine kretanja emitera su takođe manje nego u BLR (najviše 1000 km/s), tako da su i emisione linije znatno uže. Ova oblast je jedina komponenta aktivnih galaktičkih jezgara koju je moguće neposredno posmatrati u optičkom domenu. NLR je obasjana anizotropno od strane centralnog izvora, i na osnovu proučavanja dinamike ove oblasti moguće je saznati više o samom jezgru.

Širina uskih emisionih linija na polovini maksimalnog intenziteta je u opsegu  $200 \lesssim \Delta v_{\text{FWHM}} \lesssim 900 \text{ km s}^{-1}$ , sa najčešćim vrednostima oko  $350 - 400 \text{ km s}^{-1}$ . Ove emisione linije uglavnom nastaju u zabranjenim prelazima. Elektronska gustina u ovoj oblasti je dovoljno mala da je sudarna ekscitacija zanemarljiva. Samim tim, odnosi intenziteta određenih linija mogu se koristiti za merenje elektronskih gustina i temperatura gasa, što je velika prednost u odnosu na dijagnostiku fizičkih parametara u širokolinijskoj oblasti. Mana spektroskopskog određivanja ovih parametara je što je u slučaju NLR uticaj prašine značajniji nego

---

<sup>14</sup>HIL nastaju kod emitera sa jonizacionim potencijalom  $\geq 50 \text{ eV}$ , dok emiteri sa jonizacionim potencijalom  $\leq 20 \text{ eV}$  proizvode LIL.

kod BLR. Osnovna osobina NLR emisije je da je emisija iz zabranjenih prelaza izotropna, s obzirom na to da je samoapsorpcija kod uskih linija zanemarljiva.

Određivanje elektronske gustine i temperature pomoću odnosa intenziteta određenih emisionih linija je detaljno opisano u poglavlju 2.4. Za NLR Sejfertovih galaksija izmerene elektronske gustine imaju sve vrednosti koje je moguće dobiti merenjima pomoću odnosa intenziteta linija iz [SII] dubleta, tako da se  $n_e$  nalazi u opsegu od  $10^2 \text{ cm}^{-3}$  do  $10^4 \text{ cm}^{-3}$ , pri čemu je srednja gustina uskolinijske oblasti oko  $2000 \text{ cm}^{-3}$  (Koski 1978). Što se elektronskih temperatura tiče, vrednosti dobijene merenjima iz odnosa intenziteta [OIII] linija su u opsegu 10000 – 25000 K. Tipična vrednost za elektronsku temperaturu u NLR je  $T_e = 16000 \text{ K}$  (Koski 1978). Prilikom određivanja fizičkih parametara NLR važno je obratiti pažnju na to da vrednost za gustinu NLR varira u dosta širokom opsegu, za razliku od temperature gde se skoro uvek dobija isti red veličine. Odnosi intenziteta emisionih linija zavise kako od temperature tako i od gustine, tako da je moguće da linije dolaze iz oblaka različitih gustina. Drugi ograničavajući faktor spektroskopskog određivanja  $n_e$  i  $T_e$  je da se oni određuju pomoću linija različitog stanja jonizacije, a prirodno je očekivati da gustina i temperatura nisu iste u sredinama gde dominira  $O^{++}$  i gde je kiseonik pretežno jednom jonizovan.

Za određivanje nekih osnovnih karakteristika uskolinijske oblasti može se koristiti luminoznost jakih emisionih linija<sup>15</sup>. Najčešće se koristi vodonikova  $H\beta$  rekombinaciona linija<sup>16</sup>. Ukupna luminoznost  $H\beta$  linije,  $L(H\beta)$ , data je izrazom (Osterbrock 1989, Peterson 1997):

$$L(H\beta) = \frac{4\pi\epsilon n_e^2}{3} 1.24 \times 10^{-25} r^3 \text{ erg s}^{-1},$$

gde je  $n_e$  koncentracija elektrona<sup>17</sup>, a  $\epsilon$  faktor ispunjenja (*filling factor*), koji izražava koliki deo ukupne zapremine stvarno sadrži materiju koja emituje linije (ostatak zapremine se može smatrati vakuumom). Faktor ispunjenja u slučaju sferne raspodele oblaka gasa povezuje broj oblaka  $N_c$  i poluprečnik oblaka  $l$  pomoću relacije  $N_c l^3 = \epsilon r^3$ . Iz gornje jednačine dobija se da za NLR važi

$$r \approx 19 \left( \frac{L_{41}(H\beta)}{\epsilon n_3^2} \right)^{1/3} \text{ pc},$$

gde je  $L_{41}(H\beta)$  luminoznost  $H\beta$  linije u jedinicama  $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ , a  $n_3$  je elektronska gustina u jedinicama  $10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Kako je luminoznost uske  $H\beta$  linije kod Sejfert 2

<sup>15</sup>Isto razmatranje može se primeniti i na širokolinijsku oblast, koristeći luminoznost jakih linija, na primer CIV  $\lambda 1549$  linije.

<sup>16</sup>U slučaju NLR prednost korišćenja rekombinacionih linija je ta što je njihova jačina relativno neosetljiva na promenu temperature, za razliku od sudarno ekscitovanih linija. Odnos flukseva uskih vodonikovih linija odgovara slučaju B rekombinacije, sa malim odstupanjima zbog sudarne ekscitacije sa osnovnog stanja, tako da se u dijagnostici NLR koriste vodonikove linije.  $H\beta$  linija se obično razmatra pre nego  $H\alpha$  jer je u manjoj meri osetljiva na sudarne efekte.

<sup>17</sup>Pretpostavka je da se gas sastoji samo od potpuno jonizovanog vodonika, tako da je  $n_e = n_p$ , gde je  $n_p$  koncentracija jona vodonika.

galaksija reda  $10^{39} - 10^{42}$  erg s<sup>-1</sup>, a  $r \gtrsim 100$  pc, dobija se da je faktor ispunjenja  $\epsilon \lesssim 10^{-2}$ , a u nekim slučajevima je i nekoliko redova veličina manji od ove granice (Peterson 1997). Na osnovu ovoga sledi da je uskolinijska oblast itekako prekidna i sastavljena od velikog broja oblaka gasa. Pomoću luminoznosti H $\beta$  linije moguće je proceniti i masu ove oblasti. Ako je broj oblaka gasa  $N_c$ , njihov poluprečnik  $l$ , a masa oblaka  $n_e m_p$  (gde je  $m_p$  masa jona vodonika, odnosno protona), onda je masa NLR prosto data izrazom

$$M_{\text{NLR}} = \frac{4\pi}{3} l^3 N_c n_e m_p,$$

odnosno ako se zameni  $l^3 N_c$  faktorom ispunjenja, dobija se da je masa

$$M_{\text{NLR}} = \frac{4\pi}{3} \epsilon r^3 n_e m_p.$$

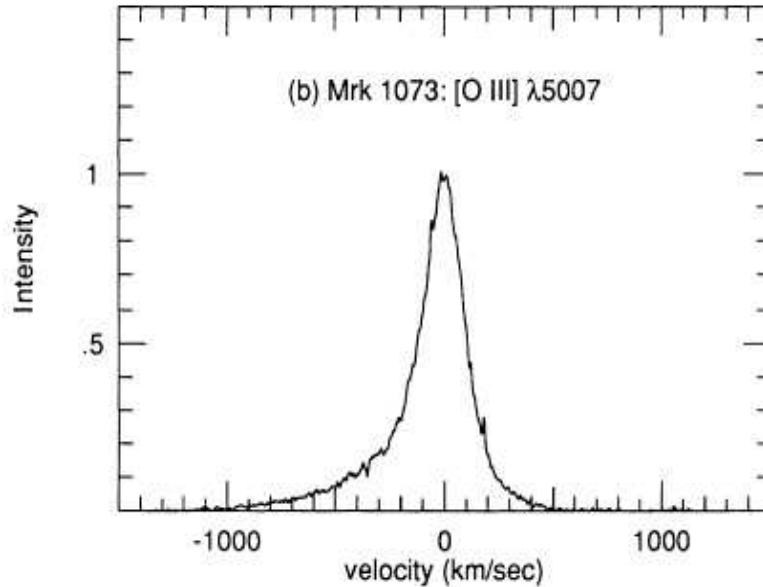
Zamenjujući  $\epsilon r^3$  dobija se da je masa

$$M_{\text{NLR}} = 7 \times 10^5 \frac{L_{41}(H\beta)}{n_3} M_{\odot}.$$

Masa NLR je nekoliko redova veličina veća od mase BLR, iako je količina emisije u linijama uporediva sa BLR emisijom. Razlog za to je činjenica da je emisivnost rekombinacionih linija proporcionalna sa  $n_e^2$ , pa kako je BLR mnogo gušća sredina emisija je efektnija.

Promenljivost uskih emisionih linija je jako teško detektovati, za razliku od značajne promenljivosti širokih linija. Kako je vreme za koje svetlost treba da pređe put duž NLR reda  $\tau \approx 60(L_{41}(H\beta)/\epsilon n_3^2)^{1/3}$  godina, samo se dugoročne promene zračenja u kontinuumu mogu detektovati kao promene u fluksu uskih linija. Uslovi za promenljivost uskih linija su pre svega veća srednja gustina (na primer,  $n_e \approx 10^6 \text{cm}^{-3}$ ), ali i kompaktnost NLR i dugoperiodičnost kontinuuma.

Tipičan oblik uskih emisionih linija prikazan je na slici 15. Profil linije je izrazito ne-Gausovski, često asimetričan i to uglavnom ka plavom delu spektra. Kako je kod jakih zabranjenih linija samoapsorpcija beznačajna, detektovana asimetrija mora biti posledica radijalnog kretanja oblaka gasa i nekog neprozračnog izvora, kao što je npr. prašina. Asimetrija se može objasniti izbacivanjem oblaka gasa kroz neprozračnu sredinu, tako da je emisija iz najudaljenijih oblaka više apsorbovana nego emisija iz oblaka bližih centralnom izvoru kontinuuma. Ako se uporede Balmerove linije jednog izvora, zaključak je da su profili tih linija praktično identični. To ukazuje na činjenicu da je optička dubina emisione sredine velika ( $\tau \gg 1$ ) i da je asimetrija posledica zaklanjanja velikog dela NLR. Ako bi optička dubina bila manja ( $\tau \approx 1$ ), onda bi efekti pocrvenjenja i ekstinkcije bili uporedivi, pa bi odnos flukseva H $\alpha$ /H $\beta$  linija varirao sa radijalnom brzinom, što nije posmatrano.



Slika 15: Profil [OIII]  $\lambda 5007$  emisione linije Sejfert 2 galaksije Markarian 1073 u rezoluciji od  $10 \text{ km s}^{-1}$  (Veilleux 1991). Linija je vidno asimetrična, sa više fluksa na kraćim nego na dužim talasnim dužinama u odnosu na centar linije.

Ako se radijalne brzine dobijene iz uskih linija uporede sa sistematskom brzinom galaksije, dobija se da su brzine dobijene iz uskih linija u odnosu na sistematske brzine blago pomerene ka plavom, najčešće u opsegu  $50 - 100 \text{ km s}^{-1}$  (Wilson & Heckman 1985). Izgleda da se centar uske emisione linije nalazi blizu sistematskog crvenog pomaka galaksije, što ukazuje na to da veći deo emisije uske linije nastaje u simetričnoj oblasti koja se kreće zajedno sa galaksijom. Međutim, postoji i druga, slabija komponenta, koja je pomerena ka plavom u odnosu na sistematski crveni pomak koja se može objasniti na primer izbacivanjem materije u onom delu AGJ koji je bliži posmatraču.

Profili različitih zabranjenih emisionih linija u spektru jedne AGJ su slični, ali imaju različite širine. To znači da emisivnost različitih linija na različite načine zavisi od radijalne brzine. Verovatno je da postoji radijalna stratifikacija unutar uskolinijske oblasti, bilo da se gustina ili stepen jonizacije (ili oba parametra) povećavaju ka centru. Ukoliko se i gustina i disperzija brzine povećavaju ka centru AGJ, prelaz sa uskolinijske na širokolinijsku oblast dolazi prirodno, odnosno NLR se prosto nadovezuje na BLR kako se ide od centra ka udaljenim delovima AGJ.

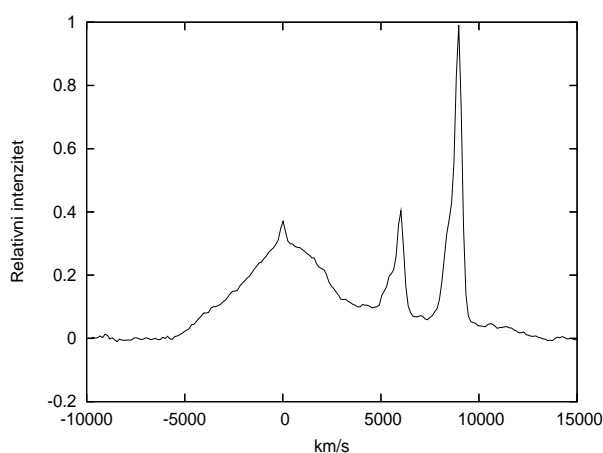
U skorije vreme kod bliskih AGJ su sve više detektovane i proučavane uskolinijske oblasti, naročito uz pomoć Hablovog teleskopa. Primećeno je da je oblik NLR pre osnosimetričan nego sfernosimetričan. Ose simetrije ove oblasti se poklapaju sa osama radio-emisije u slučaju izvora gde je uopšte detektovana radio-emisija u udaljenim delovima galaksije. To ukazuje na činjenicu da pos-

toji određena veza između gasa koji emituje termalno zračenje, odnosno uske emisione linije i gasa koji emituje netermalno zračenje. Kod nekih izvora, oblik radio-zračenja jasno ukazuje na postojanje frontova udarnih talasa između plazme koja emituje radio-zračenje i međuzvezdane materije galaksije. U hladnijoj postudarnoj okolini detektovana je jaka emisija linija. Slika koja sledi iz ovih posmatranja je da plazma koja se izbacuje iz centra galaksije, koja je odgovorna za emisiju u radio-području, stvara udarne talase prilikom sudara sa gasom unutar NLR. Postudarni gas koji je primarno verovatno bio fotojonizovan od strane centralnog izvora, biva dodatno jonizovan sudarnom jonizacijom. Zaista, da bi se u potpunosti objasnio spektar uskolinijske oblasti neophodno je uzeti u razmatranje oba modela jonizacije gasa.

Još jedna karakteristika vezana za oblike AGJ su jonizacioni konusi, koji su jasno izraženi na mapama visoko-ekscitovanih linija kao što je [OIII]  $\lambda 5007$  linija. Jonizacioni konusi su detektovani kod više desetina aktivnih galaksija, pretežno Sejfert 2 galaksija od kojih su sve radio-slabe galaksije. Otvori konusa su u opsegu  $\sim 30^\circ - 100^\circ$  i unutar njih odnos flukseva [OIII]  $\lambda 5007/H\alpha$  linija je veći od jedan, što je karakteristika gasa male gustine, jonizovanog od strane AGJ kontinuuma, dok je van konusa taj odnos manji, ukazujući na to da dominira jonizacija zračenjem sa zvezda pre nego od AGJ. Veličina jonizacionih konusa kreće se od  $\sim 60$  pc do  $\sim 20$  kpc i ponekad se označavaju kao dodatak uskolinijskoj oblasti i obeležavaju kao ENLR (*Extended Narrow Line Region*), kako bi se razlikovali od standardne NLR, koja je bliža samom jezgru, većeg površinskog sjaja i višeg stepena jonizacije. Ivice konusa su upadljivo prave i jasno izražene, što dokazuje da su oblasti oko samog jezgra definisane ne samo raspodelom gasa već i usmerenim zračenjem izvora iz centra. Brzine gasa u ENLR su u saglasnosti sa rotacijom unutar galaksije i nije prisutno ubrzanje kao posledica interakcije sa radio-emitujućom plazmom, kao što je slučaj kod klasične NLR. Emisiju iz ENLR moguće je objasniti emisijom međuzvezdanog gasa, fotojonizovanog od strane jezgra. Ukoliko su prisutna oba jonizaciona konusa kod AGJ, njihove ose simetrije se poklapaju, ali sa druge strane ne izgleda da je ta osa povezana sa osom simetrije galaksije. U slučaju kada je posmatran samo jedan konus, jedan mogući scenario je da je drugi konus prosto nemoguće detektovati jer je zaklonjen prašinom iz ravni simetrije. Bitna stvar koja sledi iz prisustva ovih konusa je da je kontinualno zračenje iz centra aktivne galaksije najverovatnije anizotropno ili je, u najmanju ruku, to zračenje anizotropno na rastojanjima reda kiloparseka.

## 4 Aktivna galaksija Markarian 817 (Mrk 817)

Galaksija Markarian<sup>18</sup> 817 (Mrk 817) je aktivna galaksija svrstana po svojim karakteristikama, pre svega po izgledu spektra, u Sejfert 1 galaksije. Mnogi autori, baš zbog karakterističnog izgleda njenog spektra, ovu galaksiju svrstavaju u prelazni tip Sejfertovih galaksija (Osterbrock & Koski 1976, Osterbrock 1989, Osterbrock & Martel 1993). Kako je u spektru ove galaksije vrlo izražena superpozicija uskih linija (sličnog profila kao uske zabranjene linije) na široke emisijske linije (slika 16) ova galaksija je svrstana u grupu Sejfert 1.5 galaksija (Cohen 1983, Dahari & De Robertis 1988, Pogge & Martini 2002).



Slika 16:  $H\beta$  linija u spektru aktivne galaksije Mrk 817 snimljena na OAN/SPM u Meksiku.

Osnovni podaci za ovu galaksiju, kao što su dijametar, crveni pomak i položaj, nalaze se u Tabelama 3 i 4. Svi ovi podaci mogu se naći u NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*) bazi podataka<sup>19</sup>. Galaktička ekstinkcija u pravcu gde se nalazi ova galaksija je zanemarljiva ( $E(B-V)=0.007$ ), ali pocrvnenje koje nastaje zbog unutrašnje ekstinkcije same galaksije je značajnije. Pocrvnenje dobijeno merenjem odnosa intenziteta uskih Balmerovih linija iznosi  $E(B-V)=0.22$  (Cohen 1983) i može se koristiti za korekciju intenziteta ostalih linija, ali ipak ovaj rezultat treba uzeti sa određenom rezervom, jer je dosta teško izdvojiti samo uske linije i precizno odrediti sopstveno pocrvnenje. Ukoliko se uzme da je vrednost Hablove

<sup>18</sup>Veliki broj danas poznatih Sejfertovih galaksija je identifikovan u spektroskopskom istraživanju Markariana i njegovih kolega sa Bjurakanske opservatorije u Jermeniji (Markarian & Lipovetsky 1976). U tom istraživanju korišćen je 1m teleskop i spektroskop niske disperzije od  $\sim 1800 \text{ \AA mm}^{-1}$ . Dobijeni spektri su upotrebljeni za identifikaciju objekata sa pojačanim zračenjem u UV oblasti. Procenjeno je da su oko 11 % objekata iz Markarianovog kataloga Sejfertove galaksije, 2 % zvezde iz naše galaksije, 2 % QSO i BL Lac objekti, a ostatak čine plave galaksije, pretežno patuljaste i galaksije bogate mladim zvezdama.

<sup>19</sup><http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

Tabela 3: Osnovne karakteristike aktivne galaksije Mrk 817.

Druga imena	UGC 09412 PG 1434+590 PGC 052202 IRAS F14349+5900
Heliocentrična radijalna brzina	$9430 \pm 35 \text{ km s}^{-1}$
Crveni pomak	$0.03145 \pm 0.00012$
Poluprečnik	0.6 arcmin
Vizuelna magnituda	14.50
Klasifikacija	SBc ; Sy1.5
Galaktička ekstinkcija E(B-V)	0.007

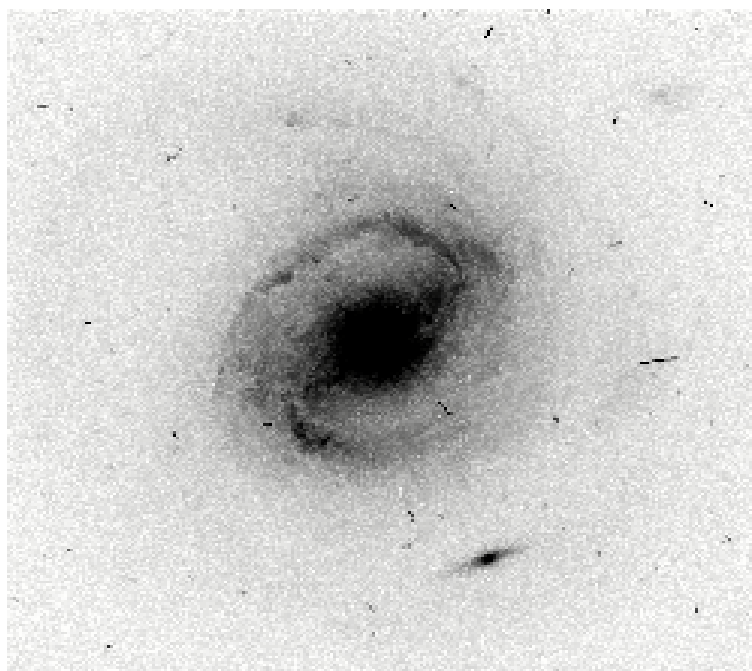
Tabela 4: Položaj aktivne galaksije Mrk 817.

Referentni sistem	Longituda ( $^{\circ}$ )	Latituda ( $^{\circ}$ )	$\alpha$ (h:m:s)	$\delta$ ( $^{\circ}$ : $'$ : $''$ )
Ekvatorski (B1950.0)	218.7411292	59.0108139	14 34 57.871	+59 00 38.93
Ekvatorski (J2000.0)	219.0919487	58.7942736	14 36 22.068	+58 47 39.38
Ekliptički (B1950.0)	173.5386891	66.1614307		
Ekliptički (J2000.0)	174.2519250	66.1616635		
Galaktički	100.2997221	53.4783950		

konstante  $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  rastojanje do Mrk 817 dobijeno iz heliocentrične brzine galaksije je 127.6 Mpc (Pogge & Martini 2002).

Galaksija Mrk 817 je spiralna galaksija sa raširenim spiralnim granama što se jasno vidi na slici dobijenoj pomoću svemirskog teleskopa Hubble (slika 17). Na slici je takođe jasno izražena prečka, relativno malih uglovnih dimenzija, pa se ova galaksija svrstava među SBc galaksije Hubbleove klasifikacije (Malkan et al. 1998, Knapen et al. 2000, Pogge & Martini 2002). U radu Pogge i Martini (Pogge & Martini 2002) uradjeno je detaljno istraživanje strukture ove galaksije. Na osnovu posebne metode obrade slika sa Hubble svemirskog teleskopa i pojačavanja kontrasta napravljena je "strukturna mapa" ove galaksije (slika 18). Na mapi se vidi prisustvo prečke, ali pošto prečka nije toliko jaka ova galaksija je u RC3<sup>20</sup> kat-

<sup>20</sup>RC3 katalog je treći referentni katalog sjajnih galaksija (*The Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*). Sastavljen je na Univerzitetu u Teksasu i sadrži osnovne podatke za 23022 galaksije (koordinate iz 1950. i 2000., imena, tip, optički dijametar, galaktičku i unutrašnju ekstinkciju, radijalnu brzinu u odnosu na Sunce, itd.). Katalog je skoro kompletan za galaksije veće od 1 lučne sekunde i plave magnituda sjajnije od 15.5, sa crvenim pomakom ne većim od



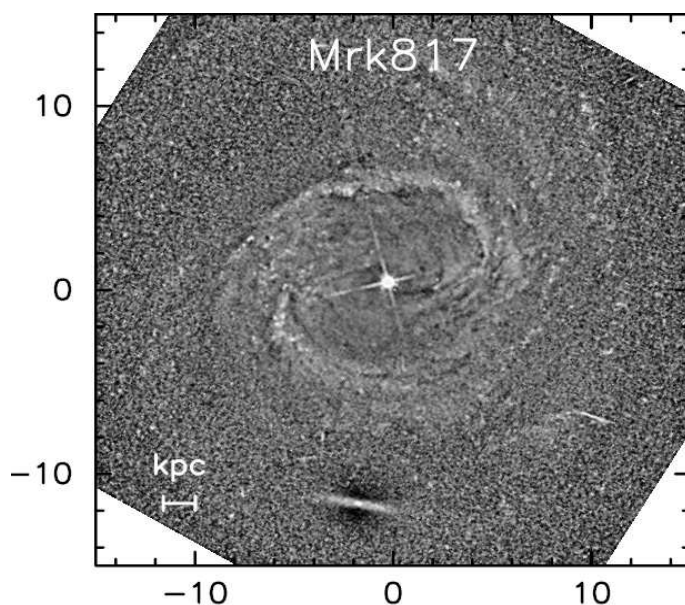
Slika 17: Aktivna galaksija Mrk 817 snimljena pomoću HST-a, sa širokim filterom F606W (srednja talasna dužina je  $5940 \text{ \AA}$ , a FWHM  $1500 \text{ \AA}$ ). Vidno polje je dimenzija  $0.6 \times 0.6$  lučnih minuta, a rezolucija je  $0.1$  lučna sekunda (Malkan et al. 1998).

alogu klasifikovana kao S? galaksija. Druga zanimljivost, koja sledi iz ove analize, je da oko jezgra ove galaksije postoje spirale razmera manjih od kiloparseka, u kojima dominira neprozračan gas i prašina. Ove spirale su sa okolnom galaksijom povezane prašinom koja se prostire duž prečke. Prisutne su, takođe, i "pravolinijske" pruge prašine na većim razmerama (koje prate velike spiralne grane), čije prisustvo je i opravdano, a obzirom na to da se prilikom kompresije gasa i prašine u osnovnom udaru duž glavnih granica prečke formiraju takve oblasti. Hidrodinamički modeli kretanja gasa u galaksijama sa prečkom predviđaju spiralne strukture gasa i prašine oko jezgra, u razmerama od nekoliko stotina parseka. Skorašnje hidrodinamičke simulacije velike rezolucije prikazuju formiranje sličnih struktura. Te strukture su spiralni udarni talasi, koji se kreću brzinom zvuka i koji dovode gas do jezgra (ili barem do najmanjih rastojanja, koja se mogu dobiti datim modelom). Verovatno je da su ove strukture odgovorne za približavanje materije iz spoljašnjeg dela galaksije u oblast vrlo blizu jezgra. Iako galaksija Mrk 817 ima u svom centru aktivno jezgro, karakteristike okolnog diska su iste kao kod "normalnih" spiralnih galaksija. Jedina zanimljiva razlika je manja količina prašine i gasa u spoljašnjem disku Sejfert galaksija, što ukazuje na to da je proces formiranja zvezda u završnoj fazi (Hunt et al. 1997).

---

$15000 \text{ km s}^{-1}$  (de Vaucouleur et al. 1991).

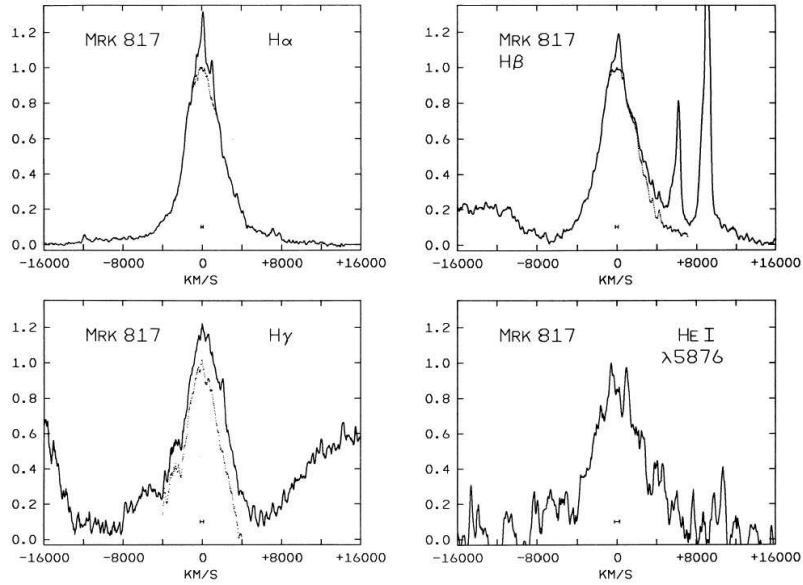




Slika 18: Struktura aktivne galaksije Mrk 817. Na slici je prikazano  $30''$  centra galaksije. Intenzitet (crno i belo) predstavlja deo ostatka ( $\pm 10\%$ ) originalnog intenziteta. Tamne oblasti predstavljaju mesto apsorpcije od strane prašine, a svetle oblasti su ili pojačano zračenje zvezda (npr. mesta formiranja zvezda) ili oblasti emisije linija. Slika je rotirana tako da sever bude gore, a istok levo (Pogge & Martini 2002).

Spektroskopska istraživanja jezgra aktivne galaksije Mrk 817 su tema mnogih astrofizičkih radova još od ranih osamdesetih godina prošlog veka. Ova galaksija je bila deo uzorka mnogih statističkih istraživanja, pre svega zbog relativno velike vizulene magnitude, ali i dobrog položaja na nebu, pa je i deo poznatog i dosta proučavanog uzorka sjajnih Sejfertovih galaksija izvučenih iz CfA pregleda severnog neba<sup>21</sup> koji su dali Hučra i Burg (Huchra & Burg 1992). Na slici 19 prikazane su jake Balmerove linije ( $H\alpha$ ,  $H\beta$  i  $H\gamma$ ) i linija neutralnog helijuma  $HeI \lambda 5876$  iz jednog od prvih spektroskopskih radova o Mrk 817 (Osterbrock & Shuder 1982). Profili linija su simetrični i sličnih širina na polovini maksimuma intenziteta ( $FWHM \sim 4000\text{\AA}$ ), sa tim da je linija neutralnog helijuma nešto šira, ali ti podaci su manje pouzdani zbog velikog nivoa šuma (Osterbrock & Shuder 1982). Doprinos multiplleta jonizovanog gvožđa je značajan kod ovog AGJ i treba ga oduzeti od emisionih linija, naročito u slučaju  $H\beta$  linije. Oduzimanjem dopri-

<sup>21</sup>The Center for Astrophysics (CfA) Redshift Survey je započeo 1977. godine. Prvo pretraživanje neba, završeno 1982. godine, imalo je za cilj da meri radijalne brzine, odnosno crveni pomak, svih galaksija sjajnijih od 14.5 magnituda i na visokim galaktičkim latitudama iz spojenog Cviki-Nilson kataloga (poznatiji kao UGC katalog - *the Uppsala General Catalogue*). Ovaj pregled neba sadrži 2399 galaksija i dao je prve mape struktura velikih dimenzija bliskog svemira i prve nagoveštaje grupisanja galaksija u grupe i postojanja praznih oblasti svemira (Huchra et al. 1983).

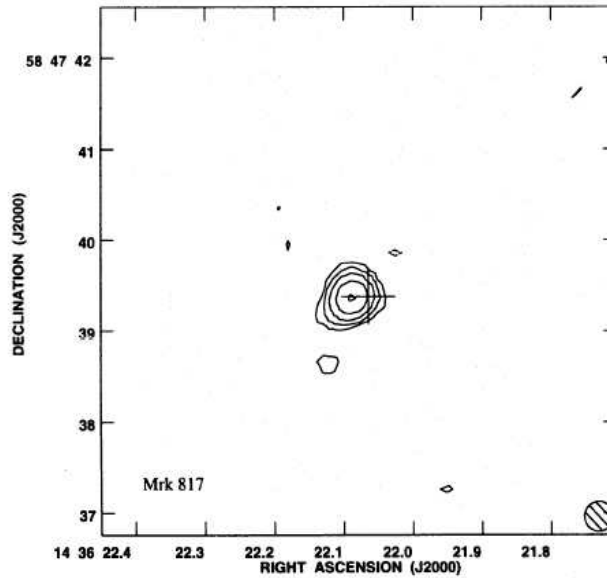


Slika 19: Jake emisione linije u spektru aktivne galaksije Mrk 817 (Osterbrock & Shuder 1982).

nosa Fe II od 15% dobija se simetričan profil  $H\beta$  linije (De Robertis 1985). Na spektrima bolje rezolucije (ali čak i na slici 19) jasno se vidi da Balmerove linije i linije neutralnog i jonizovanog helijuma imaju složen profil: na široke linije su nadograđene uske linije, profila sličnog zabranjenim linijama (Cohen 1983), pa se Mrk 817 svrstava u Sy 1.5 galaksije. Uske linije imaju  $\text{FWHM} \sim 300 \text{ km s}^{-1}$  (Feldman et al. 1982) i, naročito kod [OIII] linija, primetna je asimetrija ka plavom. Odnosi uskih linija su vrlo slični kao kod Sejfert 2 galaksija, što ukazuje na to da je i NLR sličnih karakteristika, odnosno da je osnovni izvor energije fotojonizacija od strane centralnog kontinuuma, dok je temperatura nešto viša, i mnogo su izraženije visoko-jonizovane linije (Cohen 1983).

AGJ Mrk 817 je bila deo programa reverberacionog mapiranja dve grupe autora (Peterson et al. 1998, Wandel et al. 1999, Kaspi et al. 2000). Praćene su promene fluksa  $H\beta$  linije i kontinuuma duži niz godina, kako bi se uočila korelacija i primenio reverberacioni metod<sup>22</sup> određivanja mase i dimenzija širokolinijske oblasti. Za radijus BLR-a dobija se vrednost  $R_{\text{BLR}} = 15.0_{-3.4}^{+4.2}$  svetlosnih dana (Kaspi et al. 2000), odnosno  $R_{\text{BLR}} = 15.5_{-3.5}^{+4.3}$  svetlosnih dana (Peterson et al. 1998, Wandel et al. 1999). Masa crne rupe iznosi  $M(\text{mean}) = 4.4_{-1.1}^{+1.3} \times 10^7 M_{\odot}$  kada se FWHM određuje iz usrednjenog spektra, odnosno  $M(\text{rms}) = 3.54_{-0.86}^{+1.03} \times 10^7 M_{\odot}$  u slučaju kada se FWHM određuje iz RMS spektra (Kaspi et al. 2000). Peterson i saradnici dobijaju sličan rezultat za masu, koristeći RMS spektar  $M(\text{rms}) = 3.8 \times 10^7 M_{\odot}$  (Peterson et al. 1998, Wandel et al. 1999). Najnovija

<sup>22</sup>Detalji o reverberacionom metodu određivanja mase dati su u poglavlju 3.4.



Slika 20: Aktivna galaksija Mrk 817 snimljena na 8.4 GHz sa VLA radio-interferometrom. Krstić obeležava mesto gde se nalazi optičko jezgro galaksije (Kukula et al. 1995).

određivanja mase crne rupe ukazuju na to da postoje odstupanja između mase određene metodom reverberacije i mase izračunate na osnovu kinematike zvezda u centralnom ovalu galaksije, gde je greška reda 30 % (Onken et al. 2004, Peterson et al. 2004). Na osnovu empirijski dobijene relacije između mase crne rupe  $M_{\text{BH}}$  i disperzionog sferoida brzina zvezda oko centra galaksije  $\sigma_*$ , tzv.  $M_{\text{BH}}-\sigma_*$  relacije, treba izvršiti popravku reverberacione mase (Ferrarese et al. 2001)). Tako je određena najnovija vrednost za masu crne rupe aktivne galaksije Mrk 817  $M_{\text{BH}} = 4.94 \pm 0.77 \times 10^7 M_{\odot}$  (Onken et al. 2004, Peterson et al. 2004).

Kod ovog AGJ postoji veza između parametara široke emisije  $H\beta$  linije i luminoznosti kontinuuma, takva da je ekvivalentna širina  $H\beta$  linije obrnuto proporcionalna luminoznosti kontinuuma na 5100 Å kao  $EW \sim L_{5100}^{-0.047 \pm 0.038}$ . Ovaj efekat je poznat kao Baldwinov efekat i u odnosu na efekat kod CIV linije, kod  $H\beta$  linije je dosta mali (Sergeev et al 1999).

U području radio-talasa aktivna galaksija Mrk 817 je okarakterisana kao tiha, i proučavana je u više navrata. U okviru programa radio-posmatranja pedesetak Sejfertovih galaksija Kukule i saradnika (Kukula et al. 1995), Mrk 817 je posmatrana VLA radio-interferometrom (slika 20) na 8.4 GHz, u takvoj konfiguraciji radio-teleskopa da je postignuta rezolucija od  $0''.25$ . Sa ovako visokom rezolucijom moguće je proučavati radio-strukturu posmatranog objekta u razmerama manjim od lučne sekunde. U njihovom israživanju Mrk 817 je obeležena kao kompaktna galaksija koja u centru ima aktivno jezgro, Sejfert 1.5 tipa. U radio-području

galaksija nije razlučena, ali se položaj radio izvora dobro poklapa sa izvorom optičkog zračenja. Izmerena je i gustina fluksa na 8.4 GHz za ovu galaksiju. Ona iznosi 3.55 mJy kada se meri pomoću A-konfiguracije interferometra, odnosno 4.20 mJy pomoću C-konfiguracije (poređenja radi, gustina fluksa u optičkom domenu, dobijena iz magnituda cele galaksije, iznosi 7.6 mJy). Izmeren je i spektralni indeks ove galaksije u okviru određivanja radio-osobina 42 sjajne Sejfert galaksije (Edelson 1987). Merenjem gustine fluksa na talasnim dužinama od 6 cm i 20 cm, dobija se da je spektralni indeks za Mrk 817  $\alpha = 0.53$ , što ukazuje na to da u radio-emisiji dominira sinhrotronsko zračenje optički retke sredine. Monohromatska radio-luminoznost na 6 cm iznosi  $L_{4.89\text{GHz}} = 10^{38.74} \text{erg s}^{-1}$  (za vrednost Hablove konstante  $H_0 = 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ).

Na osnovu spektroskopskih posmatranja primećeno je da aktivna galaksija Mrk 817 ima vrlo složene široke i uske emisione linije, koje se formiraju u oblastima različitih kinematičkih i fizičkih karakteristika. U ovom radu će se na osnovu spektroskopskih posmatranja visoke rezolucije proučiti komplikovana kinematička i fizička struktura emisionih oblasti ove galaksije, odnosno širokolinijskog i uskolinijskog emisionog regiona.

## 5 Posmatrački podaci i način obrade

Prilikom izučavanja emisione oblasti galaksije Mrk 817 korišćeni su različiti posmatrački podaci. U sledećem poglavlju detaljno je opisan posmatrački materijal, kao i kompjuterski paketi i programi koji su primenjeni u obradi podataka.

### 5.1 Posmatrački materijal

U ovom radu obrađeni su i analizirani spektri aktivne galaksije Mrk 817 dobijeni upotrebom sledećih teleskopa:

i) Osnovni set podataka čine spektri posmatrani sa 2.5 metarskim teleskopom "Isak Njutn" (*Isaac Newton Telescope - INT*) opservatorije "Roque de Los Muchachos" na Kanarskim ostrvima (ostrvo La Palma) u Španiji. Posmatranja su obavljena u okviru zajedničkih istraživanja tima astronoma sa Astronomske opservatorije u Beogradu i Instituta za astrofiziku na Kanarskim ostrvima (*Instituto de Astrofísica de Canarias, IAC*). Posmatranja su vršena u periodu od 21. do 25. januara 2002. godine. Projekat je obuhvatao posmatranja 12 aktivnih galaksija koje su ranije posmatrane u X-području i gde je detektovana Fe K $\alpha$  emisiona linija (Nandra et al. 1997, Sulentic et al. 1998). Ti rezultati ukazuju na postojanje geometrije diska u oblasti emitovanja X-zraka, i da postoji mogućnost da se i u optičkoj oblasti mogu posmatrati linije koje dolaze iz spoljnih delova diska. Kako bi se u emisionim linijama detektovala složena struktura emisionog diska, potrebno je dobiti spektralne linije visoke rezolucije, ali i velikog odnosa signal/šum (posmatrane AGJ nemaju H $\alpha$  i H $\beta$  linije sa dva pika, već se prisustvo diska može odraziti kao dve izbočine u plavom i crvenom delu ovih linija). Cilj istraživanja je, dakle, bio dobijanje spektralnih profila visoke rezolucije emisionih linija Balmerove serije, kako bi se proučila struktura širokolinijske emisione oblasti i uočila struktura diska (Popović et al. 2004).

Potrebno je bilo snimiti spektre jako visoke rezolucije, a u isto vreme trebalo je obuhvatiti relativno veliki opseg talasnih dužina, s obzirom na to da su snimane vrlo široke linije. Zato je za dobijanje spektara korišćen spektrograf srednje disperzije (*Intermediate Dispersion Spectrograph - IDS*) sa kamerom žižne daljine 235 mm, u kombinaciji sa difrakcionim rešetkama R1200B i R1200Y. Za detektor je korišćen CCD čip EEV10a. IDS je spektrograf sa širokim prorezom (*long-slit spectrograph*). Širina proreza varira od 0".216 do 9".43. Optimalna širina proreza se dobija kombinacijom dva parametra - "seeing"<sup>23</sup> teleskopa i spektralne rezolucije koja se želi dobiti. Takođe, postavljanjem kamere sa većom žižnom daljinom

---

<sup>23</sup>Proširenje tačkastog lika, kao posledica uticaja atmosfere i karakteristika teleskopa.

od 235 mm dobija se bolja rezolucija (manja od 0.8 Å), ali uz širinu proreza manju od 0".9, što utiče na količinu detektovanog zračenja. S obzirom na to da je "seeing" teleskopa "Isak Njutn" bio 1", najefikasnije je bilo postaviti prorez spektrografa na 1" i koristiti kameru 235. Karakteristika ove kamere je da daje razmeru od 0".4/px u slučaju CCDa EEV10a. Kako bi se snimili različiti domeni talasnih dužina korišćene su dve difrakcione rešetke. Njihove karakteristike su date u Tabeli 5. CCD detektor EEV10a je dimenzija 2148 × 4200 piksela (treba voditi računa da je korisna površina 2048 × 4096 px), gde je jedan piksel veličine 13.5 μm. Radna temperatura CCD-a je 153 K <sup>24</sup>.

Tabela 5: Karakteristike difrakcionih rešetaka IDS sa kamerom od 235 mm.

Naziv rešetke	Broj zarezaka (po mm)	Centralna talasna dužina (Å)	Opseg (Å)	Efikasnost (%)	Disperzija (Å/mm)
R1200B	1200	3500	445	76	35.3
R1200Y	1200	6500	445	68	35.2

Ovom konfiguracijom postignuta je spektralna rezolucija od oko 1.0 Å a spektri su pokrivali opseg talasnih dužina od 3700 Å do 7000 Å. Spektri su posmatrani u tri seta, koji su obuhvatali sledeće spektralne linije: Hα, Hβ i Hδ linije. Detalji se nalaze u Tabeli 6. Svaki posmatrački set sadrži nekoliko BIAS ekspozicija i odgovarajućih FLATFIELD ekspozicija<sup>25</sup>. Za kalibraciju talasnih dužina za svaki set snimljeni su spektri CuNe lampe.

Tabela 6: Tabela posmatranja galaksije Mrk 817 2.5 metarskim teleskopom "Isak Njutn".

$\alpha$ $\delta$	z	Talasna dužina	Datum posmatranja	Broj spektara	Ekspozicija (s)
14:36:20.5	0.031455	4904.3	25-Jan-02	3	550
+58:48:14.6		4214.5	25-Jan-02	3	560
		6742.3	24-Jan-02	3	500

ii) Drugi set podataka su posmatranja sa 4.2 metarskim teleskopom "Viljam Heršel" (*William Herschel - WHT*) sa iste opservatorije na La Palmi. Posmatranja su izvršena 12/13 marta 2001. godine, i takođe su rađena po programu

<sup>24</sup>Sve informacije o korišćenim instrumentima mogu se naći na sledećoj internet adresi: <http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments>.

<sup>25</sup>Detaljnije opisano u Poglavlju 5.2.

naučne saradnje Astronomske opservatorije u Beogradu i Instituta za astrofiziku na Kanarskim ostrvima. Za dobijanje spektara korišćen je CRVENI krak ISIS spektrografa, sa kamerom žižne daljine 500 mm, u kombinaciji sa difrakcionom rešetkom R158R. Za detektor je korišćen CCD čip TEK4.

ISIS je visoko efikasan spektrograf, širokog proreza (širine i do  $4'$ ) i srednje rezolucije, sa dva kraka, tako da je moguće snimati spektre istovremeno u dva spektralna kanala, PLAVI i CRVENI. PLAVI krak je podešen da snima u spektralnom domenu  $3000 - 6000 \text{ \AA}$ , dok CRVENI krak snima u opsegu  $5000 - 10000 \text{ \AA}$ . U oba slučaja koristi se kamera žižne daljine 500 mm, koja daje razmeru od  $14.9'/\text{mm}$  duž proreza spektrografa. U slučaju CCD detektora TEK4, postiže se razmera od  $0''.36/\text{px}$ . Korišćena je difrakciona rešetka R158R, pomoću koje je moguće snimiti široku  $H\alpha$  liniju. Njene karakteristike su date u Tabeli 7. CCD kamera TEK4 je dimenzija  $1100 \times 1040$  piksela (treba voditi računa da je korisna površina  $1024 \times 1024$  px), gde je jedan piksel veličine  $24 \mu\text{m}$ . Radna temperatura CCD-a je 168 K. Postignuta je spektralna rezolucija od  $2.9\text{\AA}$  a snimljena je  $H\alpha$  linija.

Tabela 7: Karakteristika difrakcione rešetke korišćene u posmatranjima sa ISIS spektrografom.

Naziv rešetke	Broj zareza (po mm)	Centralna talasna dužina ( $\text{\AA}$ )	Opseg ( $\text{\AA}$ )	Disperzija ( $\text{\AA}/\text{mm}$ )	Širina proreza <sup>26</sup> (")
R158R	158	6500	2970	121	0.78

iii) Treći set čine podaci dobijeni sa 2.6 metarskim teleskopom "Šain" (*Shain*), Krimске astrofizičke opservatorije (*CrAO - Crimean Astrophysical Observatory*), u okviru programa posmatranja aktivnih galaksija, koji je vodio K.K.Čuvaev, u periodu od 1970 - 1990 godine. Posmatrački materijal je dobijen u okviru saradnje Krimске astrofizičke opservatorije i Astronomske opservatorije Beograd. Spektri su snimljeni SPEM spektrografom u Nesmitovom fokusu i "image tube" detektorom sa magnetskim fokusiranjem. "Seeing" teleskopa "Šain" je bio uglavnom  $\sim 2'' - 3''$ , a retko  $\sim 6''$ . Prorez spektrografa je bio širine  $\sim 2''$ . Difrakciona rešetka je imala 600 zareza po milimetru, što je obezbeđivalo disperziju od  $\sim 100 \text{ \AA mm}^{-1}$  i spektralnu rezoluciju od  $\sim 8 \text{ \AA}$ . Snimljeni spektri sadrže  $H\beta$  liniju, snimljenu u periodu od 1976 do 1990 godine.

iv) Za dijagnostiku širokolinijske oblasti korišćeni su spektroskopski podaci srednje rezolucije dobijeni sa 2.1 metarskim teleskopom OAN/SPM (*Observatorio Astrónomico Nacional en San Pedro Mártir*) opservatorije (Baja California, Mexico). Galaksija Mrk 817 je posmatrana 06/07 Februara 2005. godine, i tada je "seeing" teleskopa bio  $1''$ . Posmatranja su obavljena sa Boler i Čivens (Boller & Chivens - B&Ch) spektrografom, koji je opremljen SITE 1k CCD kamerom,

postavljenom u Kasegrenovom fokusu, dajući tako razmeru od 1".1/px. Korišćen je otvor spektrografa širine 2".5 i difrakciona rešetka od 600 zareza/mm, postižući disperziju od 2 Å/px, tako da je efektivna instrumentala spektralna rezolucija bila  $\sim 4.5$  Å. Spektri su snimljeni u dve spektralne oblasti 3700 – 5900 Å i 5700 – 8000 Å.

Za obradu spektara prva dva i četvrtog seta podataka primenjene su standardne procedure obrade i kalibracije spektara uz pomoć programskog paketa IRAF, što je detaljnije opisano u sledećem poglavlju. Treći set je obrađen na Krimskoj astrofizičkoj opservatoriji (Popović et al. 1998, Doroshenko et al. 1999). Negativi spektara su prvo skenirani dvokoordinatnim mikrofotometrom, a onda je uz pomoć programskog paketa SPE (Sergeev & Heisberger 1993) odrađena obrada spektara. Crveni pomak galaksije Mrk 817 koji je korišćen pri obradi je  $z=0.03145$  (Straus & Huchra 1988, Véron-Cetty & Véron 2000).

v) U toku rada na ovoj magistarskoj tezi obavljeno je i nekoliko spektrofotometrijskih posmatranja pomoću 2 m Riči-Kretjen-Kude (Ritchey-Chrétien-Coudé) teleskopa na Nacionalnoj opservatoriji Rožen (HAO Рожен) u Bugarskoj. Posmatrački projekat je deo saradnje Astronomske opservatorije Beograd i Instituta za fiziku iz Sofije. Posmatranja su vršena u periodu januar 2004 - mart 2005. godine i planirano je da se nastavi sa projektom. Aktivna galaksija Mrk 817 je posmatrana pomoću pet uskih filtera: HeII  $\lambda 4686$ , [OIII]  $\lambda 5007$ , kontinuum  $\lambda 5755$ ,  $H_{\alpha}$   $\lambda 6563$ , [SII]  $\lambda 6734$ . Osnovni podaci o filterima (prečnik 45mm), kao što su centralna talasna dužina, optička propustljivost i širina filtera, nalaze se u Tabeli 8.

Tabela 8: Karakteristike uskih filtera korišćenih u posmatranjima na NAO Rožen.

$\lambda_c$ [nm]	$\tau_{\max}$ [%]	FWHM [nm]	Emisija
468.1	0.607	18.8	HeII, 4686
500.9	0.726	22.3	[OIII], 4959,5007
575.5	0.644	23.5	kontinuum
653.0	0.685	20.8	$H_{\alpha}$ , 6563
673.2	0.672	21.0	[SII], 6717, 6734

Ekvivalentna dužina fokusa 2 m Riči-Kretjen-Kude teleskopa je 16 m, a vidno polje je veličine jednog kvadratnog stepena, sa uveličanjem od 12".89/mm. U većini posmatranja je korišćena Photometrics AT200 CCD kamera, dimenzija  $1024 \times 1024$  px, gde je 1 px = 0".32, i vidnog polja  $5.45 \times 5.45$  lučnih minuta. Pri nekim posmatranjima je korišćen FoReRo instrument, koji razdvaja plavi i crveni deo spektra, i usmerava snop fotona na dve CCD kamere, pa je moguće u isto vreme posmatrati objekte pomoću dva filtera.

Posmatranja aktivne galaksije Mrk 817 navedena su u Tabeli 9. Posmatranja



Tabela 9: Tabela posmatranja galaksije Mrk 817 2m teleskopom na NAO Rožen.

$\alpha$ $\delta$	z	Datum posmatranja	Filter	Broj spektara	Ekspozicija (s)
14:36:20.5 +58:48:14.6	0.031455	16-Jan-04	HeII	2	1200
		16-Jan-04	[OIII]	2	1200, 1500
		16-Jan-04	Continuum	2	600

su obrađena korišćenjem osnovne procedure programskog paketa IRAF, za oduzimanje BIAS ekspozicija, FLATFIELD kalibracije i oduzimanja kosmičkih zraka.

## 5.2 Obrada podataka

Izdvajanje spektara iz snimaka CCD kamere i pripremanje spektara za dalju analizu oblika profila linija sastoji se iz više faza u kojima se koriste različiti programski paketi.

U prvoj fazi koristi se paket IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) koji je deo STARLINK kolekcije programa. Konkretno IRAF je razvijen od strane stručnjaka sa Nacionalne optičke astronomske opservatorije Kit Pik (*NOAO Kitt Peak*) i jedan je od paketa sa najopštijom namenom u astronomiji. Program sadrži osnovne procedure za redukciju i analizu optičkih astronomskih podataka, ali i aplikacije za obradu slika i grafika.

Sve detalje o ovom programskom paketu, uputstva, primere, rešenja problema, kao i potpuno besplatan programski paket mogu se naći na internet adresi <http://iraf.noao.edu> (Barners 1993).

U ovom slučaju na teleskopima opservatorije na Kanarskim ostrvima dobijene su slike spektara pomoću CCD kamere. Sirove CCD snimke je potrebno adekvatno obraditi i izdvojiti spektre galaksija. Sama obrada je dalje opisana u nekoliko osnovnih koraka. Svaki od koraka je moguće izvršiti na više različitih načina i uz pomoć drugih programskih paketa za obradu CCD snimaka. Ovde je opisan način na koji je obrađena galaksija Mrk 817.

**Prvi korak.** Uklanjanje početnog nivoa šuma koji se zove BIAS. S obzirom na to da on varira u zavisnosti od položaja teleskopa, vlažnosti, temperature i drugih uslova, neophodno je snimiti nekoliko BIAS ekspozicija u toku noći, koje se kasnije usrednjavaju i oduzimaju od svakog CCD snimka spektra, snimka kalibracione lampe i FLATFIELD ekspozicije. U IRAF programskom paketu za usrednjavanje BIAS snimaka koristi se procedura *zerocombine*, a za oduzimanje

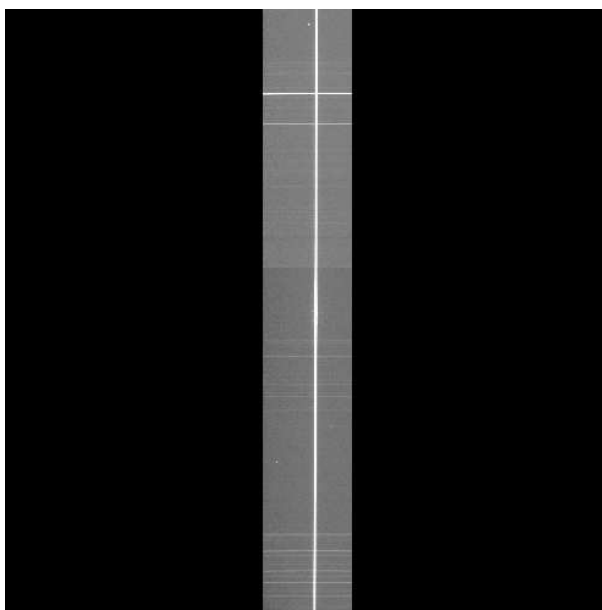
srednjeg BIAS-a od ostalih snimaka koristi se procedura *ccdproc*. Većina parametra u IRAF procedurama je već zadata i ne treba ih menjati, a ostale je lako zadati na osnovu uputa koji pišu pored svakog parametra. Međutim, u proceduri *ccdproc* treba voditi računa o parametru *trimsec*, koji nam govori o granicama korisnog snimka. U opštem slučaju krajevi svakog snimka se moraju odseći jer mogu praviti problem prilikom usrednjavanja FLATFIELD snimaka. Treba proceniti gde počinje korisna informacija i odseći isti deo kod svih snimaka spektara, kalibracionih lampi i FLATFIELD ekspozicija.

**Drugi korak.** Uklanjanje normalizovane slike ravnog polja teleskopa koja se zove FLATFIELD. To je veličina kojom treba podeliti sliku CCD-a, da bi se otklonile varijacije od piksela do piksela, kao i drastične promene intenziteta. U slučaju snimanja spektra dovoljno je snimiti više FLATFIELD ekspozicija, usrednjiti ih i normalizovati fitovanjem na neku srednju vrednost, a potom i oduzeti od CCD slika objekta. U IRAF-u se za to koriste procedure *flatcombine*, *response* i *ccdproc* respektivno. Bitno je napomenuti da je, za razliku od BIAS ekspozicija, potrebno snimiti FLATFIELD za svaku talasnu dužinu posebno.

**Treći korak.** Uklanjanje tragova koje kosmički zraci ostavljaju na CCD snimku prilikom dugih ekspozicija, kao što je slučaj sa ovim podacima. Najmanje dve CCD slike objekta se upoređuju i kombinuju, odstranjajući sve što prelazi domen zadatih parametara ili se ne pojavljuje na svim CCD slikama. Time se odstranjaju kosmički zraci koji imaju slučajnu raspodelu. U IRAF-u se za to koristi procedura *imcombine*. U ovom koraku moguće je, ako postoji potreba za tim, primeniti i operacije uklanjanja loših piksela koji postoje na samom CCD čipu. Odstranjivanje se vrši pravljenjem mapa loših piksela, koje se posle koriste kao maske za CCD snimke spektara i time se uklanjaju loši pikseli.

**Četvrti korak.** Kalibracija CCD snimaka spektara na talasne dužine. Da bi se uopšte mogle porediti slike objekta i kalibracione lampe, neophodno je da se na oba tipa CCD snimka primenjuju identične operacije. Prvo se identifikuju linije kalibracione lampe, vizuelnim upoređivanjem sa postojećim bazama laboratorijskih talasnih dužina odgovarajuće lampe. U IRAF-u se za to koriste procedure *identify*, *reidentify* i *fitcoord*. Zatim se obeleženi spektar kalibracione lampe primeni na slike objekta i dobijaju se slike kalibrisane na talasne dužine. Za to služi IRAF procedura *transform*.

**Peti korak.** Primenjivanje procedura koje iz površinskog spektra koji dobijamo CCD kamerom izdvajaju jednodimenzioni spektar. Svaki CCD snimak može imati jedan ili više spektara postavljenih duž linija ili duž kolona koji čine jednu aperturu. Ti spektri ne moraju biti strogo paralelni pravcima linija ili kolona, tako da je potrebno izvršiti praćenje linije koja, normalno na pravac disperzije, prati pravac spektra. Ovaj korak u obradi se zove "sinteza apertura" i može biti poprilično složen jer zavisi od oblika spektralnog uređaja (npr. broj apertura je veći od jedan u slučaju spektrografa tipa "echelle"). U slučaju kompjuterskog

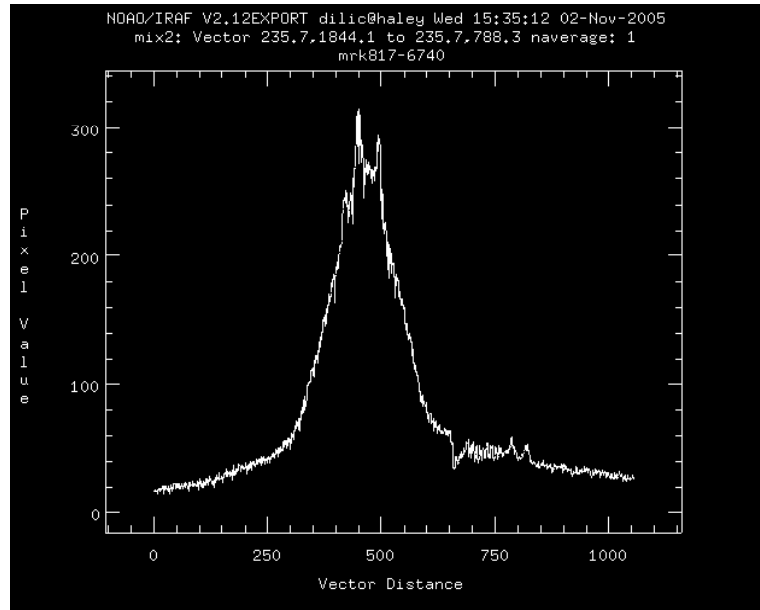


Slika 21: Obradeni CCD snimak spektra galaksije Mrk 817.

programa IRAF ovaj korak je dosta automatizovan procedurom *apall* pri čijoj primeni je jedino potrebno precizno definisati parametre kao što su broj i širina apertura, tip funkcije kojom se fituje linija praćenja aperture spektra i drugi.

Ovim korakom se završava jedna faza obrade spektara. Sledeći koraci zavise od samog zadatka istraživanja. Konkretno u ovom slučaju, budući da se proučava oblik spektralnih linija, nije potrebno vršiti kalibraciju na apsolutnu vrednost fluksa, ali je neophodno od linija oduzeti nivo kontinuuma. To je urađeno pomoću programskog paketa DIPSO, koji je takođe deo STARLINK kolekcije programa. DIPSO je programski paket koji sadrži veoma korisne procedure za primenu u spektroskopiji. Sve informacije o njemu mogu se naći na internet adresi <http://www.starlink.ac.uk>. Oduzimanje kontinuuma se vrši tako što se prvo lokalni kontinuum fituje polinomom N-tog reda i onda oduzme od spektra. Pomoću ovog programa moguće je vrlo lako svesti talasne dužine spektralnih linija na laboratorijske vrednosti, deljenjem sa faktorom  $(z + 1)$ , gde je  $z$  kosmološki crveni pomak objekta. U slučaju galaksija izvan lokalne grupe to je neophodno uraditi jer njihov crveni pomak nije zanemarljiv. Takođe je potrebno normalizovati intenzitete spektralnih linija, što je isto urađeno u DIPSO programu. Obično se linije normiraju tako da intenziteta bude jednak jedinici, dok je u slučaju proučavanja promenljivosti  $H\beta$  linije, fluks normalizovan pomoću [OIII]  $\lambda 5007$  emisione linije, kod koje (kao što je ranije rečeno) ne postoje značajne promene u fluksu za period od nekoliko desetina godina.

Često se dešava da proučavamo spektre različite rezolucije, što je i ovde slučaj, jer imamo spektre rezolucije 1, 2.9 i 8 Å. Da bismo poredili ove spektre dobijene



Slika 22: Primer izdvojenog linijskog spektra -  $H\alpha$  linija galaksije Mrk 817.

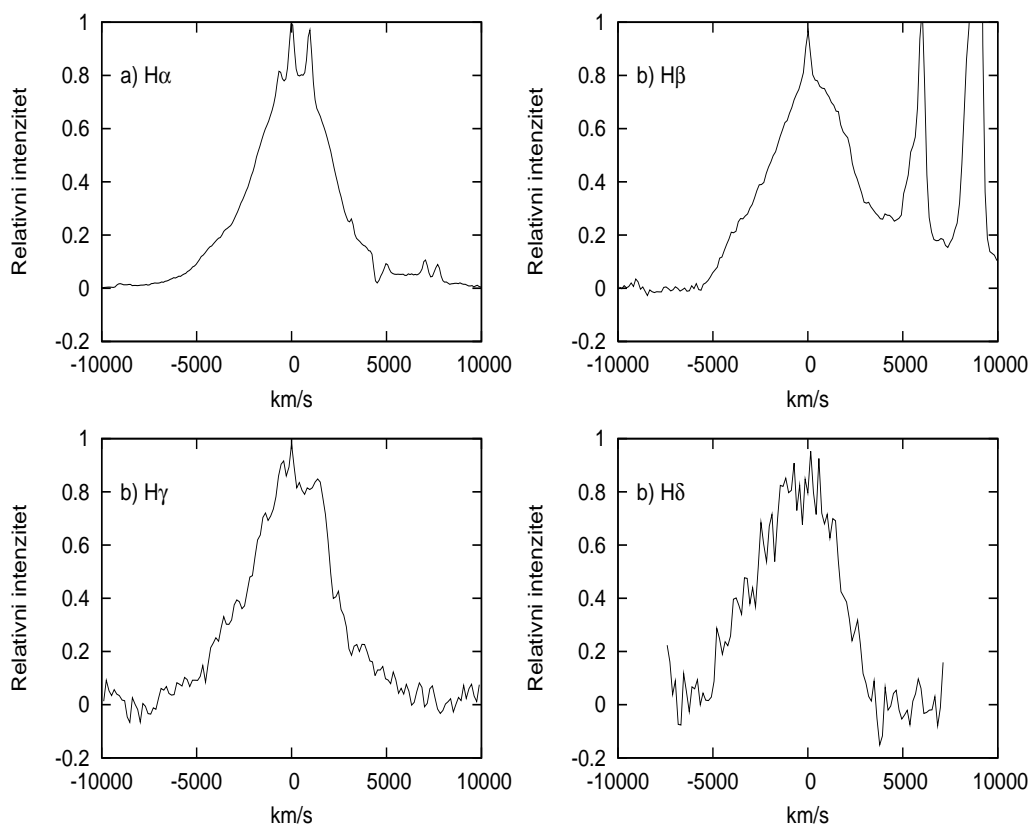
različitim instrumentima, potrebno je svesti ih na istu rezoluciju. To se može vrlo lako izvesti filtriranjem pomoću Gausijana. U okviru programa DIPSO postoje procedure pomoću kojih je moguće fitovati funkciju Gausijanom (procedure *elfinp* i *elfopt*) i izvršiti filtriranje Gausijanom (procedura *sm*). Pri filtriranju treba voditi računa o izboru širine filtra, odnosno Gausijana<sup>27</sup>. Ukoliko profil linije širine  $\sigma_1$  treba da se svede na profil širine  $\sigma_2$ , Gausijan kojim se filtrira spektar treba da ima širinu  $\sigma_g = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_2^2}/2.354$ .

Ovim smo pripremili spektre za dalju detaljniju analizu spektralnih linija.

<sup>27</sup>Gausova funkcija je data kao  $e^{-\frac{1}{2}(\frac{\Delta\lambda}{\sigma})^2}$ , gde je FWHM= 2.354  $\sigma$ .

## 6 Analiza spektara i osobine emisionih oblasti aktivne galaksije Mrk 817

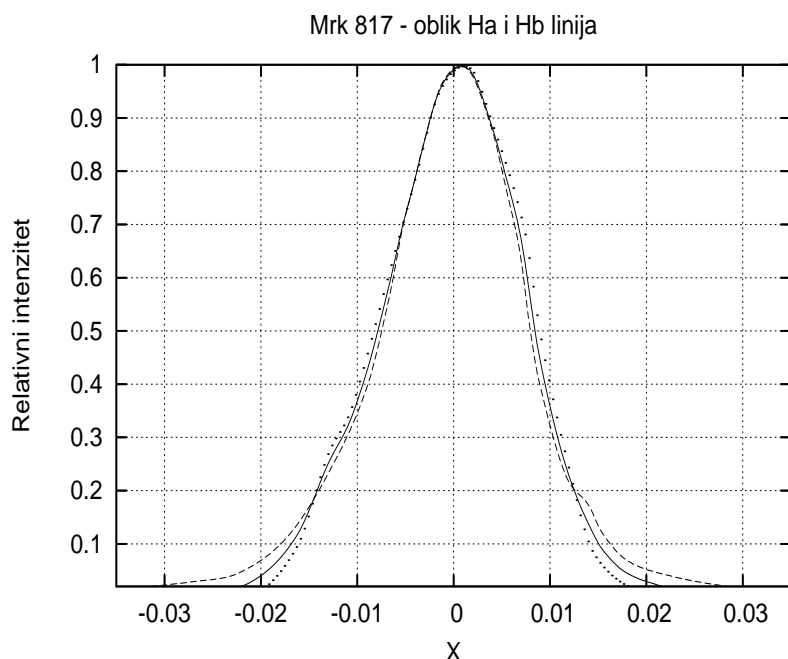
Pomoću proučavanja spektara aktivnih galaktičkih jezgara mogu se efikasno i pouzdano odrediti kinematičke i fizičke karakteristike emisionih oblasti ovih objekata. S obzirom na veliku udaljenost galaksija koje sadrže aktivno jezgro, kao i zbog velike luminoznosti jezgra, spektroskopija je često i jedini metod proučavanja struktura emisionog gasa u samom jezgru. U ovom delu biće detaljnije opisane pojedinačne metode i rezultati spektroskopskih proučavanja aktivnog jezgra galaksije Mrk 817.



Slika 23: Emisione linije Balmerove serije kod Mrk 817: H $\alpha$ , H $\beta$ , H $\gamma$  i H $\delta$  linije. Relativni intenzitet emisionih linija je normiran na jedinicu, dok su širine emisionih linija date u km s $^{-1}$ .

Na slici 23 date su četiri najsnažnije linije Balmerove serije proučavanog aktivnog galaktičkog jezgra, snimljene na opservatoriji u Meksiku. Prikazane široke emisione linije su normirane na jedinicu, a širine su izražene u km s $^{-1}$ . Jasno se

vidi da su na široke linije superponirane uske linije, koje se formiraju u uskolinijskoj oblasti. Pomoću širokih linija ispituju se osobine širokolinijskog regiona. Oblik njihovog profila je sličan, što ukazuje na to da se formiraju u istoj oblasti. Tome u prilog ide i činjenica da su širine ovih linija na polovini maksimalnog intenziteta približno iste. Na slici 24 su prikazani profili širokih  $H\alpha$  i  $H\beta$  emisijonih linija. Linije su očišćene od uskih linija i normirane na jedinicu, a osa talasnih dužina je pretvorena u skalu  $X = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ , što je jednostavno urađeno pomoću programskog paketa za analizu spektara DIPSO. Na slici je prikazan i njihov usrednjen profil čija je FWHM  $\sim 4900 \text{ km s}^{-1}$ , a FWZI  $\sim 12900 \text{ km s}^{-1}$ , koje se malo razlikuju od vrednosti dobijenih pojedinačno za  $H\alpha$  i  $H\beta$  linije.



Slika 24: Poređenje normalizovanih profila emisijonih linija  $H\alpha$  (isprekidana linija) i  $H\beta$  (tačkice) sa usrednjenim profilom (puna linija) u funkciji od  $X = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ .

## 6.1 Karakteristike BLR: Bolcmanov plot

Kao što je već detaljno opisano u Poglavlju 3.4, širokolinijska oblast je po svojim karakteristikama i strukturi komplikovanija nego uskolinijska oblast. Kao prvo, za razliku od NLR, u BLR nastaju samo linije iz dozvoljenih prelaza, tako da nije moguće odrediti fizičke uslove unutar BLR na osnovu odnosa zabranjenih linija (npr. [OIII] ili [NII] linija), jer su fizički uslovi takvi da se ne formiraju

zabranjene linije. Prirodno je iskoristiti vodonikove linije, budući da su izuzetno intenzivne, i na osnovu odnosa njihovih flukseva odrediti elektronsku temperaturu i koncentraciju uz pomoć Bolcmanovog plotu<sup>28</sup>. Da bi se primenio Bolcmanov plot potrebno je uzeti linije iz iste spektralne serije. U ovom radu su korišćene vodonikove linije Balmerove serije:  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $H\gamma$ ,  $H\delta$  i  $H\epsilon$ . Pre merenja ukupnog fluksa u liniji potrebno je oduzeti kontinuum, kao i očistiti uske i satelitske linije. Odnosi flukseva Balmerovih linija su dati u Tabeli 10. Fluks  $H\beta$  linije je dat u relativnim jedinicama. Greške su procenjene kao zbir grešaka usled oduzimanja kontinuumu ( $\sim 10\%$ ) i grešaka samog merenja fluksa. Greške usled oduzimanja uskih i satelitskih linija su takođe prisutne, ali ulaze u opseg gore pomenutih grešaka.

Tabela 10: Odnos flukseva Balmerovih linija u slučaju AGJ Mrk 817: (a) izmerene vrednosti; (b) popravljene vrednosti za uticaj sopstvenog pocrvenjenja.

	$F_{H\alpha}/F_{H\beta}$	$F_{H\gamma}/F_{H\beta}$	$F_{H\delta}/F_{H\beta}$	$F_{H\epsilon}/F_{H\beta}$	$F_{H\beta}$
(a)	$3.088 \pm 0.722$	$0.445 \pm 0.116$	$0.187 \pm 0.048$	$0.079 \pm 0.026$	$(3.247 \pm 0.375)E-13$
(b)	$2.421 \pm 0.566$	$0.484 \pm 0.126$	$0.212 \pm 0.054$	$0.091 \pm 0.030$	$(3.247 \pm 0.375)E-13$

Na odnos Balmerovih linija, a samim tim i na elektronsku temperaturu i koncentraciju koja se određuje Bolcmanovim plotom, utiče i efekat pocrvenjenja. Uticaj Galaktičkog pocrvenjenja je u pravcu galaksije Mrk 817 zanemarljiv, dok je uticaj unutrašnjeg pocrvenjenja znatno veći i iznosi  $E(B-V)=0.22$  (Cohen 1983). Popravljene vrednosti fluksa  $F'(\lambda)$  usled efekta sopstvenog pocrvenjenja su takođe date u Tabeli 10. a izračunate su na osnovu relacije<sup>29</sup>

$$\log(F'(\lambda)) = \log(F(\lambda)) + Cf(\lambda)$$

gde je mera količine pocrvenjenja  $C$  određena iz  $E(B-V) = 0.77C$  a za  $f(\lambda)$  je uzeta kriva srednje ekstinkcije data u knjizi Osterbroka (Osterbrock 1989).

Na slici 25 je prikazan Bolcmanov plot primenjen na flukseve Balmerovih linija, određene sa i bez uticaja pocrvenjenja. U oba slučaja odnosi flukseva se fituju pravom linijom. Jedina razlika je što efekat pocrvenjenja povećava temperaturu dobijenu ovom metodom. Elektronska temperatura se lako određuje kada se odredi koeficijent pravca  $A$ , pomoću relacije (Popović 2003):

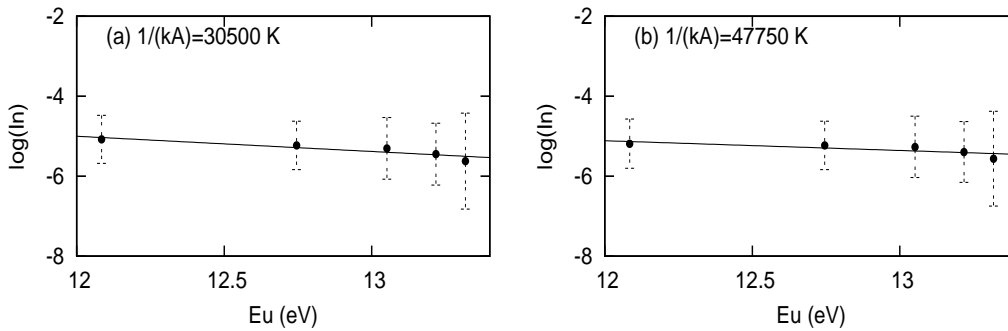
$$T_e = \frac{11605}{A} \text{K.}$$

U slučaju AGJ Mrk 817 dobija se da je temperaturski koeficijent  $A = 0.381$ , a elektronska temperatura  $T_e = 30478$  K, odnosno  $A = 0.244$  i  $T_e = 47561$  K

<sup>28</sup>Detaljnije objašnjeno u Poglavlju 3.4.

<sup>29</sup>Metod korekcije fluksa linija usled efekta pocrvenjenja je opisan u Poglavlju 2.4.

kada se uzme u obzir i efekat sopstvenog pocrvenjenja. Na osnovu Bolcmanovog plota sledi da se plazma u širokolinijskoj oblasti barem delimično nalazi u PLTE, bez obzira da li se uzima u obzir uticaj sopstvenog pocrvenjenja ili ne (slika 26). Ukoliko razmatramo temperaturski parametar dobijen iz odnosa nepopravljenih vrednosti flukseva, dobija se  $A > 0.3$ , što prelazi granicu za slučaj plazme za koju važi rekombinacija B-tipa ( $A = 0.2$ ), ali prelazi i granicu  $A = 0.3$  koja važi za slučaj B-tipa rekombinacije i uračunatog efekta sopstvenog pocrvenjenja (slika 26). Dakle, deo plazme unutar BLR se nalazi u delimičnoj lokalnoj ravnoteži.

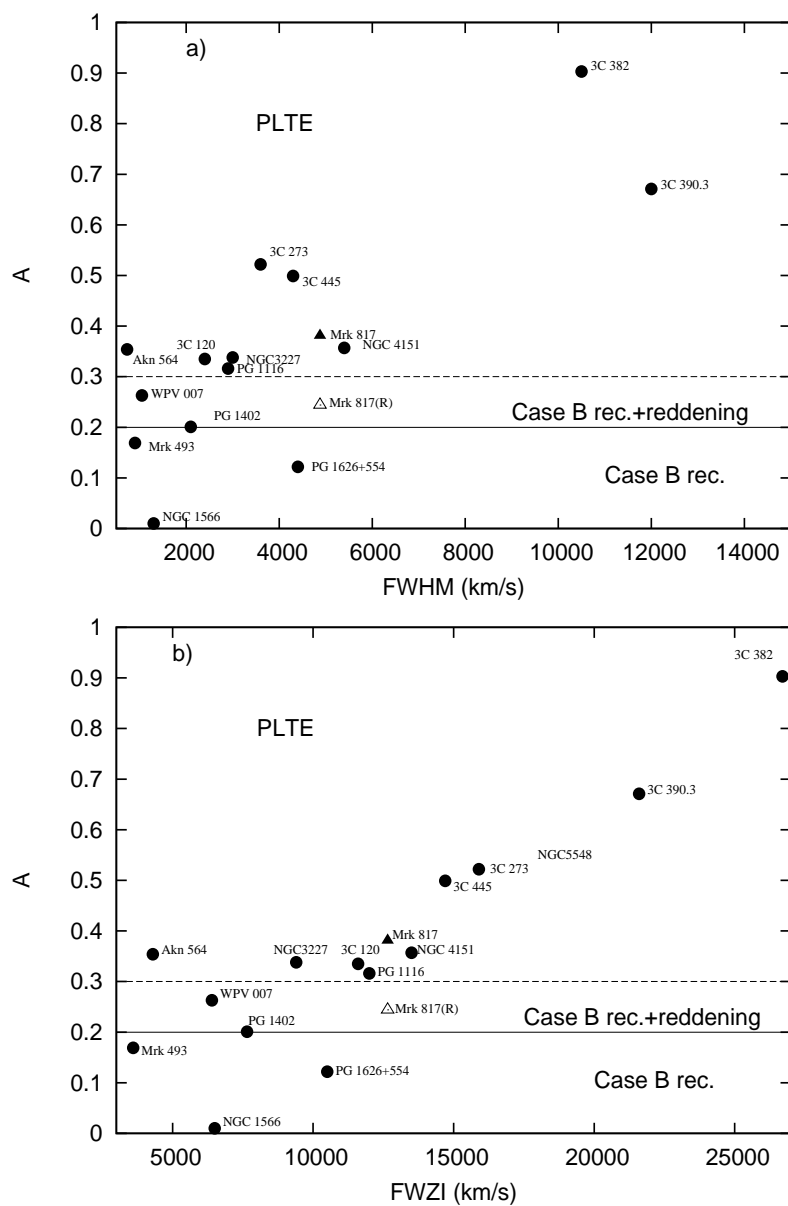


Slika 25: Bolcmanov plot primenjen na Balmerove linije aktivne galaksije Mrk 817, bez i sa uticajem sopstvenog pocrvenjenja (grafik (a) i (b) respektivno). Odgovarajuće temperature, odnosno  $1/(kA)$ , su date u gornjem levom uglu grafika.

Elektronska koncentracija BLR može se proceniti na osnovu relacija izvedenih u Poglavlju 3.4. Ukoliko se uzme slučaj  $H\alpha$  linije, dobija se da je minimalna elektronska koncentracija BLR u slučaju optički retke sredine  $N_e \sim 10^{14}$  (na osnovu relacije  $N_e \sim 7 \times 10^{18} z^6 n_c^{-17/2} (kT_e/E_H)^{1/2} \text{ cm}^{-3}$ ), dok je u slučaju optički guste plazme elektronska koncentracija u stvari izračunata vrednost skalirana za faktor  $N_{\text{esc}}$ , koji zavisi od optičke dubine, pa je elektronska koncentracija u opsegu  $N_e \sim 10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ , u zavisnosti od vrednosti koja se uzme za optičku dubinu  $H\alpha$  linije. Ovi rezultati su u skladu sa drugim rezultatima dobijenim za širokolinijsku oblast (Peterson 1997, Osterbrock 1989).

Kako bi se ispitala zavisnost brzina čestica u BLR od fizičkih uslova (u ovom slučaju parametra  $A$ , odnosno elektronske temperature) izmerene su FWHM i FWZI srednjeg profila širokih  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija. Izmerene vrednosti za AGJ Mrk 817 su dodate na grafik zavisnosti  $A = f(\text{FWHM}, \text{FWZI})$  uzorka od 15 AGJ (slika 26). U oba slučaja, i sa i bez uticaja sopstvenog pocrvenjenja (na grafiku obeleženo indeksom (R)), rezultati se dobro slažu sa rezultatima dobijenim za ostale aktivne galaksije date u radu Popović (2003). Na grafiku se jasno vidi da temperaturski parametar  $A$  raste sa brzinom, specijalno u slučaju brzine merene



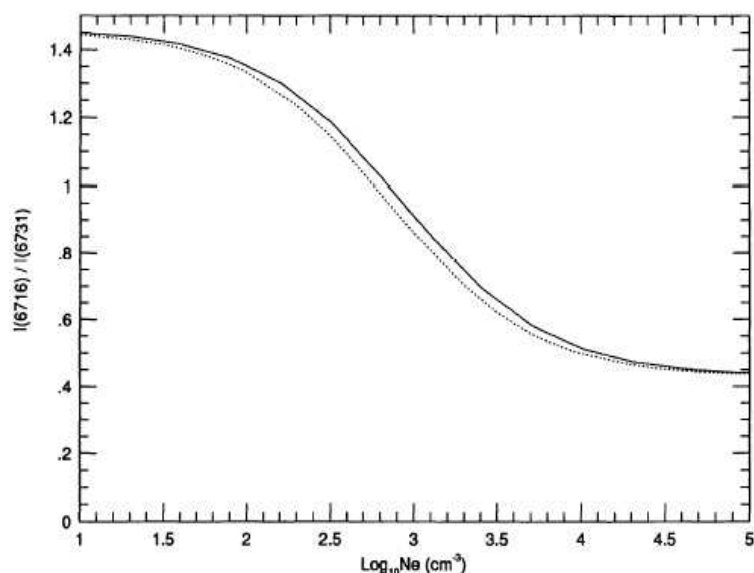


Slika 26: Parametar  $A$  dobijen za set od 14 AGJ (Popović 2003) u funkciji brzina merenih na (a) polovini maksimalnog intenziteta (FWHM) i (b) nultom intenzitetu (FWZI). Vrednosti za  $A = 0.2$  i  $A = 0.3$  su prikazane punom, odnosno isprekidanom linijom. Merenja parametra  $A$  za Mrk 817 dodata su i označena punim trouglom, odnosno praznim trouglom i indeksom (R), u slučaju kada je uračunat uticaj sopstvenog pocrvenjenja.

na FWZI, kada je ta funkcija skoro linearna. Takođe, iz razlike u zavisnosti temperaturnog parametra  $A$  od FWHM i od FWZI sledi da je BLR kompleksna oblast, odnosno da se fizički uslovi u oblasti gde se formira jezgro linije razlikuju od uslova u oblasti gde se formiraju krila linije.

## 6.2 Osobine NLR: elektronska temperatura i koncentracija

Procena temperature i gustine u uskolinijskoj oblasti je znatno lakša jer se mogu primeniti iste metode kao i kod emisionih maglina, budući da su uslovi koji vladaju u obe sredine slični, odnosno u oba slučaja prisutne su zabranjene emisione linije<sup>30</sup>.



Slika 27: Odnos [SII]  $\lambda\lambda 6716, 6731$  linija u funkciji elektronske gustine (puna linija). Vrednosti su date za elektronsku temperaturu  $T_e = 10^4 \text{K}$  (Cai & Pradhan 1993).

Kriva zavisnosti odnosa [SII] linija na  $\lambda 6716$  i  $\lambda 6731$  od elektronske koncentracije u opsegu  $10^2 \text{ cm}^{-3} \lesssim N_e \lesssim 10^4 \text{ cm}^{-3}$  može se predstaviti u obliku (Osterbrock 1989)

$$\frac{F([\text{SII}]\lambda 6716)}{F([\text{SII}]\lambda 6731)} \sim \frac{1}{N_e}$$

i data je na slici 27. Merenjem odnosa flukseva ovih linija može se, pomoću prikazanog grafika, grubo proceniti elektronska koncentracija u NLR. Odnos fluk-

<sup>30</sup>Detalji o ovom metodu opisani su u Poglavlju 2.4.

seva  $[SII] \lambda 6716/[SII] \lambda 6731$  slabo zavisi i od elektronske temperature  $\sim T_e^{1/2}$ . Pri ovoj proceni korišćena je vrednost  $T_e = 10^4$  K, kao najverovatnija vrednost NLR temperature. Fluksevi ovih linija su određeni uz pomoć programskog paketa DIPSO i dati su u Tabeli 11. Greške su procenjene kao zbir grešaka usled oduzimanja kontinuuma ( $\sim 10\%$ ) i grešaka samog merenja fluksa.

Tabela 11: Fluksevi uskih linija aktivne galaksije Mrk 817. Vrednosti su podeljene sa  $10^{15}$  i date su u relativnim jedinicama.

Linija	[SII] $\lambda 6716$	[SII] $\lambda 6731$	[NII] $\lambda 5755$	[NII] $\lambda 6548$	[NII] $\lambda 6583$
Fluks	$4.635 \pm 0.589$	$4.421 \pm 0.646$	$0.463 \pm 0.159$	$5.438 \pm 1.014$	$17.873 \pm 1.887$

Odnos flukseva ovih uskih linija sumpora iznosi

$$\frac{F([SII]\lambda 6716)}{F([SII]\lambda 6731)} = 1.048.$$

Dalje, na osnovu pomenute krive zavisnosti izračunate na osnovu atomskih podataka (Cai & Pradhan 1993), sa grafika se dobija da elektronska koncentracija u NLR iznosi  $N_e \approx 0.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ . Ova vrednost za  $N_e$  je u skladu sa prethodnim rezultatima dobijenim za uskolinijski region (Osterbrock 1989, Peterson 1997).

Određivanje elektronske temperature može se vršiti na osnovu odnosa flukseva zabranjenih [NII] linija na  $\lambda 6548$ ,  $\lambda 6583$  i  $\lambda 5755$ , uz pomoć izraza

$$\frac{F([NII]\lambda 6548) + F([NII]\lambda 6583)}{F([NII]\lambda 5755)} = \frac{6.91 \times e^{(2.5 \times 10^4)/T_e}}{1 + 2.5 \times 10^{-4}(N_e/T_e^{1/2})}.$$

Fluksevi ovih linija su dati u Tabeli 11., a greška je računata kao i kod [SII] linija. Na osnovu vrednosti fluksa uskih linija azota i gore navedene relacije dobija se da je elektronska temperatura u NLR  $T_e = 12568$  K što se slaže sa ranijim istraživanjima (Osterbrock 1989, Peterson 1997).

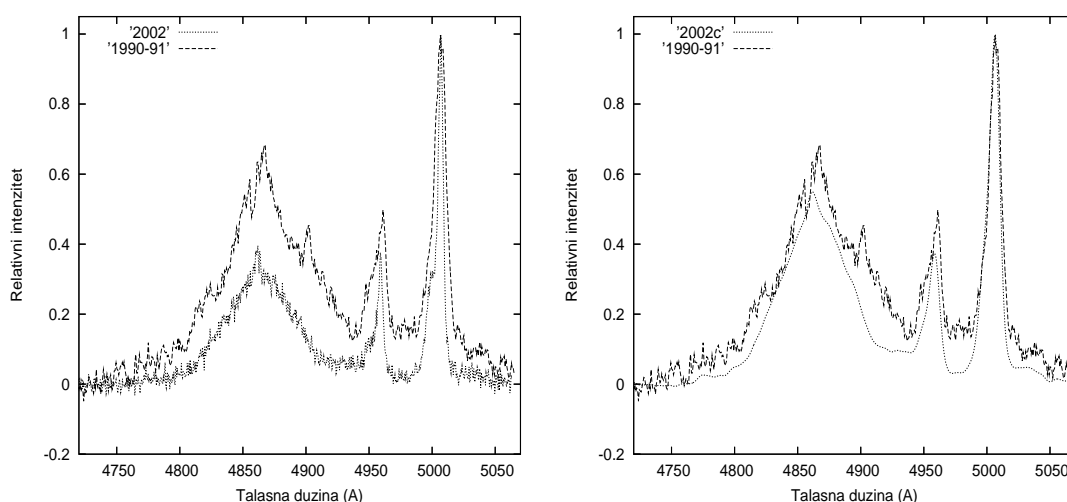
### 6.3 Analiza promene fluksa i oblika profila $H\beta$ linije

$H\beta$  linija je posmatrana u više navrata različitim teleskopima. U Tabeli 12. dati su osnovni podaci o posmatranjima: naziv teleskopa, spektralna rezolucija i datum posmatranja. Posmatranja vršena teleskopom Krimске opservatorije (CrAO) su usrednjena u određenom vremenskom periodu i dalje u tekstu su razmatrani

odgovarajući usrednjeni profili  $H\beta$  linije (slika 28 (levo)). Navedeni spektri su različite rezolucije pa je za upoređivanje profila  $H\beta$  linije neophodno svesti spektre na istu rezoluciju. Pre svodjenja, svi spektri su normirani na  $[OIII] \lambda 5007$  liniju, kako bi se bolje uočila promena intenziteta  $H\beta$  linije.

Tabela 12: Posmatranja  $H\beta$  linije.

Teleskop	Rezolucija [ $\text{\AA}$ ]	Period posmatranja
CrAO	8	1978-1979
CrAO	8	1982-1983
CrAO	8	1984
CrAO	8	1990-1991
INT	1	Januar 2002
OAN/SPM	4.5	Februar 2005

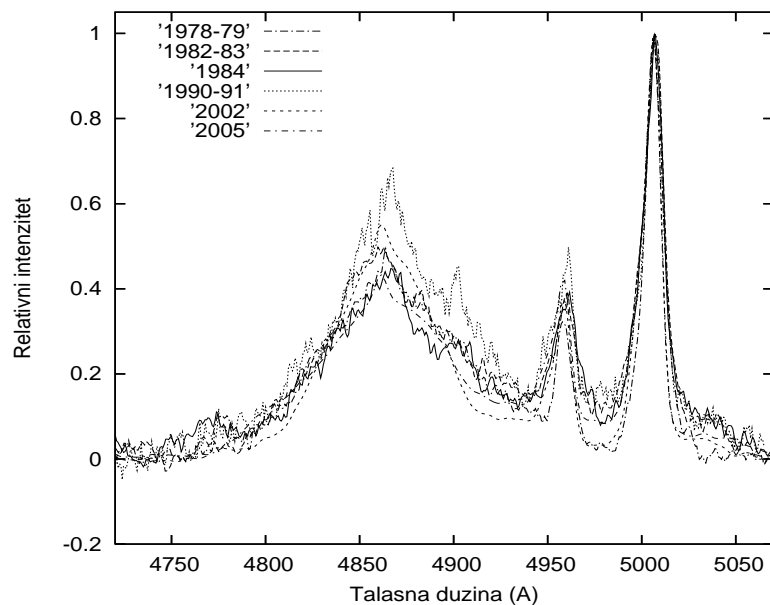


Slika 28: Profili  $H\beta$  linije snimljeni sa CrAO (isprekidana linija) i INT (tačkasta linija) teleskopom. Levo su predstavljeni originalni spektri, a desno su svedeni na istu rezoluciju. Profili su normalizovani na usku  $[OIII] \lambda 5007$  liniju.

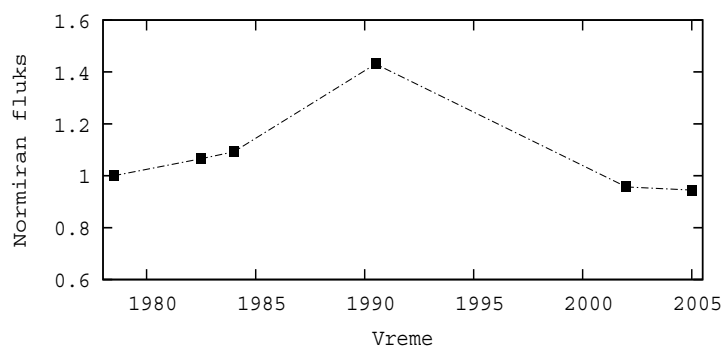
Rezolucija spektara dobijenih CrAO teleskopom je znatno manja od rezolucije spektara dobijenih na Kanarskim ostrvima (INT teleskop). Zbog toga je potrebno smanjiti rezoluciju tog spektra, što je postignuto filtriranjem Gausovom funkcijom, pomoću procedura iz DIPSO programskog paketa. Na slici 28 (desno) prikazan je INT i CrAO profil  $H\beta$  linije, nakon što je INT spektar sveden na rezoluciju CrAO spektra<sup>31</sup>. Ista procedura je urađena i za spektar dobijen u

<sup>31</sup>Kako su na CrAO dobijene 4 grupe spektara koje se neznatno razlikuju, za širinu profila linije, na koju treba svesti ostale spektre, je uzeta širina usrednjenog profila  $[OIII] \lambda 5007$  linija.

Meksiku (OAN/SPM teleskop).



Slika 29: Svi profili  $H\beta$  linija. U gornjem levom uglu su date oznake odgovarajućih spektara.



Slika 30: Relativna promena fluksa  $H\beta$  linije u toku perioda od 27 godina. Fluks je normalizovan na prva posmatranja  $H\beta$  linije iz 1978-79. godine.

Na slici 29 su prikazani svi spektri iz Tabele 12. Evidentno je da postoji razlika u fluksu  $H\beta$  linije. Zato je izmeren fluks za svaki od spektara uz pomoć astronomskog programskog paketa DIPSO. Promena fluksa  $H\beta$  linije sa vremenom

je predstavljena na slici 30, gde se vidi da fluks  $H\beta$  linije raste od 1978. do 1991. godine, a onda brže opada do 2005. godine. Promene u fluksu širokih linija su posledica promene zračenja u kontinuumu. Sa grafika se vidi da u jednom velikom intervalu nema drastične promene u fluksu  $H\beta$  linije, kao npr. u slučaju aktivne galaksije NGC 5548 (Shapovalova et al. 2004), odnosno BLR kod Mrk 817 je relativno stabilan.

## 6.4 Dekompozicija profila na Gausove funkcije

U cilju određivanja kinematičkih osobina aktivne galaksije Mrk 817 analiziran je oblik emisionih linija. U tu svrhu korišćeni su spektri visoke rezolucije, snimljeni na opservatoriji na Kanarskim ostrvima, koji sadrže linije Balmerove spektralne serije:  $H\alpha$  i  $H\beta$  linije<sup>32</sup>. Prvi korak u analizi emisionih linija je fitovanje profila pomoću sume Gausovih funkcija. Fizički je opravdano fitovati liniju Gausovom funkcijom ukoliko parametri te funkcije odgovaraju realnim brzinama gasa koje može imati sredina gde se linija formira. Kako se ovde vrši dekompozicija na više Gausijana, pretpostavka je da više oblasti sa različitim kinematičkim svojstvima doprinosi formiranju linije. Detaljna procedura dekompozicije Balmerovih linija na Gausijane može se naći u radovima (Popović et al. 2001, 2002, 2003, 2004).

U ovoj proceduri traži se najmanji broj Gausijana potrebnih da se dobije zadovoljavajući fit profila linije. Postupak se sastoji u primeni  $\chi^2$  minimalizacionog postupka za dobijanje parametara najboljeg fita. Kako je broj slobodnih parametara veliki, zbog korišćenja više Gausovih funkcija pri fitovanju, zadato je nekoliko početnih pretpostavki baziranih na atomskim parametrima pojedinih linija. Takođe, pretpostavka je da se široke linije sastoje od više Gausijana, ali i da se uske linije mogu fitovati jednom ili više Gausovih funkcija. Fitovani spektri su jako visoke rezolucije pa je asimetrija u uskim linijama, pre svega u [OIII] linijama, izrazito vidljiva. U tom slučaju fit sa samo jednim Gausijanom je nezadovoljavajući. Svrha ove analize je da se nađe najbolji fit kako bi se oduzele satelitske i uske linije od  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija, tako da ostaju samo komponente iz širokolinijske oblasti.

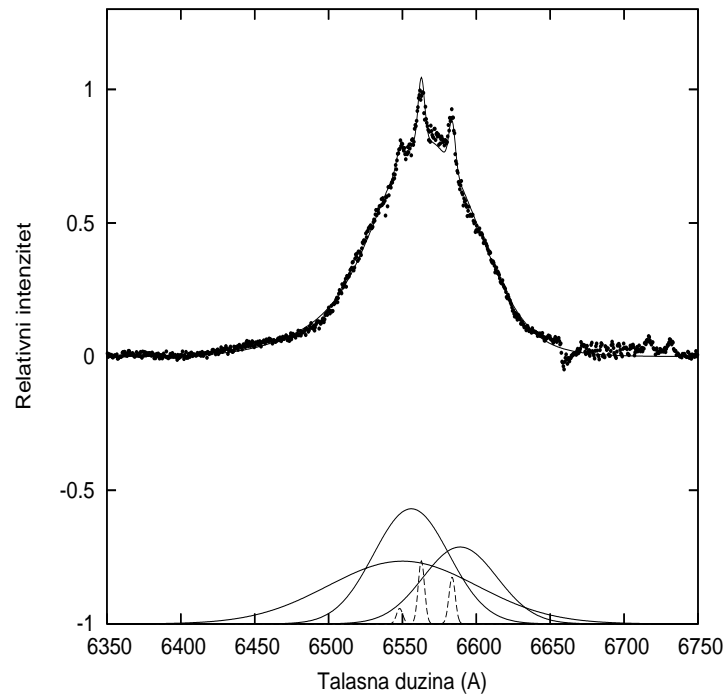
### 6.4.1 Metod fita na Gausove funkcije: osnovne pretpostavke

Kako je Mrk 817 klasifikovana kao aktivna galaksija tipa Sejfert 1.5, bilo je očekivano da su pored širokih Balmerovih linija prisutne i uske linije, koje su

---

<sup>32</sup> $H\gamma$  linija nije analizirana zbog velikog nivoa šuma.

superponirane na široke. Pored njih, i kod  $H\alpha$  i  $H\beta$  linije javljaju se satelitske uske linije, [NII] i [OIII] respektivno. Za sve uske linije poznato je da nastaju u istoj oblasti. Ta uskolinijska oblast se nalazi relativno daleko od centra i samim tim je stabilna, tj. promene u ovim linijama se dešavaju na vremenskoj skali od stotinu godina. Emiteri se unutar te oblasti kreću manjim brzinama nego u oblasti koja je bliža centru. Kako je oblast i dovoljno velika, kreće se zajedno sa celom galaksijom, odnosno pomaci uskih linija najčešće odgovaraju kosmološkom crvenom pomaku AGJ (Ilić et al. 2003).



Slika 31: Dekompozicija  $H\alpha$  linije na Gausove funkcije. Tačkasta linija predstavlja posmatranja a puna linija predstavlja najbolji fit dobijen dekompozicijom na Gausijane. Na dnu su prikazane Gausove komponente. Uske isprekidane linije odgovaraju uskoj  $H\alpha$  i [NII] linijama.

Pri fitovanju  $H\alpha$  linije uzete su sledeće početne pretpostavke:

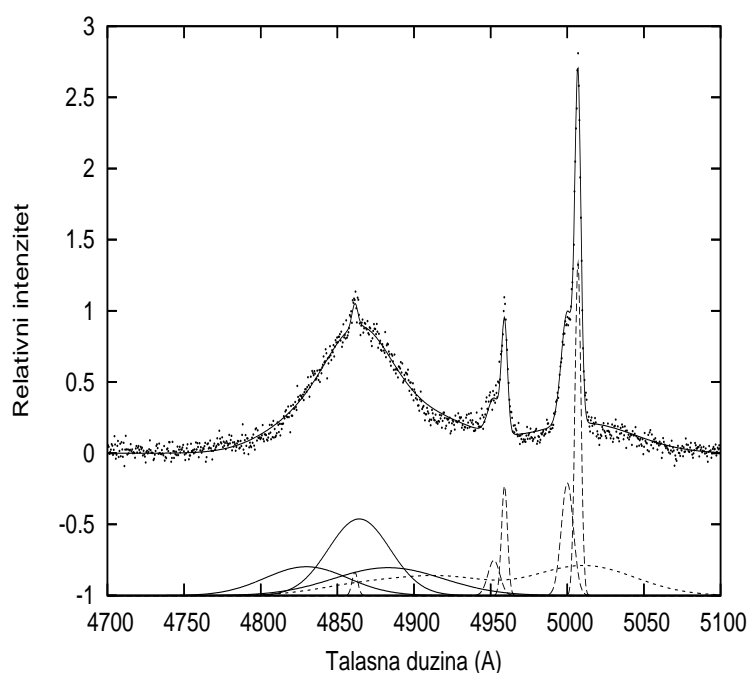
1. Za uske [NII]  $\lambda\lambda 6548,6583$  linije i usku  $H\alpha$  komponentu je uzet isti crveni pomak. Takođe, širine Gausovih funkcija su uzete da su proporcionalne njihovoj talasnoj dužini

$$\frac{W_{H\alpha}}{6563} = \frac{W_{[NII]\lambda 6548}}{6548} = \frac{W_{[NII]\lambda 6583}}{6583}.$$

Širina na polovini maksimalnog intenziteta linije (FWHM) je povezana sa

širinom Gausovog profila kao  $\text{FWHM} = 2W\sqrt{\ln 2}$ . Ove uske linije su fitovane samo jednim Gausijanom.

2. Ako se uzme u obzir da [NII]  $\lambda\lambda 6548,6583$  linije pripadaju istom multipletu, onda je odnos njihovih intenziteta 1:2.96.
3. Prisutne su i FeII linije u okolini  $H\alpha$  linije: FeII  $\lambda 6456.385$  (blizu plavog krila) i FeII  $\lambda 7308.065$  (blizu crvenog krila). Međutim, njihov doprinos profilu  $H\alpha$  linije je beznačajan jer je pokazano da kod AGJ sa jakom emisijom gvožđa u okolini  $H\beta$  linije postoji slaba FeII emisija u opsegu  $H\alpha$  linije (Halpern & Oke 1987), što je slučaj i sa ovim AGJ.



Slika 32: Isto kao na slici 31 samo u slučaju  $H\beta$  linije. Isprekidane linije na dnu slike odgovaraju FeII multipletu, [OIII] linijama i uskoj  $H\beta$  liniji.

Kod  $H\beta$  linije uzete su sledeće početne pretpostavke:

1. Gausove funkcije koje opisuju uske [OIII]  $\lambda\lambda 4959,5007$  linije i usku  $H\beta$  komponentu su fiksirane na isti crveni pomak. Takođe, širine Gausovih funkcija su uzete da su proporcionalne njihovoj talasnoj dužini

$$\frac{W_{H\beta}}{4861} = \frac{W_{[OIII]\lambda 4959}}{4959} = \frac{W_{[OIII]\lambda 5007}}{5007}.$$

Širina na polovini maksimalnog intenziteta linije (FWHM) je povezana sa širinom Gausovog profila kao  $\text{FWHM} = 2W\sqrt{\ln 2}$ .



2. Odnos intenziteta [OIII]  $\lambda\lambda 4959,5007$  linija je uzet da je 1:3.03.
3. U fit je uključen i širok profil, tzv. šelf, multiplleta gvožđa. FeII uzorak se sastoji od devet FeII linija (talasne dužine od 4855.5 Å do 5018.4 Å), koje pripadaju multipletu 25, 36 i 42 (Korista 1992). Relativni intenziteti ovih linija su preuzeti iz rada Koriste (1992), a dodatna pretpostavka je da FeII linije nastaju u istoj oblasti kao i široke linije, da imaju isti crveni pomak i da su njihove širine proporcionalne talasnoj dužini.
4. Kako [OIII]  $\lambda\lambda 4959,5007$  linije imaju izdužena krila nije ih bilo moguće fitovati samo sa jednim Gausijanom. Zato su u fit uključena još dva Gausijana, za koje isto važi pretpostavka 2 (vidi sliku 32).

#### 6.4.2 Rezultati analize pomoću više Gausijana

Na osnovu dekompozicije na Gausijane može se izvesti nekoliko zaključaka o širokim i uskim linijama, odnosno o BLR i NLR. Rezultati fita za  $H\alpha$  i  $H\beta$  linije su dati na slici 31 i 32, respektivno i u Tabeli 13. Ove linije su razložene na široku komponentu koja se sastoji od tri Gausijana i na usku komponentu koja je predstavljena samo jednim Gausijanom. Ukoliko se razmatraju samo komponente širokih linija opisane Gausijanima, može se zaključiti sledeće:

- (i) oblik  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija razmatranog aktivnog galaktičkog jezgra Mrk 817 je veoma složen i ne može se opisati samo jednim Gausijanom; dekompozicija na Gausijane ukazuje na veoma složenu kinematičku strukturu BLR;
- (ii) dekompozicija na Gausijane ukazuje na prisustvo centralne široke komponente, sa brzinama oko  $1500 \text{ km s}^{-1}$  i sa pomakom u skladu sa sistematskim pomakom galaksije, u granicama greške.
- (iii) plava i crvena široka komponenta<sup>33</sup> su prisutne u fitu; ove komponente teže da imaju veće brzine i veći pomeraj u odnosu na sistematski pomak galaksije; na osnovu približno simetrične raspodele plave i crvene komponente može da sledi da deo emisije, barem u krilima linije, potiče iz akrecionog diska;
- (iv) širine i pomak Fe II linija ukazuju na to da značajan deo ove emisije potiče iz iste oblasti kao i jezgro  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija.

---

<sup>33</sup>Nazivi ovih komponenti slede iz odgovarajućeg pomaka komponente  $z$  u odnosu na kosmološki pomak galaksije.

Tabela 13: Parametri komponenti opisanih Gausijanima  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija. Širine Gausijana ( $W$ ) i pomeraj ( $z$ ) su dati u  $\text{km s}^{-1}$ . Intenziteti svake od komponenti su takođe dati.

Linija	Komponenta	$W$	$z$	I
$H\alpha$	Plava	3260	-580	0.23
	Centralna	1650	-310	0.43
	Crvena	1620	1200	0.29
	Uska	140	0	0.24
$H\beta$	Plava	2360	-1940	0.20
	Centralna	1760	180	0.53
	Crvena	3110	1350	0.19
	Uska	160	0	0.16

Uske [OIII]  $\lambda\lambda 4959, 5007$  linije su fitovane sa dva Gausijana i kao rezultat je dobijeno da je drugi Gausijan pomeren ka plavom i više proširen nego centralni Gausijan. Rezultati ove analize su dati u Tabeli 14. Može se zaključiti da NLR takođe ima složenu strukturu i da se sastoji od najmanje dve oblasti:

- (i) NLR1 - ova oblast ima brzine  $\sim 450 \text{ km s}^{-1}$  i relativnu brzinu  $-400 \text{ km s}^{-1}$  u odnosu na sistematsku brzinu galaksije Mrk 817, ukazujući da u ovoj oblasti postoji izbacivanje materije, odnosno da se emisioni gas kreće ka posmatraču;
- (ii) NLR2 - brzine ove oblasti su  $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ , a crveni pomak je u skladu sa crvenim pomakom galaksije.

Tabela 14: Parametri komponenti opisanih Gausijanima [OIII] linija. Širine Gausijana ( $W$ ) i relativni pomeraj  $\Delta z = z_{\text{NLR2}} - z_{\text{NLR1}}$  su dati u  $\text{km s}^{-1}$ . Odnos intenziteta pojedinih komponenti je predstavljen veličinom  $R = I_{5007}/I_{4959}$ . Odnos intenziteta "centralne" i "plave" komponente  $I_B/I_C$  je takođe dat.

$W_{\text{NLR1}}$	$R_{\text{NLR1}}$	$W_{\text{NLR2}}$	$R_{\text{NLR2}}$	$\Delta z$	$I_B/I_C$
430	3.03	165	3.03	-400	0.34

Ovaj rezultat se slaže sa istraživanjima Popovića i Medijavile (Popović & Medjavilla 1997), koji su analizirali [OIII] linije galaksije Mrk 817 u periodu od 9 godina i pokazali da je asimetrija ka plavom [OIII] linija prisutna kod svih posmatranih spektara. Jasno izražena osobina NLR1 oblasti da ima brzinu pomerenu ka plavom delu spektra u odnosu na sistematsku brzinu galaksije, podržava ideju

o tzv. džet geometriji NLR, odnosno o konusnom izbacivanju materije u ovom regionu (Dopita et al. 2003). Izbacivanje materije u suprotnom smeru nije detektovano, ali to može biti posledica toga da je ta komponenta u [OIII] linijama apsorbovana od strane okolne galaksije, tako da se vidi samo izbacivanje gasa duž bližeg džeta. Proučavanja drugih autora pokazuju da je NLR složena oblast (Arribas et al. 1997) i da činjenica da su [OIII] linije pomerene ka plavom u odnosu na  $H\beta$  liniju nagoveštava da te linije nastaju u visoko-jonizovanim, konusnim strujama gasa koje dolaze iz centra AGJ (Zamanov et al. 2002).

## 7 Model širokolinijske emisije oblasti kod Mrk 817

Širokolinijska oblast je oblast vrlo bliska crnoj rupi ( $< 1$  pc) gde se emisijski gas kreće relativističkim brzinama ( $\sim 0.02 c$ ). Ova oblast ima vrlo složenu kinematičku strukturu. Do sada nije prihvaćen jedan jedinstven kinematički model kojim se opisuje struktura ove oblasti. Neki od najčešće korišćenih modela su<sup>34</sup>:

1. dvojna crna rupa;
2. oblaci gasa, sferno simetrično raspoređeni oko centra;
3. akrecioni disk;
4. konusno izbacivanje materije.

Isto tako, rasprostranjeno je mišljenje da se BLR sastoji iz dve podoblasti, definisane kao izuzetno širokolinijska oblast (VBLR - *Very Broad Line Region*), koja doprinosi krilima emisijih linija i međulinijaska oblast (ILR - *Intermediate Line Region*), gde se formira jezgro linija (Brotherton et al. 1994, Sulentic et al. 2000, Popović et al. 2002, 2003, 2004). Isti zaključak sledi iz razmatranja analize pomoću više Gausijana, na osnovu koje se jasno izdvajaju dve oblasti koje doprinose formiranju širokih emisijih linija: dva Gausijana pomerena ka plavom i crvenom u odnosu na sistematski pomak galaksije, koji doprinose krilima linije (VBLR) i centralni Gausijan koji formira jezgro linije (ILR).

Sa druge strane, u okolini supermasivne crne rupe u centru AGJ za očekivati je da se nalazi akrecioni disk koji zrači karakteristično kontinualno zračenje AGJ. Pored snažnog kontinualnog zračenja, moguće je da se u spoljašnjim delovima akrecionog diska formiraju i široke emisije linije. Ovoj pretpostavci u prilog ide i istraživanje Korbena i Borosona (Corbin & Boroson 1996) koji su analizirali UV i optički deo spektra kod 48 QSO i Sejfertovih galaksija tipa 1 sa crvenim pomakom od 0.034 do 0.774. Oni su pronašli da postoji statistički značajna razlika između vrednosti FWZI za  $\text{Ly}\alpha$  i  $\text{H}\beta$  linije, koja daje dodatni dokaz za postojanje optički retke VBLR (koja može biti disk ili oblast nalik disku) koja doprinosi krilima linije. Ova oblast se nalazi unutar ILR gde se formira jezgro linije. UV linije imaju manju srednju vrednost FWHM u odnosu na  $\text{H}\beta$ , odakle sledi da ILR emisija doprinosi više kod UV linija, dok kod Balmerovih linija dominira VBLR.

U ovom radu, na osnovu prethodnih istraživanja (Popović et al. 2002, 2003, 2004) i rezultata, prihvaćen je **dvo-komponentni model**. U suštini, dvo-komponentni model *a priori* uzima da je BLR sastavljena iz dve kinematički različite oblasti. Moguće je u dvo-komponentni model uključiti kombinaciju različitih

---

<sup>34</sup>Detaljnije u Poglavlju 3.4

geometrija. U ovom radu se pretpostavlja da se krila BEL formiraju u samom akrecionom disku, dok se jezgro linije formira u oblasti oko diska, koja ima sferno simetričnu raspodelu. Opravdanost ovakvih geometrija emisionih oblasti, uzetih u ovom modelu, bazira se na sledećim činjenicama:

- (a) akrecioni disk se po prirodi stvari očekuje oko masivne crne rupe, tj. za očekivati je da emisioni gas u širokolinijskoj oblasti ima diskoliki kretanje oko crne rupe;
- (b) usled burnih procesa u centru dolazi do rasipanja materije u široj okolini crne rupe; ova materija takođe ima velike brzine i doprinosi zračenju u širokim linijama, ali njene kinematičke osobine su definisane neuređenim kretanjem, za razliku od diskolikog kretanja.

## 7.1 Dvo-komponentni model

Ovde uzimamo da se dvo-komponentni model širokolinijske oblasti aktivnog jezgra galaksije Mrk 817 sastoji iz akrecionog diska i sfernog emisionog regiona koji okružuje disk.

Za model akrecionog diska je korišćen keplerovski relativistički model Čena i Halperna (Chen & Halpern 1989), izveden za modeliranje oblika emisionih linija aktivne galaksije Arp 102B. Osnovne pretpostavke ovog model su sledeće:

- (i) disk je u osnovi keplerovski disk sa uračunatim relativističkim efektima koji utiču na širenje linija;
- (ii) emisivnost diska je data kao funkcija radijusa u obliku  $\epsilon = \epsilon_0 r^{-p}$ , gde je  $p$  parametar emisivnosti diska;
- (iii) disk koji zrači u određenoj liniji prostire se od radijusa  $x_1$  do  $x_2$ , oko masivne crne rupe mase  $M$ ;
- (iv) osa rotacije diska je nagnuta pod uglom  $i$  u odnosu na pravac ka posmatraču;
- (v) unutrašnji deo diska je neprozračan, i svojim zračenjem (inverznim Komptonovim rasejanjem) jonizuje prozračni torus, odnosno spoljašnji deo diska, i time stvara profil spektralnih linija;
- (vi) uračunat je i efekat da na rasejanje fotona u prozračnom disku utiče i lokalna turbulencija gasa, na kome se vrši rasejanje, pa je jednačina za fluks zračenja konvoluirana gausijanom širine  $\sigma$  kao doprinos dodatnog doplerovskog širenja.

Ako se uzmu u obzir gore navedene pretpostavke, fluks keplerovskog relativističkog diska, za određeni ugao inklinacije  $i$  i masu crne rupe  $M$ , ima sledeći oblik (Chen & Halpern 1989, Chen et al. 1989):

$$F_\nu = \frac{2\epsilon_0 M^2 \nu_0 \cos i}{4\pi d^2 \sqrt{2\pi\sigma}} \int_{x_1}^{x_2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(\nu_e - \nu_0)^2}{2\sigma^2}} D^3 x^{1-p} G V dx d\nu_e,$$

gde su  $D$ ,  $G$  i  $V$  definisani kao

$$D = \frac{\nu}{\nu_e},$$

$$G = 1 + x^{-1} \left[ \frac{2D^2}{D^2 \cos^2 i + x[D - (1 - 3/x)^{1/2}]^2} - 1 \right],$$

$$V = \frac{(1 - 3/x)^{1/2} x^{1/2}}{\nu_e \{D^2 \sin^2 i - x[D - (1 - 3/x)^{1/2}]^2\}^{1/2}}.$$

Ostale veličine koje figurišu u gornjim izrazima su: frekvencija nepomerene linije  $\nu_0 = c/\lambda_0$ ; emitovana frekvencija  $\nu_e = c/\lambda_e$ , koja se razlikuje od  $\nu_0$  zbog gausovske raspodele brzina;  $x = r/R_g$ , je bezdimenzioni radijus diska u jedinicama gravitacionih radijusa ( $R_g = GM/c^2$ ), a  $d$  je rastojanje do AGJ.

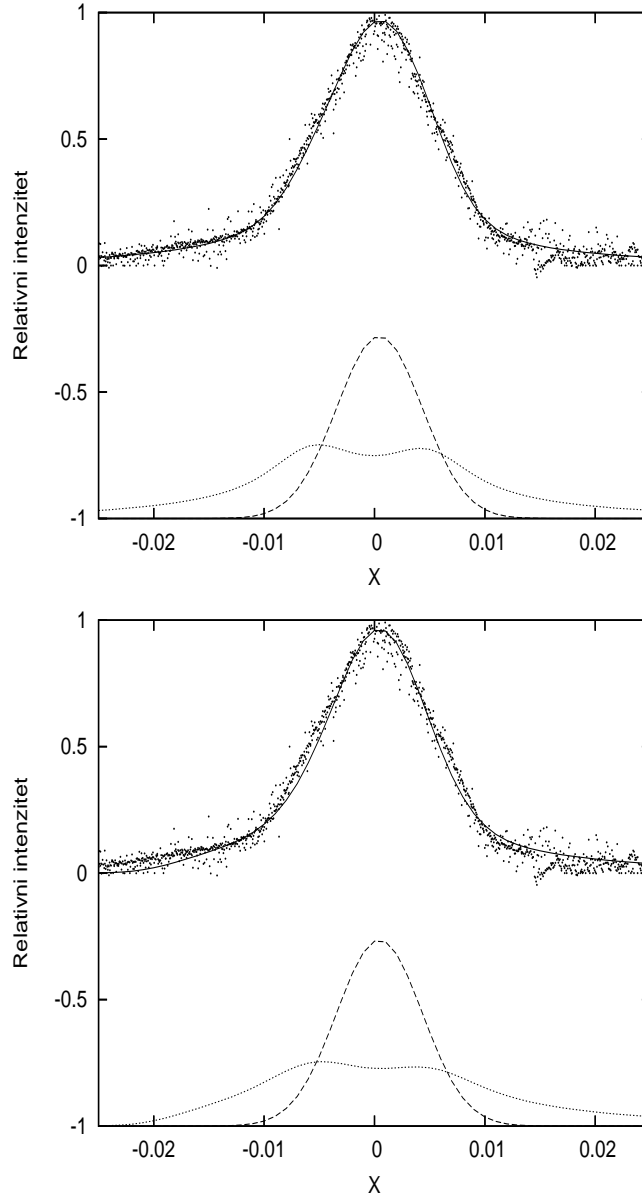
Što se tiče kinematike emisione oblasti koja okružuje disk, pretpostavlja se da je ova oblast sferna, sa izotropnom raspodelom brzina. To znači da se profil emisione linije koji dolazi iz ove oblasti može opisati Gausijanom, širine  $W_G$  i pomaka  $z_G$ . Ukupan profil linije se opisuje relacijom:

$$I(\lambda) = I_{AD}(\lambda) + I_G(\lambda)$$

gde su  $I_{AD}(\lambda)$ ,  $I_G(\lambda)$  emisije relativističkog akrecionog diska i dodatne sferne oblasti, respektivno.

Široke emisione linije  $H\alpha$  i  $H\beta$  su pre fitovanja očišćene od uskih i satelitskih linija. Isto tako, njihov intenzitet je normiran na jedinicu, a skala talasnih dužina je transformisana u skalu brzina:  $\lambda \rightarrow X = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ . Ovim postupkom su  $H\alpha$  i  $H\beta$  transformisane tako da se njihovi profili mogu porediti (vidi sliku 25). Dobijeno je da su profili ovih linija slični, što podržava ideju da se formiraju u istim emisionim oblastima. Dalje, u fitu je korišćen srednji profil ove dve Balmerove linije.

Osnovni problem prilikom fita širokih linija Mrk 817 dvo-komponentnim modelom je činjenica da profili širokih linija imaju samo jedan pik, tako da deo linije koji dolazi iz diska nije jasno definisan. Posledica toga je da, kada se primeni  $\chi^2$  minimizacioni postupak, zbog velikog broja slobodnih parametara rezultati fita dosta zavise od zadatih početnih vrednosti ulaznih parametara. Kako bi se savladao taj nedostatak, potrebno je zadati nekoliko početnih ograničenja i

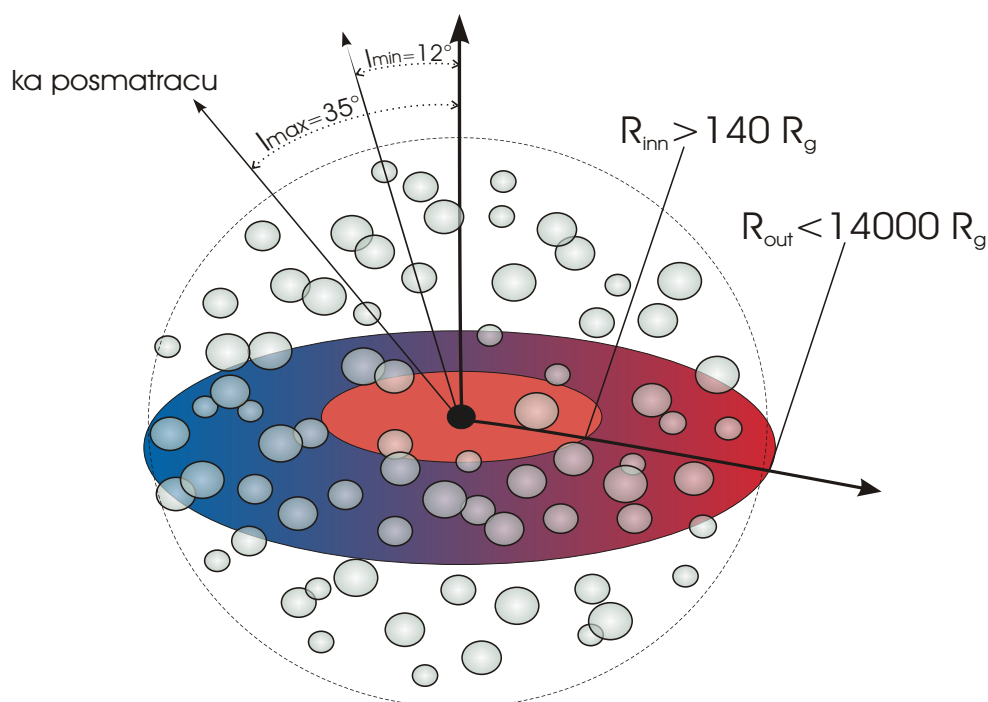


Slika 33: Primer dva različita fita dvo-komponentnim modelom AGJ Mrk 817. Parametri fita su: (a)  $i = 30^\circ$ ,  $R_{\text{inn}} = 140 R_g$ ,  $R_{\text{out}} = 10400 R_g$ ,  $\sigma_d = 900 \text{ km s}^{-1}$ ,  $p = 1.8$ ,  $W_G = 1650 \text{ km s}^{-1}$ ; (b)  $i = 20^\circ$ ,  $R_{\text{inn}} = 140 R_g$ ,  $R_{\text{out}} = 5000 R_g$ ,  $\sigma_d = 1140 \text{ km s}^{-1}$ ,  $p = 2.0$ ,  $W_G = 1530 \text{ km s}^{-1}$ .

pretpostavki. Prva pretpostavka je da disk fituje krila linije, a sferna komponenta jezgro linije. Drugo, početna vrednost inklinacije diska može se dobiti iz empirijske relacije, koja povezuje relativno odstojanje plave i crvene komponente opisane Gausijanima  $\Delta z$ , inklinaciju diska  $i$  i spoljašnji radijus diska  $R_{\text{out}}$ :  $\sin i \approx \Delta z \sqrt{2 \cdot R_{\text{out}}}$ . Ako se uzme da je  $\sin i \leq 1$ , može se proceniti spoljašnji radi-

jus diska. Iz dekompozicije na Gausijane dobijeno je da se  $\Delta z$  nalazi u opsegu  $0.007 \leq \Delta z \leq 0.011$ , što daje granice intervala spoljašnjeg radijusa za najveću inklinaciju  $4 \times 10^3 R_g \leq R_{\text{out}} \leq 10^4 R_g$ . Sa druge strane, kako se iz ranijih istraživanja zna da su tipične dimenzije diska  $\sim 10^3 R_g$ , sledi da inklinacija diska ne bi smela biti van intervala  $i \sim 5^\circ - 30^\circ$ .

Na osnovu navedenih ograničenja fitovan je usrednjen profil  $H\alpha$  i  $H\beta$  linija AGJ Mrk 817. Rezultati fita su dobijeni u nekoliko iteracija. Pri svakoj iteraciji fiksiran je jedan parametar (npr. inklinacija  $i$  ili parametar emisivnosti diska  $p$ ), a ostali su menjani dok nije dobijen zadovoljavajući fit. Korišćen je modifikovan  $\chi^2$  minimalizacioni postupak, jer cilj postupka nije da se dobije najbolji fit, već da se pokuša modelirati linija sa dvo-komponentnim modelom.



Slika 34: Šematski prikaz dvo-komponentnog modela centralne emisione oblasti aktivne galaksije Mrk 817.

Na slici 33 se vidi da dvo-komponentni model dobro fituje profile emisionih linija Mrk 817 galaksije. Ali nije moguće dobiti jedinstven model ukoliko barem jedan od parametara diska nije unapred zadat (inklinacija, unutrašnji i spoljašnji radijus ili parametar emisivnosti). Ipak, pomoću opisanog metoda moguće je izvršiti procenu parametara dvo-komponentnog modela. Ti rezultati dati su u



Tabeli 15. Interesantno je izdvojiti činjenicu da su brzine u disku (parametar  $W_d$ ) i u sfernoj oblasti (parametar  $W_G$ ) ne razlikuju mnogo. Ovaj rezultat se može objasniti ukoliko postoji stalni priliv materije iz diska u sfernu oblast, npr. putem vetra iz diska. Jedan takav scenario je već ranije predložen, gde se deo BLR formira udarnim talasima iz akrecionog diska (Fromerth & Melia 2001).

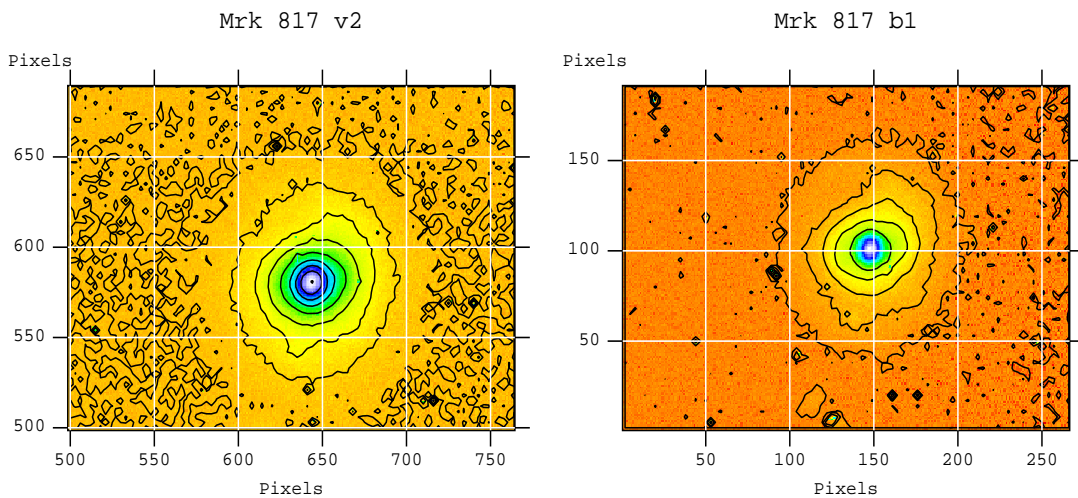
Tabela 15: Parametri diska i sferne emisione oblasti:  $z_d$  i  $\sigma_d$  su pomeraj i širina Gausijana, koji opisuje doplerovsko proširenje diska,  $R_{inn}$  i  $R_{out}$  su unutrašnji i spoljašnji radijus diska,  $z_G$  i  $W_G$  su parametri Gausijana koji opisuje sfernu emisionu oblast.

$i$ ( $^\circ$ )	$z_d^{\min,\max}$	$\sigma_d^{\min,\max}$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$R_{inn}^{\min}$ ( $R_g$ )	$R_{out}^{\max}$ ( $R_g$ )	$z_G^{\min,\max}$	$W_G$ ( $\text{km s}^{-1}$ )	$p^{\min}$
12-35	-450,+300	850,1200	140	14000	0,+130	1550 $\pm$ 100	1.8

Šema dvo-komponentnog modela za širokolinijsku oblast Mrk 817 je data na slici 34. Na slici je prikazan akrecioni disk i sferna emisiona oblast, predstavljena preko velikog broja sferno raspoređenih oblaka gasa.

## 8 Spektro-fotometrijska struktura aktivne galaksije Mrk 817

Postoji nekoliko pretpostavki za uzroke aktivnosti jezgara aktivnih galaksija. Jedna od takvih je da je aktivnost izazvana interakcijom, a ponekad i sudarom, dve galaksije. U cilju ispitivanja šire strukture aktivne galaksije Mrk 817, izvedena su spektro-fotometrijska posmatranja. Galaksija je posmatrana sa uskim filterima: [OIII] ( $\lambda = 4959 \text{ \AA}$ ,  $5007 \text{ \AA}$ ), HeII ( $\lambda = 4686 \text{ \AA}$ ) i u kontinuumu ( $\lambda = 4686 \text{ \AA}$ ).

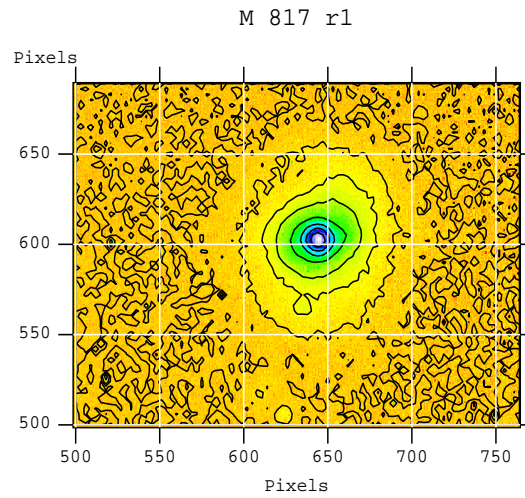


Slika 35: Mrk 817 posmatrana u uskim spektralnim filterima, čija centralna talasna dužina odgovara: [OIII]  $\lambda\lambda 4959, 5007$  linijama (levo) i HeII  $\lambda 4686$  liniji (desno). Ose grafika su date u pikselima gde je  $1 \text{ px} = 0.32''$ .

Podaci o filterima i o samim posmatranjima su dati u Tabeli 8. i Tabeli 9, u okviru Poglavlja 7.1. Snimanjem galaksije u nekom određenom uskom filteru postiže se efekat da samo oblasti u kojima se formira zračenje koje odgovara talasnoj dužini filtera budu detektovane. U ovom istraživanju cilj je da se ispita struktura jonizovanog gasa u široj okolini aktivnog jezgra (Ilić et al. 2004).

Na svim snimcima očigledno je prisustvo spiralnih grana i jasno se vidi da je galaksija vertikalno izdužena, što se i očekuje, budući da je Mrk 817 klasifikovana kao Sejfert 1.5 galaksija sa prečkom - galaksija SBc tipa (slike 35 i 36). Isto tako, primećuje se da veličina galaksije varira u različitim spektralnim opsezima. Najveća je u slučaju [OIII] linija (prečnik galaksije iznosi  $d \approx 39''$ ), a najmanja u HeII liniji (prečnik galaksije iznosi  $d \approx 32''$ ), što ukazuje na prisustvo visokojonizovanog gasa u jednom većem delu u spiralnim granam galaksije.

Slike snimljene pomoću [OIII] filtera pokazuju intenzivniju i širu centralnu



Slika 36: Sejfert galaksija Mrk 817 posmatrana u kontinuumu, na 5755 Å. Ose grafika su date u pikselima gde je 1 px = 0.32".

oblast galaksije. Ovo može biti u korelaciji sa spektralnim rezultatima, u kojima je detektovana izrazita asimetrija ka plavom u [OIII] linijama. Ta asimetrija može biti posledica izbacivanja materije duž konusa uskolinijske oblasti.

## 9 Zaključak

U ovom radu je istraživana centralna emisiona oblast aktivne galaksije Mrk 817. Na osnovu spektro-fotometrijskih posmatranja ove aktivne galaksije dobijenih pomoću različitih teleskopa: teleskopi "Isak Njutn" i "Viljam Heršel" sa opservatorije na Kanarskim ostrvima, teleskop "Šain" sa Krimске astrofizičke opservatorije i 2m teleskop na opservatoriji Rožen u Bugarskoj, urađena je analiza strukture, kinematičkih i fizičkih osobina emisionih oblasti AGJ Mrk 817. Svi podaci<sup>35</sup> su najpre obradjeni u programskom paketu IRAF i DIPSO, a potom je izvršena analiza dobijenih spektralnih linija. Najvažniji rezultati ovog rada su:

- (i) aktivna galaksija Mrk 817 ima vrlo izražene široke i uske emisione linije, koje potiču iz dve različite kinematičke oblasti: širokolinijska oblast (BLR) i uskolinijaska oblast (NLR);
- (ii) primenom Bolcmanovog metoda na linije Balmerove serije određena je elektronska temperatura i koncentracija u BLR ove galaksije; za elektronsku temperaturu je dobijena vrednost  $T_e \approx 4 \times 10^4 \text{K}$ , a za elektronsku koncentraciju  $n_e \sim 10^9 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$  u slučaju optički guste sredine, dok je  $n_e \sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  u slučaju optički retke sredine;
- (iii) na osnovu odnosa flukseva uskih [NII] i [SII] linija, određeni su i parametri plazme NLR ( $T_e \sim 10^4 \text{K}$ ,  $n_e \sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ );
- (iv) dekompozicija na Gausijane  $\text{H}\alpha$  i  $\text{H}\beta$  linija ukazuje na to da su i široke i uske linije složene, odnosno BLR i NLR su oblasti koje se sastoje iz više podoblasti;
- (v) široke linije se mogu razložiti na tri Gausijana: jedan pomeren ka plavom, drugi pomeren ka crvenom i treći sa pomerajem koji odgovara sistematskom pomaku galaksije;
- (vi) jasno je vidljiva asimetrija u zabranjenim uskim [OIII]  $\lambda\lambda$  4959, 5007 linijama; asimetrija u plavom krilu zabranjenih linija ukazuje na izbacivanje gasa u uskolinijaskom emisionom regionu; odatle sledi da postoje dve kinematički različite NLR oblasti;
- (vii) za širokolinijsku oblast AGJ Mrk 817 je primenjen dvo-komponenti model, koji se sastoji iz VLBR (akrecioni disk, koji doprinosi krilima linije) i ILR (sferna emisiona oblast, gde se formira jezgro linije); model odlično fituje posmatrane profile linija; na osnovu ovog modela procenjeno je da karakteristike diska uzimaju sledeće vrednosti: inklinacija  $i \sim 12 - 35^\circ$ , parametar emisivnosti  $p_{\min} \approx 1.8$ , minimalni unutrašnji radijus  $R_{\text{inn}}^{\min} \approx 140 R_g$ , maksimalni spoljašnji radijus  $R_{\text{out}}^{\max} \approx 14000 R_g$ ;

---

<sup>35</sup>Podaci sa Krimске opservatorije su obradjeni uz pomoć programskog paketa SPE.

- (viii) brzine gasa u akrecionom disku i brzine gasa u sfernoj emisionoj oblasti su slične ( $\sim 10^3 \text{ km s}^{-1}$ ); ova činjenica ukazuje na to da su ove dve oblasti povezane nekim procesom, a to je najverovatnije vetar sa diska, koji je i odgovaran za dovođenje materije u sfernu emisionu oblast.

Ovim radom je urađena dijagnostika fizičkih i kinematičkih osobina širokolinijske i uskolinijske oblasti jezgra aktivne galaksije Mrk 817. Time je dat doprinos razumevanju strukture aktivnih galaktičkih jezgara, kao i rasvetljavanju karakteristika emisionih oblasti u blizini crne rupe. U budućem radu, trebalo bi obratiti pažnju na povezanost između različitih emisionih oblasti, kako u samom BLR i NLR, tako i vezu između BLR i NLR (s obzirom da je izbacivanje gasa vidljivo u NLR), kao i povezivanje fizike okolnog visokojonizovanog gasa (slika 36) sa oblastima BLR i NLR ove galaksije.

## 10 Literatura

- [1] Arribas, S., Mediavilla, E., Garcia-Lorenzo, B., del Burgo, C. 1997, ApJ **490**, 227.
- [2] Baldwin, J. A., 1977, ApJ **214**, 679.
- [3] Baldwin, J. A., Ferland, G., Korista, K., Verner, D., 1995, ApJ **455**, L119.
- [4] Baldwin, J. A., Wampler, E. J., Gaskell, C. M., 1989, ApJ **338**, 630.
- [5] Barners, J., 1993, *A Beginners Guide to Using IRAF* (<http://iraf.noao.edu>).
- [6] Binney, J., Merrifield, M., 1998, *Galactic Astronomy* (Princeton: Princeton Univ. Press).
- [7] Blandford, R. D., McKee, C. F., 1982, ApJ **255**, 419.
- [8] Boroson, T. A., Green, R. F., 1992, ApJS **80**, 109.
- [9] Brotherton, M. S., Wills, B. J., Steidel, R., Sargent, W. L. W., 1994, ApJ **423**, 131.
- [10] Burstein, D., Heiles, C., 1982, AJ **87**, 1165.
- [11] Cai, W., Pradhan, A. K., 1993, ApJS **88**, 329.
- [12] Chen, K., Halpern, J. P., 1989, ApJ **344**, 115.
- [13] Chen, K., Halpern, J. P., Filippenko, A. V., 1989, ApJ **339**, 742.
- [14] Cohen, R. D., 1983, ApJ **273**, 489.
- [15] Corbin, M. R., Boroson, T. A., 1996, ApJS **107**, 69.
- [16] Dahari, O., De Robertis, M. M., 1988, ApJS **67**, 249.
- [17] De Robertis, M. M., 1985, ApJ **289**, 67.
- [18] de Vaucouleur, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., Buta, R. J., Paturel, G., Fouque, P.: Third reference catalogue of bright galaxies, 1991, Springer-Verlag New York, Inc.
- [19] Dopita, M. A., Bicknell, G. V., Sutherland, R. S., Saxton, C. J. 2003, Rev. Mex. AA **15**, 323.

- [20] Doroshenko, V. T., Sergeev, S. G., Pronik, V. I., Chuvaev, K. K., 1999, *Astron. Lett.* **25**, 9, 569.
- [21] Edelson, R. A., 1987, *ApJ* **313**, 651.
- [22] Eracleous, M., Halpern, J. P., Storchi-Bergmann, T., Filippenko, A. V., Wilson, A. S., Livio, M., 2004, *IAUS* **222**, 29.
- [23] Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, *MNRAS* **167**, 31P.
- [24] Feldman, F. R., Weedman, D. W., Balzano, V. A., Ramsey, L. W., 1982, *ApJ* **256**, 427.
- [25] Ferrarese, L., Pogge, R. W., Peterson, B. M., Merritt, D., Wandel, A., Joseph, C. L., 2001, *ApJL* **555**, 79.
- [26] Fromerth, M. J., Melia, F. 2001, *ApJ* **549**, 205.
- [27] Francis, P. J., Hewett, P. C., Foltz, C. B., Chaffee, F. H., & Weymann, R. J. 1991, *ApJ* **373**, 465.
- [28] Gaskell, C. M., 1988, *ApJ* **325**, 114.
- [29] Gaskell, C. M., 1996, *ApJ* **464**, L107.
- [30] Goad, M., Wanders, I., 1996, *ApJ* **469**, 113.
- [31] Griem, H.R. 1997, *Principles of Plasma Spectroscopy* (Cambridge University Press).
- [32] Halpern, J. P., Oke, J., 1987, *ApJ* **312**, 91.
- [33] Ho, L. C., Filippenko, A. V., Sargent, W. L. W., 1997a, *ApJS* **112**, 315.
- [34] Ho, L. C., Filippenko, A. V., Sargent, W. L. W., Peng, C. Y., 1997b, *ApJS* **112**, 391.
- [35] Huchra, J., Burg, R., 1992, *ApJ* **393**, 90.
- [36] Huchra, J., Davis, M., Latham, D., Tonry, J., 1983, *ApJS* **52**, 89.
- [37] Hunt, L. K., Malkan, M. A., Salvati, M., Mandolesi, N., Palazzi, E., Wade, R., 1997, *ApJS* **108**, 229.
- [38] Ilić, D., Bon, E., Mediavilla, E. G., Popović, L. Č., 2003, *Publ. Astron. Obs. Belgrade* **76**, 197I.
- [39] Ilić, D., Stavrev, K., Tsvetkova, K., Tsvetkov, M., Popović, L. Č., 2004, *Publ. Astron. Soc. "Ruđer Bošković"* **5**, 183.

- [40] Jahnke, K., Kuhlbrodt, B., Wisotzki, L., 2004 MNRAS **352**, 399J.
- [41] Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., Maoz, D., Jannuzi, B. T., Giveon, U., 2000, ApJ **533**, 631.
- [42] Knapen, J. H., Shlosman, I., Peletier, R. F., 2000, ApJ **529**, 93.
- [43] Krolik, J.H., 1999, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment* (Princeton: Princeton Univ. Press).
- [44] Koratkar, A. P., Gaskell, C. M., 1991, ApJ **370**, L61.
- [45] Korista, K. T., 1992, ApJS **79**, 285.
- [46] Koski, A. T., 1978, ApJ **223**, 56.
- [47] Kukula, M. J., Pedlar, A., Baum, S. A., O’Dea, C. P., 1995, MNRAS **276**, 1262.
- [48] Malkan, M. A., Gorjian, V., Tam, R., 1998, ApJS **117**, 25.
- [49] Markarian, B. E., Lipovetsky, V. A., 1976, Astrofizika **12**, 657.
- [50] Marziani, P., Sulentic, J. W., Dultzin-Hacyan, D., Calvani, M., Moles, M., 1996, ApJS **104**, 37.
- [51] Miller, J. S., Antonucci, R., 1983, ApJ **271**, L7.
- [52] Miller, J. S., French, H. B., Hawley, S. A., 1978, ApJ **219**, L85.
- [53] Miller, J. S., Mathews, W. G, 1972, ApJ **172**, 593.
- [54] Murray, N., Chiang, J., 1998, ApJ **494**, 125.
- [55] Nandra, K., George, I. M., Mushotzky, R. F., Turner, T. J., Yaqoob, T., 1997, ApJ **477**, 602.
- [56] Netzer, H., 1990, Active Galactic Nuclei, Saas-Fees Advanced Course 20, ed. T. J. L. Courvoisier, M. Major (Berlin-Springer), 57.
- [57] Netzer, H., Peterson, B. M., 1997, Astronomical Time Series, ed. D. Maoz, A. Sternberg, E. M. Leibowitz (Dordrecht: Kluwer), 85.
- [58] Onken, C. A., Ferrarese, L., Merritt, D., Peterson, B. M., Pogge, Ri. W., Vestergaard, M., Wandel, A., 2004, ApJ **615**, 645.
- [59] Osterbrock, D.E., 1981, ApJ **249**, 462.
- [60] Osterbrock, D.E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (Mill Valle: University Science Press).



- [61] Osterbrock, D. E., Koski, A. T., 1976, MNRAS **176**, 61P.
- [62] Osterbrock, D. E., Martel, A., 1993, ApJ **414**, 552.
- [63] Osterbrock, D. E., Pogge, R. W., 1985, ApJ **297**, 166.
- [64] Osterbrock, D. E., Shuder, J. M., 1982, ApJS **49**, 149.
- [65] Peterson, B. M., 1997, *An Introduction to Active Galactic Nuclei* (Cambridge University Press).
- [66] Peterson, B. M., Ferrarese, L., Gilbert, K. M., Kaspi, S., Malkan, M. A., Maoz, D., Merritt, D., Netzer, H., Onken, C. A., Pogge, R. W., Vestergaard, M., Wandel, A., 2004, ApJ **613**, 682
- [67] Peterson, B. M., Wanders, I., Bertram, R., Hunley, J. F., Pogge, R. W., Wagner, R. M., 1998, ApJ **501**, 82.
- [68] Pogge, R. W., 2000, NewAR **44**, 381.
- [69] Pogge, R. W., Martini, P., 2002, ApJ **569**, 624.
- [70] Popović, L. Č., 2003, ApJ **599**, 140.
- [71] Popović, L. Č., Mediavilla, E.G., 1997, Publ. Astron. Obs. Belgrade **57**, 95.
- [72] Popović, L. Č., Mediavilla E.G., Bon E., Ilić D., 2004, A&A **423**, 909.
- [73] Popović, L. Č., Mediavilla, E.G., Bon, E., Stanić, N., Kubičela, A., 2003, ApJ **599**, 185.
- [74] Popović, L. Č., Mediavilla, E.G., Kubičela, A., Jovanović, P. 2002, A&A **390**, 473.
- [75] Popović, L. Č., Stanić, N., Kubičela, A., Bon, E., 2001, A&A **367**, 780.
- [76] Popović, L. Č., Trajković, N., Kubičela, A., et al., 1998, Publ. Astron. Obs. Belgrade **61**, 139.
- [77] Popović, L. Č., Vince, I., Atanacković-Vukmanović, O., Kubičela, A., 1995, A&A **293**, 309.
- [78] Rokaki, E., Boisson, C., Collin-Suffrin, S., 1992, A&A **253**, 57.
- [79] Savage, B. D., Mathis, J. S., 1979, ARAA, **17**, 73.
- [80] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M., 1998, ApJ **500**, 525.
- [81] Schmidt, M., 1963, Nat **197**, 1040.

- [82] Sergeev, S. G., Heisberger, F., 1993, *A Users Manual for SPE* (Wien).
- [83] Sergeev, S. G., Pronik, V. I., Sergeeva, E. A., 1999, *ApJ* **118**, 2658.
- [84] Seyfert, C. K., 1943, *ApJ* **97**, 28.
- [85] Shapovalova, A. I., Doroshenko, V. T., Bochkarev, N. G., Burenkov, A. N., Carrasco, L., Chavushyan, V. H., Collin, S., Valdés, J. R., Borisov, N., Dumont, A. M., Vlasuyk, V. V., Chilingarian, I., Fioktistova, I. S., Martinez, O. M., 2004, *A&A*, 422, 925.
- [86] Spinard, H., Djorgovski, S., Marr, J., Aguilar, L., 1985, *PASP* **97**, 932.
- [87] Strauss, M. A., Huchra, J., 1988, *ApJ* **95**, 1602
- [88] Sulentic, J. W., Marziani, P., Dultzin-Hacyan, D., 2000, *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* **38**, 521.
- [89] Sulentic, J. W., Marziani, P., Zwitter, T., Calvani, M., Dultzin-Hacyan, D., 1998, *ApJ* **501**, 54.
- [90] Veilleux, S., 1991, *ApJ* **369**, 331.
- [91] Veilleux, S., Osterbrock, D. E., 1987, *ApJS* **63**, 295.
- [92] Véron, P., Goncalves, A. C., Véron-Cetty, M.-P., 1997, *A&A* **319**, 52.
- [93] Véron-Cetty, M.-P. & Véron, P., 2000, *A Catalogue of Quasars and Active Galactic Nuclei*, Sci. Report 19.
- [94] Wandel, A., 1997, *ApJ* **430**, 131.
- [95] Wandel, A., Peterson, B. M., Malkan, M. A., 1999, *ApJ* **526**, 579.
- [96] Wilson, A. S., Heckman, T. M., 1985, *Astrophysics of Active Galaxies and Quasi-Stellar Objects*, ed. J.S. Miller (University Science Books: Mill Valley), p.39.
- [97] Worall, D. M., Boldt, E. A., Holt, S. S., Serlemitsos, P. J., 1980, *ApJ* **240**, 421.
- [98] Zamanov, R., Marziani, P., Sulentic, J.W., Calvani, M., Dultzin-Hacyan, D., Bachev, R. 2002, *ApJ* **576**, L9.
- [99] Zheng, W., Binette, L., Sulentic, J. W., 1990, *Apj* **365**, 115.
- [100] Zheng, W., Kriss, G. A., Davidsen, A. F., Lee, G., Code, A. D., Bjorkman, K. S., Smith, P. S., Weistrop, D., Malkan, M. A., Baganoff, F. K., Peterson, B. M., 1995, *ApJ* **444**, 632.
- [101] Zwicky, F., 1966, *ApJ* **143**, 192.