

UNIVERZITET U BEOGRADU
MATEMATIČKI FAKULTET

- DOKTORSKA DISERTACIJA -

Dijagnostika plazme u
širokolinijskoj oblasti aktivnih galaksija
pomoću emisionih linija

Dragana Ilić

Beograd 2008.

Author: Dragana Ilić (1978-)

Title of the PhD thesis: Plasma Diagnostics in the Broad Line Region of Active Galaxies using Emission Lines

Naslov disertacije: Dijagnostika plazme u širokolinijskoj oblasti aktivnih galaksija pomoću emisionih linija

Keywords: *galaxies: active – (galaxies:) quasars: emission lines – lines: formation – plasma*

Ključne reči: *galaksije: aktivne – (galaksije:) kvazari: emisione linije – linije: formiranje – plazma*

Area: extragalactic astrophysics, spectroscopy, active galaxies, broad line region physics

Oblast: vangalaktička astrofizika, spektroskopija, aktivne galaksije, fizika širokolinijskog regiona

PhD Committee: Luka Č. Popović (advisor), Dejan Urošević, Piero Rafanelli, Stefano Ciroi, Olga Atanacković

Faculty: Faculty of mathematics, University of Belgrade

Fakultet: Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Date: October 27 2008

Language: Serbian

References: 141

* * *

Ova doktorska disertacija je urađena u okviru projekta Ministarstva za nauku Republike Srbije 146002: "Astrofizička spektroskopija vangalaktičkih objekata", pod rukovodstvom dr Luke Č. Popovića. Ovom prilikom želim da mu se iskreno zahvalim na sveobuhvatnoj i nesebičnoj pomoći, i konstantnom usmeravanju i podršci pri istraživanju i samoj izradi disertacije.

Deo istraživanja prikazan u disertaciji urađen je u toku mog šestomesečnog boravka na Katedri za astronomiju Univerziteta u Padovi, pod rukovodstvom dr Stefana Ćiroija (*dr Stefano Ciroi*). Želim da se zahvalim celom kolektivu na ogromnoj pomoći i toplom gostoprimstvu koje mi je ukazano, a posebno želim da se zahvalim prof. dr Pjeru Rafaneliju (*dr Piero Rafanelli*), dr Frančesku di Mileu (*dr Francesco di Mille*) i Đovaniju La Muri (*Giovanni La Mura*) na korisnim savetima i diskusiji. Takođe, želim da se zahvalim dr Piter van Hofu (*dr Peter van Hoof*) sa Opservatorije u Briselu, na pomoći u radu sa CLOUDY numeričkim kodom.

U tezi je korišćen veliki broj podataka, sakupljan desetinama godina na Specijalnoj Astrofizičkoj Opservatoriji u Rusiji. Ovde želim da se zahvalim dr Ali Šapovalovoj (*др Алла Шаповалова*) na obezbeđenim podacima i pomoći oko njihove analize. Takođe, jedan deo istraživanja sproveden je na Maks-Plank Institutu za radio-astronomiju u Bonu pa se zahvaljujem na gostoprimstvu i pomoći dr Andreju Lobanovu (*др Андреу Лобанов*) i Džonatan Leon-Tavaresu (*Jonathan León-Tavares*).

I na kraju, zahvaljujem se porodici, prijateljima i kolegama, a posebno mojoj Katedri za astronomiju Matematičkog fakulteta, na velikoj podršci i pomoći pri izvođenju i uspešnom završetku ovog rada.

U Beogradu, 10.09.2008.

Dragana Ilić

Abstract

The electromagnetic spectrum of active galactic nuclei (AGN) has two specific features: an intensive broad-band continuum that comes from γ to radio wavelengths, and broad and intensive emission lines. In this emission line spectrum there are broad emission lines (BELs) that come from the so-called Broad Line Region (BLR). Even today, kinematics and physics of the BLR are not fully understood, and there is no unique geometry of the BLR that can be applied to all AGN. So far it has been assumed and accepted that the BLR is ionized by the intensive continuum coming from the accretion disk around a supermassive black hole that is in the center of an AGN. Thus, it is assumed that the major ionization mechanism of this region is photoionization and that the BELs are the result of recombination.

In this PhD Thesis we study the physical properties of the BLR using broad hydrogen and helium lines. In previous investigations, physical properties, i.e. the temperature and electron density, have been estimated according to the similarity of this region to the emission nebulae (e.g. H II regions) where ratios of some forbidden lines (e.g. [O III] and [N II] lines) have been used. Another way to estimate these parameters is to use complex numerical codes to reproduce the observed emission line spectrum. In this work we propose a direct method for estimation of the physical properties of the BLR using the flux ratios of hydrogen Balmer and helium (He I 5876 Å i He II 4687 Å) emission lines. The method is performed using Boltzmann-plot method (widely used for the laboratory plasma diagnostics) and numerical simulations of the plasma conditions in the BLR, that are done with the spectral synthesis code CLOUDY. The method is applied to a sample of AGN spectra were taken from the SDSS (Sloan Digital Sky Survey) database. We found that in this sample the BLR temperature is in the range $T_{\text{BLR}} = 4000 - 18000$ K while the hydrogen density is $n_{\text{H}} = 10^{8.6} - 10^{11.5}$ cm $^{-3}$. The obtained results are in good agreement with previous rough estimates of these BLR physical parameters. Moreover, we study here the variation of the BLR temperature and density in two well known AGN (NGC 5548 and NGC 4151), that were observed in a large period (8 years for NGC 5548 and 11 years for NGC 4151) with 6m SAO telescope from Russia and 2.1 INAOE telescope from Mexico.

At the end, let us say that the work in this PhD Thesis is an attempt to clarify and better understand the nature of the BLR in AGN.

Keywords: *galaxies: active – (galaxies:) quasars: emission lines – lines: formation – plasma*

Sažetak

Elektromagnetni spektar aktivnih galaktičkih jezgara (AGJ) karakteriše intenzivno zračenje u kontinuumu na svim talasnim dužinama (od γ do radio), ali i vrlo intenzivne emisijske linije. Tu se izdvajaju široke emisijske linije, najšire linije u svemiru, koje nastaju u oblasti koja se po njima naziva širokolinijska oblast. I danas, fizičke i kinematičke osobine ove oblasti nisu do kraja objašnjene, pa i sama geometrija nije jedinstvena za sva AGJ. Za sada se pretpostavlja da je širokolinijska oblast jonizovana od strane intenzivnog zračenja u kontinuumu koje dolazi iz akrecionog diska oko supermasivne crne rupe koja se nalazi u centru AGJ. Dakle, pretpostavlja se da je glavni oblik jonizacije ove sredine fotojonizacija, a da su široke emisijske linije rezultat rekombinacije.

U ovoj doktorskoj disertaciji istražuju se fizičke osobine (temperatura i koncentracija) širokolinijske oblasti koristeći emisijske linije vodonika i helijuma. U dosadašnjim istraživanjima, temperatura i koncentracija su procenjivane na osnovu sličnosti ove oblasti sa emisionim maglinama (npr. H II regionima), gde se koriste odnosi flukseva zabranjenih linija za dijagnostiku plazme. Takođe, moguće je proceniti ove veličine i pomoću kompleksnih numeričkih simulacija, gde se pokušava reprodukovati posmatrani emisioni spektar. U ovoj disertaciji prikazan je direktan metod procene fizičkih karakteristika širokolinijske oblasti koristeći samo odnose flukseva emisionih linija Balmerove serije vodonika i linija helijuma (He I 5876 Å i He II 4687 Å). Metod se bazira na Bolcman-plot metodu (koji se primenjuje u dijagnostici laboratorijske plazme) i razvijen je uz pomoć numeričkih simulacija uslova plazme u širokolinijskoj oblasti, koje su rađene u programu CLOUDY. Metod je primenjen na uzorak AGJ spektara preuzetih iz SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) spektralne baze. Za razmatrani uzorak je pokazano da su temperatura i koncentracija u širokolinijskoj oblasti u opsegu $T_{\text{BLR}} = 4000 - 18000$ K i $n_{\text{H}} = 10^{8.6} - 10^{11.5}$ cm⁻³. Ovi rezultati su u saglasnosti sa prethodnim grubim procenama ovih parametara. Takođe, u ovoj disertaciji se proučava i vremenska zavisnost fizičkih karakteristika u slučaju promenljivih aktivnih galaksija NGC 5548 i NGC 4151, koje su posmatrane u dugačkom vremenskom intervalu (8 odnosno 11 godina, respektivno) sa 6 m teleskopom SAO-a u Rusiji i 2.1 m INAOE teleskopom u Meksiku

Na kraju, naglasimo da je rad u ovoj doktorskoj disertaciji pokušaj da se razjasni i bolje razume priroda širokolinijske oblasti aktivnih galaktičkih jezgara.

Ključne reči: *galaksije: aktivne – (galaksije:) kvazari: emisijske linije – linije: formiranje – plazma*

Sadržaj

1	Uvod	5
2	Aktivna galaktička jezgra (AGJ)	9
2.1	Osobine AGJ	10
2.2	Emisione linije AGJ	11
3	Fizički procesi unutar širokolinijske emisije oblasti	13
3.1	Struktura širokolinijske emisije oblasti	13
3.2	Fizički procesi unutar širokolinijske emisije oblasti	19
3.3	Fizički procesi u plazmi	22
3.3.1	Fotojonizacija	24
3.4	Dijagnostika temperature laboratorijske plazme	27
3.4.1	Relativni intenzitet linija istog jona ili atoma	28
3.4.2	Relativni intenzitet linija iz susednih stanja jonizacije istog elementa	29
3.5	Boltzmann-Plot (BP) metod u slučaju BLR	30
3.6	Numeričke simulacije oblasti jonizovanog gasa	33
3.6.1	Program CLOUDY i AGJ	34
4	Simulacije fizičkih parametara BLR pomoću CLOUDY programa	36
4.1	Simulacije fotojonizacionih modela BLR	36
4.2	Rezultati i analiza numeričkih simulacija	37
4.2.1	Slučaj linijske gustine $N_H = 10^{23}\text{cm}^{-2}$	41
4.2.2	Uopštene relacije za opseg linijskih gustina od $N_H = 10^{21} - 10^{25}\text{cm}^{-3}$	45
4.2.3	Metod dijagnostike plazme u BLR	52
5	Izbor objekata, posmatranja i obrada podataka	56
5.1	SDSS uzorak	56
5.1.1	Posmatranja i izbor objekata	56
5.2	Aktivna galaksija NGC 5548	58
5.2.1	Posmatranja i obrada podataka	59
5.3	Aktivna galaksija NGC 4151	61
5.3.1	Posmatranja, obrada podataka i merenja fluksa	66
6	Analiza podataka i rezultati	68
6.1	SDSS uzorak	68
6.1.1	Merenja fluksa helijumovih linija	68
6.1.2	Dijagnostika plazme uz pomoć linija helijuma	68
6.2	Fizički procesi unutar BLR galaksije NGC 5548	71
6.2.1	Merenja fluksa široke komponente emisije linije i brzina	71

6.2.2	BP temperatura za NGC 5548	76
6.2.3	Kontinuum vs. temperatura	78
6.2.4	Simulacije fizičkih uslova BLR NGC 5548	82
6.3	Fizički procesi unutar BLR galaksije NGC 4151	85
6.3.1	BP koeficijent za NGC 4151	85
7	Zaključci	90
8	Literatura	92
9	DODATAK A - <i>CLOUDY</i>	100
9.1	Nastanak i razvoj <i>CLOUDY</i> programa	100
9.2	Osnovne fizičke pretpostavke korišćene u programu	101
9.2.1	Kontinuum	102
9.2.2	Geometrija oblaka gasa	102
9.2.3	Hemijski sastav	103
9.2.4	Definicije osnovnih veličina	103
9.3	Instalacija i pokretanje <i>CLOUDY</i> programa	105
9.4	Ulazni fajl	106
9.5	Primeri simulacija	107
9.6	Izlazni fajl	110
10	DODATAK B - <i>Atomski procesi</i>	112

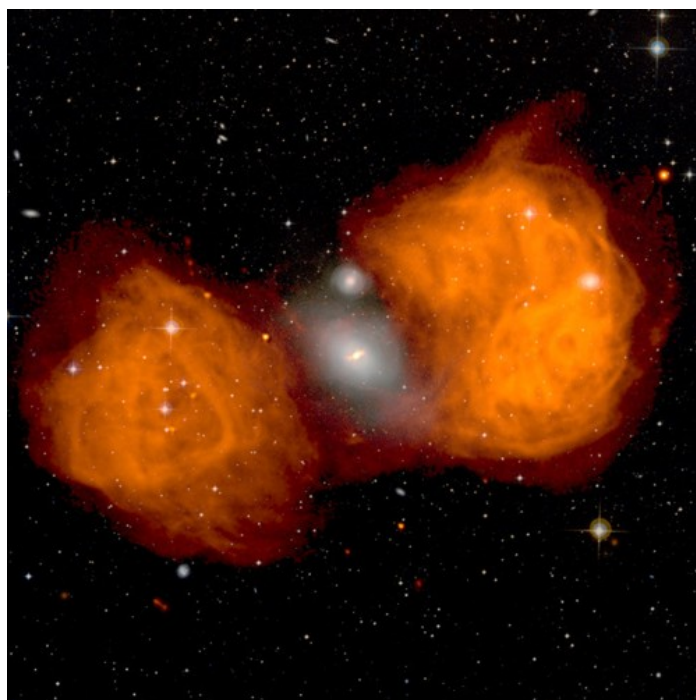
1 Uvod

Aktivne galaksije (AG) su poslednje 3-4 decenije predmet intenzivnih astrofizičkih istraživanja. Budući da obuhvataju različite grupe objekata, među koje spadaju kvazari, blazari, gigantske eliptične radio-galaksije i sjajne spiralne Sejfert galaksije, aktivne galaksije su i dalje najsjajniji i najudaljeniji posmatrani objekti. Najveći deo svoje energije, ove galaksije oslobode u svojim jezgrima, pa se zato nazivaju i Aktivna Galaktička Jezgra (AGJ). Njihova luminoznost dostiže vrednosti $L \approx 10^{42} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$. Poređenja radi, ovi objekti u nekim slučajevima oslobađaju čak i nekoliko desetina hiljada puta više energije nego normalne galaksije. Druga značajna osobina ovih objekata je njihov spektar elektromagnetnog zračenja. AGJ zrače u kontinuumu i spektralnim linijama od γ i X-područja do dalekog infracrvenog i radio dela spektra, pri čemu je zračenje u kontinuumu u velikom opsegu talasnih dužina vrlo intenzivno i konstantno. Ovi objekti su sigurno najsnažniji radio izvori (Slika 1). U optičkom i ultraljubičastom delu spektra ovih objekata, prisutne su intenzivne emisione linije, koje imaju najveću širinu od svih posmatranih emisionih linija nebeskih objekata. Ukupan fluks ovih linija dostiže vrednosti i od nekoliko desetina procenata fluksa kontinuumu a širine ukazuju na veoma dinamične procese u emisionim oblastima.

Danas je opšte prihvaćeno da je izvor najvećeg dela ogromne energije koju zrače jezgra aktivnih galaksija akrecija materije u supermasivnu crnu rupu, odnosno da najveća količina kontinualnog zračenja dolazi iz akrecionog diska. Tako da je najverovatnije da je struktura AGJ takva da se u centru nalazi supermasivna crna rupa sa akrecionim diskom, koju okružuje velika količina gasa i prašine u obliku torusa. Tu naravno postoje i druge strukture, kao na primer, jonizovani oblaci gasa koji produkuju intenzivne emisione linije, ili mlazevi gasa vidljivi uglavnom u radio-području (Slika 1), ali ponekad i u optičkom spektru. No sigurno je da je dinamika ovih oblasti jako kompleksna, kao i fizički procesi koji se tu odigravaju i koji dovode do formiranja tako specifičnog spektra ovih objekata.

Budući da su aktivne galaksije, odnosno kvazari kao jedna od grupa ovih objekata najsjajniji a samim tim mogu se videti najdalje, one su važne i za istraživanja u oblasti ranog svemira i kosmologije uopšte. Tako na primer, određivanje funkcije luminoznosti ovih objekata ili karakteristika galaksija čije je jezgro kvazar, su bitne za razumevanje nastanka i evolucije galaksija.

Jezgra aktivnih galaksija su izuzetno malih dimenzija, što je zaključeno na osnovu brzih promena sjaja koja se često dešavaju u periodu od nekoliko dana (npr. slučaj galaksije NGC 4151) što ukazuje na to da su emisione oblasti relativno malih dimenzija (od svega nekoliko svetlosnih dana do nekoliko svetlosnih meseci). Takođe, sjaj AGJ može biti toliko veliki da je ukupan



Slika 1: Gigantska eliptična aktivna galaksija NGC 1316 (centar slike) koja proždire svog manjeg severnog pratioca. Na slici su predstavljene superponirane optička i radio-slika izvora. Kompleksna radio-emisija ovog izvora (nazvanog Fornax A), kao i ostala aktivnost u njegovom jezgru, objašnjava se sudarom ove dve galaksije, koji se smatra odgovorinim za dotok materije do crne rupe u jezgru galaksije NGC 1316 (Slika dobijena ljubaznošću NRAO/AUI i J. M. Uson, <http://www.nrao.edu/>).

sjaj okolnih zvezda zanemarljiv u ukupnom sjaju galaksije (što je čest slučaj kod kvazara). Dakle, radi se o vrlo kompaktnim oblastima koje još uvek nije moguće direktno posmatrati u većem delu elektromagnetnog spektra¹, pa se AGJ i njihove osobine proučavaju indirektno, proučavanjem spektra njihovog zračenja. Metode koje se pre svega koriste za istraživanja ovih objekata su spektroskopske metode. Analiza spektara je u slučaju aktivnih galaktičkih jezgara vrlo značajna za ispitivanje njihovih osobina. AGJ imaju vrlo karakterističan spektar sa jako izraženim emisionim linijama, pa se na osnovu spektara može steći predstava o njihovoj komplikovanoj kinematičkoj i fizičkoj strukturi. Unutar AGJ postoji više emisionih oblasti, sa različitim kinematičkim i fizičkim osobinama. Obradom, analizom i modeliranjem ukupnog spektra moguće je razdvojiti uticaje pojedinih emisionih oblasti i tako odrediti njihove karakteristike i položaj unutar jezgra.

¹Do sada su jedino u radio-području posmatrane strukture dimenzija reda 1 pc.

U ovoj doktorskoj disertaciji predstavljeno je istraživanje fizičkih osobina jedne od oblasti aktivnih galaktičkih jezgara, takozvane širokolinijske oblasti, iz koje dolaze izuzetno široke emisione linije (širine na polovini maksimalnog intenziteta se kreću od 1000 km s^{-1} do 10000 km s^{-1}). Tačnije, proučavaju se fizičke karakteristike ove oblasti (temperatura i gustina) i metode pomoću kojih se ove veličine mogu proceniti. Iako je prošlo više od 40 godina od otkrića AGJ, još uvek postoje otvorena pitanja o njihovoj strukturi i fizičkim procesima koji se tu odigravaju, a jedno od njih je i koje su vrednosti temperature i gustine širokolinijske oblasti. Do sada ne postoje jednostavni i direktni metodi (koji bi koristili jedino posmatrane široke emisione linije) za određivanje fizičkih karakteristika ove oblasti, već se koriste složeni programi za numeričku simulaciju spektra (kao što je npr. CLOUDY), na osnovu kojih se zaključuje o ovim osobinama, npr. temperaturi, stepenu jonizacije ili hemijskom sastavu.

Cilj ove doktorske disertacije je da kombinujući rezultate numeričkih simulacija (izvedenih pomoću numeričkog programa za simulaciju spektra CLOUDY) i posmatranih spektralnih karakteristika AGJ, dâ direktan i jednostavan metod kojim se mogu odrediti fizičke osobine, pre svega temperatura širokolinijskog regiona, koristeći posmatrane emisione linije, kao i da priloži razne testove kojim se procenjuje validnost ovog metoda. Metod se zasniva na Bolcmanplotu (BP), metodu koji se široko koristi u dijagnostici laboratorijske plazme i pomoću kojega se mogu proceniti temperatura i gustina plazme iz odnosa flukseva linija jedne spektralne serije, npr. Balmerove serije. U istraživanju se koriste i posmatranja aktivnih galaksija NGC 5548 u periodu od 8 godina i NGC 4151 u periodu od 11 godina, dobijena 6 m teleskopom SAO-a u Rusiji i 2.1 m INAOE teleskopom u Meksiku, ali i uzorak od pedesetak aktivnih galaksija preuzet iz SDSS baze (*Sloan Digital Sky Survey - SDSS*). Galaksije NGC 5548 i NGC 4151 su specifične s obzirom da im se fluks u kontinuumu i u emisionim linijama drastično menja tokom vremena, što za posledicu ima da ove galaksije menjaju tip tokom vremena, od tipa Sejfert 1 (široke linije sa superponiranim uskim linijama) do tipa Sejfert 2 galaksija (samo uske linije). S obzirom na takvu činjenicu, ove galaksije su vrlo zanimljive za proučavanja promena fizičkih osobina širokolinijskog regiona. Sa druge strane, veliki uzorak galaksija iz SDSS baze je korišćen radi statistički validne analize fizičkih karakteristika širokolinijske oblasti.

U prvom delu ove doktorske disertacije dat je opšti prikaz aktivnih galaksija, kompletan pregled osobina njihovog širokolinijskog regiona i rezultata dobijenih u dosadašnjim istraživanjima, kao i fizičke osnove predloženog istraživanja. Dalje u tekstu je detaljno opisan metod generisanja mreže numeričkih simulacija fizičkih uslova u širokolinijskom regionu uz pomoć CLOUDY programa. Dobijena mreža modela je upoređena sa posmatranim spektrima, pri čemu je poseban akcenat dat na upoređivanju odnosa intenziteta posmatranih emisionih linija i linija dobijenih numeričkim simulacijama, kao i na

vezi između odnosa flukseva linija Balmerove serije i odnosa flukseva helijumovih linija (He I 5876 Å i He II 4687 Å). U posljednjem delu disertacije dato je istraživanje vremenske zavisnosti fizičkih karakteristika i to u slučaju promenljivih aktivnih galaksija NGC 5548 i NGC 4151. Na kraju rada su izloženi zaključci istraživanja i dat je spisak korišćenih referenci. U Dodatku ove disertacije detaljno je opisan numerički kod CLOUDY, njegova instalacija, upotreba i primena, a navedeni su i neki osnovni atomski procesi koji se dešavaju u jonizovanom gasu.

2 Aktivna galaktička jezgra (AGJ)

Aktivne galaksije se po količini izračene energije iz jezgra koja ne potiče od zvezda, razlikuju od ostalih tzv. "normalnih" galaksija. Među AG postoje razlike po kojima ih klasifikujemo. Prvu klasu zvezdanih sistema sa aktivnim jezgrom čine Sejfertove galaksije². To su spiralne galaksije čije je jezgro izuzetno sjajno i čiji spektar ima jake emisione linije mnogostruko jonizovanih atoma, što ukazuje na postojanje nezvezdanog jonizacionog kontinuuma. Razlikuju se dva osnovna tipa Sejfertovih galaksija, Sejfert 1 galaksije, čiji spektar sadrži široke dozvoljene emisione linije i uske zabranjene linije, dok Sejfert 2 galaksije sadrže samo uske emisione linije (i dozvoljene i zabranjene). Mnoge galaksije imaju jezgra koja podsećaju na jezgro Sejfert 2 galaksija, s tim da im zabranjene linije nastaju u slabije jonizovanim emisionim oblastima, te ih nazivamo LINERs galaksije (*Low-Ionization Nuclear Emission-line Regions*), u prevodu nisko-jonizujuće emisione oblasti.

Aktivne galaksije koje zrače intenzivno u radio-području nazivamo radio-galaksijama. To su uglavnom eliptične galaksije, koje su podeljene na dva morfološki različita tipa: FR I i FR II³. Podela je izvršena na osnovu relativnog položaja maksimuma površinskog sjaja ("vrele 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 (Binney & Merrifield 1998). Kao i Sejfert galaksije, mogu se podeliti na osnovu izgleda spektra na usko-linijske 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 kao Sejfert 1 galaksije.

Kao posebnu klasu aktivnih galaksija, koji su ujedno nasjajni izvori na nebu, razlikujemo kvazare. To su zvezdoliki objekti koji zrače intenzivno u radio-području i čiji spektar pokazuje široke emisione linije značajno pomerene ka crvenom i sa apsolutnom magnitudom $M_B < -23$ (Osterbrock 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 su slabi radio-izvori.

Na kraju, posebnu klasu AGJ čine objekti pod nazivom BL Lacerte (Lacs). To su jezgra eliptičkih galaksija, koja se odlikuju brzim promenama sjaja i polarizovanim zračenjem, sa netermalnim optičkim kontinuumom i jakom radio-

²Ove galaksije su dobile ime po Karl Sejfertu (Carl Seyfert), koji je 1943. godine otkrio prvu klasu zvezdanih sistema sa aktivnim jezgrom (Seyfert 1943).

³Skraćenica FR je usvojena po autorima Fanaroff i Rilej, koji su izvršili klasifikaciju 1974. godine (Fanaroff & Riley 1974).

emisijom. Često se zajedno sa ovom grupom galaktičkih jezgara svrstava i drugi tip AGJ, a to su optički intenzivno promenjivi kvazari - OVVs (*Optically Violently Variable quasars*), koji za razliku od BL Lacs objekata emituju široke optičke emisione linije karakteristične za kvazare, dok kod BL Lacs emisione linije uopšte nisu detektovane. Ovi objekti se često grupišu u jednu klasu i nazivaju blazari.

2.1 Osobine AGJ

Aktivna galaktička jezgra su pre svega vrlo malih ugaonih dimenzija⁴. Njihove ugaone dimenzije zavise od posmatranog fluksa kao $\propto F_{\text{obs}}^{1/2}$, pa su galaksije koje su posmatrane kao najsjajnije i najvećih ugaonih dimenzija, ali su te dimenzije i dalje vrlo male da bi jezgro bilo direktno posmatrano. Međutim, neke emisione oblasti kod najbližih AGJ mogu biti direktno posmatrane. Jezgra aktivnih galaksija karakterišu vrlo velike luminoznosti. Do sada su izmerene luminoznosti AGJ u opsegu od $\sim 10^{42}$ do $\sim 10^{48}$ erg s⁻¹, što u stvari iznosi od 1% ukupnog sjaja obične galaksije pa do 10 hiljada puta većeg sjaja od ukupnog sjaja tipične galaksije. Naravno, ove granice treba uzeti sa rezervom jer je moguće da postoje i aktivna jezgra manjeg sjaja koja jednostavno nisu detektovana zbog sjajnijeg okolnog zvezdanog omotača, a moguće je da je stvarna luminoznost nekih AGJ i veća budući da su zaklonjena debelim slojem gasa i prašine koji apsorbuje deo zračenja. Njihovo zračenje u kontinuumu pokriva širok opseg frekvencija⁵, reda 10⁵ Hz, i može se približno opisati stepenim zakonom $F_{\nu} = k\nu^{-\alpha}$ gde je α spektralni indeks (npr. Krolik 1999, Peterson 2004). Kod nekih AGJ spektar je skoro ravan od infracrvenog do X-dela, te spektralni indeks ima vrednost $\alpha \approx 1$, mada je obično strmiji. U radio-području sjaj aktivnih galaksija je po pravilu za red veličine veći nego kod normalnih galaksija, ali iako je radio-zračenje intenzivno, ono nikad ne čini više od 1% bolometrijske luminoznosti. Deo snage koji se emituje u X-području je tri ili četiri puta veći, a registrovane su i neke podklase AGJ koje imaju γ fluks reda veličine kao na znatno manjim frekvencijama (Krolik 1999, Peterson 2004).

Promenljivost fluksa zračenja je još jedna osobina aktivnih galaktičkih jezgara, pri čemu zavisi od talasne dužine i vremenskog intervala u kojem se proučava promenljivost nekog objekta. U većini slučajeva te promene su bez neke uočljive periode i lako merljive amplitude. Postoji potklasa AGJ koja je

⁴Naravno to zavisi od talasne dužine u kojoj se posmatra dati objekat, jer na primer, u radio-području AGJ mogu imati izduženu strukturu koja ukazuje na prisustvo radio-mlazeva, dok u optičkom ima kompaktniji sferni oblik

⁵Za razliku od spektralne energetske raspodele normalnih galaksija, koja predstavlja u stvari sumiran spektar zvezda, gde se gotovo celokupna snaga galaksije izrači u vrlo malom opsegu talasnih dužina.

izrazito promenljiva u svim oblastima spektra, i kod kojih je ta promenljivost u korelaciji sa jakom polarizacijom, kompaktnom radio-strukturom i intenzivnim γ -zračenjem, i ta aktivna galaktička jezgra se nazivaju blazari (oni obuhvataju BL Lac i OVV objekte). Većina AGJ emituje zračenje koje je linearno polarizovano, gde je polarizacija reda $\simeq 0.5 - 2\%$, ali i polarizacija naravno zavisi od talasne dužine. Na primer radio-zračenje može biti par desetina procenata polarizovano, dok kod X-zračenja još nije detektovana polarizacija.

Iako je u principu moguće da su svi različiti tipovi AGJ fizički gledano objekti u kojima dominiraju suštinski različiti mehanizmi, danas je opšte prihvaćeno da su to fizički veoma slični objekti i da se razlika u njihovim posmatranim osobinama može opisati različitom luminoznošću i različitim uglom pod kojim ih posmatramo. To je suština jedinstvenog modela aktivnog galaktičkog jezgra, koji predviđa da se u centru nalazi supermasivna crna rupa sa akrecionim diskom, okružena neprozračnim torusom. Pored torusa, u blizini crne rupe nalaze se još dve emisije oblasti, širokolinijska i uskolinijska, koje su jonizovane od strane zračenja iz centra. Takođe, iz centralnog dela AGJ polaze usmereni relativistički mlazevi materije koji su normalni na ravan akrecionog diska i uglavnom zrače u radio-području, ali su vidljivi i u drugim talasnim dužinama.

2.2 Emisije linije AGJ

Jedna od upečatljivih karakteristika ovih objekata su njihovi linijski emisijski spektri. Kao što je rečeno, u spektru AGJ prisutno je elektromagnetno zračenje svih talasnih dužina: γ i X-zraci, ultraljubičasto, optičko, infracrveno i radio-zračenje, koje je posledica različitih fizičkih procesa (zakočno zračenje, inverzno Komptonovo rasejanje, sinhrotronsko zračenje i kreacija/anhilacija elektron - pozitron parova). Zračenje u kontinuumu uglavnom dolazi iz samog centra jezgra, tačnije iz akrecionog diska, koje jonizuje okolne emisije oblasti. Jasno je da se emisije oblasti tako kompaktnih izvora kao što su AGJ ne mogu razdvojiti, pa je posmatrani spektar u stvari superpozicija zračenja iz centralne oblasti i zračenja iz oblaka gasa oko centra AGJ, odakle dolaze emisije i apsorpcione linije.

Emisije linije su zanimljive iz dva razloga. Prvo, one su često veoma široke sa $\text{FWHM} \sim 10^4 \text{ km s}^{-1}$, gde je FWHM (*Full Width at Half Maximum*) širina na polovini maksimalnog intenziteta linije. Drugo, s obzirom na sadašnje znanje iz oblasti atomske fizike pogodne su za proučavanje i određivanje fizičkih uslova emisijonog gasa. Neke od linija koje se najčešće detektuju su Ly α linija, linije iz Balmerove serije, dublet CIV $\lambda\lambda 1548, 1550$, [OIII] $\lambda\lambda 4959, 5007$ linije i mnoge druge koje su znatno slabije. Vrlo često se detektuje i Fe K α 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 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 kod većine objekata javljaju i dozvoljene i zabranjene linije, s tim da su zabranjene uvek uske.

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 one formiraju. Te emisije oblasti su dobile ime upravo po uskim i širokim linijama, tako da postoje:

- **Širokolinijska oblast**, u daljem tekstu BLR (*Broad Line Region*), je kompaktna oblast, dimenzija u opsegu od nekoliko svetlosnih dana do nekoliko svetlosnih nedelja (npr. Kaspi et al. 2000, Peterson et al. 2004, 2005), koja se nalazi u blizini crne rupe (< 1 pc). Struktura ove oblasti je kompleksna i najverovatnije se sastoji od najmanje dve podoblasti (npr. Marziani et al. 1996, Popović et al. 2004, Sulentić et al. 2000). Jonizovan gas ove oblasti je relativno velike gustine ($n \sim 10^9 - 10^{10}$ cm⁻³) i temperature $T \sim 10^4$ K. Emiteri u njoj se kreću velikim brzinama, i po nekoliko hiljada km/s. Tu se formiraju široke emisije linije.
- **Uskolinijska oblast**, u daljem tekstu NLR (*Narrow Line Region*) prostire se do 1 kpc od centralnog izvora (Peterson 2004). Gustina u ovoj oblasti je znatno manja ($n \sim 10^3$ cm⁻³) nego u BLR, kao i brzina kretanja emitera (najviše do 1000 km/s), dok su temperature nešto niže, no istog reda veličine. Iz ove oblasti potiču uske emisije linije, često iz zabranjenih prelaza. Ona je po svojim fizičkim karakteristikama bliska emisionim maglinama, tako da se za njihovo određivanje mogu primeniti standardni metodi iz vrlo razvijene i proučavane fizike emisionih maglina (Osterbrock 1989, Osterbrock & Ferland 2006)

Istraživanje u ovoj disertaciji je ograničeno na širokolinijsku oblast i njene fizičke osobine, tako da će dalje u tekstu biti opisane njene karakteristike i struktura. Za detaljniji pregled posmatranih osobina aktivnih galaksija, klasifikaciju, strukturu i opis svake od emisionih oblasti, pogledati Ilić (2006).

3 Fizički procesi unutar širokolinijske emisione oblasti

Fizički procesi i kinematika unutar širokolinijske oblasti aktivnih galaktičkih jezgara su vrlo složeni, i svakako komplikovaniji nego kod uskolinijskog regiona ili planetarnih maglina (Osterbrock 1989, Krolik 1999, Sulentic et al. 2000). To je oblast jonizovanog gasa relativno blizu crne rupe, čije dimenzije mogu biti reda veličine od svega nekoliko svetlosnih dana. Dobila je ime po širokim emisionim linijama koje tu nastaju, kao što su $\text{Ly}\alpha$, linije Balmerove serije, CIV, CIII], HeII, HeI, FeII. Njihova širina na polovini maksimalnog intenziteta je u opsegu od par hiljada do 10 000 km s^{-1} , i posledica je doplerovskog kretanja gasa u gravitacionom polju. Kako brzine mogu da dostignu i 10% brzine svetlosti, rastojanje od crne rupe može biti malo, tj oko $100 R_g$ ($v \propto r^{-1/2}$). Struktura ove oblasti je i dalje nejasna, ali je najverovatnije da je oblast slojevita, u smislu da se sastoji od više podoblasti različitih kinematičkih osobina. Procene su da su temperature gasa reda $10^4 - 10^5$ K, a gustine $n \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, što se da zaključiti na osnovu prisutnosti, odnosno odsustva nekih linija u spektru AGJ. Ali za razliku od uskolinijskog regiona, HII regiona ili planetarnih maglina, kod kojih se na osnovu odnosa zabranjenih linija (npr. [OIII], [NII], [SII] linija) može relativno prosto odrediti temperatura i gustine (Osterbrock 1989), u slučaju BLR fizički uslovi se ne mogu odrediti koristeći direktno merene odnose linija. Izuzetak je metod za procenu elektronske temperature kod AGJ koji je predložio Laor (Laor 2006), ali on može da se primeni samo za neke specifične AGJ⁶.

3.1 Struktura širokolinijske emisione oblasti

Profili širokih emisionih linija se značajno razlikuju od objekta do objekta, ali i između linija istog objekta. Tako je na primer pokazano da postoje bitne razlike između profila linija radio-jakih i radio-slabih aktivnih galaksija (Sulentic et al. 2000). 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*)⁷, kao što su Balmerove i FeII linije, nastaju unutar dinamički različitih komponenti široko-linijske oblasti (Sulentic et al. 2000, Marziani et al. 1996). Razlika između HIL i LIL je posebno izražena kod radio-slabih aktivnih galaktičkih jezgara. Često je prisutna asimetrija u

⁶Više o ovom metodu je dato u poglavlju 3.2

⁷HIL nazivamo linije koje nastaju kod emitera sa jonizacionim potencijalom ≥ 50 eV, dok linije kod emitera gde je on ≤ 20 eV nazivamo LIL.

obliku profila, s tim da su podjednako zastupljene asimetrija ka plavom i ka crvenom delu spektra, pri čemu asimetrija ka plavom odmah navodi na ideju da je prisutno izbacivanje materije ka posmatraču. Naročito su interesantna proučavanja krila emisionih linija, jer zbog svoje naglašenosti, širine, asimetrije ili zaobljenog 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 (Krolik 1999, Wandel et al. 1999, Sulentic et al. 2000).

Pouzdan metod određivanja dimenzija širokolinijske oblasti je reverberaciono mapiranje (Blandford & McKee 1982, Netzer & Peterson 1997). Metod reverberacije⁸ koristi kašnjenje promene intenziteta emisionih linija u odnosu na promenu zračenja u kontinuumu. Iz tog kašnjenja signala određuju se dimenzije emisione oblasti. Kašnjenje nastaje zato što 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, prosečne luminoznosti. 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 kod proučavanog uzorka dimenzije širokolinijske oblasti u intervalu od 1 do 387 svetlosnih dana, a da su mase crne rupe u opsegu $(0.13 - 55) \times 10^7 M_{\odot}$.

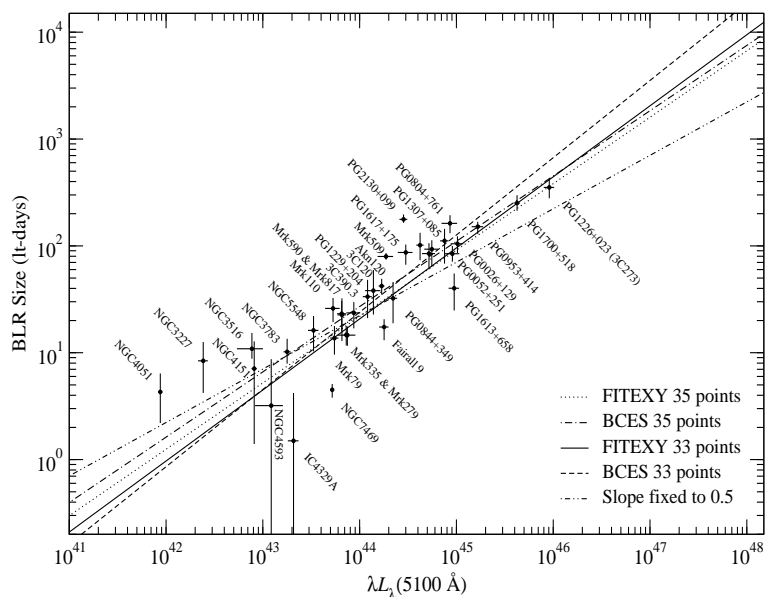
Pomoću rezultata reverberacione analize moguće je proceniti i masu crne rupe u centru AGJ, ako se pretpostavi da važi teorema virijala, odnosno da je gas unutar BLR gravitaciono vezan, te da važi

$$M \approx G^{-1}v^2r, \quad (3.1.1)$$

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). Istraživanja pokazuju da se dimenzije širokolinijske oblasti menjaju približno sa korenom luminoznosti, što se slaže sa predviđanjima fotojonizacionog modela, ukoliko se pretpostavi da kod različitih AGJ BLR imaju slične vrednosti za jonizacioni parametar i gustinu (Kaspi et al. 2000, 2005). Ovaj rezultat je teorijski dobijen korišćenjem pomenutih pretpostavki, a eksperimentalno se dobija stepena zavisnost između radijusa BLR i luminoznosti (Kaspi et al. 2000, 2005, Bentz et al. 2006, 2007b):

$$\log(R_{\text{BLR}}) = K + \alpha \log[\lambda L_{\nu}], \quad (3.1.2)$$

⁸Reč reverberacija dolazi od engleske reči *reverberation*, što znači odjek, eho, odražavanje.



Slika 2: Zavisnost dimenzija BLR od $\lambda L_\lambda(5100 \text{ \AA})$ luminoznosti (u jedinicama erg s^{-1}). BLR dimenzije svakog seta podataka su dobijene iz usrednjenog vremenskog kašnjenja Balmerovih linija. Vrednosti za objekte za koje postoji više setova podataka su usrednjene i na grafiku je data samo jedna tačka. Prikazano je i četiri fita (videti tekst) i prava za koju je fiksiran nagib $\alpha = 0.5$ (linija tačka-tačka-crtica) (Kaspi et al. 2005, Kaspi 2007).

gde je α nagib stepene funkcije između radijusa BLR i monohromatske luminoznosti a K je koeficijent skaliranja. Vrednost eksponenta α još uvek nije precizno određena (varira u opsegu od 0.47 do 0.88) zbog relativno malog broja objekata za koje su urađena reverberaciona istraživanja, kao i zbog praćenja promena fluksa različitih emisionih linija i kontinuum (videti rad McGill et al. 2008 za pregled svih poslednjih rezultata). Zanimljivo je istaći vrednost $\alpha \approx 0.50$ koju su dobili Bentz i saradnici (Bentz et al. 2006, 2007b), koja je u skladu sa prostim razmatranjima fotojonizacione teorije $\alpha = 0.50$ uz pretpostavke da sva AGJ imaju isti stepen jonizacije, gustinu i spektralnu energetska raspodelu jonizujućeg kontinuuma.

Na Slici 2 su date dimenzije BLR (u jedinicama svetlosnih dana) u funkciji od $\lambda L_\lambda(5100 \text{ \AA})$, gde je $L_\lambda(5100 \text{ \AA})$ luminoznost na 5100 \AA . Svaka tačka na grafiku predstavlja usrednjenu vrednost za svaki objekat. Na slici su prikazana četiri različita fita: koristeći svih 35 tačaka, neuključujući dva AGJ slabe luminoznosti (koja su pod velikim uticajem sopstvenog pocrvenjenja), i sa dva različita metoda fitovanja. U opsegu izmerenih luminoznosti (10^{42} – $10^{46} \text{ erg s}^{-1}$) svi fitovi su međusobno konzistentni i ulaze u opseg grešaka određivanja BLR dimenzija. Neslaganje ovih rezultata sa teorijski očekivanim nagibom od

0.5 ukazuje na to da ipak jednostavna pretpostavka da sva AGJ imaju isti jonizacioni parametar, gustinu i linijsku gustinu unutar BLR, kao i spektralnu raspodelu jonizujućeg kontinuuma, ne može biti validna i najverovatnije je da postoji neka promena, odnosno evolucija ovih karakteristika duž skale luminoznosti (Kaspi et al. 2005, Kaspi 2007).

Kinematika i geometrija širokolinijskog regiona još uvek nije do kraja ispitana. 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, spektroskopija je najdirektniji metod proučavanja kretanja gasa unutar BLR, odnosno njegove geometrije. Na osnovu proučavanja profila emisionih linija iz ove oblasti moguće je izvesti nekoliko osnovnih činjenica o prirodi BLR. Pre svega, postoji jak dokaz o prisustvu diskolike komponente barem u nekim AGJ. Naime, postoji relativno mali skup AGJ (od 2% do 5%), čiji spektar poseduje Balmerove linije sa dva pika, svega oko 4% na rastojanju $z < 0.33$ (Eracleous & Halpern 2004). Takve linije se najčešće povezuju sa rotirajućim keplerovskim diskom. Takođe, postoji jak dokaz o izbacivanju gasa kod mnogih AGJ. Neke emisione linije su izrazito asimetrične ka plavom delu spektra, ukazujući na to da je uglavnom posmatrano izbacivanje materije u nama bližoj oblasti AGJ. Apsorpcija pomerena ka plavom u odnosu na kosmološki crveni pomak galaksije je takođe prisutna 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. I na kraju, postoji jak dokaz da je izuzetno značajno gravitaciono ubrzavanje od strane centralnog izvora zračenja. 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 $r \propto \Delta V^{-2}$, gde je r rastojanje od centra a ΔV je disperzija brzina. Razumevanje strukture širokolinijskog regiona je neophodno za razumevanje celog fenomena aktivnih galaktičkih jezgara. 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,

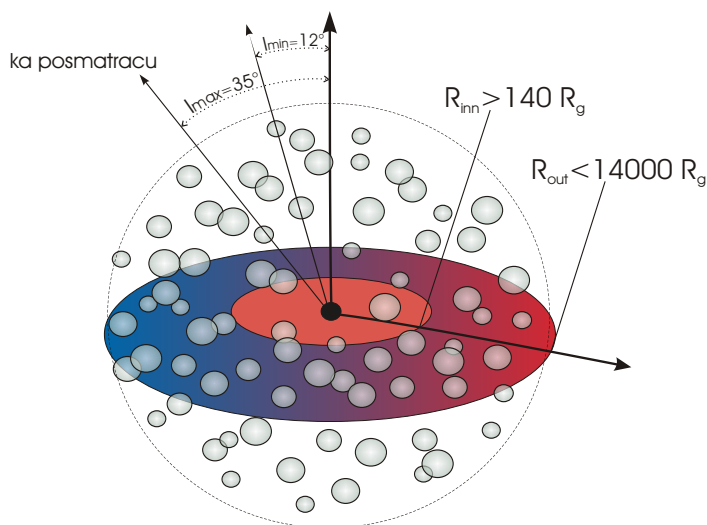
sa različitim karakteristikama, određenim osobinama crnih rupa. Ovaj model objašnjava prisustvo dva pika u nekim linijama kao i prisustvo dve različite komponente u krilima pojedinih linija (Gaskell 1988, 1996). Nedostatak ovog modela je što u jednom takvom sistemu teško mogu opstati stabilne širokolinijske oblasti (Eracleous & Halpern 1994).

2. *Oblaci gasa.* Stratifikacija BLR objašnjava se postojanjem velikog broja oblaka sa različitim osobinama, sferno-simetrično raspoređenih oko crne rupe. Asimetrija linija se objašnjava njihovom pokretljivošću i rasejavanjem zračenja na njima. Veliki nedostatak ovog modela je što je neophodno postojanje ekstremno velikog broja oblaka (10^7 - 10^8) da bi se postigao gladak profil emisione linije, a takođe 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). Ovde treba spomenuti i model "lokalnih optimalnih emitujućih oblaka" (*Locally Optimally emitting Clouds - LOCs*), koji pretpostavlja da su za svaku emisionu liniju odgovarni oblaci samo određenog i uskog opsega gustina i rastojanja od centralnog izvora, što rezultira sa maksimalnom efikasnošću emisije (Baldwin et al. 1995).
3. *Disk.* Ovaj model predviđa da široke linije nastaju unutar relativističkog keplerovskog akrecionog diska⁹ koji okružuje supermasivnu crnu rupu (Chen et al. 1989, Eracleous & Halpern 1994, 2003, Strateva et al. 2003). Najveća prednost ovog modela je što objašnjava profile linija sa dva značajno razdvojena pika, ali i velike elektronske gustine potrebne za nastanak FeII_{opt} 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 može da objasni promenljivost emisionih linija, jer u slučaju diska obe strane profila linije se menjaju kao rezultat promene fluksa jonizujućeg kontinuuma (Gaskell 1988), kao i to što su objekti koji imaju linije sa izražena dva pika uglavnom radio-jaki izvori, koji imaju najslabiju emisiju u FeII_{opt} (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 (Zheng et al. 1990, Marziani et al. 1996). Problem ovog modela je činjenica da asimetrija u linijama nije često prisutna, kao i to što se uglavnom javlja izrazita asimetrija u liniji samo ka plavom delu spektra, a model predviđa i postojanje toka

⁹ili je to neki vid spljoštene sredine koja okružuje akrecioni disk

materije koji se udaljava od posmatrača, odnosno asimetriju u liniji i ka crvenom delu spektra, koja je retko posmatrana u emisionim linijama.

5. *Dvo-komponentni model.* Mnogi autori razmatraju da se BLR 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, Popović et al. 1995, Sulentic et al. 2000, Popović et al. 2001, 2002, 2003, 2004, Ilić 2005, 2006, Ilić et al. 2006b, Bon et al. 2006). Unutrašnji delovi BLR čine VBLR. VBLR obuhvata gas sa najvećim brzinama koji je vrlo verovatno 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. Jedna od pretpostavki je da je VBLR disk, a da je ILR posledica vetra iz diska (Popović et al. 2004).



Slika 3: Šematski prikaz dvo-komponentnog modela centralne emisione oblasti aktivne galaksije Mrk 817 (Ilić 2005, Ilić et al. 2006).

Primer jednog dvo-komponentnog modela dat je na Slici 3. U pitanju je širokolinijska oblast aktivne galaksije Mrk 817. Na slici je prikazan akrecioni disk i sferna emisiona oblast, predstavljena preko velikog broja sferno raspoređenih oblaka gasa (Ilić 2005, 2006).

Statistički značajno reverberaciono proučavanje BLR (Kaspi et al. 2000, 2005, Peterson et al. 2004, 2005) 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 emisije linije formiraju u različitim fizičkim uslovima, kao i u širokom opsegu rastojanja od centralnog izvora.

3.2 Fizički procesi unutar širokolinijske emisije oblasti

Proučavanje širokolinijske oblasti aktivnih galaktičkih jezgara je važno iz mnogih razloga, od kojih je najočigledniji blizina i povezanost ove oblasti za sjajnim centralnim izvorom zračenja. Razumevanje fizičkih procesa unutar BLR nam može dati važne nagoveštaje o procesima koji se dešavaju u neposrednoj blizini masivne crne rupe, poreklu zračenja u kontinuumu koje zagreva BLR i fizičkim procesima odgovornim za proizvodnju energije AGJ uopšte. Nažalost, BLR do sada nije direktno posmatrana¹⁰ te samim tim i fizičko razumevanje BLR zahteva detaljne teorijske proračune, numeričke simulacije i pribavljanje spektara visokog kvaliteta. I danas, posle mnogo godina istraživanja, postoje fundamentalne stvari koje ne razumemo u vezi BLR, a tu spadaju geometrija i fizički procesi u gasu, kao i poreklo gasa u BLR.

Širokolinijska oblast se sastoji od gasa fotojonizovanog od strane termalnog zračenja u kontinuumu koje dolazi iz akrecionog diska, i nalazi se u neposrednoj blizini supermasivne crne rupe i akrecionog diska (< 1 pc). Budući da je tako blizu masivnoj crnoj rupi, fizičke karakteristike gasa u ovoj oblasti su sigurno pod uticajem jakog gravitacionog polja. Poređenje fluksa u kontinuumu i BLR fluksa pokazuje da je svega 10 % zračenja u kontinuumu apsorbavano 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 sunčevih masa. Čak i u slučaju najsjajnijih AGJ, masa BLR je zanemarljiva u odnosu na masu crne rupe u centru, jer je manja od $10 M_{\odot}$.

Klasična teorija pretpostavlja da je glavni izvor zagrevanja, odnosno jonizacije emitujućeg gasa u BLR fotojonizacija (videti npr. Kwan & Krolik 1981,

¹⁰Strukture dimenzija 1 pc su razlučene u radio-području posmatranjima pomoću radio-interferometara, mada zbog velikih grešaka optičkih posmatranja, nemoguće je precizno povezati posmatrane radio-strukture sa centrom optičkog zračenja koje bi eventualno moglo da se uzme za centralni izvor kontinuuma. Međutim, radi se na tome da se dobiju i optička posmatranja velike prostorne rezolucije.

Osterbrock 1989, Baldwin et al. 1995, 1996, Marziani et al. 1996, Ferland et al. 1998, Krolik 1999, Korista & Goad 2004), mada za par slučajeva je pokazano da oblast koja nije radijativno zagrejana doprinosi takođe ukupnom BLR spektru (Dumont et al. 1998, Shapovalova et al. 2008). Štaviše, budući da su koncentracije gasa u ovoj oblasti visoke ($n_H \sim 10^8 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$), a temperature reda 10^4 K , verovatnije je da su fizički uslovi u BLR sličniji uslovima u zvezdanim atmosferama nego u fotojonizacionim maglinama, kao što su planetarne magline ili HII regioni (Osterbrock 1989). Prema tome, mnoge spektroskopske metode koje su često korišćene za dijagnostiku fizičkih karakteristika emitujuće plazme u maglinama (npr. dijagnostika temperature i koncentracije na osnovu merenih odnosa zabranjenih linija) ne mogu da se primene u ovom slučaju (Osterbrock 1989, Griem 1997). Naročito je teško pronaći direktan metod koji bi koristio samo posmatrane široke emisije linije za procenu temperature i koncentracije u BLR.

Postoje neke indikacije da je temperatura u BLR $T < 35,000 \text{ K}$ na osnovu posmatranih emisionih linija jonizovanog gvožđa, jer bi za veće temperature Fe II bio skoro potpuno sudarno jonizovan u Fe III (Osterbrock & Ferland 2006). Sa druge strane, postoji par indikacija o granicama koncentracije gasa unutar BLR. Tako na primer, odsustvo emisije [OIII] λ 4363 u širokolinijskoj oblasti daje donju granicu koncentracije emitera. Kako je kritična gustina za sudarnu deekscitaciju nivoa 1S_0 kod O^{++} približna $\approx 10^8 \text{ cm}^{-3}$, dobijamo donju granicu gustine unutar BLR. Sa druge strane, gornja granica gustine sredine može da se dobije iz činjenice da je u spektru BLR prisutna široka CIII] λ 1909 linija. Kritična gustina za sudarnu deekscitaciju nivoa 3P_1 kod C^{++} iznosi 10^{10} cm^{-3} . Međutim, za gornju granicu gustine trebalo bi uzeti kritičnu gustinu sudarne deekscitacije širokih linija od $n_c \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. No ipak, neke linije nam mogu dati indikaciju o vrednosti koncentracije u BLR, ali samo u određenim opsezima koncentracija. Na primer, za vrednosti koncentracija od 10^9 do 10^{11} cm^{-3} neke polu-zabranjene linije su osetljive na gustinu, pa odnos linija SiIII] λ 1892/CIII] λ 1909 koji raste sa porastom gustine je zgodan aparat za procenu gustine. Takođe, linija AlIII] λ 1860 je posebno naglašena u slučaju kada je $n_e \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ (Sulentić et al. 2000).

Problem direktne procene fizičkih karakteristika širokolinijskog regiona na osnovu posmatranih širokih emisionih linija je aktuelan i danas. Pre svega, postoji mogućnost da se procene fizički uslovi u BLR pretpostavljajući teorijske modele i zatim ih upoređujući sa posmatranim spektrom (Osterbrock & Ferland 2006), ili pomoću numeričkih simulacija (Ferland et al. 1998, Korista & Goad 2000, 2004), mada i numeričke simulacije nisu u stanju da objasne neke posmatračke činjenice¹¹. U skorije vreme, Laor (2006) je predložio metod za procenu elektronske temperature i optičke dubine kod AGJ sa širokim emisionim linijama koje imaju vrlo izražena eksponencijalna krila, odnosno AGJ slabije lu-

¹¹Detaljnije o nedostacima numeričkih simulaciju u poglavlju 3.6.1

minoznosti (Laor 2006). Metod pretpostavlja da eksponencijalna krila širokih emisionih linija nastaju kao posledica optički retkog i izotropnog termalnog rasejanja elektrona. U tom slučaju, fitovanjem profila linija može se proceniti elektronska temperatura i optička gustina sredine (Laor 2006). Međutim, problem ovog direktnog metoda za procenu fizičkih osobina je što važi samo za redak slučaj linija sa jako širokim eksponencijalnim krilima (primer galaksije NGC 4395), ali i činjenica da kinematika emisionog gasa u BLR može jako da utiče na oblik profila linije.

Takođe, Popović (2003, 2006ab) je pokazao da u slučaju širokolinijskog regiona nekih AGJ, fluksevi Balmerovih linija vodonika prate Bolcman plot (BP), što ukazuje na to da se naseljenosti viših energetskih nivoa ($n \geq 3$) mogu opisati Saha-Bolcmanovom jednačinom. U tom slučaju, ako važi Saha-Bolcmanova raspodela viših energetskih nivoa vodonika, može se proceniti temperatura oblasti gde se ove linije formiraju¹². Ovaj metod je već uspešno primenjen na široke Balmerove linije vodonika za nekoliko slučajeva AGJ (Popović et al. 2002, 2003, Ilić et al. 2006a,b, La Mura et al. 2007a,b, Popović et al. 2008a). Ovaj metod, kao i metod Laora (Laor 2006), omogućava da se istražuju fizičke (termodinamičke) osobine BLR na direktan način, samo na osnovu merenja parametara širokih emisionih linija. Jedan od osnovnih ciljeva ove doktorske disertacije jeste da predloži jednostavan metod pomoću kojeg se mogu proceniti neke od fizičkih osobina širokolinijskog regiona (temperatura i koncentracija) na osnovu posmatranih linija vodonika i helijuma u vidljivom delu spektra.

Emisione linije u širokolinijskoj oblasti nastaju po rekombinaciji fotojonizovane sredine. Međutim uslovi čiste rekombinacije ne mogu se u potpunosti primeniti u slučaju BLR, jer se u praksi pokazuje da su na primer posmatrani odnosi flukseva linija različiti od odnosa koje predviđa teorija rekombinacije (kao primer se često navodi odnos $\text{Ly}\alpha/\text{H}\beta$ koji kod nekih AGJ iznosi ≈ 10 , dok teorija daje mnogo veće vrednosti i preko 30 (Netzer et al. 1995, Osterbrock 1989)). Nekoliko procesa može da dovede do takvog odnosa flukseva linija vodonika, pre svega sudarna ekscitacija i deekscitacija, kao i ekstinkcija. Za poslednjih 30 godina, veliki broj objavljenih radova je posvećen ovom problemu, videti na primer Netzer (1975), Ferland & Netzer (1979), Ferland et al. 1979, Kwan (1984), Rees et al. (1989), Ferland et al. (1992), Shields & Ferland (1993), Dumont et al. (1998), itd. Prašina je naravno prisutna u galaksiji kojoj pripada aktivno galaktičko jezgro (npr. Crenshaw et al. 2002, 2004, Gabel et al. 2005, itd.), ali izgleda da u nekim slučajevima ekstinkcija ne može da objasni izmerene odnose flukseva linija. Prema tome, pri izučavanju širokih emisionih linija treba uzeti u obzir i procese fotojonizacije i rekombinacije i sudarne ekscitacije i deekscitacije kao procese koji se javljaju u BLR. Za slučaj većeg jonizacionog parametra, rekombinacija je dominantniji proces, dok za veće temperature ili za slučaj manjeg jonizacionog parametra procesi sudarne

¹²Detaljnije o ovom metodu u poglavlju 3.5.

deekscitacije postaju takođe značajni (Osterbrock 1989). Ova dva procesa, kao i efekti prenosa zračenja u Balmerovim linijama vodonika, bi trebalo da se uzmu u obzir pri objašnjavanju odnosa flukseva linija vodonika. Pored toga, geometrija sredine i moguća prostorna raspodela karakteristika takođe utiču na kontinualni i linijski spektar AGJ (Goad et al. 1993). U daljem tekstu ćemo više pažnje posvetiti fotojonizaciji i metodama procene temperature jonizovanog gasa, kao što je na primer Bolcman-plot metod.

3.3 Fizički procesi u plazmi

Kinetička teorija gasova se bavi proučavanjem makroskopskih termodinamičkih karakteristika plazme, kao što su pritisak, temperatura, zapremina, uzimajući u obzir hemijski sastav gasova i njihovo kretanje, kao i mikroskopske karakteristike emitera. Pre razmatranja osnovnih kinetičkih modela plazme, neophodno je razjasniti koje sve temperature određuju stanje plazme. Razlikujemo kinetičku temperaturu gasa T_{kin} koja određuje Maksvel-Bolcmanovu raspodelu brzina

$$f(v)dv = \left(\frac{m}{2\pi kT_{\text{kin}}}\right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT_{\text{kin}}}\right) dv, \quad (3.3.1)$$

gde su m i v masa i brzina čestice, a k je Bolcmanova konstanta. Zatim, postoji temperatura ekscitacije T_{eks} koja sledi iz Bolcmanove raspodele, koja opisuje odnos naseljenosti dva energetska nivoa N_1 i N_2

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{g_1}{g_2} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT_{\text{eks}}}\right), \quad (3.3.2)$$

gde su g i E statistička težina i energija određenog diskretnog energetskog nivoa. Temperatura jonizacije T_{jon} određuje raspodelu Saha koja opisuje odnos naseljenosti dva stanja jonizacije N_{k+1} i N_k

$$\frac{N_{k+1}}{N_k} = \frac{2}{n_e} \frac{(2\pi m_e k T_{\text{jon}})^{3/2}}{h^3} \frac{g_{k+1}}{g_k} \exp\left(-\frac{E_{k+1} - E_k}{kT_{\text{jon}}}\right), \quad (3.3.3)$$

gde je n_e koncentracija elektrona, a E_{k+1} i E_k odgovarajuće energije jonizacije stanja $k + 1$ i k . Dalje, elektronska temperatura gasa T_e se dobija iz energije koju nose sami elektroni

$$E_k = kT_e. \quad (3.3.4)$$

I, na kraju, temperatura zračenja T_{zr} određuje Plankovu raspodelu zračenja

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT_{\text{zr}}) - 1}, \quad (3.3.5)$$

gde je h Plankova konstanta a c brzina svetlosti.

Najprostiji kinetički model kojim se može opisati jonizovan gas je model **termodinamičke ravnoteže** (TR). U tom slučaju karakteristike gasa se ne menjaju u prostoru i vremenu, a mogu se opisati Maksvelovom, Bolcmanovom i Saha raspodelama, a sve prethodno navedene temperature su međusobno jednake:

$$T_{\text{kin}} = T_{\text{eks}} = T_{\text{jon}} = T_{\text{e}} = T_{\text{zr}}.$$

Međutim, teško je očekivati da se u prirodi nađe gas koji se u potpunosti nalazi u TR, mnogo je verovatnije da se gas nalazi u **lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži** (LTR), što znači da se karakteristike gasa menjaju u prostoru i vremenu, ali su te promene toliko spore da se za svaku tačku može pretpostaviti da u njenoj okolini važi termodinamička ravnoteža. U slučaju LTR sve temperature su međusobno jednake osim temperature zračenja koja se razlikuje od svih ostalih:

$$T_{\text{kin}} = T_{\text{eks}} = T_{\text{jon}} = T_{\text{e}} \neq T_{\text{zr}}.$$

No ipak, mnoge plazme u praksi nisu blizu ni potpune LTR, ali moguće je da u nekim slučajevima važi **parcijalna termodinamička ravnoteža** (PLTR) u smislu da su naseljenosti dovoljno visoko ekscitovanih energetskih nivoa opisane pomoću Saha-Bolcmanove raspodele (Griem 1997). U slučaju PLTR imamo situaciju da se jedino temperatura ekscitacije može aproksimirati elektronskom temperaturom:

$$T_{\text{kin}} \neq T_{\text{jon}} \neq T_{\text{zr}} \neq T_{\text{eks}} \simeq T_{\text{e}}.$$

Pored ovih kinetičkih modela gasa, postoje i **model koronalne plazme i sudarno-radijativni model gasa**. Prvi model može da se primeni u slučaju male koncentracije gasa. Gas se tada nalazi u koronalnoj jonizacionoj ravnoteži, što znači da postoji ravnoteža između brzine sudarne jonizacije u stanje $z - 1$ i radijativne rekombinacije u stanje z po jedinici zapremine. Sudarno-radijativni model važi za veće koncentracije gasa, ali je i on za slučaj mirne i prostorno homogene plazme kao i prethodni modeli, i predstavlja u principu prelazni model između koronalnog i LTR modela. Osnovna jednačina za opis stanja plazme je **jednačina jonizacione ravnoteže** koja opisuje ravnotežu između svih procesa jonizacije i procesa rekombinacije.

Koronalna ravnoteža ili ravnoteža sudarne jonizacije¹³ je dinamička ravnoteža između sudarne jonizacije sa osnovnog stanja različitih atoma i jona prisutnih u plazmi i procesa rekombinacije sa viših stanja jonizacije, gde su svi joni u osnovnom stanju. Osnovna razlika između koronalne plazme i plazme u LTR je što je u slučaju LTR jednačina jonizacione ravnoteže u stvari jednačina Saha, a naseljenosti svih ekscitovanih nivoa su opisane Bolcmanovom jednačinom. Ravnoteža sudarne jonizacije uključuje, u principu, tri jonizaciona stanja određenog elementa, $i - 1$, i i $i + 1$, povezanih pomoću procesa sudarne jonizacije, različitih rekombinacija i razmene naelektrisanja¹⁴. Ukoliko su naseljenosti ovih

¹³Naziv potiče od primenljivosti ovog modela na vrele zvezdane korone.

¹⁴Detaljnije o atomskim procesima u plazmi dato je u Dodatku B.

stanja jonizacije n_{i-1} , n_i i n_{i+1} respektivno, onda se uslov sudarne jonizacije ravnoteže može napisati kao

$$n_e n_i \alpha_{\text{coll}}^i + n_i \sum_{x=H^0, He^0} n_x \alpha_{\text{ce}}^i = n_e n_{i+1} \alpha_{\text{rec}}^{i+1} + n_{i+1} \sum_{x=H^0, He^0} n_x \alpha_{\text{ce}}^{i+1}, \quad (3.3.6)$$

gde je α_{coll} koeficijent sudarne jonizacije, α_{ce} je koeficijent razmene naelektrisanja a α_{rec} koeficijent rekombinacije (Dopita & Sutherland 2003). Slučaj koronalne aproksimacije se bazira na pretpostavci da se brzina jonizacije na levoj strani odnosi samo na osnovno stanje jona. Ukoliko se zanemari proces razmene naelektrisanja (što je validna pretpostavka za slučaj vodonika ili helijuma za plazmu sa sunčevom zastupljenošću), jednačina 3.3.6 se svodi na elegantno rešenje

$$\frac{n_{i+1}}{n_i} = \frac{\alpha_{\text{coll}}^i}{\alpha_{\text{rec}}^{i+1}}. \quad (3.3.7)$$

3.3.1 Fotojonizacija

Šta leži u osnovi fotojonizacije, odnosno spektra fotojonizovanog gasa? Uzmimo da se spektar formira unutar oblaka, relativno retkog gasa, koji je skoro providan za zračenje. Takav oblak je izložen izvoru zračenja velikih energija (npr. u slučaju AGJ radi se o intenzivnom zračenju u kontinuumu akrecionog diska). Fotoni velike energije jonizuju gas, a ostatak energije predaju izbačenim elektronima, koji ga zagrevaju. Ti se fotoelektroni sudaraju sa emiterima i dovode do njihove ekscitacije, koji se posle vraćaju u osnovno stanje proizvodeći **sudarno ekscitovane emisione linije**. Izbačeni elektroni mogu eventualno da se rekombinuju sa jonima i dovedu do produkcije **rekombinacionih emisijonih linija**. Ili, ako slabije zračenje u kontinuumu na putu do posmatrača prolazi kroz hladniji gas, gas će proizvesti **apsorpcione linije**. Analiza ovako emitovanog spektra daje nam informacije o sastavu, gustini, pritisku i temperaturi gasa, kao i karakteristikama samog izvora zračenja u kontinuumu.

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 napuste sredinu ne interagujući sa njom. Da bi se predvideo ukupni linijski spektar, svaki od ovih parametara mora biti određen i svi procesi koji se dešavaju u plazmi moraju biti razmatrani konzistentno. U većini slučajeva koristi se jednačina termalne ravnoteže i jednačina jonizacije ravnoteže. A obično se pretpostavlja i da su procesi vremenski nepromenljivi, iako to nije svaki put odgovarajuća pretpostavka. Konačan oblik jednačine jonizacije ravnoteže 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 Milneove relacije, koja kaže

da u stanju termodinamičke ravnoteže, svi procesi i njima inverzni procesi moraju biti ujednačeni. U slučaju kada se ona primeni na fotojonizaciju i njoj inverzan proces rekombinaciju, znači da broj spontanih i radijativnih rekombinacija elektrona u opsegu brzina $v, v+dv$ odgovara broju fotojonizacija u opsegu frekvencija $\nu, \nu + d\nu$, gde je $m_e v^2/2 + h\nu_I = h\nu$ (ν_I je frekvencija koja odgovara energiji određenog stanja jonizacije I). Posledica ovoga je da je $m_e v dv = h d\nu$. U slučaju LTR, kombinujući Plankovu funkciju za raspodelu zračenja, Sahinu jednačinu za jonizacionu ravnotežu i Maksvel-Bolcmanovu raspodelu brzina, dobijamo da je Milneova relacija između efikasnog preseka za fotojonizaciju $\sigma_{\text{phot}}(v)$ i rekombinaciju $\sigma_{\text{rec}}(v)$ za brzinu elektrona v i statističku težinu stanja g , oblika

$$(m_e c v)^2 \sigma_{\text{rec}}(v) = \frac{g_i}{g_{i+1}} (h\nu)^2 \sigma_{\text{phot}}(v). \quad (3.3.8)$$

Bliska veza između procesa jonizacije (sudarna jonizacija i fotojonizacija) i procesa rekombinacije (dielektrična i radijativna rekombinacija) uslovljava da se izračunavanje brzina ovih procesa mora obaviti konzistentno koristeći isti set atomskih parametara. Ranije su često neki od procesa tretirani odvojeno koristeći različite metode, ali nedavno su Nahar & Pradhan (1997) dali prvi samo-usaglašen račun za efikasne preseke fotojonizacije i rekombinacije koristeći metod R-matrica. U slučaju vodoniku sličnih jona naelektrisanja Z , efikasni presek za fotojonizaciju, $\sigma_{1s}(E)$, i energija jonizacije, E_{1s} , se za visoke frekvencije mogu aproksimativno izračunati pomoću jednačina

$$E_{1s} = Z^2 I_H \text{ i} \\ \sigma_{1s}(\nu) = \frac{2^9 \pi^2 \alpha a_0^2}{3 Z^2 e^4} \left(\frac{E_{1s}}{h\nu} \right)^{3.5} = \frac{6.3042 \times 10^{-18}}{Z^2} \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{-3.5} [\text{cm}^2], \quad (3.3.9)$$

gde je I_H jonizacioni potencijal vodonika a ν_0 odgovarajuća frekvencija, α je konstanta fine strukture a a_0 je Borov radijus (Dopita & Sutherland 2003).

Parametar kojim se često opisuju osobine fotojonizovanog gasa je jonizacioni parametar U (ponekad obeležavan sa Γ). Postoji više definicija ovog parametra, one su konceptualno iste, ali svaka definicija ima svoje tehničke prednosti i mane. Za procenu jonizacione ravnoteže najkorisnija je sledeća definicija jonizacionog parametra

$$U = \int \frac{J_\nu d\nu}{c h \nu n_H}, \quad (3.3.10)$$

gde je J_ν srednji intenzitet zračenja (u jedinicama energije po jedinci površine, vremena, prostornog ugla i u jediničnom frekvencionom 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, jonizacioni parametar predstavlja odnos koncentracije jonizujućih fotona, koji

dovode do fotojonizacije, i koncentracije jonizovanog vodonika, koja utiče na rekombinaciju. Najdominantniji proces emisije fotona iz fotojonizovanih atoma je radijativna rekombinacija, budući da je to inverzan proces fotojonizacije. Postoji par sličnih procesa koji takođe mogu biti relevantni za formiranje linija u aktivnim galaktičkim jezgrima. To su procesi dielektrične rekombinacije, rekombinacije pomoću tri tela i izmene naelektrisanja (Detaljnije u Dodatku B).

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 zračenja u kontinuumu po jediničnom intervalu talasnih dužina, L_λ važi sledeća veza (Osterbrock 1989):

$$L_{H\beta} = L_\lambda(\lambda 4861)W_0(H\beta) = L_\nu(\lambda 4861)\frac{d\nu}{d\lambda}W_0(H\beta), \quad (3.3.11),$$

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

$$L_\nu \sim \nu^{-n} \quad (3.3.12)$$

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

$$L_{H\beta} = h\nu_{H\beta} \frac{\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)}{\alpha_B(H^0, T)} \int_{\nu_0}^{\infty} \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu, \quad (3.3.13)$$

ova relacija postaje

$$W_0 = \frac{\lambda_{H\beta}}{n} \frac{\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)}{\alpha_B(H^0, T)} \left(\frac{\nu_0}{\nu_{H\beta}} \right)^{-n} = \frac{568}{n} (5.33)^{-n}, \quad (3.3.14)$$

gde su numeričke vrednosti date u Å i izračunate za temperaturu $T = 10^4$ K, iako odnos rekombinacionih koeficijenata ($\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}(H^0, T)/\alpha_B(H^0, T)$) praktično ne zavisi od temperature (Osterbrock 1989). $\alpha_{H\beta}^{\text{eff}}$ je efektivni rekombinacioni koeficijent $H\beta$ linije, dok je α_B ukupan rekombinacioni koeficijent neutralnog vodonika, u koji nisu uračunati procesi rekombinacije na osnovni nivo. 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.

Jasno je da u slučaju AGJ izvor jonizacije oblasti koje emituju emisijski spektar ne mogu biti vrele zvezde, kao što je slučaj kod HII regiona, gde imamo slične emisijske 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 [OII] 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" zračenjem, koje je u UV delu spektra, ali i na mnogo višim frekvencijama.

Iako su dokazi prilično jasni, da većina AGJ emituje linije usled apsorpcije zračenja u kontinuumu koje dolazi iz akrecionog diska i njegove korone, moguće je da postoje objekti u kojima je primarni izvor energije mehanička energija udarnih talasa. Zračenje u kontinuumu 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 ovo objašnjenje još uvek dosta nesigurno. 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 uskolinijaska 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 kontinuumu, 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 u linijama (primer galaksije NGC 4151 (Mundell et al. 2003)).

3.4 Dijagnostika temperature laboratorijske plazme

U mnogim slučajevima pri određivanju temperature gasa neophodno je pravi razliku između kinetičke temperature elektrona, jona i atoma (T_e , T_j , T_a). Ove temperature se mogu međusobno razlikovati čak iako su raspodele brzina ovih čestica Maksvelovske. Međutim, mnogi tipovi laboratorijske plazme su dovoljno guste, dugoživeće i imaju relativno glatku prostornu promenu, pa im se bar raspodela brzina elektrona može opisati pomoću Maksvelove raspodele. U tom slučaju koncept lokalne elektronske temperature je validan i koristan (Griem 1997). Većina spektroskopskih metoda merenja temperature u stvari daju elektronsku temperaturu. Ti metodi su bazirani na relativnom odnosu intenziteta linija istog atoma ili jona, na osnovu relativnih intenziteta linija iz

susednih stanja jonizacije istog elementa, na relativnom intenzitetu kontinuuma, na odnosu relativnog ili apsolutnog intenziteta kontinuuma, itd (Griem 1997). Osnovna pretpostavka kod svih metoda je da Doplerovo širenje linija dominira nad svim ostalim mehanizmima širenja. Ovde ćemo malo detaljnije opisati samo dva metoda određivanja temperature: pomoću relativnog intenziteta linija istog jona ili atoma i pomoću relativnog intenziteta linija iz susednih stanja jonizacije istog elementa.

3.4.1 Relativni intenzitet linija istog jona ili atoma

Ovaj metod podrazumeva da se radi o optički retkoj i homogenoj plazmi. Za takvu plazmu intenzitet integraljen po profilu emisione linije ($m \rightarrow n$) duž linije posmatranja je dat sa (Griem 1997):

$$i_{nm} = \frac{\hbar\nu_{mn}}{4\pi} A_{mn} N_m l, \quad (3.4.1)$$

gde je ν_{mn} frekvencija datog prelaza, A_{mn} verovatnoća prelaza, N_m naseljenost energetskog nivoa m , l dužina sredine, a \hbar je redukovana Plankova konstanta.

Ako imamo plazmu koja je u PLTR do gornjih nivoa prelaza m_1 i m_2 dveju emisionih linija istog jona ili atoma, onda se populacije tih nivoa mogu opisati Saha-Bolcmanovom raspodelom. U tom slučaju, koristeći jednačinu 3.3.2, odnos intenziteta dve emisione linije čiji su gornji energetski nivoi m_1 i m_2 je

$$R = \frac{i_{n_1 m_1}}{i_{n_2 m_2}} = \frac{\nu_{m_1 n_1} A_{m_1 n_1} g_{m_1}}{\nu_{m_2 n_2} A_{m_2 n_2} g_{m_2}} \exp\left(-\frac{E_{m_1} - E_{m_2}}{kT}\right). \quad (3.4.2)$$

Odatle se dobija temperatura koja odgovara datom odnosu linija

$$kT = \frac{E_{m_2} - E_{m_1}}{\ln(\nu_{m_2 n_2} A_{m_2 n_2} g_{m_2} R / \nu_{m_1 n_1} A_{m_1 n_1} g_{m_1})} \quad (3.4.3)$$

i zavisi logaritamski od odnosa linija R i ostalih veličina u argumentu logaritma. Ukoliko argument obeležimo sa X , onda je relativna greška temperature data kao

$$\left|\frac{\Delta T}{T}\right| = \frac{kT}{E_{m_2} - E_{m_1}} \left|\frac{\Delta X}{X}\right|. \quad (3.4.4)$$

Eksperimentalna greška u $\Delta X/X$ je retko manja od 0.1, što ukazuje na grešku u elektronskoj temperaturi $\sim \pm 10\%$ čak i kada su uslovi u plazmi takvi da plazma teži ka PLTR i poznate su tačne vrednosti verovatnoće prelaza A . Tačnost određivanja temperature se može povećati ukoliko se mere odnosi linija jedne spektralne serije i zatim fituju logaritmi ovih relativnih intenziteta, prethodno naravno pomnoženi sa odgovarajućim faktorima koji se javljaju u jednačini 3.4.3, u zavisnosti od energije ekscitacije gornjeg nivoa u prelazu. Ako

razmatrane tačke na takvom Bolcman-plotu padaju blizu prave linije, može se odrediti tačnija vrednost za kT iz recipročne vrednosti nagiba te prave. Bilo kakvo značajno odstupanje od takvog linearnog fita može da ukazuje na odstupanje od PLTR, na grešku u vrednosti A_{mn} ili na greške izdvajanja i merenja ukupnog intenziteta linija iz posmatranog spektra.

Ako imamo plazmu za koju ne može da se pretpostavi da su gornji nivoi u PLTR, prethodno navedene relacije ne bi trebalo da se koriste. U svakom slučaju, ukoliko postoje podaci za brzine sudara i neki kinetički model kojim se može opisati razmatrana plazma, moguće je odrediti temperaturu iz izmerenih odnosa linija bilo fitujući posmatrani spektar sa sintetičkim, bilo razmatrajući granične, odnosno jednostavne slučajeve. Primer za to su rezonantne linije i linije viših serija jona sličnih litijumu kod koronalne plazme. U tom slučaju odnos linija R je dat sa (Griem 1997)

$$R = \frac{i_{n_g m_1}}{i_{n_g m_2}} \approx \frac{\nu_{m_1 n_g} X_{m_1 g}}{\nu_{m_2 n_g} X_{m_2 g}} \approx \frac{(\bar{g}f)_{m_1 g}}{(\bar{g}f)_{m_2 g}} \exp\left(-\frac{E_{m_1} - E_{m_2}}{kT}\right), \quad (3.4.5)$$

gde je X_{mg} koeficijent brzine ekscitacije (što je u osnovi verovatnoća sudara), koji aproksimativno može da se predstavi preko konstantnog Gaunt faktora \bar{g} i jačine apsorpcionog oscilatora f . Zavisnost temperature od odnosa linija se svodi na isto kao i u slučaju PLTR, jedino što ovde postoji dodatan izvor greške zbog vrednosti verovatnoće sudara. Iako je ovaj metod određivanja temperature prilično jednostavan i pravolinijski, usled relativno male razlike između energija ekscitacije, eksperimentalne greške i teorijskih neodređenosti, ipak on ne dovodi do preciznog merenja temperature.

3.4.2 Relativni intenzitet linija iz susednih stanja jonizacije istog elementa

U slučaju guste plazme u LTR i sa poznatom koncentracijom N_e , može se mnogo preciznije nego u prethodno opisanom metodu odrediti temperatura plazme, mereći relativne integralne intenzitete i i i' od recimo, linija neutralnog atoma i susednog jona. U tom slučaju njihov odnos je dat sa (Griem 1997)

$$R = \frac{i'}{i} = \frac{\nu' A' g'}{\sqrt{\pi} \nu A g} (4\pi a_0^3 N_e)^{-1} \left(\frac{kT}{E_H}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E' + E_\infty - E - \Delta E_\infty}{kT}\right), \quad (3.4.6)$$

gde je g statistička težina gornjeg nivoa, a_0 Borov radijus, E_H energija jonizacije vodonika, E energija ekscitacije atoma, E_∞ i ΔE_∞ energija jonizacije atoma i njena redukovana vrednost¹⁵. Pogodnost ovog metoda je da je kombinacija

¹⁵U prisustvu oblaka elektrona dolazi do smanjenja energije jonizacije atoma ili jona kao posledica međusobne Kulonove interakcije.

energija u eksponentu često mnogo veća od kT , što znatno pojednostavljuje račun greške.

Ukoliko elektronska koncentracija nije dovoljno velika da se obezbede uslovi LTR za jonizaciju i ekscitaciju do nivoa E' , moguće je koristiti isti metod za slučaj kombinacije koronalne plazme i plazme kod koje važi PLTR za naseljenosti dva gornja energetska nivoa u odnosu na naseljenost osnovnog nivoa sledećeg stanja naelektrisanja. Tada je odnos linija dat sa (Griem 1997)

$$R = \frac{i'}{i} = \frac{\nu' A' g'}{\nu A g} \exp\left(\frac{E'_\infty - E' - E_\infty + E}{kT}\right) \frac{g_i S}{g'_i \alpha}, \quad (3.4.7)$$

gde su S i α koeficijent brzine jonizacije i rekombinacije, respektivno. Ukoliko se za S i α uzmu odgovarajući koeficijenti za sudarno-radijativni model, ovaj metod se može primeniti i za jonizovan gas srednje gustine koja se nalazi između koronalnog i LTR režima (Griem 1997).

3.5 Boltzmann-Plot (BP) metod u slučaju BLR

U slučaju plazme debljine ℓ koja emituje duž pravca posmatranja, može se izračunati da je fluks (ili spektralno integrisan intenzitet) emisione linije F_{ul} atomskog prelaza sa gornjeg na donji nivo ($u \rightarrow l$) jednak (Griem 1997, Konjević 1999, Popović 2003, 2006ab):

$$F_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \int_0^\ell N_u(x) dx, \quad (3.5.1)$$

gde je λ talasna dužina prelaza, g_u je statistička težina gornjeg nivoa, A_{ul} je verovatnoća prelaza, N_u je broj emitera ekscitovanih na gornji nivo i koji efektivno doprinose fluksu linije, a h i c su Plankova konstanta i brzina svetlosti, respektivno. Ako pretpostavimo da je naseljenost energetskih nivoa u posmatranom regionu (u svim slojevima) opisana Saha-Bolcmanovom raspodelom, onda važi sledeća jednačina

$$N_u(x) \approx \frac{N_0(x)}{Z} \exp(-E_u/kT(x)), \quad (3.5.2)$$

odnosno, jednačina (3.5.1) postaje

$$F_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \int_0^\ell \frac{N_0(x)}{Z} \exp(-E_u/kT(x)) dx. \quad (3.5.3)$$

Ovde je Z particiona funkcija, N_0 je ukupna koncentracija čestica koje zrače, E_u je energija gornjeg nivoa u prelazu, T je temperatura i k je Bolcmanova konstanta.

U realnom slučaju ne može se očekivati da je unutar prostranog širokolinijskog regiona raspodela fizičkih karakteristika homogena, pa samim tim ni ukupna koncentracija emitera, niti temperatura širokolinijskog regiona nisu konstantne duž pravca posmatranja. Iz tog razloga, podelimo širokolinijski region na n tankih slojeva sa konstantnim fizičkim osobinama. U tom slučaju možemo da zapišemo jednačinu (3.5.3) kao

$$F_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \sum_{i=1}^n \frac{N_0(i)}{Z} \exp(-E_u/kT(i)) \ell_i. \quad (3.5.4)$$

Ako pretpostavimo da se duž BLR temperatura menja kao $T(i) = T_{av} \pm \Delta T_i$ i da se koncentracija emitera menja kao $N_0(i) = N_0^{av} \pm \Delta N_0(i)$, gde su T_{av} i N_0^{av} srednja temperatura i koncentracija sredine, onda se jednačina (3.5.4) može napisati u obliku

$$F_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \frac{N_0^{av}}{Z} \sum_{i=1}^n (1 + \delta N_0(i)) \exp \left[-\frac{E_u}{kT_{av}} \frac{1}{(1 + \delta T_i)} \right] \ell_i, \quad (3.5.5)$$

gde su $\delta T_i = \Delta T_i/T_{av}$ i $\delta N_0 = \Delta N_0/N_0^{av}$. Ako pretpostavimo i da je promena temperature i koncentracije emitera u BLR mala, odnosno da je $\Delta N_0/N_0^{av} \ll 1$ i $\Delta T_i/T_{av} \ll 1$, jednačina (3.5.5) postaje

$$F_{ul} = \frac{hc}{\lambda} g_u A_{ul} \frac{N_0^{av}}{Z} \exp(-E_u/kT_{av}) \ell. \quad (3.5.6)$$

Tada se sledeća relacija, što je već pomenuti Bolcman-plot (BP), može koristiti za određivanje temperature T_{av} u BLR (Popović 2006b):

$$\log_{10}(F_n) = \log_{10} \frac{F_{ul} \cdot \lambda}{g_u A_{ul}} = B - AE_u, \quad (3.5.7)$$

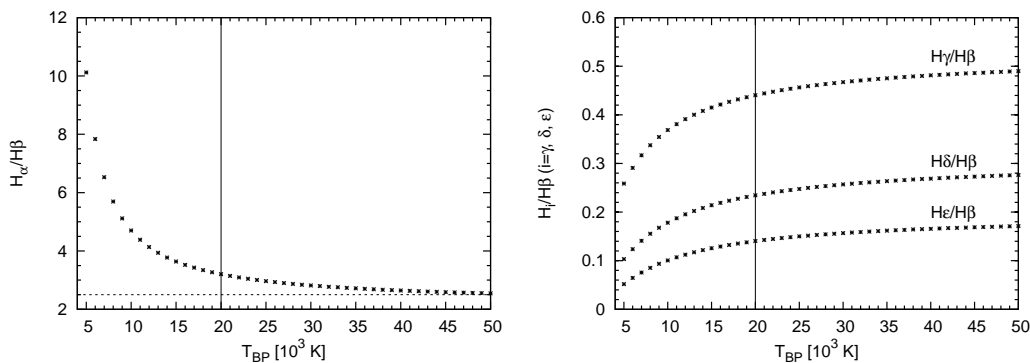
gde su B i A parametri, a

$$A = \frac{\log_{10}(e)}{kT} \approx \frac{5040}{T[\text{K}]} \quad (3.5.8)$$

je indikator temperature emisionog regiona. F_n je fluks linije skaliran pomoću atomskih parametara određenog prelaza. Dakle, u slučaju jedne atomske serije linija (npr. Balmerove serije) ako se naseljenost gornjih energetskih nivoa ($n \geq 3$)¹⁶ može opisati Saha-Bolcmanovom raspodelom, onda se primenom jednačine (3.5.7) na flukseve te atomske serije, može odrediti vrednost parametra A . Iz ovog parametra se može proceniti temperatura emisione oblasti gde nastaju korišćene emisione linije.

¹⁶Budući da deekscitacija ide sa gornjeg na donji nivo $u \rightarrow l$ nije neophodno da i donji nivo l bude opisan Saha-Bolcmanovom raspodelom.

Ovde treba skrenuti pažnju na to da BP metod uzima *a priori* samo činjenicu da sve linije jedne serije, na primer Balmerove serije koja je korišćena u ovom radu, nastaju u istoj emisionoj oblasti. Takođe, ne treba izjednačavati BP sa Balmerovim dekrementom (*Balmer decrement*), koji je u stvari samo odnos $H\alpha$ i $H\beta$ linije (eventualno i $H\gamma$), jer se BP metod primenjuje na celu seriju, i to normalizovanih linija. Sa druge strane problemi prenosa zračenja i velikih optičkih gustina linija vodonika komplikuju sliku ove emisione oblasti, ali je moguće izvršiti dodatne testove koji pokazuju validnost primenjivosti BP metoda (Popović et al. 2008). Pored toga, i slučaj "Case B" rekombinacije¹⁷ može dovesti do sličnih odnosa Balmerovih linija pa i parametara Bolemanplota kod nekih AGJ, čiji se širokolinijski regioni mogu aproksimirati "Case B" rekombinacijom (Osterbrock 1989). Ali u takvim slučajevima, fizički uslovi (gustina i temperatura) u ovoj oblasti su takvi da je parametar A relativno mali ($A < 0.2$), pa se samim tim ni BP metod ne može koristiti za procenu temperature, iako se formalno BP može primeniti, odnosno normalizovani fluksevi linija se mogu fitovati jednačinom (3.5.7) (Popović 2003, 2006ab, Ilić et al. 2006b). Na kraju, logično je postaviti pitanje zašto predlažemo da se BP metod primenjuje baš na linije Balmerove serije vodonika, kada se zna da kod njih postoje razni problemi tačnog merenja fluksa, kao što su na primer samoapsorpcija ili zagađenje satelitskim linijama. Odgovor na ovo pitanje je jednostavan i posledica je pre svega tehničke prirode, jer najlakše je posmatrati Balmerovu seriju vodonika, budući da se ona cela nalazi u optičkom delu spektra i obuhvaćena je skoro uvek pri posmatranjima. A sa druge strane, vodonika ima najviše i u slučaju BLR, pa su i ove linije intenzivne.



Slika 4: Odnos Balmerovih linija kao funkcija temperature. Fluksevi emisionih linija su izračunati pomoću jednačine (3.5.3). Levo je dat odnos $H\alpha/H\beta$ linija, dok su desno dati odnosi $H\gamma/H\beta$, $H\delta/H\beta$, i $H\epsilon/H\beta$. Granica za temperaturu od 20,000 K je data vertikalnom linijom na oba grafika, a levo je predstavljen i konstantan odnos $H\alpha/H\beta = 2.5$.

¹⁷B-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.

Koristeći jednačinu (3.5.3) izračunati su odnosi flukseva emisionih linija Balmerove serije, kako bi se proverilo kakva je zavisnost njihovog odnosa od temperature, naročito u slučaju $H\alpha/H\beta$ odnosa linija. Iz jednačine (3.5.3) vidi se da odnosi linija ne zavise od koncentracije i debljine emisione oblasti, već samo od temperature. Varirajući temperaturu od 5 000 to 50 000 K, izračunati su fluksevi Balmerovih linija, od $H\alpha$ do $H\epsilon$ linije. Na Slici 4 su predstavljeni u funkciji temperature fluksevi ovih Balmerovih linija normalizovanih na fluks $H\beta$ linije. Dobijene vrednosti su u opsegu očekivanih vrednosti koje su i posmatrane kod AGJ. Jasno se vidi sa Slike 4 da posle temperature od $\approx 20\,000$ K odnos linija nije više osetljiv na temperaturu i počinje da bude približno konstantan, pa to predstavlja i ograničenje u korišćenju BP kod Balmerove serije.

3.6 Numeričke simulacije oblasti jonizovanog gasa

Kao što je već rečeno u uvodu ove disertacije, spektroskopija sadrži vrlo efikasne metode za istraživanje objekata koji emituju elektromagnetno zračenje, ili da citiramo Garija Ferlanda (*Gary J. Ferland*): *"Najveći deo kvantitativnih informacija koje imamo o vasioni dobili smo pomoću spektroskopije: na primer tu su apsorpcione linije poreklom od međugalaktičke materije umetnute u spektar dalekih kvazara, emisione linije iz maglina ili emisione linije samih kvazara"* (Ferland 2003).

Kod aktivnih galaksija i emisionih maglina elektromagnetni spektar je emitovan iz jonizovanog gasa određene temperature, gustine i stepena jonizacije. Na karakteristike gasa, kao što su na primer kinetička temperatura gasa, stepen jonizacije ili naseljenosti nivoa, utiču svi mikroskopski procesi koji se odvijaju u tom gasu. Da bi se odredili fizički uslovi i predvideo izlazni spektar takve sredine treba simultano rešiti jednačine statističke i termalne ravnoteže, jednačine prenosa zračenja, jednačine koje opisuju procese jonizacije i neutralizacije, kao i procese zagrevanja i hlađenja gasa. Analitička rešenja koja bi dala takav spektar su retko moguća, tako da jedan od načina istraživanja fizičkih karakteristika emisionih oblasti je pomoću numeričkih simulacija.

Prve numeričke simulacije spektra fotojonizovanog gasa su počele da se rade sa pojavom prvih kompjutera. Do sada postoji nekolicina dobro razvijenih numeričkih kodova, koji su se simultano razvijali od sedamdesetih godina. Neki od njih su: ION (Netzer & Ferland 1984, Rees et al. 1989, Netzer 1993), AANGABA (Gruenwald & Viegas 1992), MAPPINGS I (Binette et al. 1985, 1993ab), MAPPINGS II (Sutherland & Dopita 1993), XSTAR (Kallman & McCray 1982), NEBU (Petitjean et al. 1990), CLOUDY (Ferland et al. 1998), SUMA (Viegas & Contini 1994), i drugi. Naravno da se radi o kompleksnim

kompjuterskim programima koji obuhvataju što je moguće više fizičkih procesa koji se dešavaju u fotojonizovanom gasu (a mnogi uključuju i jonizaciju izazvanu udarnim talasima). Međutim, treba imati u vidu da često nije odmah očigledno koji fizički procesi najviše doprinose posmatranom spektru. Tako da prosta aproksimacija ponekad mnogo bolje opisuje sistem od komplikovanog iterativnog procesa koji zadaje numerička simulacija, odnosno sam analitički pristup analizi spektra ne treba biti zapostavljen.

Prosto rečeno, numeričke simulacije omogućavaju da razumemo kompleksne fizičke sredine pomoću fundamentalnih fizičkih zakona. Kod za simulaciju spektra **CLOUDY** služi baš za to. On je zamišljen da metodom iteracije simulira fizičke uslove (odnosno temperatursku, jonizacionu i hemijsku strukturu oblaka gasa) i predvidi rezultujućí izlazni spektar gasa u non-LTE¹⁸ režimu, koji je izložen spoljašnjem izvoru zračenja (kao što je npr. slučaj kod HII regiona ili emisionih oblasti AGJ). Za ovo istraživanje je uzet baš CLOUDY pre svega zbog relativno jednostavne upotrebe, ali naročito zbog toga što tim naučnika svakodnevno radi na njegovom razvijanju i poboljšavanju. Takođe, programski kod je otvorenog tipa i dostupan je svima za upotrebu. Detalji o samom programu i fizičkim pretpostavkama od kojih se polazi, kao i njegovoj instalaciji, načinu korišćenja i primeni, nalaze se u Dodatku A ove disertacije.

3.6.1 Program CLOUDY i AGJ

Uz pomoć programa CLOUDY mogu dobro da se modeliraju uskolinijski i širokolinijski regioni aktivnih galaksija, jer je osnovni mehanizam jonizacije ovih sredina fotojonizacija od strane zračenja u kontinuumu iz akrecionog diska (videti npr. Ferland & Persson 1989, Ferland et al. 1992, Kwan & Krolik 1981, Marziani et al. 1996, Dumont et al. 1998, Goad & Koratkar 1998, Ferland 1999, Korista & Goad 2000, 2004, Baldwin et al. 2004, Casebeer et al. 2006, Bruhweiler & Verner 2008). Iako su numeričke simulacije ovih regiona jako napredovale, i dalje postoji nekoliko važnih problema koji nisu rešeni (Ferland 1999).

Neka od otvorenih pitanja koja CLOUDY ne razmatra su:

- stratifikacija BLR, pristup koji CLOUDY ima je dosta pojednostavljen;
- činjenica da su profili emisionih linija tako glatki, prostorna raspodela brzina unutar BLR (HIL i LIL imaju različit crveni pomak);
- problem odnosa nekih emisionih linija, odnosno neslaganje sa posmatranim odnosima. Specijalno se tu izdavaju problemi posmatranog malog odnosa nekih linija vodonika i odnosa UV i optičkih linija jonizovanog gvoždja Fe II, koje fotojonizacioni modeli ne mogu da opišu;
- problem viška energije kontinuuma, itd.

¹⁸Gas koji nije u lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži.

Naime, jedan od najzanimljivijih problema je mali posmatrani odnos $\text{Ly}\alpha$ i $\text{H}\beta$ linija (najčešće 5 - 15), dok modeli predviđaju mnogo veći (30 - 50) (videti Netzer et al. 1995 i reference navedene unutar članka). Skorija istraživanja (Baldwin et al. 2004) pokazuju da je pomoću CLOUDY programa uz pretpostavku jakog gradijenta brzina ili velikih mikroturbulentnih brzina, moguće reprodukovati UV Fe II linije, ali optička Fe II emisija je u tom slučaju za red veličine manja nego posmatrana. Takođe, isti autori pokazuju da u slučaju da je Fe II emisija rezultat sudarne jonizacije i ekscitacije, posmatranja mogu podjednako dobro da se fituju, ali opet ne mogu se simultano objasniti UV i optička Fe II emisija. Na kraju, neophodno je pomenuti i "problem viška energije" (Netzer 1985, Collin-Souffrin 1986, Dumont et al. 1998, Gaskell et al. 2007), a koji se odnosi na to da je posmatrani odnos ukupnog BLR fluksa (kome doprinose najviše optičke emisije linije i Balmerov kontinuum) i fluksa $\text{Ly}\alpha$ linije, veći od teorijskih predviđanja. Jedno moguće objašnjenje ovog problema je to što fotojonizacija nije jedini mehanizam zagrevanja, odnosno jonizacije sredine. Moguće je da mehanizmi kao što je jonizacija udarnim talasom ili radio-džetom takođe doprinose stvaranju linija (Dumont et al. 1998, Shapovalova et al. 2008).

4 Simulacije fizičkih parametara BLR pomoću CLOUDY programa

Jedan od zadataka ove teze je da opiše i da dâ jednostavan metod za dijagnostiku gasa širokolinijskog regiona aktivnih galaksija koristeći samo posmatrane široke emisione linije. Za to smo krenuli od Bolcman-plot metoda koji se naširoko koristi za dijagnostiku plazme u laboratorijskim uslovima, i za koji je pokazano da u nekim slučajevima može da se primeni na široke emisione linije AGJ (Popović 2003, 2006ab, Popović et al. 2008a). Kako bi testirali pod kakvim uslovima može BP metod da se koristi, generisane su mreže fotojonizacionih modela BLR koristeći programski kod CLOUDY¹⁹. Razmatrane su različite koncentracije gasa, linijske gustine i jonizujućeg fluksa kako bi se postigli uslovi da gornji nivoi neutralnog vodonika prate Saha-Bolcmanovu raspodelu neophodnu za dijagnostiku gasa uz pomoć BP metoda. Pored toga, uzete su u obzir i linije neutralnog i jonizovanog helijuma, koje su takođe dobijene u numeričkim simulacijama BLR. Metod koji predlažemo koristi se za procenu temperature i koncentracije vodonika širokolinijskog regiona koristeći samo vodonikove linije Balmerove serije i linije helijuma: He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$. Koriste se baš ove linije pre svega zato što su nam uvek dostupne jer se nalaze u optičkom delu spektra i obuhvaćene su skoro uvek pri posmatranjima. Detaljnije o tome pogledajte u odeljku 3.4 i 3.5.

4.1 Simulacije fotojonizacionih modela BLR

Kako bi se ispitali fizički uslovi unutar BLR za koje BP metod može da se primeni, simuliran je veliki broj fotojonizacionih modela BLR uz pomoć CLOUDY programa (verzija C07.02.01: Ferland et al. 1998, Ferland 2006)²⁰. Ulazni parametri u simulacijama su izabrani tako da opišu standardne uslove u BLR (Ferland 2006, Korista & Goad 2000, 2004). Za simulacije je pretpostavljeno da su unutar BLR hemijski sastav i raspodela gustine konstantni. Za upadni kontinuum je korišćen standardni oblik AGJ koji je tabelarno zadat u samom programu. Da bi se dobila mreža simulacije, varirana su dva ulazna paramtera: koncentracija vodonika $n_{\text{H}}(\text{cm}^{-3})$ i jonizujući fluks fotona $\Phi_{\text{H}}(\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1})$. Parametri su varirani u širokom opsegu, gde je koncentracija bila u intervalu od $\log n_{\text{H}} \in [8, 12]$ a jonizujući fluks $\log \Phi_{\text{H}} \in [17, 22]$, sa korakom od 0.2, što je rezultiralo sa ukupno 546 simulacije. Za početak, mreža simulacija je urađena pretpostavljajući da je svuda ista linijska gustina od $N_{\text{H}} = 10^{23}\text{cm}^{-2}$, koju

¹⁹Programski kod i njegova upotreba su detaljno opisani u Dodatku A.

²⁰Detaljnije o programu nalazi se u Dodatku A na kraju ove disertacije.

mnogi autori navode kao najverovatniju u slučaju BLR (Dumont et al. 1998, Korista & Goad 2000, 2004). Dalje za detaljniju analizu, iste mreže simulacija su kreirane za različite linijske gustine, N_{H} je menjano u opsegu $10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-2}$ s, pa je ukupno urađeno 5 mreža od po 546 simulacija. Primer fajla sa ulaznim parametrima za $n_{\text{H}} = 10^{10} \text{cm}^{-3}$, $\Phi_{\text{H}} = 10^{19} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ i $N_{\text{H}} = 10^{23} \text{cm}^{-2}$ je:

```
table agn
hden 10
phi 19
print last iteration
stop column density 23
iterate to convergence
```

Budući da se radi o velikom broju simulacija (ukupno 2730), koje su pored toga i zahtevne za CPU vreme (u proseku oko 20 minuta po simulaciji), mreže numeričkih simulacija su rađene automatski. U tu svrhu su napisane skripte u dinamičkom programskom jeziku *Perl*. Skripte su napisane tako da se za fiksiranu linijsku gustinu variraju koncentracija vodonika i jonizujući fluks.

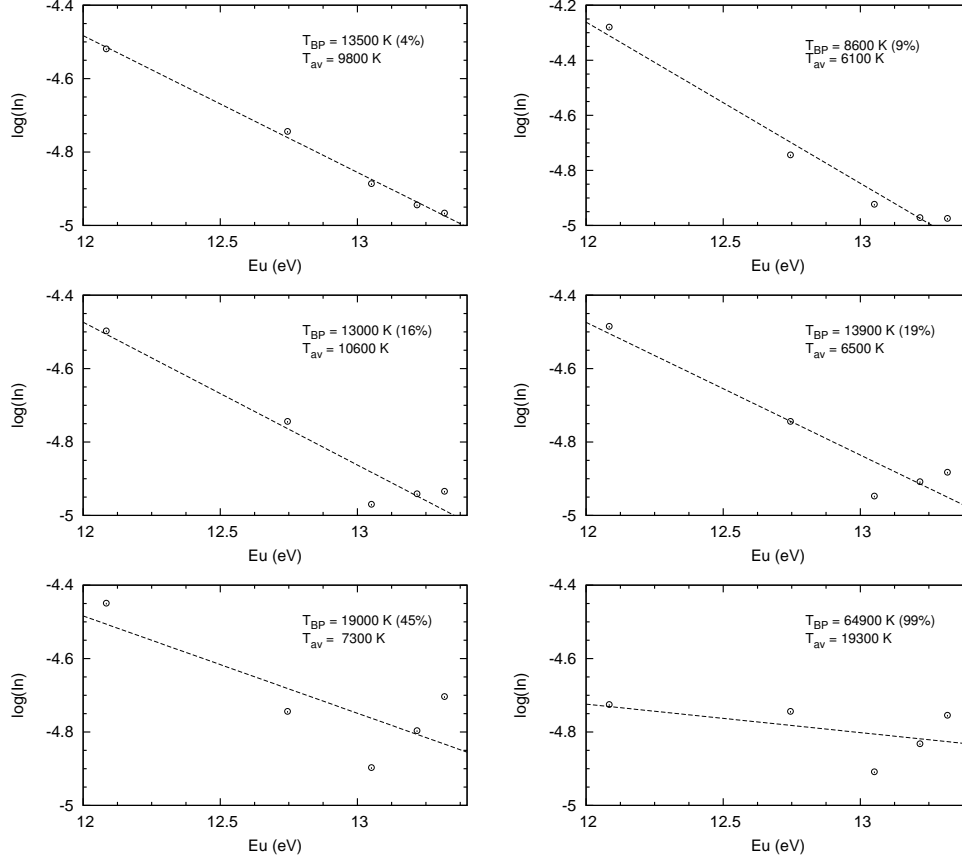
4.2 Rezultati i analiza numeričkih simulacija

Dalji rad na rezultatima CLOUDY numeričkih simulacija se sastojao u analizi dobijenih flukseva emisionih linija. Program daje izlazni fajl koji sadrži flukseve svih linija formiranih u emitujućoj oblasti određenog hemijskog sastava, koncentracije vodonika i jonizujućeg fotonskog fluksa. Svi dobijeni fluksevi linija su normalizovani na $\text{H}\beta$ liniju, pa kako to nema nikakvog uticaja na BP analizu, dalje u radu su korišćeni fluksevi normalizovani na fluks $\text{H}\beta$ linije.

Glavna ideja u razmatranju rezultata simulacija je da se primeni prethodno već opisan BP metod na flukseve Balmerove linije koje daje CLOUDY. U osnovi, uz pomoć jednačine 3.5.7 primenjene na Balmerove linije procenjuje se BP temperatura (T_{BP} dalje u tekstu) oblasti gde se ove linije formiraju (Slika 5). Pored Balmerovih linija, razmatrane su i sledeće simulirane veličine: odnos flukseva helijumovih linija He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$, temperatura usrednjena po BLR radijusu (T_{av} dalje u tekstu), jonizacioni parametar Γ ($U \equiv \frac{\Phi(\text{H})}{n(\text{H})c}$), kao i temperatura prve i poslednje zone oblaka gasa²¹. Specijalno su uzete u razmatranje ove dve linije helijuma iz razloga što su to linije istog elementa iz dva različita stanja jonizacije, pa je sa tim i njihov odnos He II $\lambda 4686$ /He I $\lambda 5876$ osetljiv na promene temperature i gustine (poglavlje 3.4.2, Griem 1997). Pored

²¹CLOUDY radi tako što podeli sredinu na tanke koncentrične zone, tako da je njihova debljina dovoljno mala da fizički uslovi u zoni budu skoro konstantni (Detaljnije u Dodatku A).

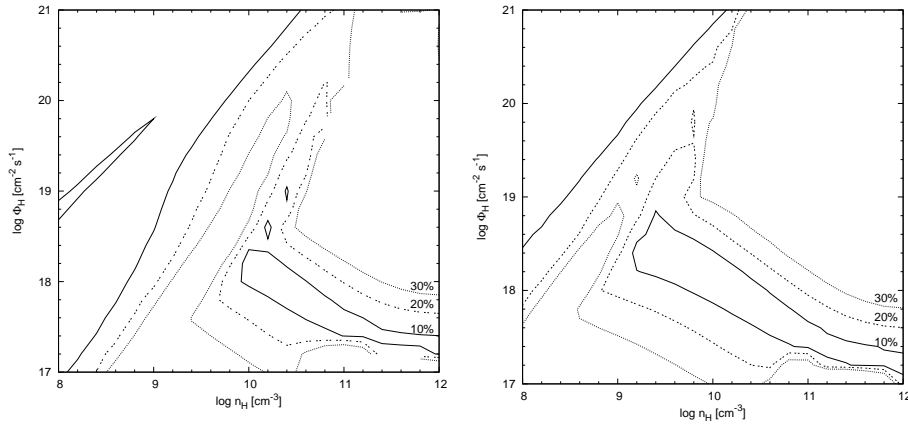
toga, ove dve linije helijuma su u istom spektralnom opsegu kao i Balmerove linije, te ukoliko su prisutne uvek su posmatrane kad i Balmerove linije.



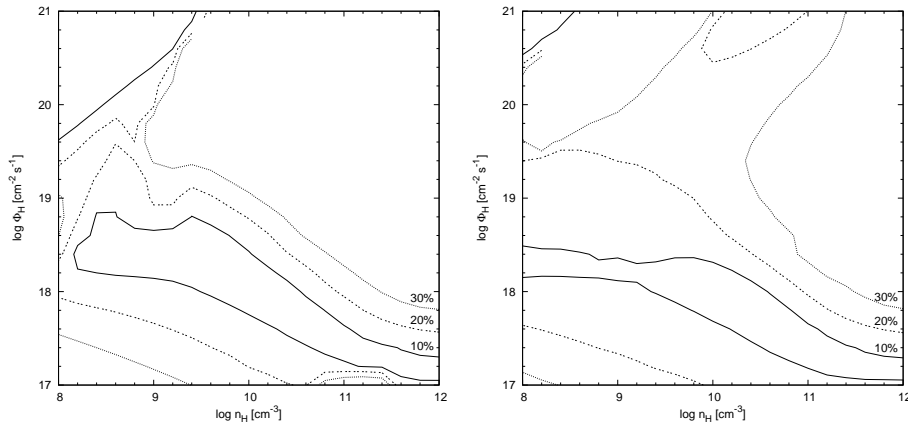
Slika 5: Neki primeri BP metoda primenjenog na Balmerove linije dobijene CLOUDY numeričkim simulacijama za linijsku gustinu $N_H = 10^{23} \text{cm}^{-2}$. Normalizovani intenziteti F_n su izračunati uz pomoć jednačine 3.5.7 koristeći Balmerove linije normalizovane na fluks $H\beta$ linije. U desnom uglu svakog grafika date su BP temperatura T_{BP} , greška BP fita i srednja temperatura T_{av} .

Kako bi se dobile željene veličine iz velikog broja izlaznih fajlova, neophodno je bilo napisati skriptu za automatsko izdvajanje potrebnih podataka. Procedura izdvajanja podataka radi tako što na osnovu prepoznavanja određene ključne reči u izlaznom fajlu čita vrednost tražene fizičke veličine i zapisuje u posebnu tabelu. U tabelu su pored ulaznih parametara koncentracije vodonika i jonizujućeg fluksa, zapisivani fluksevi Balmerovih linija vodonika ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, $H\epsilon$), linija helijuma ($He II \lambda 4686$, $He I \lambda 5876$), srednja temperatura, parametar jonizacije, debljina oblasti i optičke dubine u vodonikovim $Ly\alpha$ i $H\alpha$ linijama, kao i temperatura prve i poslednje zone oblaka gasa. Posebna tabela je napravljena za svaku mrežu simulacija, kako bi se razmatrali rezu-

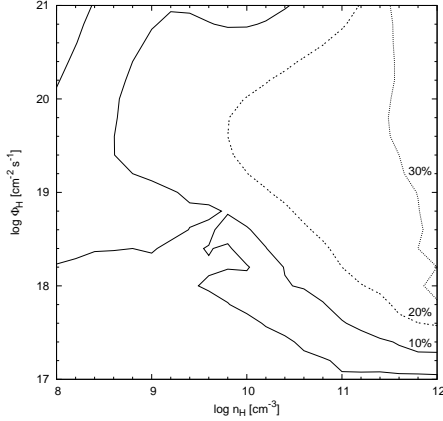
ltati posebno za svaku linijsku gustinu. Ove skripte su takođe pisane u *Perl* dinamičkom programskom jeziku. Dalje je na Balmerove linije ($H\alpha$ - $H\epsilon$) za svaki par n_H i Φ_H primenjen BP metod (jednačine 3.5.7 i 3.5.8) i određen je parametar temperature A i BP temperatura T_{BP} . Nekoliko primera BP metoda primenjenog na Balmerove linije dobijene CLOUDY numeričkim simulacijama za linijsku gustinu $N_H = 10^{23}\text{cm}^{-2}$ su dati na Slici 5. U mnogim slučajevima nije mogao da se dobije zadovoljavajući fit jednačine 3.5.7, odnosno greške fita su velike. Na par primera sa Slike 5 se vidi da se u slučaju velike greške fita dobija velika BP temperatura T_{BP} , znatno veća nego što je očekivana temperatura unutar BLR kod AGJ.



Slika 6: Greška BP fita primenjenog na Balmerove linije simulirane CLOUDY programom u ravni koncentracija vodonika - jonizujući fluks za linijske gustine $N_H = 10^{21}\text{cm}^{-2}$ (levo) i $N_H = 10^{22}\text{cm}^{-2}$ (desno). Na slikama su predstavljene samo konture unutar kojih je greška manja od 10%, 20% i 30%.



Slika 7: Isto kao i na Slici 6 samo za slučaj linijskih gustina $N_H = 10^{23}\text{cm}^{-2}$ (levo) i $N_H = 10^{24}\text{cm}^{-2}$ (desno).



Slika 8: Isto kao i na Slici 6 samo za slučaj linijskih gustina $N_H = 10^{25} \text{cm}^{-2}$.

Ova činjenica je još primetnija u slučaju većih vrednosti koncentracije vodonika i jonizujućeg fluksa fotona. Iz tog razloga, nacrtan je grafik koji pokazuje greške BP fita u ravni koncentracije vodonika - fluks jonizujućih fotona kako bi se videlo u kojoj oblasti ovih parametara BP fit daje najmanje greške (Slika 6 - 8). Na Slikama 6 - 8 su date konture koje pokazuju za koje parametre BP fit ima grešku 10%, 20% i 30%, uzimajući u obzir rezultate svih simulacija (kasnije u daljoj analizi uvedena su određena ograničenja pa je samo deo simulacija korišćen). Ukoliko pretpostavimo da se BP metod može smatrati validnim u slučaju da je greška fita manja od 10% (eventualno 20%), onda je jasno sa Slika 6 - 8 da su vrednosti fizičkih parametara za koje to važi ograničene za sve vrednosti linijske gustine N_H . To ukazuje na to da za neke fizičke uslove naseljenost energetskih nivoa vodonika sa $n \geq 3$ može da se aproksimira Saha-Bolcmanovom raspodelom. U slučaju kada je greška BP metoda primenjenog na izmerene flukseve Balmerovih linija veća od 10 %, tada možemo da kažemo da BP ne daje validan rezultat i da se na taj način ne može izvršiti procena temperature.

Dalje u analizi je uvedeno nekoliko ograničenja pri izboru rezultata numeričkih simulacija koji će biti detaljnije razmatrani.

1. Prvo ograničenje je da je greška fitovanja pomoću BP metoda manja od 10%. Skup podataka tako izabranih je obeležen sa "BP 10%".
2. Drugo, uzeto je da srednja temperatura T_{av} emitujuće oblasti koju daju numeričke simulacije nije veća od 20 000 K. Ovo ograničenje je uvedeno iz razloga što za veće temperature odnosi Balmerovih linija nisu osetljivi na promenu temperature (što je pokazano u odeljku 3.5 i na Slici 4) pa se i aproksimacija Saha-Bolcmanove raspodele ne može primeniti (Popović 2006b).
3. Treće ograničenje se odnosi na odnos linija helijuma. Usvojeno je da

je njihov odnos $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$ manji od 2, što je očekivana vrednost dobijena iz posmatranja (Kollatschny et al. 2001, Vanden Berk et al. 2001).

Uz ta tri uslova, broj simulacija u analiziranim uzorcima je sa 543, sveden na 22 (4.03 %) za slučaj linijske gustine $N_{\text{H}} = 10^{21}\text{cm}^{-2}$, odnosno 35 (6.41 %) za $N_{\text{H}} = 10^{22}\text{cm}^{-2}$, odnosno 54 (9.94 %) za $N_{\text{H}} = 10^{23}\text{cm}^{-2}$, odnosno 50 (9.16 %) za $N_{\text{H}} = 10^{24}\text{cm}^{-2}$, i 73 (13.37 %) za $N_{\text{H}} = 10^{25}\text{cm}^{-2}$.

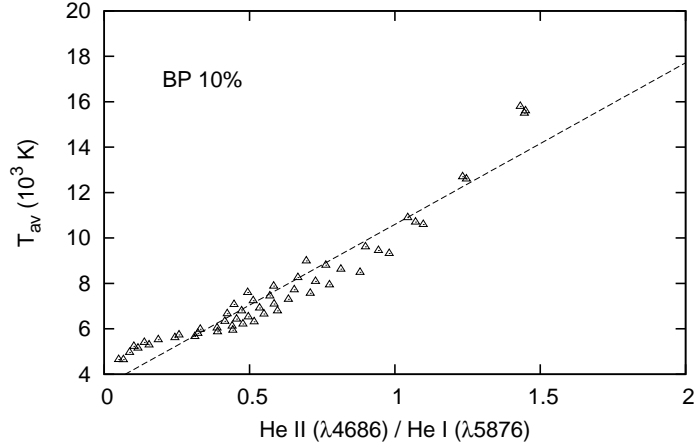
4.2.1 Slučaj linijske gustine $N_{\text{H}} = 10^{23}\text{cm}^{-2}$

Budući da mnogi autori daju da je očekivana linijska gustina širokolinijskog regiona $N_{\text{H}} = 10^{23}\text{cm}^{-2}$ (Dumont et al. 1998, Korista & Goad 2000, 2004), prvo je razmatrana mreža rezultata numeričkih simulacija za ovu linijsku gustinu. Odnosno, razmatran je set podataka za koje BP fit ima grešku manju od 10% (BP 10%). Na Slici 9 je data zavisnost srednje temperature T_{av} emitujuće oblasti, jedne od izlaznih veličina numeričkih simulacija, od odnosa flukseva linija helijuma, He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$, R za set podataka "BP 10%". Ukoliko bi se na istom grafiku prikazali svi rezultati numeričkih simulacija iz ove mreže, dobila bi se jako velika disperzija podataka, kao i nerealno veliki odnosi pomenutih linija helijuma. Set podataka "BP 10%" je fitovan linearnom funkcijom oblika $T_{\text{av}} = a + b \cdot R$, gde je $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$ odnos flukseva ovih linija helijuma. Dobijen je visok stepen korelacije, gde koeficijent korelacije iznosi $r = 0.96$ a fit je oblika:

$$T_{\text{av}}[10^3\text{K}] = (3.49 \pm 0.20) + (7.12 \pm 2.88) \cdot R. \quad (4.2.1)$$

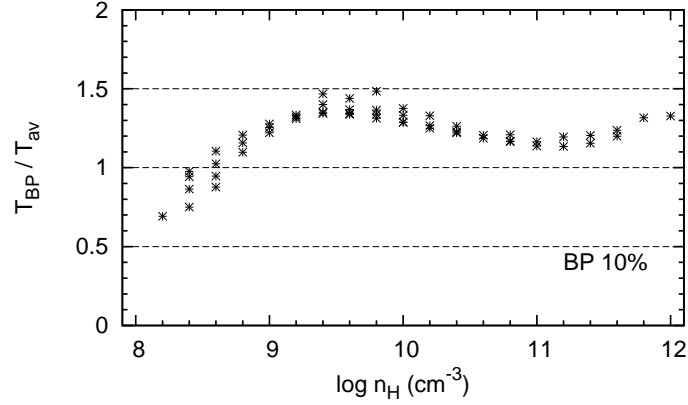
Ovako visok stepen korelacije nam govori da ukoliko BP dobro fituje linije Balmerove serije, korelacija između srednje temperature i odnosa linija helijuma može se koristiti kao direktan metod za procenu srednje temperature u BLR, jer su ove linije helijuma u istoj spektralnoj oblasti kao i Balmerove linije, i samim tim skoro uvek pokrivene optičkim posmatranjima. Sa druge strane, treba voditi računa o tome da oblast formiranja linija helijuma ne mora biti ista kao oblast formiranja linija vodonika (npr. Kollatschny et al. 2001).

Zanimljivo je videti kako se BP temperatura T_{BP} razlikuje od srednje temperature T_{av} , pa je nacrtan grafik zavisnosti odnosa ove dve temperature od koncentracije vodonika za set podataka "BP 10%" (Slika 10). Postoji razlika između T_{BP} i T_{av} i ona je vidljivija za veće vrednosti koncentracije vodonika. Za $n_{\text{H}} \approx 10^{9.5}\text{cm}^{-3}$ odnos ove dve temperature je oko 1.5, ali za većinu vrednosti n_{H} ovaj odnos je blizak 1, gde za najmanje vrednosti koncentracije vodonika pada na 0.6 (Slika 10). Razlika između ovih temperatura je i očekivana budući da se najverovatnije Balmerove linije formiraju samo u jednom delu BLR, a one definišu BP temperaturu, dok je srednja temperatura usrednjena po celoj



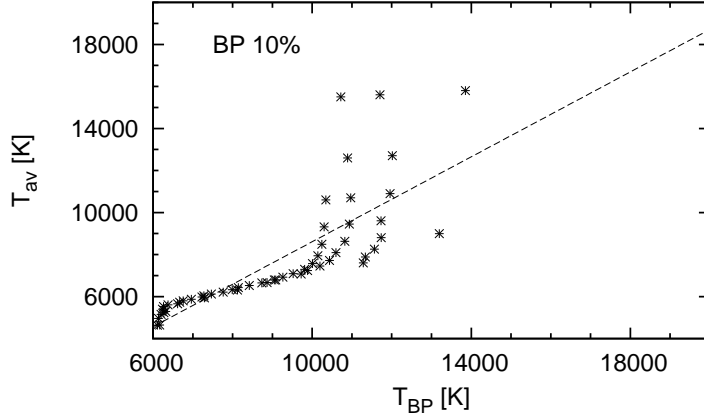
Slika 9: Srednja temperatura T_{av} emitujuće oblasti u funkciji odnosa flukseva linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$ R , za slučaj seta podataka "BP 10%" u slučaju linijske gustine $N_H = 10^{23} \text{cm}^{-2}$. Najbolji fit linearnom funkcijom je prikazan isprekidanom linijom.

širokolinijskoj oblasti, pa je samim tim karakteristika cele oblasti a ne samo jednog njenog dela, kao što je to BP temperatura.



Slika 10: Promena odnos BP temperature T_{BP} i srednje temperature T_{av} pri promeni koncentracije vodonika za set podataka "BP 10%" iz mreže numeričkih simulacija dobijenih za linijsku gustinu $N_H = 10^{23} \text{cm}^{-2}$. Jasno se vidi da je odstupanje u granicama -30%, +50%.

Sa druge strane, ukoliko bi postojala veza između srednje i BP temperature, to bi dalo dodatani metod za procenu srednje temperature širokolinijskog regiona aktivnih galaksija. Da bi se ispitalo postojanje takve veze, nacrtan je



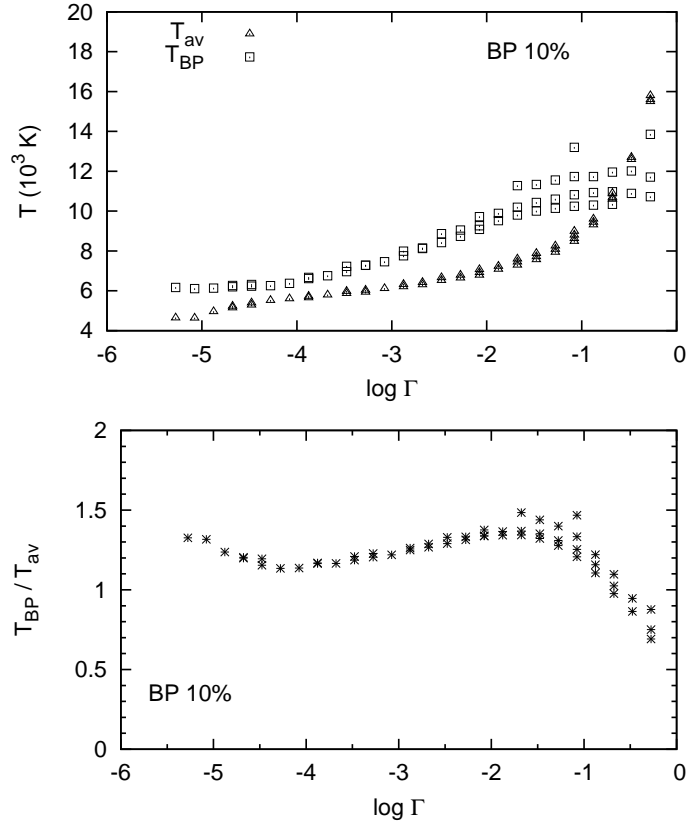
Slika 11: Srednja temperatura T_{av} BLR naspram BP temperature T_{BP} za slučaj seta podataka "BP 10%" za linijsku gustinu $N_{\text{H}} = 10^{23} \text{cm}^{-2}$. Najbolji fit linearnom funkcijom je predstavljen isprekidanom linijom.

grafik $T_{\text{av}} = f(T_{\text{BP}})$ za set podataka "BP 10%", i podaci su fitovani sa linearnom funkcijom (Slika 11). Iako je rasipanje tačaka veliko za veće temperature, dobijen je visok stepen korelacije $r = 0.80$. Dobijena linearna zavisnost je oblika:

$$T_{\text{av}} = (-1498 \pm 997) + (1.01 \pm 0.11) \cdot T_{\text{BP}}. \quad (4.2.2)$$

Ova relacija se može koristiti kao metod za grubu procenu temperature u BLR. Znači, ukoliko se normalizovani fluksevi Balmerovih linija mogu opisati jednačinom 3.5.7 sa greškom manjom od 10%, onda se iz nagiba prave (jednačina 3.5.8) može odrediti BP temperatura, koja predstavlja temperaturu oblasti gde se formiraju Balmerove linije. Dalje, na osnovu relacije 4.2.2 može se grubo proceniti srednja temperatura širokolinijskog regiona.

Na Slici 12 prikazano je kako se temperature menjaju sa parametrom jonizacije Γ . Na gornjem grafiku predstavljene su obe temperature za set podataka "BP 10%", dok je na donjoj slici dat odnos temperatura u funkciji jonizacionog parametra za isti set podataka. Sa Slike 12 se vidi da razlika između temperatura nije značajna, ali da je veća za manje vrednosti parametra jonizacije, a posebno za slučajeve velike koncentracije vodonika i jonizacionog fluksa fotona. Oblik zavisnosti je u principu obrnut u odnosu na onaj na Slici 10, što je očekivano jer je jonizacioni parametar obrnuto srazmeran koncentraciji vodonika po svojoj definiciji. Ono što je zanimljivije je da je BP temperatura uglavnom veća od srednje temperature. Jedno od objašnjenja veće BP temperature bi moglo da bude to da se slojevi gde se formiraju Balmerove linije nalaze dublje u širokolinijskom regionu, mnogo bliže izvoru jonizujućeg kontinuumu. Takođe, razlika u ovim temperaturama može biti posledica činjenice da



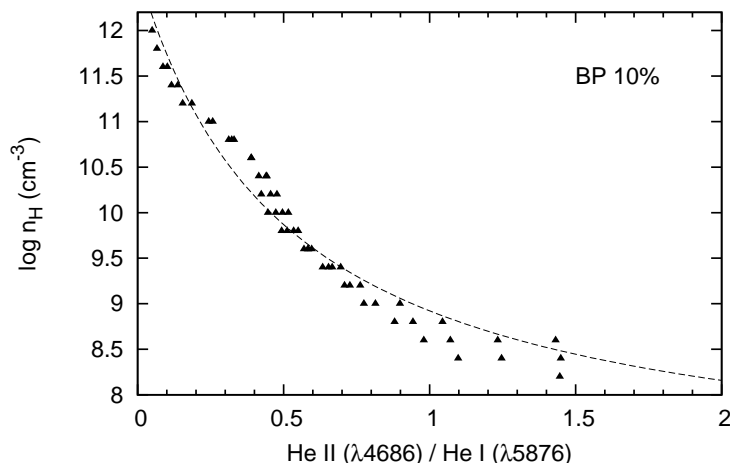
Slika 12: *Gore*: Temperature u funkciji parametra jonizacije Γ za set podataka "BP 10%". *Dole*: Odnos BP temperature T_{BP} i srednje temperature T_{av} u funkciji jonizacionog parametra Γ .

je BP temperatura po svojoj definiciji temperatura ekscitacije, dok je srednja temperatura koju daje CLOUDY elektronska temperatura.

Drugi mogući metod procene fizičkih uslova u BLR se može dobiti iz relacije između koncentracije vodonika i odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$. U tom cilju, nacrtana je logaritamska zavisnost koncentracije vodonika $\log n_H$ i odnosa linija helijuma R na Slici 13. Podaci su fitovani sa funkcijom oblika $\log n_H = d/(c + R)$, gde je koncentracija vodonika n_H data u jedinicama 10^7cm^{-3} . Rezultat najboljeg fita je :

$$\log n_H [10^7 \text{cm}^{-3}] = \frac{2.909 \pm 0.098}{(0.514 \pm 0.027) + R}. \quad (4.2.3)$$

Zapravo, ovakva zavisnost odnosa flukseva linija iz dva susedna stanja jonizacije je i očekivana ukoliko su naseljenosti energetskih nivoa opisane Saha-Bolcmanovom jednačinom (videti poglavlje 3.5). Odnos ove dve linije helijuma predstavlja u stvari odnos naseljenosti nivoa iz dva susedna stanja jonizacije a na



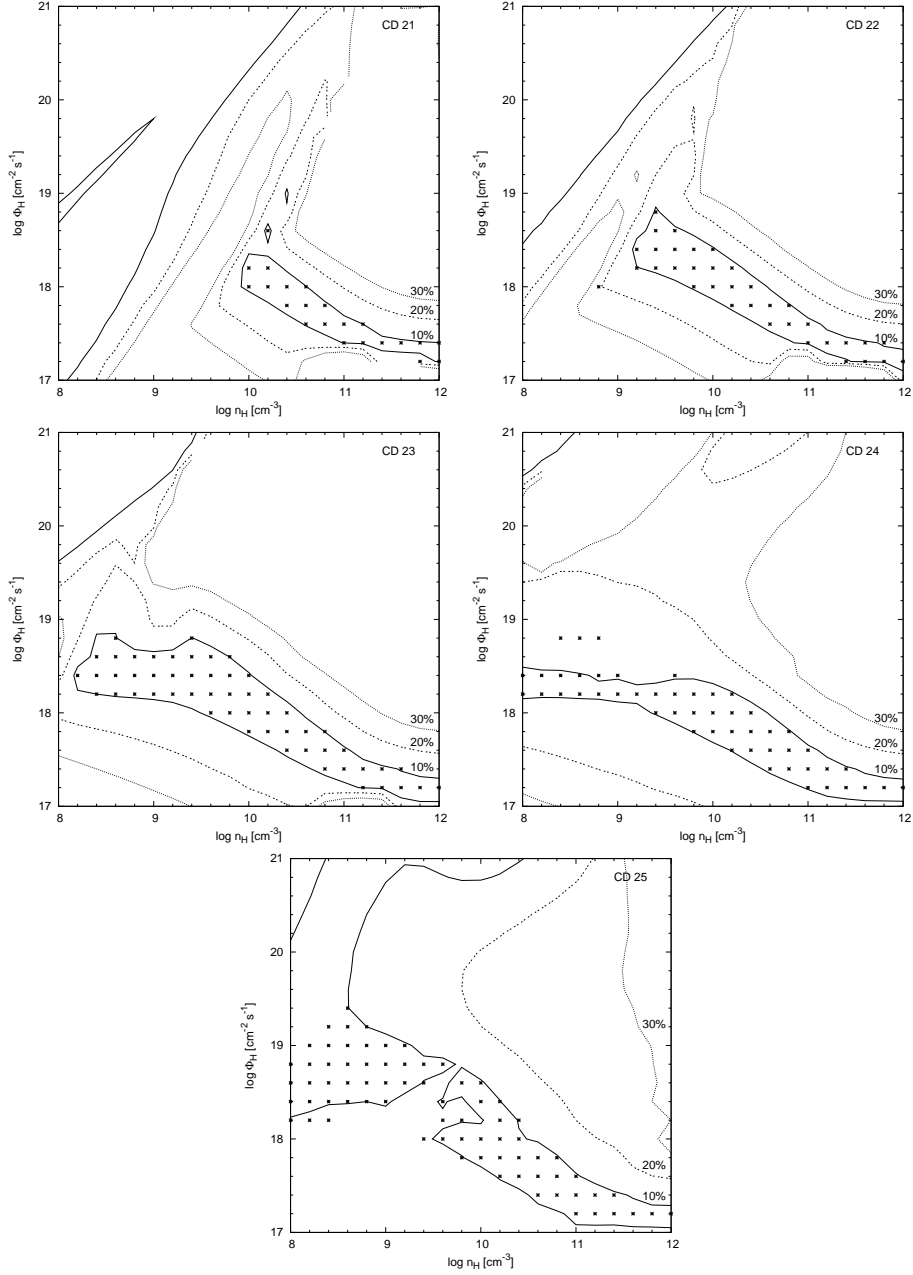
Slika 13: Koncentracija vodonika u funkciji odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$ za set podataka "BP 10%". Isprekidana linija predstavlja najbolji fit funkcijom oblika $\log n_{\text{H}}(\text{in } 10^7 \text{ cm}^{-3}) = 2.909/(0.514 + R)$, gde je R odnos između ove dve linije helijuma.

osnovu Saha-Bolcmanove jednačine taj odnos bi trebalo da opada sa porastom koncentracije elektrona²² kao $R \sim 1/n_e$, a da raste sa porastom temperature (što se i vidi na Slici 9). Ova relacija može biti korisna za procenu koncentracije vodonika širokolinijske oblasti kod AGJ koristeći samo posmatrane široke emisije linije.

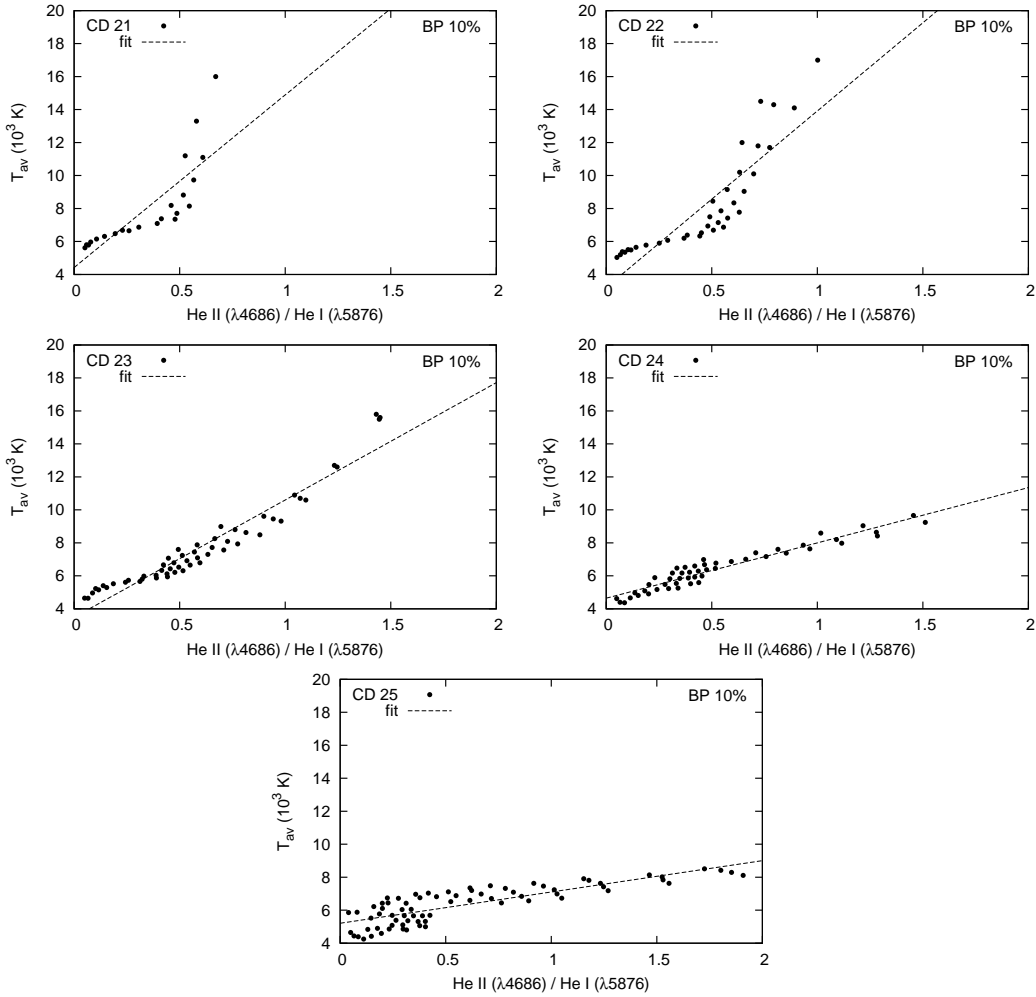
4.2.2 Uopštene relacije za opseg linijskih gustina od $N_{\text{H}} = 10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-3}$

U ovom poglavlju su razmatrani rezultati svih mreža numeričkih simulacija za različite linijske gustine vodonika N_{H} , kako bi se ispitaio uticaj promene N_{H} na prethodno predložene metode procene fizičkih karakteristika (temperature i koncentracije) širokolinijskog regiona kod AGJ na osnovu flukseva emisionih linija. U osnovi linijska gustina definiše optičku gustinu sredine, tako da je za veću linijsku gustinu veća optička gustina u emisionim linijama. Još jednom navodimo kriterijume za izbor rezultata numeričkih simulacija: greška BP fita manja od 10%, srednja temperatura manja od 20000 K i odnos linija helijuma $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$ manji od 2. Tako izabran set podataka obeležen je sa "BP 10%". Na Slici 14 prikazane su punim kružićima simulacije za koje važe gore navedeni kriterijumi. Ono što se takođe jasno vidi sa Slike 14 je da postoji određeni vid pravilnosti za koje vrednosti parametara Φ_{H} i n_{H} su

²²U ovom slučaju može se pretpostaviti da je vodonik skoro potpuno jonizovan, pa je samim tim $n_e \approx n_{\text{H}}$.



Slika 14: Greška BP fita u ravni koncentracija vodonika - jonizujući fluks za sve razmatrane linijske gustine $N_H = 10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-3}$ sa konturama unutar kojih je greška manja od 10%, 20% i 30% (kao i na Slikama 6-8), samo sada su jasno punim krugovima predstavljene simulacije koje zadovoljavaju zadate kriterijume: greška BP fita manja od 10%, $T_{\text{av}} < 20000\text{K}$, kao i odnos linija helijuma $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$ manji od 2.



Slika 15: Srednja temperatura T_{av} emitujuće oblasti u funkciji odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$, za set podataka "BP 10%" u slučaju svih linijskih gustina $N_H = 10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-3}$. Isprekidanom linijom je dat najbolji fit linearne funkcije $T_{av} = A_i + B_i \cdot R$. Različite linijske gustine su obeležene u levom gornjem uglu.

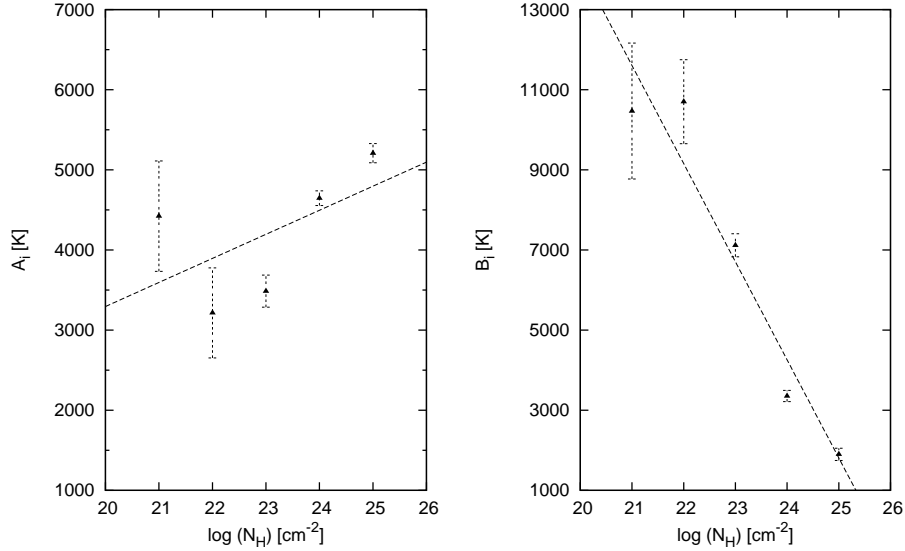
zadovoljeni pomenuti kriterijumi. Odnosno da u slučaju povećanja jonizujućeg fluksa opada koncentracija vodonika, i obrnuto.

Na Slici 15 prikazana je srednja temperatura T_{av} emitujuće oblasti u funkciji odnosa flukseva linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$ za različite linijske gustine. Dalje je svaki set podataka "BP 10%" fitovan linearnom funkcijom oblika $T_{av} = A_i + B_i \cdot R$. Parametri fita A_i i B_i su dati u Tabeli 1, dok je na Slici 16 data zavisnost ovih koeficijenata od linijske gustine. Sa Slike 16 se vidi da, iako su greške parametara velike, postoji neka zavisnost od linijske gustine N_H . U ovom radu je pokušano da se ta zavisnost prikaže linearnom funkcijom,

Tabela 1: Vrednosti parametara fita A_i i B_i funkcije $T_{av} = A_i + B_i \cdot R$ za različite vrednosti linijske gustine N_H .

$\log N_H$ [cm^{-2}]	A_i [K]	B_i [K]
21	4422 ± 689	10468 ± 1697
22	3215 ± 562	10701 ± 1049
23	3486 ± 200	7116 ± 288
24	4646 ± 92	3355 ± 139
25	5208 ± 119	1899 ± 152

kako bi se svi rezultati mogli svesti na jednu linijsku gustinu.



Slika 16: Zavisnosti parametara fita A_i (levo) i B_i (desno) od linijske gustine N_H .

Najbolji fit linearnom funkcijom daje sledeće vrednosti (Slika 16) za zavisnost parametra A_i , odnosno B_i od linijske gustine: $A_i = (-2713 \pm 5712) + (300 \pm 248) \cdot N_H$, $B_i = (63018 \pm 9092) + (-2448 \pm 395) \cdot N_H$. Odatle dalje može da se izvede uopšten izraz za izračunavanje srednje temperature T_{av} iz odnosa linija helijuma R , koji sada zavisi i od linijske gustine N_H :

$$T_{av} [10^3 \text{K}] = (-2.71 \pm 5.71) + (0.30 \pm 0.25) \cdot N_H + [(63.02 \pm 9.09) - (2.45 \pm 0.40) \cdot N_H] \cdot R. \quad (4.2.4)$$

Što se tiče metoda procene koncentracije vodonika na osnovu odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$, razmatrana je i ta zavisnost za različite

vrednosti linijske gustine. Na Slici 17 prikazana je koncentracija vodonika n_{H} emitujuće oblasti u funkciji odnosa flukseva linija helijuma R za set podataka "BP 10%" za različite linijske gustine ($N_{\text{H}} \in [10^{21} - 10^{25}] \text{cm}^{-2}$). Dalje je svaki set podataka fitovan funkcijom oblika $\log n_{\text{H}} = D_i / (C_i + R)$ (Slika 17 i 18). Na Slikama 17 i 18 vidi se da se i sa promenom linijske gustine održava zavisnost koncentracije vodonika od odnosa linija helijuma R . Parametri fita C_i i D_i su dati u Tabeli 2, kao i na Slici 19. Slično kao i u slučaju parametara A_i i B_i , na Slici 19 se vidi da postoji neki vid zavisnosti ovih koeficijenata od linijske gustine, pa je i ovde urađen fit linearnom funkcijom, kako bi se svi rezultati mogu svesti na jednu linijsku gustinu. Najbolji fit linearnom funkcijom daje sledeće vrednosti za zavisnost parametra C_i , odnosno D_i od linijske gustine (Slika 19): $C_i = (3.82 \pm 0.74) + (-0.14 \pm 0.03) \cdot N_{\text{H}}$, $D_i = (19.46 \pm 2.89) + (-0.70 \pm 0.10) \cdot N_{\text{H}}$. Dalje može da se izvede uopšten izraz za dobijanje koncentracije vodonika n_{H} iz odnosa linija helijuma R , koji sada zavisi i od linijske gustine N_{H} :

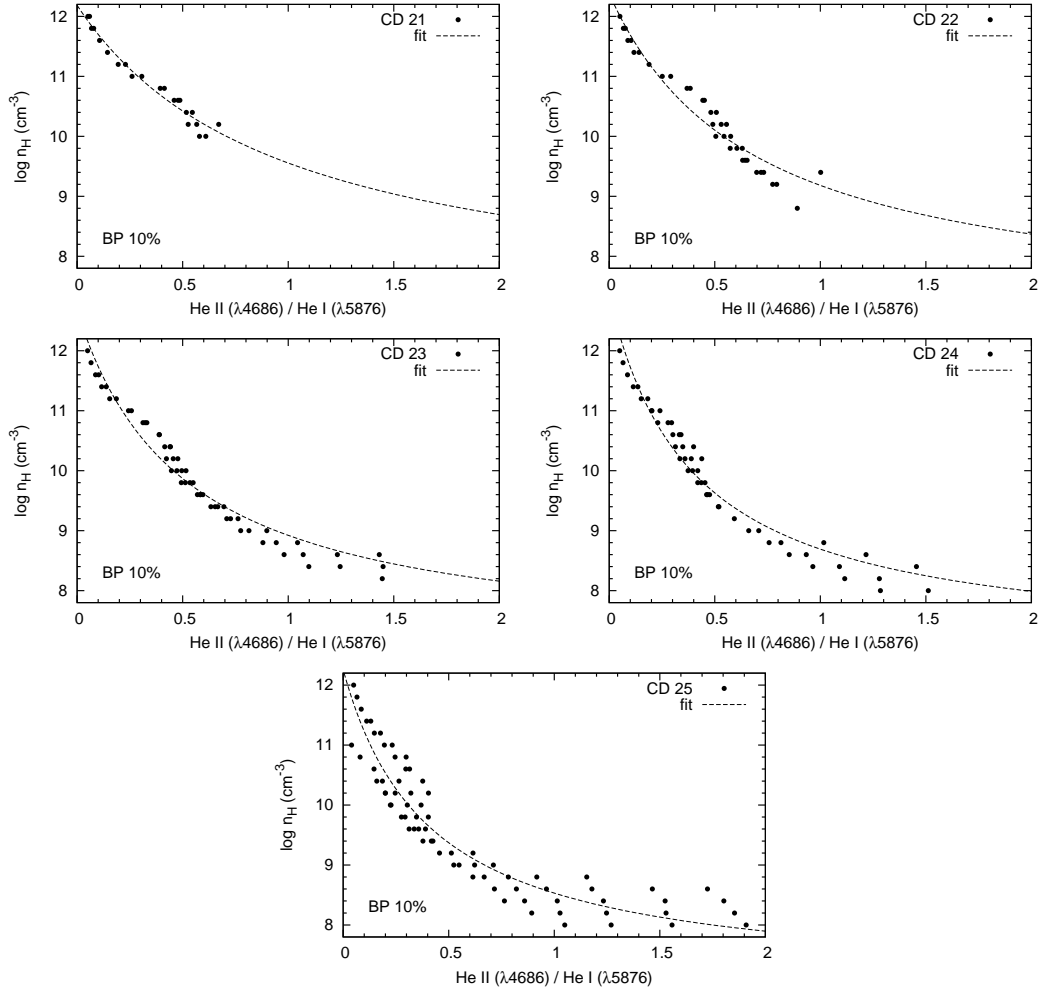
$$n_{\text{H}} = \frac{(19.46 \pm 2.89) + (-0.70 \pm 0.1) \cdot N_{\text{H}}}{[(3.82 \pm 0.74) + (-0.14 \pm 0.03) \cdot N_{\text{H}} + R]}. \quad (4.2.5)$$

Tabela 2: Vrednosti parametara fita C_i i D_i funkcije $\log n_{\text{H}} = D_i / (C_i + R)$ za različite vrednosti linijske gustine N_{H} .

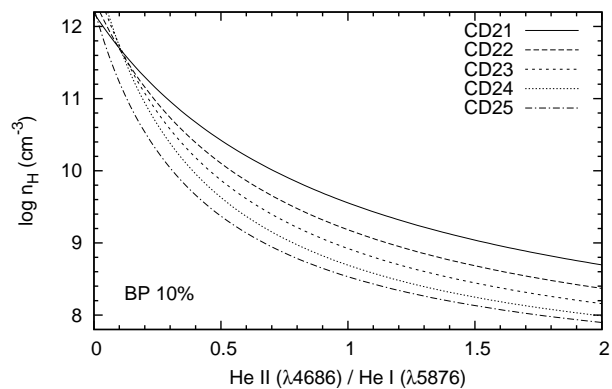
$\log N_{\text{H}} [\text{cm}^{-2}]$	$D_i [\text{cm}^{-3}]$	C_i
21	5.04 ± 0.22	0.97 ± 0.05
22	3.67 ± 0.18	0.68 ± 0.05
23	2.91 ± 0.10	0.51 ± 0.03
24	2.37 ± 0.09	0.40 ± 0.03
25	2.16 ± 0.12	0.41 ± 0.04

Na Slici 20 nacrtana je zavisnost odnosa $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ emisijonih linija od parametra temperature A . Prikazani su podaci iz svih mreža numeričkih simulacija za sve linijske gustine N_{H} , koji su obeleženi različitim simbolima na Slici 20. Vrednosti odnosa $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ emisijonih linija za različite temperature izračunate uz pomoć Saha-Bolcmanove jednačine (poglavlje 3.5, jednačina 3.5.3) su takođe predstavljene isprekidanom linijom na Slici 20. Na Slici 20 se jasno vidi da simulirani odnos $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ za koje je greška BP fita manja od 10% prati teorijsku krivu dobijenu iz Saha-Bolcmanove jednačine, što daje neku indiciju da se za određene fizičke uslove može postići da se naseljenosti viših energetskih nivoa vodonika mogu opisati Saha-Bolcmanovom raspodelom.

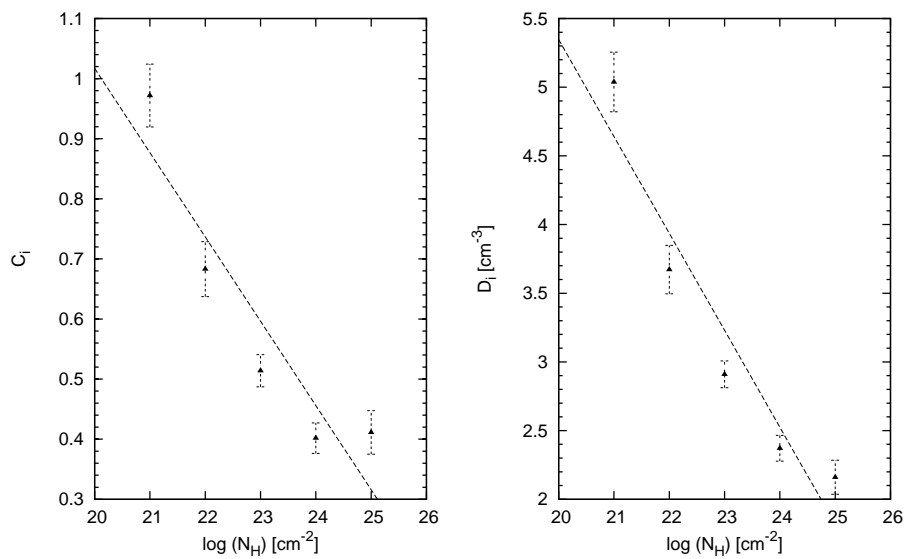
Vrednosti koje su takođe dobijane iz numeričkih simulacija su temperatura prve i poslednje zone unutar širokolinijske oblasti. Već je pomenuto da



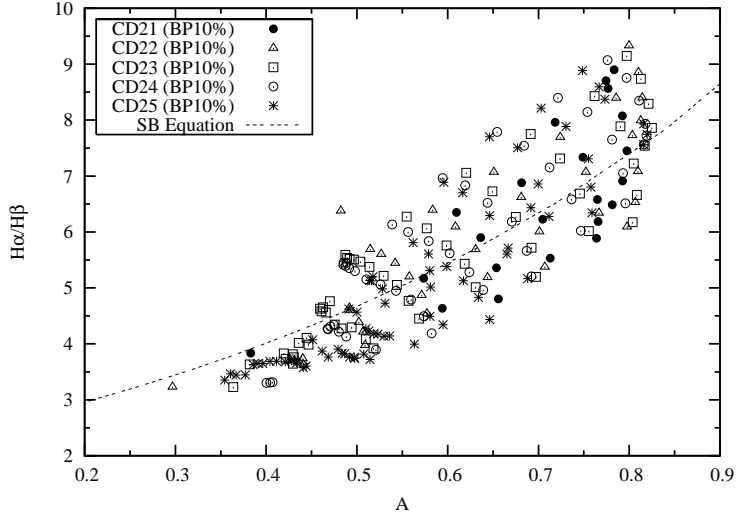
Slika 17: Koncentracija vodonika u funkciji odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$ za set podataka "BP 10%" u slučaju linijskih gustina $N_{\text{H}} = 10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-3}$. Različite linijske gustine (tačnije njihovi eksponenti) su obeležene u desnom gornjem uglu. Isprekidana linija predstavlja najbolji fit funkcijom oblika $\log n_{\text{H}} = D_i / (C_i + R)$, gde je R odnos između dve linije helijuma.



Slika 18: Koncentracija vodonika u funkciji odnosa linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$: najbolji fitovi setova podataka za različite linijske gustine N_H .



Slika 19: Zavisnosti parametara fita C_i (levo) i D_i (desno) od linijske gustine N_H .

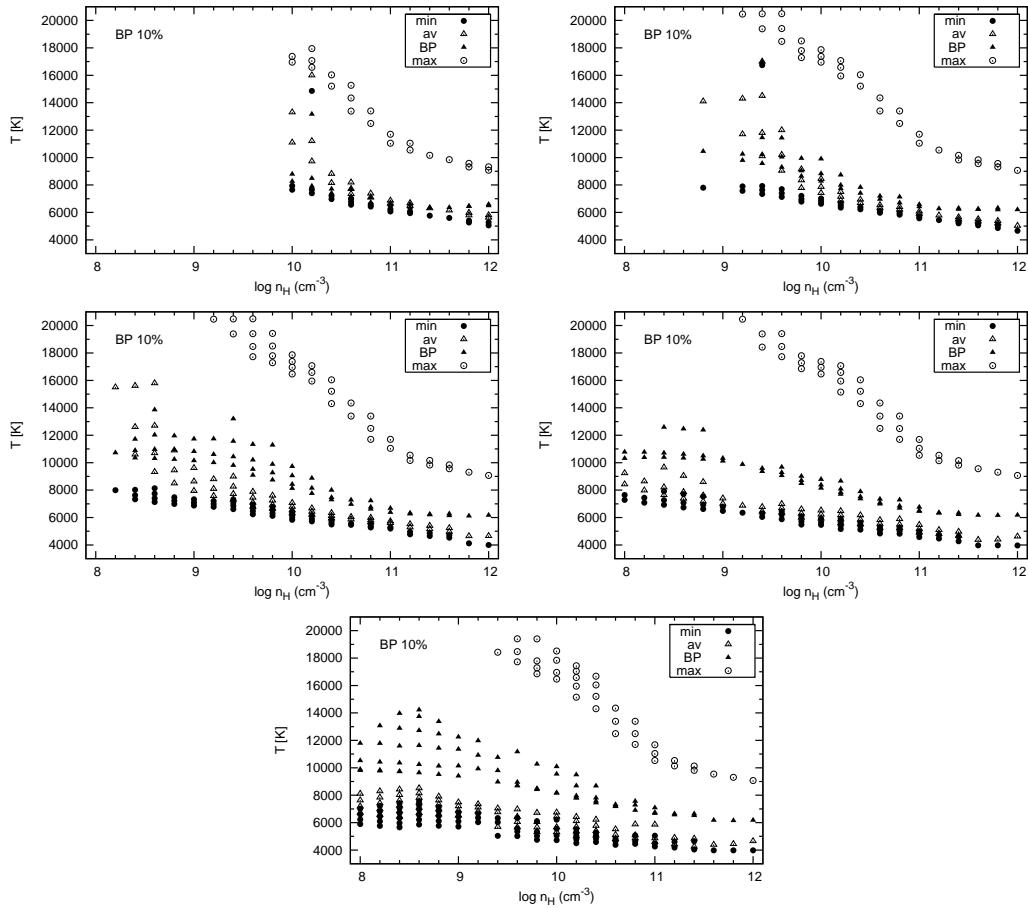


Slika 20: Odnos $H\alpha/H\beta$ emisionih linija u funkciji parametra temperature A za set podataka "BP 10%" za sve linijske gustine N_H . Podaci različitih linijskih gustina su obeleženi različitim oznakama. Vrednosti odnosa $H\alpha/H\beta$ emisionih linija za različite temperature izračunate uz pomoć Saha-Bolcmanove jednačine (poglavlje 3.5, jednačina 3.5.3) su predstavljene isprekidanom linijom.

CLOUDY radi tako što подели sredinu na zone konstantnih fizičkih karakteristika. Od svih zona, uzete su u obzir temperatura prve zone, kao zone najbliže centralnom izvoru kontinuuma i samim tim maksimalne temperature T_{\max} , i temperatura poslednje zone, kao zone najudaljenije od centra i samim tim minimalne temperature T_{\min} . Na Slici 21 date su sve do sada razmatrane temperature (T_{\max} , T_{av} , T_{BP} , T_{\min}) u funkciji od koncentracije vodonika n_H za set podataka "BP 10%" u slučaju linijskih gustina $N_H = 10^{21} - 10^{25} \text{ cm}^{-3}$. Jasno se vidi sa Slike 21 da se BP temperatura nalazi između minimalne i maksimalne temperature, što je još jedna od činjenica koja ide u prilog validnosti ove temperature, odnosno da ova temperatura daje određenu predstavu o temperaturi unutar širokolinijskog regiona. Isto važi i za srednju temperaturu, mada po samoj definiciji ove temperature ta zavisnost je i očekivana.

4.2.3 Metod dijagnostike plazme u BLR

U ovoj doktorskoj disertaciji predložen je direktan i jednostavan semi-empirijski metod za procenu fizičkih karakteristika plazme u širokolinijskoj oblasti AGJ koristeći samo posmatrane emisije linije Balmerove serije i odnos linija helijuma.



Slika 21: Zavisnost različitih temperatura od koncentracije vodonika n_H za set podataka "BP 10%" u slučaju linijskih gustina $N_H = 10^{21} - 10^{25} \text{cm}^{-3}$. Različite temperature (T_{max} , T_{av} , T_{BP} , T_{min}) su obeležene različitim simbolima koji su dati u desnom gornjem uglu.

Pri numeričkim simulacijama širokolinijske oblasti AGJ, uzete su u razmatranje različite koncentracije gasa i vrednosti jonizujućeg fluksa fotona, kao i linijskih gustina vodonika, kako bi se dobila situacija da se naseljenost viših energetske nivoa neutralnog vodonika približno može opisati Saha-Bolcmanovom raspodelom, što je neophodno za dijagnostiku temperature primenom Bolcman-plot metoda. Ovaj metod je primenjen na simulirane široke emisione linije, i pokazano je da se u ograničenom broju slučajeva metod može primeniti na Balmerove linije vodonika (Slike 6 - 8). Za slučajeve za koje važe sledeći kriterijumi: greška BP fita manja od 10%, srednja temperatura manja od 20000 K i odnos linija helijuma $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$ manji od 2, razmatran je odnos flukseva linija helijuma R , i pokazano je da se za te slučajeve odnos R može koristiti za procenu srednje temperature i koncentracije vodonika unutar širokolinijske oblasti (jednačine 4.2.1 - 4.2.5, Slike 9, 11 i 13).

Prema tome, za procenu fizičkih karakteristika u BLR kod AGJ direktno iz posmatranih širokih emisionih linija, treba da se odradi sledeće (Ilić et al. 2008a,b):

1. meriti flukseve širokih Balmerovih emisionih linija (od $H\alpha$ do $H\epsilon$) i primeniti Bolcman-plot metod (izračunati normalizovane flukseve i fitovati ih jednačinom 3.5.7). Ukoliko je greška fita manja od 20% ²³ može se izračunati BP temperatura T_{BP} koristeći jednačinu 3.5.8;
2. ako važi prethodno, onda meriti i flukseve širokih emisionih linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$, pri tome vodeći specijalno računa o doprinosu uskih linija helijuma i Fe II multiplleta u blizini He II $\lambda 4686$ linije, i zatim izračunati njihov odnos R ;
3. proceniti srednju temperaturu T_{av} i koncentraciju vodonika širokolinijske oblasti koristeći izmeren odnos linija helijuma R i jednačine 4.2.1 - 4.2.5.

Ovo je prvi put da je predložen metod za procenu temperature i koncentracije vodonika unutar BLR koji koristi samo izmerene flukseve širokih emisionih linija. Međutim, ovde treba istaći i neke od mogućih problema primene ovog metoda:

1. jedan problem je činjenica da nije sigurno da li Balmerove linije i linije helijuma dolaze iz iste ili iz različitih emisionih oblasti (videti npr. Kollatschny 2003), a čak je moguće da i same vodonikove linije iz Balmerove serije ne potiču iz iste oblasti (npr. $H\alpha$ i $H\beta$);

²³Iako je pri simulacijama uzeto da je greška manja od 10%, pri realnim merenjima zbog same greške merenja fluksa emisionih linija, koje nema u numeričkim simulacijama, može se uzeti nešto veći opseg greške fita.

2. drugi mogući problem je samoapsorpcija, koja se manifestuje tako da dolazi do smanjenja intenziteta u centru linije. Ovaj efekat je ipak mnogo intenzivniji kod linija Lajmanove serije, npr. kod $\text{Ly}\alpha$ linije jer je verovatnoća apsorpcije $\text{Ly}\alpha$ fotona mnogo veća;
3. takođe velika optička dubina u pojedinim linijama može da utiče na ukupan fluks linije;
4. na kraju, treba imati u vidu i moguće razlike između temperatura kod nekih tipova plazme. Naime, odnos linija vodonika Balmerove serije kroz BP metod daje indicaciju o temperaturi ekscitacije, dok odnosi linija helijuma ukazuju na vrednosti temperature jonizacije.

Jedan od mogućih načina kako se može proveriti koliki je uticaj gore navedenih problema (npr. prvog i trećeg problema) je poređenje oblika profila linija. Ukoliko se, na primer oblici linija vodonika Balmerove serije poklapaju to ukazuje na to da ove linije verovatno nastaju u istoj oblasti. Bez obzira na gore navedene probleme, predložen metod može se koristiti za grubu procenu fizičkih parametara širokolinijske oblasti iz direktnih merenja, odnosno posmatranja.

5 Izbor objekata, posmatranja i obrada podataka

U ovom radu su razmatrana posmatranja pedesetak aktivnih galaksija preuzeta iz SDSS spektralne baze, kao i posmatranja promenjivih galaksija NGC 5548 i NGC 4151, dobijena u toku 8, odnosno 11 godina. U ovom poglavlju date su neke osnovne karakteristike objekata, kao i izvršenih posmatranja i procesa obrade podataka.

5.1 SDSS uzorak

Kako bi se uporedili rezultati numeričkih simulacija sa posmatranim podacima, uzet je uzorak aktivnih galaksija koji su istraživali La Mura i saradnici (La Mura et al. 2007a,b). Uzorak se sastojao od 90 AGJ preuzetih iz trećeg izdanja²⁴ SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) spektralne baze podataka²⁵. Za ove objekte je primenom BP analize procenjena temperatura širokolinijske oblasti, i pokazano je da se u oko 50% slučajeva BP analiza može primeniti. U ovom radu su za isti uzorak izmereni fluksevi linija helijuma (He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$) i primenjen je metod dijagnostike plazme opisan u prethodnom poglavlju.

5.1.1 Posmatranja i izbor objekata

Posmatranja su vršena kao deo pregleda neba sa 2.5 m $f/5$ modifikovanim Ritchey-Chretien azimutalnim teleskopom, lociranim na Apache Point Observatoriji u Novom Meksiku (SAD). Spektri su dobijeni sa spektrografom čiji detektor koristi mozaik napravljen od četiri CCD kamere (SITE/Tektronix 2048 x 2048 px), i koji pokriva opseg talasnih dužina od 3800 Å do 9200 Å. Sistem od 640 optičkih vlakana, od kojih svako ima aperturu od 3", pokriva vidno polje teleskopa, tako da se sa svakom ekspozicijom dobija 640 spektara posmatrane oblasti na nebu. Spektralna rezolucija R posmatranja je varirala u opsegu 1850 - 2200.

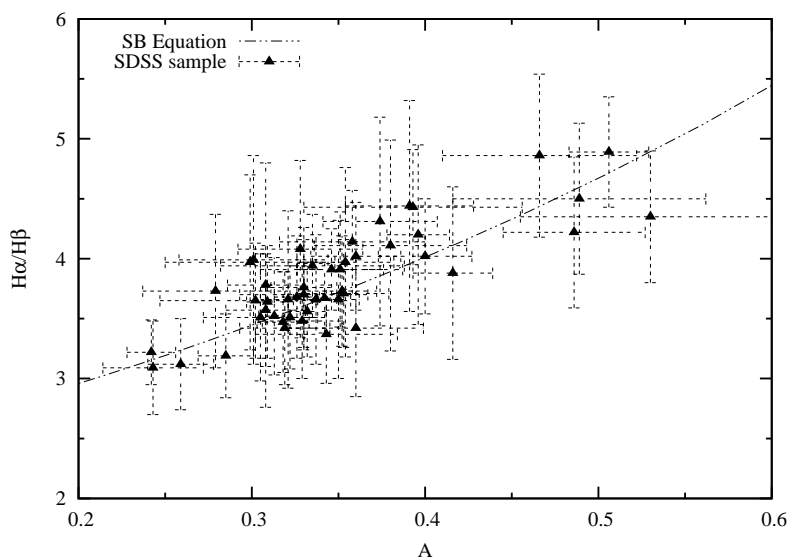
Objekti su izabrani na osnovu sledećih kriterijuma: (i) objekti su locirani unutar crvenog pomaka $z < 0.4$, odnosno crveni pomak je izabran tako da se svi profili Balmerovih linija nalaze unutar posmatranog spektralnog opsega;

²⁴<http://www.sdss.org/dr3>

²⁵Sloan Digital Sky Survey (SDSS) je najambiciozniji pregled neba sproveden do sada. Pregled neba obuhvata detaljne optičke slike i spektre više od četvrtine neba, i daje trodimenzionalnu mapu miliona galaksija i kvazara. Finansiranje SDSS i SDSS-II je obezbeđeno od strane Alfred P. Sloan Fondacije, a participirale su i institucije: *the National Science Foundation, the U.S. Department of Energy, the National Aeronautics and Space Administration, the Japanese Monbukagakusho, the Max Planck Society i the Higher Education Funding Council for England*. Zvanična internet prezentacija SDSS baze je <http://www.sdss.org/>

(ii) spektri sadrže jasno vidljivu Balmerovu seriju linija, barem do $H\delta$ linije; (iii) profil široke komponente je prisutan u svakoj Balmerovoj liniji; (iv) profili nisu izobličeni pod uticajem npr. lošeg piksela na CCD čipu ili prisustva jakog pozadinskog izvora.

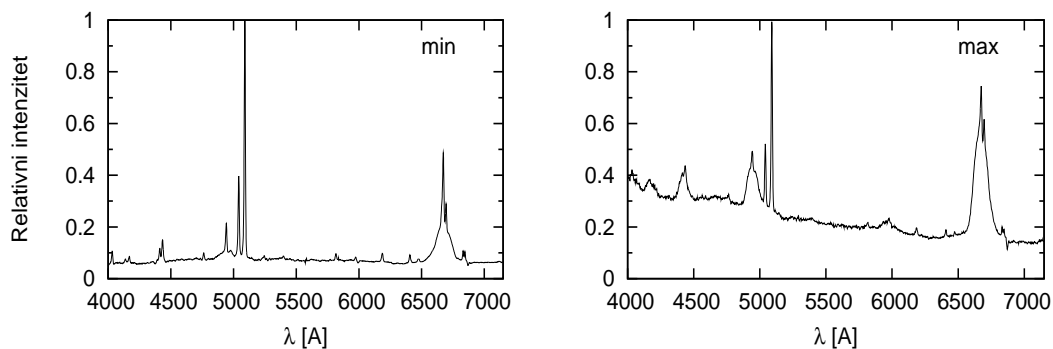
Za uzorak od 90 AGJ iz SDSS spektralne baze podataka izmereni su fluksevi Balmerovih linija (detaljna procedura izdvajanja široke komponente i merenja fluksa opisana je u radovima La Mura et al. (2007a,b)) i procenjen je parametar temperature A , odnosno BP temperatura širokolinijske oblasti uz pomoć BP analize. U daljoj analizi razmatrani su samo objekti za koje se procenjuje da BP metod može da se primeni ($\approx 50\%$ od celog uzorka), odnosno objekti koji imaju grešku BP fita manju od 20% i BP temperaturu manju od $20\,000\text{ K}$, što se ukupno svodi na 48 objekata. Za te objekte predstavljen je odnos $H\alpha/H\beta$ emisionih linija u funkciji BP temperature (trougličići na Slici 22). Kao što se vidi sa slike, rezultati se dobro slažu i jasno prate liniju teorijski izračunatih odnosa $H\alpha$ i $H\beta$ linija (isprekidana linija na Slici 22), dobijenih uz pomoć jednačine 3.5.3 koja je izvedena pod pretpostavkom da važi Saha-Bolcmanova raspodela.



Slika 22: Odnos $H\alpha/H\beta$ linija u funkciji BP parametra temperature A za SDSS uzorak od 48 AGJ (trougličići). Vrednosti ovog odnosa izračunatog predpostavljajući Saha-Bolcmanovu raspodelu za odgovarajuću temperaturu (jednačina 3.5.3) su predstavljeni isprekidanom linijom.

5.2 Aktivna galaksija NGC 5548

Aktivna galaksija NGC 5548 je jedna od najposmatranijih i najizučavanijih Sejfert 1.5²⁶ galaksija (videti npr. Shapovalova et al. 2004, Bentz et al. 2007a, Sergeev et al. 2007), te su i kinematičke i fizičke karakteristike njene širokolinijske oblasti proučavane od strane mnogih autora (npr. Netzer & Maoz 1990, Netzer et al. 1990, Krolik et al. 1991, Shields & Ferland 1993, O'Brien et al. 1994, Dumont et al. 1998, Korista & Goad 2000, 2004, Vestergaard & Peterson 2005, Sergeev et al. 2007, Gaskell et al. 2007). Specifičnost ove galaksije je da se fluks kontinuuma, kao i emisionih linija drastično menja tokom vremena. Promene intenziteta širokih linija su tolike, da ova galaksija menja svoj tip tokom vremena, odnosno prelazi od tipa Sejfert 1.5 (jake široke linije sa superponiranim uskim linijama) do tipa Sejfert 1.8 galaksija (slabe široke linije i jake uske linije) što se vidi i na Slici 23.



Slika 23: Spektar aktivne galaksije NGC 5548 u minimumu (levo) i maksimumu (desno).

Ova galaksija je bila u centru intenzivne trinaestogodišnje kampanje vođene od strane Međunarodnog konzorcijuma za monitoring AGJ (*The International AGN Watch Consortium*) čiji je glavni cilj bio da proučava promene fluksa kontinuuma u optičkom delu spektra i fluksa H β linije (Peterson et al. 2002). Kao rezultat ove kampanje, koristeći metod reverberacionog mapiranja, određene su dimenzije BLR ove galaksije iz vremena kašnjenja promena u fluksu kontinuuma i širokih linija. Procenjeno je da su se dimenzije BLR menjale u periodu 1989 - 2001 godine, i to u opsegu 6 - 26 svetlosnih dana (Peterson et al. 2002). Pomoću tih rezultata i pretpostavljajući teoremu virijala, procenjena je i masa crne rupe u centru, koja iznosi $M_{\bullet} \approx 7 \times 10^7 M_{\odot}$ (Peterson & Wandel 1999, Bentz et al. 2007a).

²⁶Sejfert 1.5 galaksije predstavljaju prelazni tip između tipa 1 i 2 Sejfert galaksija. Za njih je karakteristično da imaju široke dozvoljene linije sa istaknutim uskim vrhom.

Što se tiče fizičkih karakteristika širokolinijske oblasti ove galaksije, tu postoje mnoga zanimljiva i u neku ruku kontradiktorna istraživanja. Pokazano je da se širokolinijska oblast možda ne može opisati samo fotojonizacionim modelom, budući da se izmereni fluksevi linija, kao i promena fluksa linija i kontinuuma ne slažu sa predviđanjima fotojonizacionih modela, te da je moguće da još neka oblast, koja nije radijativno jonizovana doprinosi spektru BLR (Dumont et al. 1998). Sa druge strane, neki autori tvrde da model "locally optimally emitting clouds" (LOCs) dat od strane Baldvina i saradnika (Baldwin et al. 1995) važi i za BLR galaksije NGC 5548. Tako su, na primer, Korista i Goad (Korista & Goad 2000) simulirali krive sjaja UV emisionih linija koristeći ovaj pristup i pokazali da postoji dobro slaganje između predviđenih i posmatranih krivih sjaja i kašnjenja signala.

U cilju povezivanja promene fizičkih karakteristika širokolinijskog regiona sa promenama u spektru aktivne galaksije NGC 5548, primenjen je BP metod na široke Balmerove linije i vršene su numeričke simulacije. Za to su korišćena posmatranja u periodu od 1996 do 2004 godine (Shapovalova et al. 2004). U slučaju širokih Balmerovih linija aktivne galaksije NGC 5548, BP metod pokazuje da je moguće proceniti temperaturu BLR. Takođe, pomoću CLOUDY programa simulirani su fizički uslovi u BLR, i dobijena temperatura je poređena sa temperaturom procenjenom pomoću BP metoda, sve u cilju pokušaja da se objasni izmerena promenljivost temperature ove oblasti.

Na kraju ovog uvodnog poglavlja, dajemo osnovne podatke za ovu galaksiju, kao što su dijametar, crveni pomak i položaj, koji se nalaze u Tabeli 3²⁷.

5.2.1 Posmatranja i obrada podataka

Posmatranja aktivne galaksije NGC 5548 su obavljena na 6 m i 1 m teleskopima Specijalne Astrofizičke Opservatorije (Special Astrophysical Observatory - SAO) u Rusiji (u periodu 1996-2004), kao i pomoću INAOE 2.1 m teleskopa na Guillermo Haro Opservatoriji (*Guillermo Haro Observatory - GHO*) u Meksiku (u periodu 1998-2004).²⁸ Spektri su dobijeni koristeći spektrograf širokog proreza sa CCD kamerom. Najčešće je posmatrani spektralni opseg bio od 4000 Å do 7500 Å, dok je spektralna rezolucija bila u opsegu 4.5-15 Å, a S/N (signal/šum) odnos u kontinuumu blizu H α i H β emisionih linija je bio >50. Pri posmatranjima oštrina lika (*seeing*)²⁹ je bila između 1.4-3.5 lučnih sekundi. Spektrofotometrijske standardne zvezde su takođe posmatrane svako veće. Svi detalji

²⁷Ovi podaci su preuzeti iz NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*) baze podataka, koja se može naći na internet stranici <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

²⁸Svi ovi spektri su posmatrani u okviru već pomenute kampanje spektralnog monitoringa AGJ sa ciljem proučavanja promene fluksa kontinuuma u optičkom delu spektra i fluksa emisionih H α i H β linija.

²⁹Proširenje tačkastog lika, kao posledica uticaja atmosfere i karakteristika teleskopa.

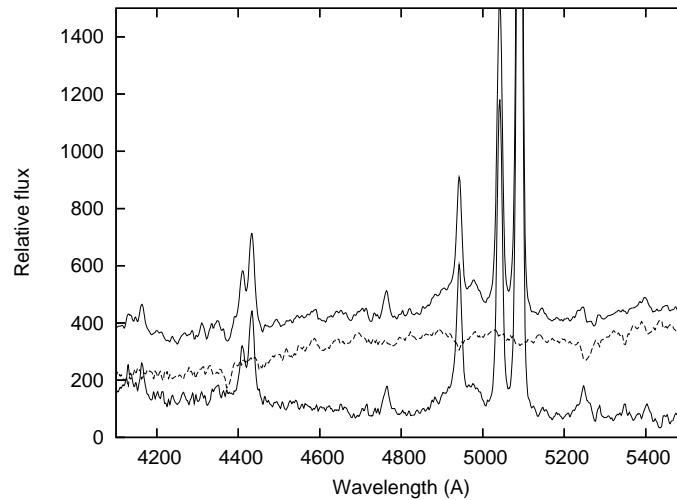
Tabela 3: Osnovne karakteristike aktivne galaksije NGC 5548.

Druga imena	UGC 09149 Mrk 9027
Položaj	α : 14h 17m 59.5s δ : +25° 08'' 12'
Heliocentrična radijalna brzina	$5149 \pm 7 \text{ km s}^{-1}$
Crveni pomak (z)	0.017175 ± 0.000023
Veliki prečnik	1.4'
Mali prečnik	1.3'
Vizuelna magnituda	13.3
Klasifikacija	SA0 ; Sy1.5
Galaktička ekstinkcija E(B-V)	0.020
Rastojanje (na osnovu ugaonih razmera)	71.9 Mpc
Rastojanje (na osnovu luminoznosti)	74.5 Mpc

u vezi sa spektroskopskim posmatranjima mogu se naći u radu Shapovalova et al. (2004). Greške pri merenju fluksa kontinuuma na 5100Å i linija su bile reda 3-5%. Iz spektralne baze podataka dobijene tokom trinaestogodišnjeg programa posmatranja NGC 5548 (koja sadrži ≈ 150 spektara) izabrana su samo 24 spektra (Tabela 4), koji su zadovoljavali sledeće kriterijume: (i) dobri fotometrijski uslovi pri posmatranju; (ii) $S/N > 10$ u kontinuumu blizu He linije; (iii) spektar pokriva opseg talasnih dužina od $\lambda 4000 \text{ \AA}$ do $\lambda 7000 \text{ \AA}$; (iv) prisutne široke komponente Balmerovih linija od $H\alpha$ do $H\epsilon$. Osnovni podaci za ova posmatranja su dati u Tabeli 4.

Spektrofotometrijska obrada podataka je urađena pomoću programskog paketa za obradu spektara razvijenog na SAO od strane Vlasjuka (Vlasyuk 1993), i pomoću IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*³⁰) programskog paketa za obradu i analizu spektara, za slučaj posmatranja izvršenih u Meksiku. Obrada podataka se sastojala iz standardnih koraka: oduzimanje BIAS slika, korekcija pomoću FLATFIELD slika, uklanjanje kosmičkih zraka, kalibracija talasnih dužina, oduzimanje spektra pozadinskog neba, i kalibracije fluksa pomoću posmatranih standardnih zvezda. Cela procedura dobijanja apsolutno kalibrisanih spektara je detaljno opisana u radu Shapovalova et al. (2004). Takođe, detaljno o procesu obrade posmatranja i dobijanju spektara može se naći u magistarskom radu Ilić (2005). Pored ovih standardnih procedura, spektri su korigovani i za uticaj spektra zvezdanog kontinuuma galaksije gde se nalazi proučavano AGJ, koristeći merenja doprinosa zvezdanog kontinuuma na 5100 Å iz rada Romanishin et al. (1995, Fig. 5) uz korekciju aperture,

³⁰<http://iraf.noao.edu>



Slika 24: Fluks kontinuuama NGC 5548 u minimumu pre (gornja puna linija) i posle (donja puna linija) oduzimanja doprinosa zvezdanog kontinuuama galaksije (isprekidana linija).

kao i spektar normalne E galaksije NGC 4339, budući da su centralne boje ($B-V \approx 0.9$; $V-I \approx 1.2$) ove dve galaksije slične kada je NGC 5548 u minimumu emisije zračenja (Romanishin et al. 1995). Detalji o korekciji uticaja zvezdanog kontinuuama galaksije nalaze se u radu Popović et al. (2008a), a na Slici 24 je dat spektar AGJ pre i posle oduzimanja spektra zvezdanog kontinuuama.

5.3 Aktivna galaksija NGC 4151

Aktivna galaksija NGC 4151 je najsjajnija i jedna od najbližih Sejfert 1.5 galaksija, što je čini podobnom za istraživanja njene strukture u različitim frekvencionim opsezima (Hutchings et al. 1998, Kaiser et al. 2000, Ulrich 2000, Mundell et al. 2003, Ulvestad et al. 2005). Osnovni podaci za ovu galaksiju, kao što su dijametar, crveni pomak i položaj, dati su u Tabeli 5³¹.

Kao i galaksiju NGC 5548, i NGC 4151 karakteriše izrazita promenljivost fluksa kontinuuama i emisijih linija u periodu od nekoliko dana (Peterson 1988, Clavel et al. 1990, Maoz et al. 1991, Shapovalova et al. 1996, Ulrich & Horne 1996, Sergeev et al. 2001, Lyuty 2005). U poslednjih 20 godina, ova galaksija je bila predmet mnogih monitoring programa u cilju određivanja dimenzija BLR na osnovu reverberacione analize, odnosno kašnjenja promene fluksa u liniji u odnosu na promenu fluksa kontinuuama. Zanimljivo je istaći da su mnogi

³¹Ovi podaci su preuzeti iz NED (*NASA/IPAC Extragalactic Database*) baze podataka, koja se može naći na internet stranici <http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

Tabela 4: Osnovni podaci za spektroskopska posmatranja aktivne galaksije NGC 5548: ime fajla, datum posmatranja, julijanski dani, teleskop kojim je posmatrano, apertura, spektralni opseg i rezolucija. Kolona "Kod" odnosi se na teleskop koji je korišćen za konkretno posmatranje: L - 6 m teleskop (SAO, Rusija), GH - 2.1 m teleskop (GHO, Meksiko).

Fajl (spektar)	Datum	JD (2400000+)	Kod	Apertura (arcsec)	Sp.opseg (Å)	Rezol. (Å)
960213	1996Feb14	50127.579	L	1.5"x6.0"	3100-7200	6
960214	1996Feb14	50128.432	L	1.5"x6.0"	3100-7200	6
960319	1996Mar19	50162.382	L	2.0"x6.0"	3600-7400	8
960321	1996Mar21	50164.395	L	2.0"x6.0"	3600-7400	8
960710	1996Jul10	50275.283	L	2.0"x6.0"	3600-7000	8
980120	1998Jan21	50834.632	L	2.0"x6.0"	3800-7600	8
980222	1998Feb23	50867.535	L	2.0"x6.0"	3800-7600	8
980504	1998May04	50938.293	L	2.0"x6.0"	3700-7600	8
980508	1998May08	50942.461	L	2.0"x6.0"	3700-7700	8
980725	1998Jul26	51020.703	GH	2.5"x6.0"	3960-7231	15
980726	1998Jul27	51021.712	GH	2.5"x6.0"	3930-7219	15
200126	2000Jan27	51570.959	GH	2.5"x6.0"	4070-7350	15
210513	2001May14	52043.859	GH	2.5"x6.0"	3980-7300	15
210613	2001Jun14	52074.772	GH	2.5"x6.0"	4022-7330	15
210614	2001Jun15	52075.738	GH	2.5"x6.0"	4010-7330	15
21-07	2001Jul16	52107.320	L	2.0"x6.0"	3630-8050	8
220304	2002Mar05	52338.780	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
220404	2002Apr05	52369.850	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
220405	2002Apr06	52370.780	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
220624	2002Jun24	52450.420	L	2.0"x6.0"	3800-7600	8
230126	2003Jan27	52666.96	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
230127	2003Jan28	52667.930	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
230325	2003Mar26	52724.900	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15
230522	2003May23	52782.750	GH	2.5"x6.0"	3976-7305	15

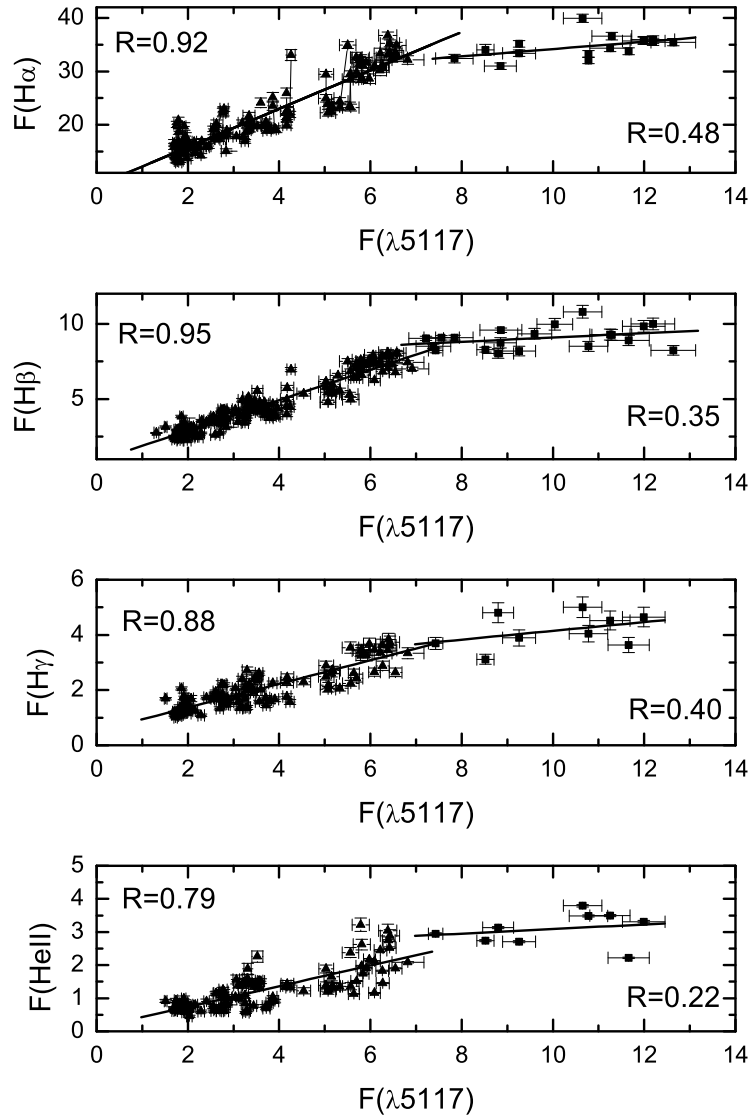
autori dobili različite rezultate za dimenzije BLR proučavajući različite oblasti spektra u različitim vremenskim intervalima (za pregled svih rezultata videti Shapovalova et al. 2008). No sigurno je da je BLR ove galaksije kompaktna, dimenzija svega nekoliko svetlosnih dana, i slojevita, u smislu da različite linije potiču iz različitih slojeva unutar BLR (npr. Kaspi et al. 1996, Metzroth et al. 2006, Shapovalova et al. 2008).

Tabela 5: Osnovne karakteristike aktivne galaksije NGC 4151.

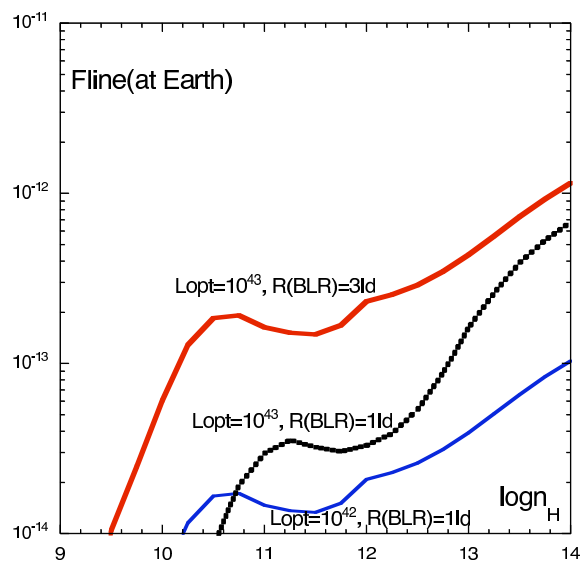
Položaj	α : 12h 10m 32.6s δ : +39° 24' 21''
Heliocentrična radijalna brzina	$995 \pm 3 \text{ km s}^{-1}$
Crveni pomak (z)	0.003319 ± 0.000010
Veliki prečnik	6.3'
Mali prečnik	4.5'
Vizuelna magnituda	11.5
Klasifikacija	SAB ; Sy1.5
Galaktička ekstinkcija E(B-V)	0.028
Rastojanje (na osnovu ugaonih razmera)	16.9 Mpc
Rastojanje (na osnovu luminoznosti)	17.1 Mpc

Šapovalova i saradnici (Shapovalova et al. 2008) su pronašli da zavisnost fluksa linija od fluksa kontinuuma nije skroz linearna, odnosno da promena fluksa linije ne odgovara baš u potpunosti promeni fluksa kontinuuma (Slika 25). Na Slici 25 se jasno vidi da za veće vrednosti fluksa kontinuuma postoji saturacija fluksa u liniji, ali i da se ukoliko se ekstrapolira vrednost kontinuuma do nule dobija da i tada postoji neka vrednost fluksa u liniji. To može da bude posledica toga da je jonizujući fluks vrlo intenzivan i da sredina ne zrači dalje taj fluks preko linija, već preko zračenja u kontinuumu (npr. Balmerovog ili Pašenovog kontinuuma).

Pored toga, pokazano je da ukoliko se pretpostavi fotojonizacioni model zagrevanja BLR dobijaju se vrednosti za izračunati fluks u linijama (npr. za slučaj $H\beta$ linije) za različite vrednosti optičke luminoznosti i radijusa, manji nego što je posmatrani fluks (Shapovalova et al. 2008). Izmeren fluks za $H\beta$ liniju je u opsegu $(2.25 - 10.80) \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Na Slici 26 je dat izračunat $H\beta$ fluks na Zemlji u funkciji gustine za različite vrednosti optičke luminoznosti i radijusa BLR. Jasno je sa Slike 26 da je posmatrani fluks uvek veći od izračunatog, čak i za velike vrednosti gustine 10^{14} cm^{-3} . Jedno od mogućih objašnjenja ove pojave je da postoji dodatna oblast koja doprinosi emisiji u Balmerovim linijama i koja nije fotojonizovana, već je jonizovana od strane nekog drugačijeg mehanizma. Objašnjenje velikog intenziteta Balmerovih lin-



Slika 25: Zavisnost fluksa $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $HeII\lambda 4686$ linija od fluksa kontinuuma na $\lambda = 5117 \text{ \AA}$ za AGJ NGC 4151. Fluksevi linija su dati u jedinicama $10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a kontinuuma u $10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ (Shapovalova et al. 2008).



Slika 26: Izračunati $H\beta$ fluks za uslove u NGC 4151 na Zemlji u funkciji koncentracije u cm^{-3} za različite vrednosti optičke luminoznosti L_{opt} i dimenzija širokolinijske oblasti $R(\text{BLR})$ (Shapovalova et al. 2008). Optička luminoznost je data u jednicima erg s^{-1} a dimenzije BLR su date u svetlosnim danima.

ija pomoću dodatne "mehanički zagrevane" oblasti je već predloženo u slučaju BLR galaksije NGC 5548 (Dumont et al. 1998). U slučaju NGC 4151, ta oblast može biti deo radio-mlaza, jer iako je ova galaksija radio-slaba, njene radio-slike velike rezolucije pokazuju prisustvo radio-mlaza, čija baza je dimenzija reda 0.2 pc (Ulvestad et al. 2005). Na osnovu ovoga zaključujemo da BLR mogu činiti dve oblasti, gde je jedna jonizovana od strane zračenja iz akrecionog diska i njegove korone, a druga može biti podrelativistički mlaz materije koji okružuje relativistički radio-mlaz (Murray & Chiang 1997), koja je jonizovana i zagrevana od strane relativističkih elektrona ili udarnog talasa u osnovi mlaza, te samim tim nije u korelaciji sa jonizujućim kontinuumom iz centra.

Takođe, urađena je procena fizičkih karakteristika širokolinijskog regiona ove galaksije pomoću BP metoda, primenjenog na 5 širokih linija Balmerove serije, od $H\alpha$ do $H\epsilon$ (Popović 2003). U radu Popović (2003) korišćena su posmatranja obavljena 10. februara 1998. godine sa H α l svemirskim teleskopom. U tom slučaju, uz pomoć BP metoda dobijena je vrednost za parametar temperature $A = 0.357$, odnosno temperatura $T \approx 14100$ K.

U cilju povezivanja promene fizičkih karakteristika širokolinijskog regiona sa promenama u spektru aktivne galaksije NGC 4151, primenjen je BP metod na široke Balmerove linije. Za to su korišćena posmatranja iz dugačkog vremenskog intervala od 11 godina jako dobre pokrivenosti (Shapovalova et al.

2008, Popović et al. 2008b), ali sa druge strane samo flukseve prve tri linije Balmerove serije je bilo moguće izmeriti. U slučaju širokih Balmerovih linija aktivne galaksije NGC 4151, pokazuje se da nije moguće proceniti temperaturu BLR uz pomoć BP metoda.

5.3.1 Posmatranja, obrada podataka i merenja fluksa

U ovoj disertaciji korišćena su spektroskopska posmatranja aktivne galaksije NGC 4151 koja pokrivaju period od 11 godina. Posmatranja i merenja fluksa linija je izvršila Ala Šapovalova sa saradnicima (Shapovalova et al. 2008) u periodu od 11. 01. 1996 (Julijanski datum = JD 2450094) do 20. 04. 2006 (JD 2453846). Sve ukupno je dobijeno 180 plavih (koji obuhvataju oblast oko $H\gamma$ i $H\beta$ linija) i 137 crvenih spektara (koji obuhvataju oblast oko $H\alpha$ linije) tokom 220 posmatračkih noći, na 6 m i 1 m teleskopima Specijalne Astrofizičke Opservatorije (Special Astrophysical Observatory - SAO) u Rusiji (1996 - 2006), kao i pomoću 2.1 m teleskopa na Guilermo Haro Opservatoriji (*Guillermo Haro Observatory - GHO*) u Meksiku (1998 - 2006), i 2.1 m teleskopom Nacionalne Astronomske Opservatorije (*Observatorio Astronómico Nacional, San Pedro Martir - OAN-SMP*), Baja Kalifornija, u Meksiku (2005–2006). Spektri su dobijeni pomoću spektrografa širokog proreza sa CCD kamerom. Najčešće je posmatran spektralni opseg od 4000 Å do 7500 Å, dok je spektralna rezolucija bila u opsegu 5-15 Å, a S/N (signal/šum) odnos u kontinuumu blizu $H\alpha$ i $H\beta$ emisionih linija je bio >50 . Spektralna posmatranja sa GHAO 2.1 m teleskopom u periodu 2004 - 2006 godine su vršena sa dve varijante opreme: 1) kombinacija spektralne prizme i rešetke od 150 l/mm, koja daje nisku spektralnu rezoluciju $R=15$ Å; 2) kombinacija spektralne prizme i rešetke od 300 l/mm, koja daje srednju spektralnu rezoluciju od $R=7.5$ Å. Spektrofotometrijske standardne zvezde su posmatrane svako veće.

Spektrofotometrijska obrada podataka je urađena pomoću programskog paketa za obradu spektara razvijenog na SAO od strane Vlasjuka (Vlasyuk 1993), i pomoću IRAF programskog paketa za obradu i analizu spektara, za slučaj posmatranja dobijenih u Meksiku. Obrada podataka se sastojala iz standardnih koraka: oduzimanje BIAS slika, korekcija pomoću FLATFIELD slika, uklanjanje kosmičkih zraka, kalibracija talasnih dužina, oduzimanje spektra pozadinskog neba, i relativne kalibracije fluksa pomoću posmatranih standardnih zvezda.

Za proučavanje promenljivosti AGJ standardna tehnika kalibracije fluksa na standardne zvezde nije dovoljno precizna, jer i u slučaju dobrih fotometrijskih uslova posmatranja, preciznost spektrofotometra nije bolja od 10%. Iz tog razloga, za apsolutnu kalibraciju su korišćeni fluksevi zabranjenih uskih emisionih linija, za koje se smatra da ostaju konstantni u vremenskim intervalima od nekoliko desetina godina (Peterson 1993), budući da je oblast koja emituje

ove linije veoma raširena (više od stotinu svetlosnih godina). Na osnovu toga, zaključeno je da je fluks [OIII] λ 5007 linije bio konstantan u toku razmatranog vremenskog intervala, pa je i ta linija korišćena za apsolutnu kalibraciju kako bi se dobio homogen set spektara sa istim fluksom [OIII] λ 5007 linije. Procedure dobijanja apsolutno kalibriranih spektara, korekcije za pozicioni ugao, oštrinu lika i otvor aperture su detaljno opisane u radu Shapovalova et al. (2008). Da bi se procenio doprinos fluksa uskih linija fluksu širokih linija, napravljen je spektralni uzorak uskih linija, koristeći plavi i crveni spektar kada je galaksija bila u stanju minimuma emisije zračenja (12. maj 2005. godine), pa je široka komponenta $H\beta$ linije bila veoma slaba, dok široke komponente viših linija Balmerove serije nisu bile prisutne. Pored fluksa linija, meren je i fluks kontinuuma na 5117 Å.

Od velikog broja spektara za BP analizu je izabrano 68 spektara na osnovu kriterijuma da su tri linije Balmerove serije ($H\alpha$, $H\beta$ i $H\gamma$) posmatrane istoga dana. Fluksevi ovih linija su dati u Tabeli 8 (Shapovalova et al. 2008, Popović et al. 2008b).

6 Analiza podataka i rezultati

U ovom poglavlju prikazana je analiza podataka i dati su rezultati ove doktorske disertacije, tačnije, prikazano je kako prethodno dat metod za dijagnostiku plazme funkcioniše u slučaju konkretnih posmatranja.

6.1 SDSS uzorak

6.1.1 Merenja fluksa helijumovih linija

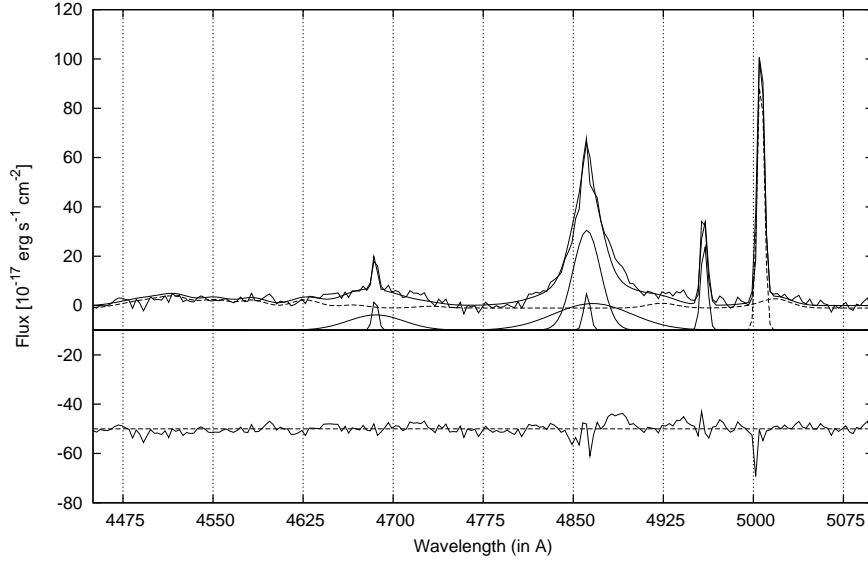
Za uzorak definisan u poglavlju 5.1.1, izmereni su fluksevi široke komponente helijumovih linija He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$. Fluksevi su mereni uz pomoć astronomskog programskog paketa DIPSO³², pri čemu je specijalno vođeno računa za slučaj He II $\lambda 4686$ linije, jer tu postoji uticaj Fe II multiplleta i H β linije. Pre merenja fluksa linija, oduzet je uticaj fluksa lokalnog kontinuuma, kao i uticaj fluksa zvezdanog kontinuuma cele galaksije (La Mura et al. 2007a,b).

Za merenje fluksa He II $\lambda 4686$ linije, u cilju otklanjanja uticaja linija jonizovanog gvožđa, H β linije i uske komponente He II $\lambda 4686$ linije, urađena je dekompozicija na Gausijane, koja sadrži i uzorak Fe II multiplleta (fitovanje pomoću Gausijana je ranije već detaljno objašnjeno u mnogim radovima; videti na primer Ilić 2005, 2006, Popović et al. 2001, 2002, 2004). Pri dekompoziciji na Gausijane posebno je obraćena pažnja na fit uske komponente linije helijuma, linija gvožđa i krila H β linije (Slika 27). Za grešku merenja fluksa linija, uzeto je standardno odstupanje σ od srednje vrednosti. Rezultati merenja fluksa helijumovih linija su dati u Tabeli 6. Od ukupno 48 objekata, objekti kod kojih fluksevi helijumovih linija nisu mogli da se izmere su izbačeni iz dalje analize (na primer u slučaju da su linije previše šumovite ili je doprinos linija gvožđa značajan pa se linija helijuma nije mogla jasno izdvojiti). Zbog ove činjenice, broj objekata u razmatranom uzorku je smanjen na 20 (Ilić et al. 2008a).

6.1.2 Dijagnostika plazme uz pomoć linija helijuma

Na Slici 28 prikazan je odnos linija helijuma R u funkciji BP temperature T_{BP} za 20 objekata iz SDSS baze podataka. Kao što se vidi sa Slike 28 postoji linearna zavisnost između BP temperature i odnosa linija helijuma, gde je koeficijent

³²Programski paket DIPSO je deo STARLINK kolekcije programa koji sadrži veoma korisne procedure za primenu u spektroskopiji. Sve informacije o njemu mogu se naći na internet adresi <http://www.starlink.ac.uk>.



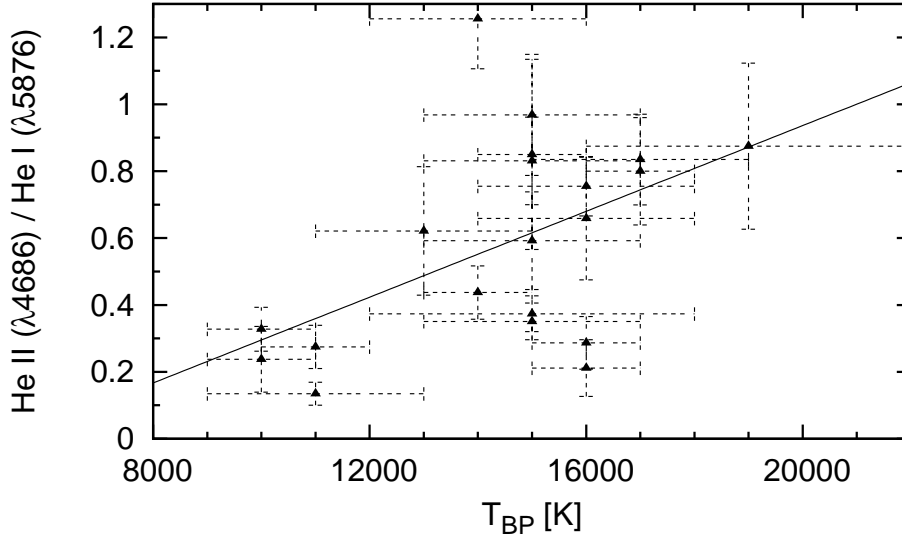
Slika 27: Primer dekompozicije pomoću Gausijana oblasti oko $H\beta$ linije za slučaj objekta SDSSJ1300+5641. Komponente su date ispod posmatranog spektra, pri čemu je helijumova linija He II $\lambda 4686$ predstavljena pomoću dva Gausijana. Uzorak linija jonizovanog gvožđa je predstavljen isprekidanom linijom, a rezidualni spektar je dat na dnu.

korelacije $r = 0.50$. Ovakav trend je očekivan i u skladu je sa fizičkim karakteristikama BLR, gde se za više temperature očekuje veća jonizacija, odnosno jača He II od He I linije. U slučaju da se isključi tačka koja jasno odstupa od najboljeg fita linearnom funkcijom (Slika 28), dobija se nešto bolji koeficijent korelacije od $r = 0.62$.

Metod za dijagnostiku plazme širokolinijskog regiona opisan u odeljku 5.3 je testiran na uzorku od 20 AGJ preuzetih iz SDSS spektralne baze podataka. Za ovaj uzorak je moguće primeniti BP metod na široke Balmerove linije i moguće je izmeriti flukseve linija helijuma He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$. Uz pomoć jednačina 4.2.1 - 4.2.3 procenjena je srednja temperatura T_{av} i koncentracija vodonika unutar širokolinijske oblasti ovih aktivnih galaktičkih jezgara za jednu linijsku gustinu $N_H = 10^{23} \text{cm}^{-2}$. Ovi rezultati su dati u Tabeli 6 u poslednje tri kolone. Koncentracija vodonika je procenjena uz pomoć jednačine 4.2.3, dok su temperature određene korišćenjem jednačina 4.2.1 i 4.2.2. Kao što se može videti u Tabeli 6, postoji određeno rasipanje između temperatura procenjenih pomoću različitih jednačina, ali uglavnom su sve vrednosti unutar procenjenih opsega greški. U slučaju procene temperature, ako se uzme u obzir da je korelacija između srednje temperature T_{av} i odnosa linija helijuma R dobijena iz numeričkih simulacija (videti Sliku 9) veća nego korelacija između srednje temperature T_{av} i BP temperature T_{BP} (videti Sliku 11), vrednosti dobijene

Tabela 6: Merenja flukseva širokih komponentata linija helijuma (He II $\lambda 4686$ i He I $\lambda 5876$) za SDSS uzorak. Temperatura T_{av}^1 je izračunata uz pomoć jednačine 4.2.1 (kolona 8), dok je temperatura T_{av}^2 izračunata uz pomoć jednačine 4.2.2. Podaci za BP temperaturu T_{BP} su preuzeti iz rada La Mura et al. (2007b). Fluksevi linija su dati u jedinicama $10^{-17} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

Ime objekta	$T_{\text{BP}} [K]$	$F(\text{HeI}5876)$	$F(\text{HeII}4686)$	$\log n_{\text{H}} [\text{cm}^{-3}]$	$T_{\text{av}}^1 [K]$	$T_{\text{av}}^2 [K]$
SDSSJ0013-0951	17000±2000	165.1 ± 18.7	137.8 ± 6.8	9.2 ± 0.9	9400 ± 1000	15700 ± 2000
SDSSJ0037+0008	15000±2000	150.4 ± 15.9	89.1 ± 12.6	9.6 ± 1.3	7700 ± 1000	13700 ± 2000
SDSSJ0110-1008	14000 ± 1000	919.4 ± 51.5	402.0 ± 50.8	10.1 ± 0.8	6600 ± 600	12700 ± 1000
SDSSJ0142-1008	15000 ± 2000	4243.2 ± 205.2	1487.6 ± 160.7	10.4 ± 0.7	6000 ± 400	13700 ± 2000
SDSSJ0150+1323	11000 ± 1000	1017.6 ± 95.2	279.1 ± 39.7	10.7 ± 0.9	5400 ± 500	9700 ± 1000
SDSSJ0409-0429	15000 ± 2000	656.8 ± 72.6	636.0 ± 48.5	9.0 ± 1.1	10400 ± 1300	13700 ± 2000
SDSSJ0832+4614	16000 ± 2000	616.7 ± 38.0	465.6 ± 26.0	9.3 ± 0.6	8900 ± 600	14700 ± 2000
SDSSJ1118+5803	14000 ± 2000	2156.2 ± 147.7	2707.2 ± 137.1	8.6 ± 0.7	12400 ± 1100	12700 ± 2000
SDSSJ1122+0117	15000 ± 1000	589.8 ± 49.1	501.3 ± 126.0	9.1 ± 1.9	9500 ± 2000	13700 ± 1000
SDSSJ1223+0240	19000 ± 3000	169.4 ± 19.9	148.2 ± 24.6	9.1 ± 1.6	9700 ± 1800	17700 ± 3000
SDSSJ1300+5641	17000 ± 1000	498.0 ± 44.7	398.3 ± 44.2	9.2 ± 1.1	9200 ± 1100	15700 ± 1000
SDSSJ1300+6139	15000 ± 3000	677.0 ± 12.7	253.0 ± 31.4	10.3 ± 0.6	6100 ± 400	13700 ± 3000
SDSSJ1307+0107	11000 ± 2000	501.1 ± 16.5	67.6 ± 15.0	11.5 ± 0.6	4400 ± 200	9700 ± 2000
SDSSJ1341-0053	16000 ± 1000	266.3 ± 19.4	56.2 ± 18.5	11.0 ± 1.3	5000 ± 600	14700 ± 1000
SDSSJ1342-0053	16000 ± 2000	145.9 ± 14.9	96.1 ± 16.9	9.5 ± 1.5	8200 ± 1300	14700 ± 2000
SDSSJ1349+0204	10000 ± 1000	1116.8 ± 57.0	365.6 ± 55.0	10.5 ± 0.8	5800 ± 500	8700 ± 1000
SDSSJ1619+4058	13000 ± 2000	657.6 ± 127.6	408.6 ± 46.9	9.6 ± 1.6	7900 ± 1400	11700 ± 2000
SDSSJ1654+3925	15000 ± 2000	633.7 ± 62.0	526.4 ± 31.5	9.2 ± 0.9	9400 ± 900	13700 ± 2000
SDSSJ1719+5937	10000 ± 1000	1214.0 ± 165.1	288.5 ± 80.2	10.9 ± 1.4	5200 ± 700	8700 ± 1000
SDSSJ1720+5540	16000 ± 1000	1134.7 ± 106.6	325.3 ± 59.0	10.6 ± 1.0	5500 ± 600	14700 ± 1000



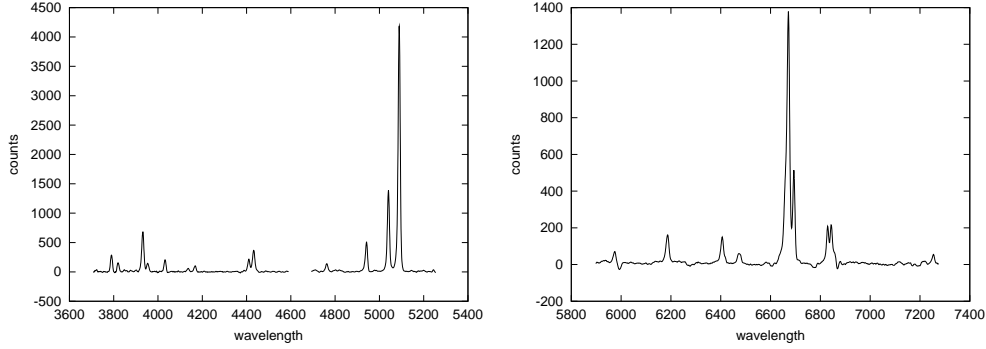
Slika 28: Odnos linija helijuma R u funkciji BP temperature T_{BP} za SDSS uzorak. Najbolji fit linearnom funkcijom je predstavljen punom linijom.

uz pomoć jednačine 4.2.1 su realnije (T_{av}^1 u Tabeli 6). Procenjene BLR temperature su u opsegu $T_{BLR} = 4000 - 18000$ K, dok je koncentracija vodonika u opsegu $n_H = 10^{8.6} - 10^{11.5} \text{ cm}^{-3}$ (Ilić et al. 2008a). Ove vrednosti su u saglasnosti sa prethodnim procenama fizičkih uslova unutar BLR (videti npr. Osterbrock & Ferland 2006).

6.2 Fizički procesi unutar BLR galaksije NGC 5548

6.2.1 Merenja fluksa široke komponente emisione linije i brzina

Da bi se proučavale široke emisione linije Balmerove serije, neophodno je prvo oduzeti doprinos kontinuuma, uskih Balmerovih i satelitskih linija. U proceni doprinosa ovih linija korišćen je uzorak uskih i satelitskih linija (Slika 29) dobijen kombinacijom dva nezavisna merenja u trenucima kad su intenziteti širokih Balmerovih linija bili minimalni. Ovaj uzorak sadrži i multiplet jonizovanog gvožđa (Fe linije) koji se nalazi u okolini $H\beta$ linije, i koji varira sa mnogo manjom amplitudom nego $H\beta$ linija (oko 50%-75% amplitude $H\beta$ linije, Vestegaard & Peterson 2005). Testirajući doprinose rezidua Fe II linija posle oduzimanja uzorka, zaključeno je da mogu da utiču oko 2-5% na ukupan izmereni fluks $H\beta$ linije. Što se greške merenja tiče, *a priori* je uzeto da oduzimanje kontinuuma i uskih linija doprinosi ukupnoj greški merenja najviše sa 10% izmerenog fluksa. U principu, ova vrednost se očekuje kod slabijih linija Balmerove serije



Slika 29: Usvojeni uzorak uskih (Balmerovih i satelitskih) linija za okolinu $H\beta$ - $H\epsilon$ linija (slika levo) i $H\alpha$ linije (slika desno).

(npr. $H\epsilon$), dok u slučaju $H\alpha$ i $H\beta$ linija, taj doprinos bi trebalo da bude manji.

Fluksevi Balmerovih linija su mereni nekoliko puta, a najbitnije je da su vršena nezavisna merenja. Greške merenja su računane po formuli:

$$\Delta F_i = \Delta F_i^{\text{mes}} + 0.1 \cdot F_i^{\text{mes}}, \quad (7.2.1)$$

gde je F_i^{mes} izmeren fluks, ΔF_i^{mes} je statistička greška (unutar 1σ , standardna devijacija) dobijena iz nekoliko merenja, a $0.1F_i^{\text{mes}}$ predstavlja grešku oduzimanja kontinuuma i uzorka uskih linija. Zatim su fluksevi normalizovani na $H\beta$ liniju. Fluks $H\beta$ linije, kao i odnosi flukseva Balmerovih linija iz različitih epoha dati su u Tabeli 7. Greške koje su takođe date u Tabeli 7 su dobijene iz formule (videti npr. Agekyan 1972, Bevington & Robinson 2003):

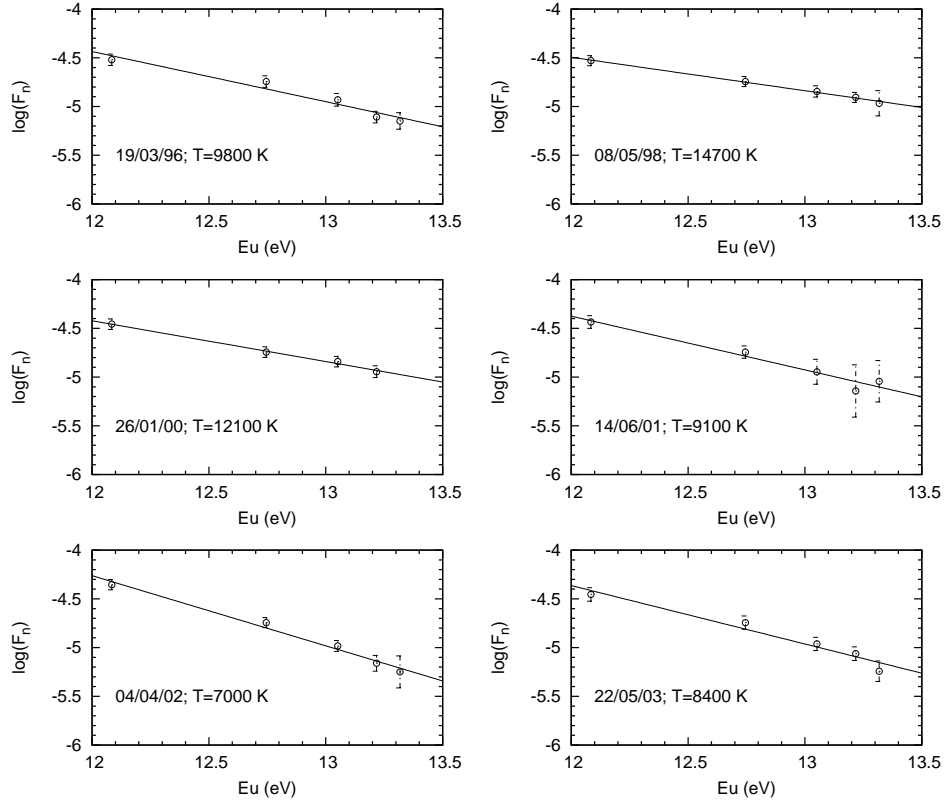
$$\Delta R_i = R_i \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta F_i}{F_i^{\text{mes}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta F_{H\beta}}{F_{H\beta}^{\text{mes}}}\right)^2}, \quad (7.2.2)$$

gde je R_i odnos $F_i/F_{H\beta}$ ($i = \alpha, \gamma, \delta, \epsilon$) linija. Fluksevi su skalirani pomoću atomskih parametara određenog prelaza koristeći jednačinu 3.5.7 i dobijen je skalirani fluks F_n , čija je greška $\Delta \log_{10}(F_n)$ određena na osnovu:

$$\Delta \log_{10}(F_n) = \frac{\Delta F_i}{F_i^{\text{mes}} \times \log_e 10}. \quad (7.2.3)$$

Zatim je za svaku seriju merenja primenjen Bolcman-plot metod i određen je parametar A na osnovu jednačine 3.5.7. Parametar A je dobijen iz najboljeg fita merenih vrednosti, a greška ΔA predstavlja asimptotsku standardnu grešku (unutar 1σ). Vrednosti parametra A i greške ΔA su date u Tabeli 7. Na Slici 30 su dati primeri Bolcman-plota za NGC 5548 iz nekoliko perioda.

Za ovu analizu korišćeni su samo oni spektri koji su obuhvatali celu spektralnu seriju od $H\epsilon$ do $H\alpha$ linije, izuzev u slučaju dva spektra (Tabela 7) koji



Slika 30: Primeri Bolzman-plota za linije Balmerove serije aktivne galaksije NGC 5548 za različite epohe. F_n je fluks izračunat na osnovu jednačine 3.5.7 posle normalizacije Balmerovih linija na fluks $H\beta$ linije ($F_{ul}(H\beta) = 1$).

pokrivaju samo interval od $H\delta$ do $H\alpha$ linije. Ova dva spektra su korišćena kako bi se imala merenja u 2000. i 2001. godini, te da bi se pokrio ceo interval posmatranja.

Efekat pocrvenjenja može uticati na odnose Balmerovih linija (Crenshaw & Kraemer 2001, Crenshaw et al. 2001, 2002, Popović 2003) a samim tim i na parametar A koji se dobija iz nagiba prave kojom se fituju odnosi Balmerovih linija. U slučaju galaksije NGC 5548 uticaj Galaktičkog pocrvenjenja je zanemarljiv jer je $E(B-V) = 0.020$ magnituda (Burstein & Heiles 1982, Schlegel et al. 1998), pa se ovde i ne uzima u obzir. Sa druge strane, uticaj sopstvenog pocrvenjenja za ovu galaksiju nije mali. Nedavno je određeno da iznosi $E(B-V) = 0.17$ magnituda (Gaskell et al. 2007). Međutim, kako je akcenat ove analize na promeni BP parametara tokom intervala od oko 8 godina, može da se zanemari sopstveno pocrvenjenje budući da u tako relativno kratkom vremenskom intervalu ne bi trebalo da se menja, te samim tim ne utiče na promene temperature u merenom vremenskom intervalu.

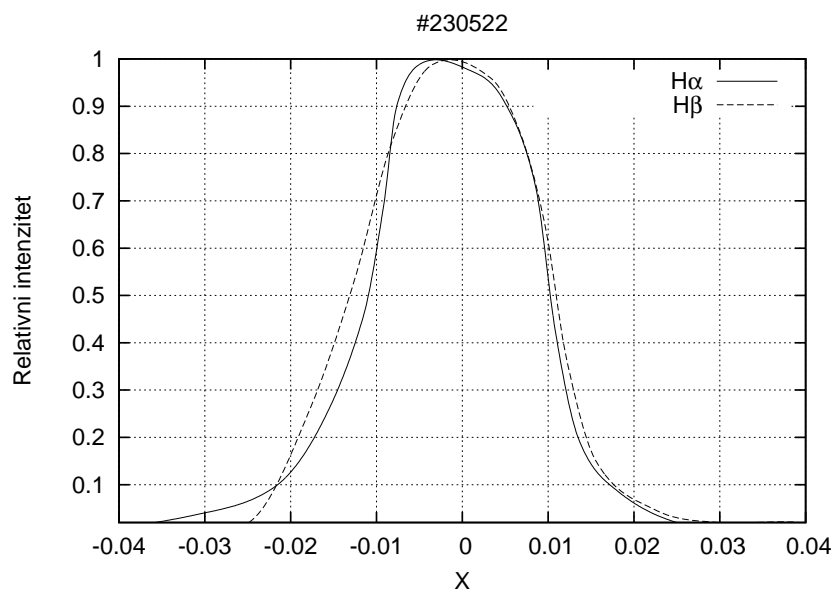
Tabela 7: Izmereni fluksevi Balmerovih linija i kontinuumu na $\lambda 4230$ i $\lambda 5190$ Å aktivne galaksije NGC 5548, kao i parametar temperature A . Fluks $H\beta$ linije je dat u jedinicom 10^{-13} erg $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a kontinuumu u 10^{-15} erg $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Spektar	$F_{H\alpha}/F_{H\beta}$	$F_{H\gamma}/F_{H\beta}$	$F_{H\delta}/F_{H\beta}$	$F_{H\epsilon}/F_{H\beta}$	$F_{H\beta}$	A	$F_c(\lambda 4230)$	$F_c(\lambda 5190)$
960213	3.405±0.406	0.396±0.047	0.174±0.021	0.071±0.027	7.998±0.950	0.456±0.095	12.51±1.01	10.33±0.84
960214	3.689±0.625	0.456±0.074	0.148±0.025	0.091±0.016	7.598±1.220	0.450±0.085	13.94±1.13	10.19±0.83
960319	3.647±0.492	0.341±0.051	0.133±0.018	0.077±0.015	7.281±0.983	0.515±0.068	12.52±1.01	10.99±0.89
960321	3.126±0.384	0.386±0.048	0.187±0.029	0.072±0.016	7.055±0.864	0.414±0.100	11.86±0.96	9.65±0.78
960710	4.203±0.569	0.465±0.063	0.204±0.027	0.084±0.011	9.891±1.322	0.462±0.082	17.68±1.43	13.73±1.11
980120	3.672±0.446	0.393±0.048	0.220±0.038	0.062±0.008	8.420±1.023	0.474±0.138	15.35±1.24	11.81±0.96
980222	3.624±0.429	0.376±0.072	0.210±0.027	0.082±0.023	9.694±1.146	0.426±0.075	14.06±1.14	11.22±0.91
980504	3.523±0.398	0.401±0.048	0.201±0.024	0.125±0.042	9.650±1.090	0.337±0.013	20.58±1.67	15.56±1.26
980508	3.571±0.427	0.416±0.055	0.212±0.025	0.117±0.035	7.998±0.950	0.344±0.014	19.87±1.61	14.79±1.20
980725	3.961±0.471	0.417±0.049	0.167±0.020	0.072±0.009	9.969±1.179	0.508±0.088	15.38±1.24	12.37±1.00
980726	3.727±0.438	0.338±0.047	0.153±0.018	0.039±0.012	9.235±1.083	0.633±0.177	15.21±1.23	12.85±1.04
200126	4.223±0.528	0.420±0.052	0.194±0.027	-	7.167±0.886	0.418±0.022	9.83±0.80	7.63±0.62
210513	5.718±1.134	0.314±0.099	0.109±0.049	0.146±0.096	2.900±0.437	0.586±0.161	5.94±0.48	5.11±0.41
210613	4.493±0.622	0.414±0.056	0.150±0.077	-	3.874±0.524	0.512±0.073	7.86±0.64	6.09±0.49
210614	4.439±0.664	0.330±0.097	0.123±0.076	0.098±0.048	3.408±0.499	0.551±0.070	8.38±0.68	6.81±0.55
21-07	4.028±0.521	0.390±0.065	0.166±0.024	0.055±0.009	5.901±0.749	0.572±0.127	10.04±0.81	8.03±0.65
220304	5.411±0.784	0.289±0.042	0.125±0.022	0.035±0.012	3.616±0.520	0.826±0.143	5.52±0.45	5.19±0.42
220404	5.347±0.654	0.303±0.039	0.118±0.022	0.061±0.023	7.998±0.950	0.720±0.049	4.20±0.34	4.13±0.33
220405	5.619±0.895	0.329±0.052	0.126±0.023	0.057±0.019	3.311±0.523	0.735±0.064	4.05±0.33	3.94±0.32
220624	4.781±1.127	0.057±0.017	0.062±0.011	0.029±0.012	2.691±0.472	1.042±0.276	4.13±0.33	4.69±0.38
230126	6.546±0.984	0.292±0.066	0.168±0.032	0.140±0.048	2.421±0.364	0.584±0.117	6.77±0.55	5.99±0.48
230127	6.794±1.176	0.208±0.040	0.162±0.030	0.130±0.032	2.136±0.369	0.641±0.167	6.00±0.49	5.49±0.44
230325	4.532±0.707	0.238±0.039	0.160±0.026	0.079±0.031	3.252±0.505	0.586±0.077	6.91±0.56	6.33±0.51
230522	4.248±0.677	0.318±0.050	0.148±0.024	0.062±0.015	4.782±0.758	0.599±0.073	8.06±0.65	6.99±0.57

Pored merenja fluksa i određivanja parametra A , izmerene su i brzine emitera koji formiraju Balmerove linije. Tačnije, izmerene su širina na polovini maksimalnog intenziteta FWHM (*Full Width Half Maximum*) i širina na nivou kontinuuma FWZI (*Full Width Zero Intensity*) koje na neki način daju procenu prosečne i maksimalne brzine emitera. Ova merenja su vršena kako bi se parametar A predstavio u funkciji FWHM i FWZI. Ti grafici su korisni iz sledećih razloga:

(i) odnosi Balmerovih linija zavise od brzine emitera u AGJ (Stirpe 1990, 1991) i to može da se poveže sa fizičkim (npr. temperatura i gustina) i kinematičkim uslovima sredine gde linije nastaju, kao i sa efektom prenosa zračenja;

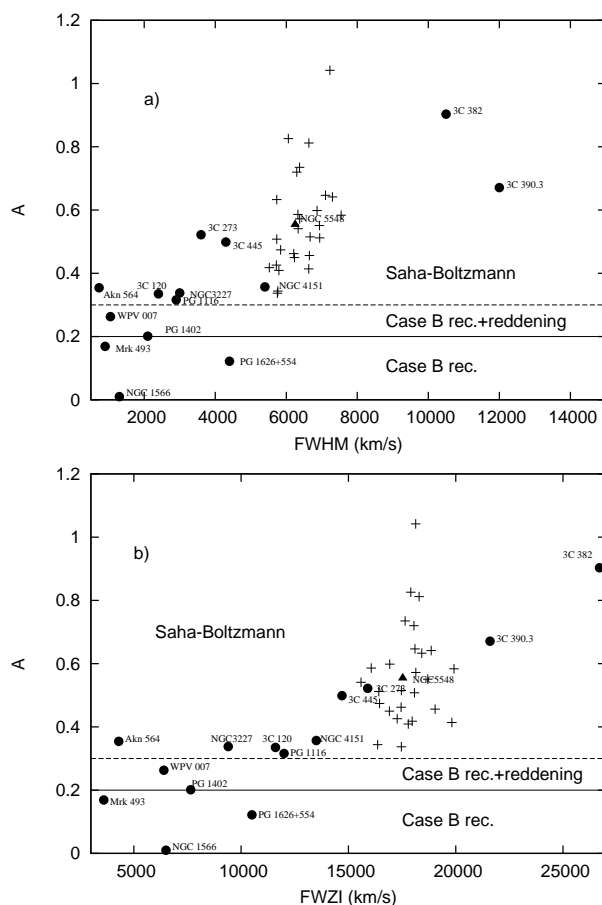
(ii) ilustruju fizičke uslove u plazmi unutar BLR. Kako je već objašnjeno u radu Popović (2003), ako je parametar $A < 0.3$, onda se nagib BP može objasniti "Case B" rekombinacijom i sopstvenim pocrvjenjem. Slučaj samo "Case B" rekombinacije koja dovodi do formiranja Balmerovih linija može da izazove da je $\log(F_n)$ u funkciji od E_u linearno opadajuća funkcija (Tabela 4.4 u Osterbrock 1989).



Slika 31: Profili $H\alpha$ i $H\beta$ linije galaksije NGC 5548 posmatrani 22/05/2003.

Da bi se uporedio parametar A sa brzinom gasa neophodno je da se koriste podaci jako dobrog kvaliteta za merenje FWHM, a specijalno FWZI. Kvalitet spektara NGC 5548 se razlikovao od spektra do spektra, i zato su za procenu brzine korišćene samo $H\alpha$ i $H\beta$ linije. Ta merenja su vršena tako što je prvo profil široke komponente ovih linija normiran na jedinicu a zatim je skala talasnih dužina prebačena u skalu brzina $X = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ (Slika 31). Na kraju, merene su FWHM i FWZI za obe linije, a potom su izračunate srednje vred-

nosti za svaki spektar (Slika 32). Napomenimo ovde da nije bilo značajnih razlika između profila $H\alpha$ i $H\beta$ linija.

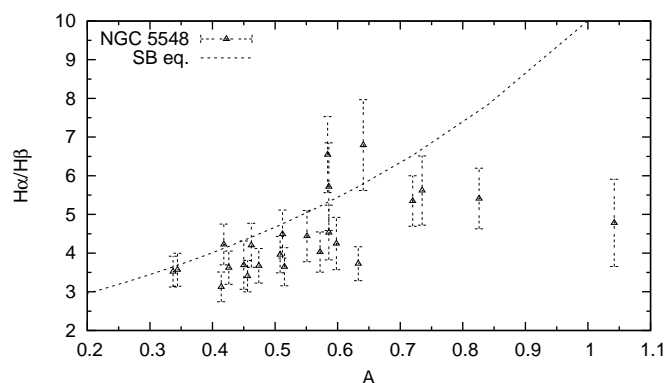


Slika 32: Grafik $A=f(\text{FWHM}, \text{FWZI})$. Podaci iz različitih perioda su obeleženi sa krstićima, dok je srednja vrednost za NGC 5548 predstavljena punim trouglom. Podaci predstavljeni punim kružićima su preuzeti iz Popović (2003) ilustracije radi.

6.2.2 BP temperatura za NGC 5548

Na Slikama 30 i 32 vidi se da BP analiza ukazuje na to da se populacije ekscitovanih nivoa Balmerove serije mogu opisati Saha-Bolcmanovom raspodelom. U svakom od razmatranih posmatranja, parametar temperature je $A > 0.3$. To znači da slučaj "Case B" rekombinacije plus uticaj sopstvenog pocrvenjenja ne može da objasni posmatrane odnose Balmerovih linija. Takođe, na Slici 32, gde je predstavljen parametar A u funkciji FWHM i FWZI, može se videti da ne postoji značajna korelacija između širina i parametra A . Ovaj rezultat je i očekivan, budući da na širine linija utiču makroskopska kretanja gasa,

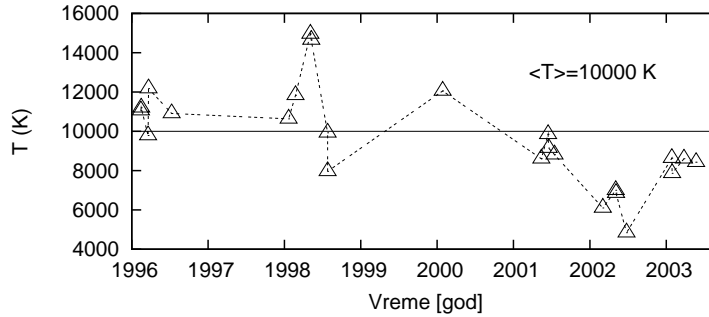
uslovljena kinematikom i geometrijom sredine (u slučaju BLR ove galaksije vrlo je verovatno da je u pitanju diskolika geometrija, odnosno da deo emisije u linijama dolazi iz akrecionog diska (Shapovalova et al. 2004)). Sa druge strane, to može da ukazuje na to da promene u samoapsorpciji Balmerovih linija nisu značajne u razmatranom periodu. Srednja vrednost dobijena usrednjavanjem vrednosti iz svakog perioda (pun trougao na Slici 32) je u saglasnosti sa trendom koji opisuju galaksije iz AGJ uzorka datom u radu Popović (2003). Postojanje neke zavisnosti (povećanje parametra A sa FWHM i FWZI) može ukazivati na to da ipak fizički uslovi zavise od kinematičkih osobina BLR. To može biti povezano sa udaljenošću BLR od super-masivne crne rupe, odnosno sa činjenicom da šire Balmerove linije ukazuju na veća mikroskopska kretanja koja se očekuju bliže masivnoj crnoj rupi. Takođe, ukoliko se predstavi zavisnost odnosa Balmerovih linija $H\alpha$ i $H\beta$ u funkciji od parametra temperature A (Slika 33), dobija se da su sve tačke raspoređene u okolini krive koja predstavlja teorijski odnos ovih linija dobijen uz pretpostavku da važi Saha-Bolcmanova raspodela (odjeljak 3.5, Slika 4). Sa Slike 33 jasno je da tačka iz 2002. godine (spektar 220624) odstupa od SB raspodele, sto se vidi i na Slici 32 jer je parametar temperature A veći od 1 (Popović et al. 2008a, Ilić et al. 2006a).



Slika 33: Zavisnost odnosa $H\alpha/H\beta$ od parametra temperature A za NGC 5548 u posmatranom periodu od 8 godina. Isprekidanom linijom su data predviđanja ovog odnosa uz pomoć Saha-Bolcmanove jednačine (odjeljak 3.5, Slika 4).

Koristeći jednačinu 3.5.8, može se proceniti i temperatura emitujuće oblasti. Na Slici 34 data je promena temperature u razmatranom periodu. Srednja temperatura je ≈ 10000 K, i u periodu od oko 8 godina se menjala oko 50%. Maksimalna vrednost temperature je bila 1998. godine, kada su i Balmerove linije bile najintenzivnije, a minimalna 2002. godine. Dobijene temperature se dobro slažu sa temperaturama očekivanim u BLR ($\sim 10^4$ K).

Sa druge strane, iz BP analize, prilikom fitovanja odnosa skaliranih fluk-



Slika 34: Promena temperature aktivne galaksije NGC 5548 u periodu od 1996 do 2004. Maksimalna vrednost temperature je bila 1998. godine, kada su i Balmerove linije bila najintezivnije.

seva Balmerovih linija, dobija se i parametar B . Kao što se vidi iz jednačina 3.5.3 - 3.5.6, parametar B zavisi od koncentracije emitera i particione funkcije ($B = \log(hcN_0/Z)$). Obe ove fizičke veličine su iste za sve linije Balmerove serije u datom trenutku posmatranja, ali se i one menjaju tokom vremena, budući da očekujemo da se fizičke karakteristike emitujuće plazme u BLR menjaju tokom vremena kod galaksije NGC 5548 jer se široke emisione linije menjaju. U osnovi, particiona funkcija, odnosno suma po stanjima zavisi od temperature i karakterisitika energetskog nivoa (za ovaj slučaj suma po stanjima Z ide do $n = 2$). Teško je odrediti stvarne vrednosti promene koncentracije BLR plazme na osnovu parametra B , ali ipak može se steći predstava o redu veličine promene ovih fizičkih veličina. Na osnovu jednačina 3.5.3 - 3.5.6 i činjenice da su fluksevi Balmerovih linija normalizovani na fluks $H\beta$ linije, može se izvesti sledeća jednačina: $\log(N_0/Z) \sim B_{E_l} + \log(F_{H\beta})$ gde je B_{E_l} vrednost parametra B koji odgovara energiji donjeg nivoa, budući da je Z data za $n = 2$ i $E_l = 10.2$ eV. Koristeći ovu relaciju, izračunato je da je razlika između maksimalne i minimalne vrednosti $\log(N_0/Z)$ jednaka $\Delta \log(N_0/Z) = \log(N_0/Z)_{\max} - \log(N_0/Z)_{\min} \sim 0.9$. Ova vrednost se može i očekivati jer ako na primer grubo aproksimiramo da se Z ne menja, onda bi maksimalna promena koncentracije emitera bila ~ 8 puta, što je u saglasnosti sa posmatranim redom veličine promena fluksa emisionih linija kod NGC 5548 (npr. fluks $H\beta$ linije se menjao ~ 5 puta).

6.2.3 Kontinuum vs. temperatura

U analizi povezanosti zračenja u kontinuumu centralnog izvora i temperature BLR, polazimo od činjenice da odgovor fluksa širokih linija na promene u kontinuumu ukazuje na to da je BLR vrlo blizu centralnom izvoru kontinuumu (Ferland et al. 1992), pa čak to može da ukazuje i na to da deo kontinuumu a u optičkom delu spektra dolazi iz BLR. Pretpostavka je da fluks kontinuumu a

dolazi iz akrecionog diska (na primer Kong et al. (2004) su objasnili promene optičkog spektralnog indeksa sa promenama parametara akrecije unutrašnjeg dela akrecionog diska). Sa druge strane, i Balmerove linije mogu biti emitovane iz spoljašnjih delova akrecionog diska (Shapovalova et al. 2004), što dovodi do zaključka da bi promene temperature izmerene pomoću BP metoda trebalo da budu povezane sa promenama kontinuuma. Iz tog razloga, razmatrana je zavisnost intenziteta kontinuuma od dobijenih temperatura. U akrecionom disku, temperature zavise od radijusa (videti npr. Shakura & Sunyaev 1973), ali ako zračenje u kontinuumu dolazi uglavnom iz unutrašnjih delova akrecionog diska a Balmerove linije dolaze uglavnom iz spoljašnjih delova, može se aproksimirati da je temperatura koja odgovara zračenju kontinuuma T_c u korelaciji sa BLR temperaturom, i to sledećeg oblika $T_c \propto T_{\text{BLR}}$.

Da bi se odredila ova korelacija, izmeren je fluks kontinuuma u opsegu talasnih dužina od 4240 Å do 4260 Å (date talasne dužine su u sistemu mirovanja galaksije) i izračunata je srednja vrednost za talasnu dužinu 4250 Å kao i fluks u spektralnom opsegu 5090 Å - 5110 Å sa srednjom vrednošću na 5100 Å. Da bi se dobila samo vrednost fluksa kontinuuma koji dolazi iz jezgra aktivne galaksije, neophodno je bilo pre toga oduzeti doprinos fluksa u kontinuumu okolne galaksije koji je superponiran na posmatrani fluks jezgra (Popović et al. 2008a).

Ukupni fluks kontinuuma $F_t(\lambda)$ emitovan na talasnoj dužini λ može se predstaviti kao suma fluksa BLR (F_{BLR}), centralnog izvora ($F_c(\lambda)$) i zvezdanog kontinuuma ($F_s(\lambda)$). Kao što je već napomenuto, doprinos fluksa zvezdanog kontinuuma okolne galaksije je oduzet, pa je ukupan fluks:

$$F_t(\lambda, T) = F_c(\lambda, T_c) + F_{\text{BLR}}(\lambda, T_{\text{BLR}}). \quad (7.2.4)$$

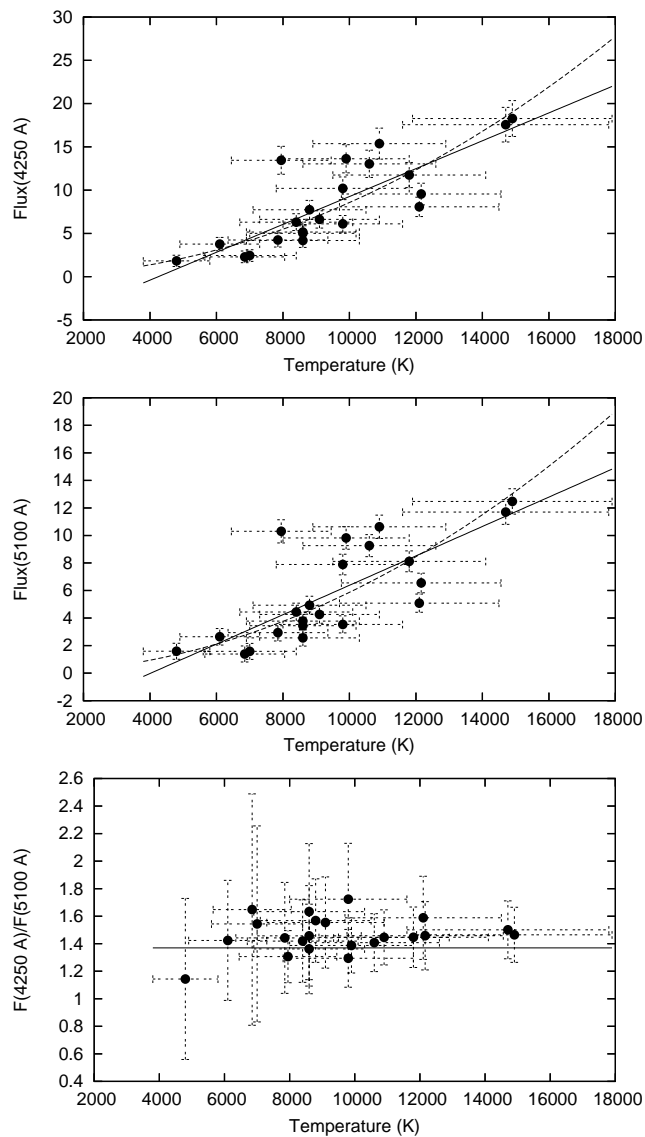
Ako se pretpostavi da kontinuum u optičkom delu spektra dolazi iz oblasti dovoljno udaljene od centra akrecionog diska, može se koristiti sledeća relacija za fluks centralnog izvora kontinuuma (videti Peterson 2004, jednačina 4.6 i odgovarajuću diskusiju):

$$F_c(\lambda, T) \sim \text{const} \times \frac{T_c^{8/3}}{\lambda^{1/3}}. \quad (7.2.5)$$

Dalje ako zanemarimo doprinos fluksa kontinuuma iz BLR, onda je odnos flukseva kontinuuma merenih na talasnim dužinama λ_1 i λ_2 :

$$\frac{F_t(\lambda_1, T)}{F_t(\lambda_2, T)} \sim \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^{1/3} = \text{const}. \quad (7.2.6)$$

Ne postoji dokaz da je temperatura kontinuuma proporcionalna BLR temperaturi, ali može se pretpostaviti da su u nekoj korelaciji, odnosno da je $T_c \sim T_{\text{BLR}}$, pa je zato ovde razmatrana zavisnost intenziteta kontinuuma od BLR temperature.

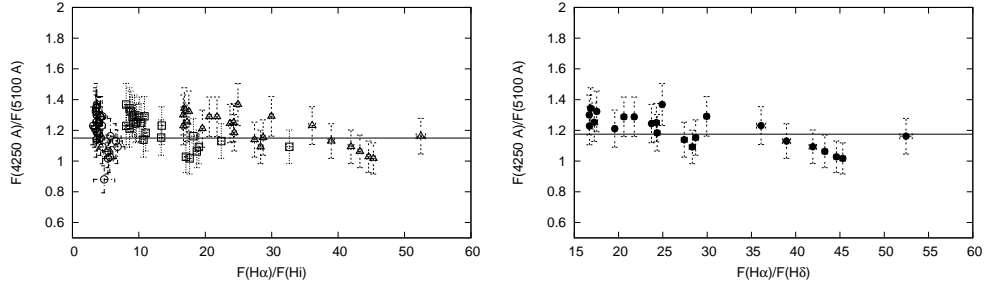


Slika 35: Fluks kontinuuma meren na 4250 Å i 5100 Å u funkciji temperature određene pomoću BP metoda (prva dva grafika), kao i odnos $I_C(4250)/I_C(5100)$ u funkciji temperature (donji grafik). Merene vrednosti su date punim kružićima. Pretpostavljena linearna funkcija i funkcija data jednačinom 7.2.5 su date punom i isprekidanom linijom, redom (prva dva grafika). Na donjem grafiku puna linija predstavlja najbolji fit sa jednačinom 7.2.6.

Na Slici 35, predstavljena je promena AGJ komponente fluksa kontinuuma u funkciji izmerenih temperatura. Na Slici 35a je data promena fluksa kontinuuma na $\lambda 4250 \text{ \AA}$; na Slici 35b je promena fluksa kontinuuma na 5100 \AA ; na Slici 35c je data varijacija odnosa ova dva fluksa. Na Slikama 35a,b se vidi da AGJ komponenta kontinuuma teži da bude linearna funkcija temperature. Stepem korelacije između promene kontinuuma i temperature je visok i iznosi $r = 0.85$. Na graficima je isprekidanom linijom dat i najbolji fit merenih podataka sa funkcijom datom jednačinom 7.2.5 (Slika 35a,b), gde se vidi da ova jednačina dobro opisuje posmatrane podatke. Na Slici 35c vidi se da odnos flukseva AGJ komponentata kontinuuma na talasnim dužinama od 4250 i 5100 \AA prati funkciju datu jednačinom 7.2.6, odnosno da ovaj odnos ostaje konstantan sa promenom temperature. Ova činjenica utvrđuje malopredloženi zaključak da je u BLR prisutna emisija diska.

Ovde treba voditi računa o tome da promena izmerenih BLR temperatura dobro prati fizičke promene kontinuuma. Ovo se može očekivati iz sledećeg razloga: bilo da je izazvan od strane promenljivog visokoenergetskog X-zračenja izvora iz centra ili nekog drugog mehanizma, optički i UV kontinuum se menja sa promenom jonizujućeg spektra. To znači da je moguće posmatrati da kontinuum postaje "plavlji" kako mu se povećava intenzitet. Ovo je u saglasnosti sa povećanjem temperature termalnog akrecionog diska kako izvor iz centra (X-zraci i jonizujući kontinuum emitovan iz unutrašnjih delova diska) postaje sjajniji. Dobijeni visok stepen korelacije između fluksa AGJ komponente kontinuuma i temperature, kao i između odnosa flukseva AGJ komponente kontinuuma na različitim talasnim dužinama i temperature, podržava činjenicu da jedan deo emisije iz BLR dolazi iz akrecionog diska, što je već ranije predlagano (Shapovalova et al. 2004). Takođe, najnovija istraživanja spektralne energetske raspodele NGC 5548 Gaskela i saradnika (Gaskell et al. 2007) pokazuju da njena BLR nije sferosimetrična (što se često uzima kao pretpostavka geometrije BLR), već da BLR pre ima spljoštenu geometriju i da se prostire do unutrašnjih granica torusa. Sa druge strane, Ulrich (2000) je pokazao da je za slučaj galaksije NGC 4151 očekivan visok stepen korelacije između X-emisije (koja zasigurno potiče iz akrecionog diska) i BLR temperature. Ovde je prvi put potvrđeno da takva korelacija postoji i u slučaju optičkog dela kontinuuma.

Međutim, dobijena korelacija može biti objašnjenja i sledećim scenarijem: emitujući gas u BLR postaje vreliji kako se povećava sjaj centralnog izvora i fluks upadnih fotona. U isto vreme veličina Strömgrenove sfere se povećava što rezultira povećanjem optičke gustine Balmerovih linija. Samim tim se efektivnost njihove emisije smanjuje sa povećanjem upadnog fluksa, sa tim da je efekat na $H\alpha$ liniju veći nego na $H\beta$ liniju, koji je pak veći od efekta na $H\gamma$ liniju, jer optička gustina $H\alpha$ linije ostaje veća od optičke gustine $H\beta$ linije, itd (Ferland et al. 1979). U tom slučaju, očekuje se da je odnos flukseva



Slika 36: *Levo*: Odnos izmerenog fluksa kontinuuma u funkciji odnosa flukseva linija $H\alpha/H\beta$ (kružići), $H\alpha/H\gamma$ (trouglovi), i $H\alpha/H\delta$ (kvadratići). *Desno*: Isto ali je sada data samo zavisnost od $H\alpha/H\delta$ odnosa flukseva.

Balmerovih linija funkcija odnosa fluksa kontinuuma merenih u plavom i crvenom delu spektra. Da bismo proverili ovaj slučaj, na Slici 36 je dat odnos flukseva kontinuuma na 4250\AA i 5100\AA u funkciji $H\alpha/H\beta$, $H\alpha/H\gamma$ i $H\alpha/H\delta$ odnosa flukseva. Na Slici 36 se vidi da postoji tendencija da odnos flukseva linija $F(H\alpha)/F(H_i)$, gde je $i = \beta, \gamma, \delta$, bude manji kako je kontinuum plavlji, ali je to vrlo mali efekat. To potvrđuje da je korelacija između temperature i fluksa AGJ komponente kontinuuma sa Slike 35 realna.

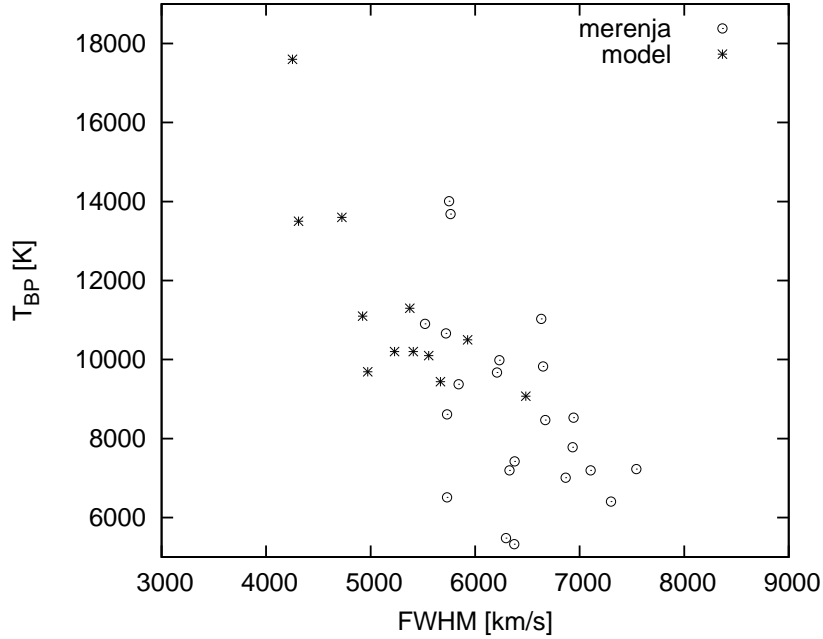
6.2.4 Simulacije fizičkih uslova BLR NGC 5548

Pomoću CLOUDY programa simulirani su fizički uslovi unutar BLR i izračunata je srednja BLR temperatura, koja je zatim upoređena sa temperaturom procenjenom pomoću BP metoda. Cilj ovih numeričkih simulacija je bio ne da se nađe najbolji fit posmatranih podataka, već pre da se nađe fizički razlog za izmerenu promenljivost BLR temperature. Za numeričke simulacije i poređenje sa našim merenjima, korišćeni su nezavisno dobijeni parametri preuzeti iz Peterson et al. (2002).

Glavni ulazni parametri ovih modela su: radijus BLR (R_{BLR}), jonizujuć fotonjski fluks (Q_{h}), i gustina vodonika (n_{H})³³. Radijusi BLR za različite periode su dobijeni iz reverberacione analize i uzeti su iz rada Peterson et al. (2002)³⁴. Za račun jonizujućeg fotonjskog fluksa korišćene su vrednosti fluksa kontinuuma $F_{\lambda}(5100\text{\AA})$ takođe preuzete iz rada Peterson et al. (2002), kao i korelacija između Q_{h} i bolometrijske luminoznosti L_{bol} (Padovani & Rafanelli 1988), pretpostavljajući da je bolometrijska luminoznost jednaka $L_{\text{bol}} \approx 9 \cdot \lambda \cdot L_{\lambda}$, gde je $\lambda = 5100\text{\AA}$ (Collin & Hure 2001). Takođe, optički fluks je korigovan za uticaj galaktičkog zvezdanog kontinuuma na $\lambda = 5100$

³³Definicije ovih veličina videti u Dodatku A

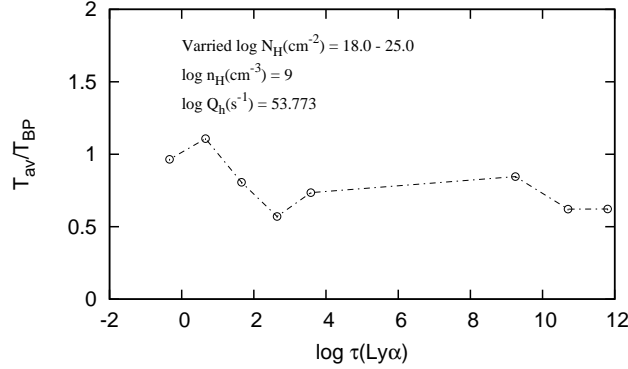
³⁴Iz celog seta podataka, merenje iz Godine 12 (2000) nije uzeto u obzir jer je vrednost BLR radijusa mnogo mala.



Slika 37: BP temperatura u funkciji brzina, odnosno FWHM. Kružići predstavljaju izmerene vrednosti predstavljene u poglavlju 6.2.1, dok su sa zvezdicama date simulirane vrednosti koristeći ulazne podatke iz Peterson et al. (2002), gde je BP temperatura dobijena iz CLOUDY simulacija, a brzina je izračunata uz pretpostvaku virijalne ravnoteže.

\AA , $F_{\text{gal}} = 3.4 \times 10^{-15} \text{ergs s}^{-1} \text{cm}^{-2}$ (Romanishin et al. 1995). Za račun rastojanja do galaksije pretpostavljeni su sledeći kosmološki parametri $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, $\Omega_m = 0.3$ and $\Omega_\lambda = 0.7$. U simulacijama je pretpostavljeno da svi oblaci imaju istu linijsku gustinu $N_H = 10^{23} \text{cm}^{-2}$ (Dumont et al. 1998, Korista & Goad 2000, 2004). Za račun brzine, odnosno FWHM, uzeta je u obzir srednja vrednost mase crne rupe $M_\bullet = 7 \times 10^7 M_\odot$ (Peterson & Wandel 1999), kao i pretpostavka da za BLR važi teorema virijala. Jedna od izlaznih veličina ovih numeričkih simulacija je temperatura usrednjena po BLR radijusu T_{av} . Uz pomoć jednačine 4.2.2 i srednje temperature iz modela, izračunata je BP temperatura T_{BP} , kako bi se uporedila sa izmerenom BP temperaturom, dobijenom primenom BP metoda na izmerene linije Balmerove serije.

Prvo su vršene simulacije pri konstantnoj gustini vodonika (npr. $n_H = 10^9 \text{cm}^{-3}$), menjajući ostale ulazne parametre. Međutim, promena temperature nije mogla da se objasni samo promenom upadnog fluksa kontinuuma. Prema tome, dalje simulacije su vršene pretpostavljajući da se i gustina vodonika n_H menja od $n_H = 10^{8.8} \text{cm}^{-3}$ do $n_H = 10^{10} \text{cm}^{-3}$, gde ove vrednosti odgovaraju maksimalnom i minimalnom fluksa kontinuuma, respektivno.



Slika 38: Razlika između srednje temperature predviđene simulacijama, T_{av} , i temperature određene primenom BP analize na odnose Balmerovih linija, takođe predviđenih numeričkim simulacijama, T_{BP} , u funkciji optičke gustine $\text{Ly}\alpha$, za fiksnu gustinu vodonika $n_{\text{H}} = 10^9 \text{cm}^{-3}$ i jonizujući fotonski fluks $Q_{\text{h}} = 10^{53.773} \text{s}^{-1}$, pri čemu je linijska gustina vodonika N_{H} varirana od 10^{18} do 10^{25}cm^{-2} .

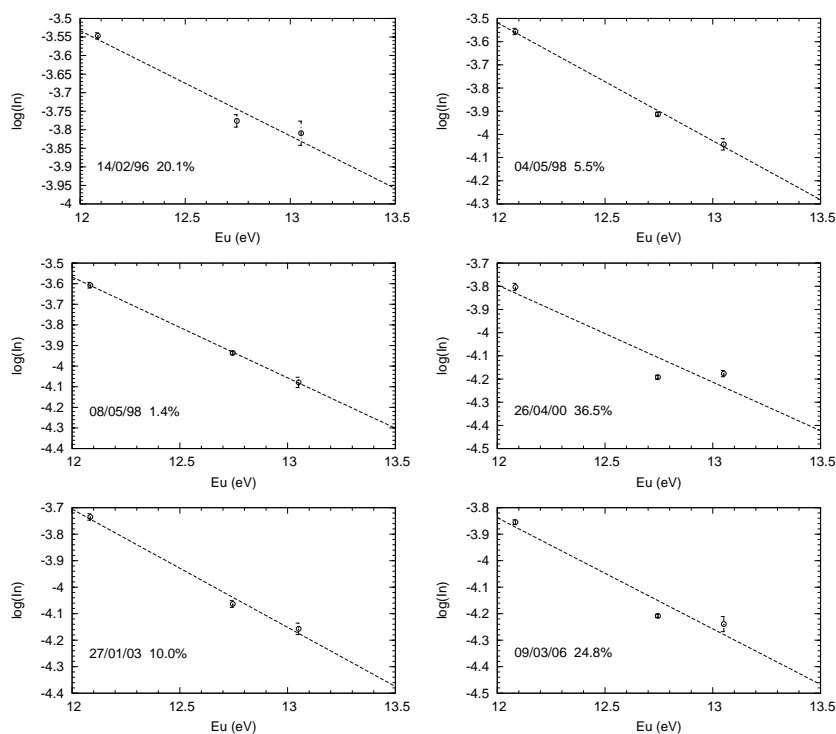
Rezultati su dati na Slici 37, gde je predstavljena BLR temperatura u funkciji brzina, odnosno FWHM. Na Slici 37 se jasno vidi da izračunate vrednosti prate trend temperatura izmerenih primenom BP metoda. Međutim, ovde treba naglasiti da se malim varijacijama u gustini vodonika može pokriti širi opseg temperatura. Najmanje izmerene temperature (većina merenja ispod $T = 8000 \text{K}$) su iz perioda između 2000. i 2003. godine, za koje Peterson et al. (2002) nisu uradili reverberaciona merenja, pa zbog toga ti podaci i nisu pokušavani da se reprodukuju modelima.

Takođe je zanimljivo videti kako se razlika između srednje i temperature dobijene kada se BP metod primeni na simulirane Balmerove linije, menja sa promenom linijske gustine, koja u osnovi određuje optičku gustinu emisionih linija (u ovom slučaju $\text{Ly}\alpha$ linije) za neku fiksnu gustinu vodonika. Na Slici 38 se može videti da je odnos ove dve temperature u većini slučajeva blizak jedinici i da ne zavisi od optičke gustine $\text{Ly}\alpha$ linije. Prema tome, možemo da zaključimo da razlika između srednje temperature predviđene CLOUDY kodom i temperature dobijene iz BP analize nije značajna, specijalno za niže vrednosti gustine vodonika.

Povećanje gustine vodonika može da dovede do povećanja intenziteta $\text{H}\alpha$ linije u odnosu na $\text{H}\beta$ liniju, dok je uticaj na ostale Balmerove linije manji. Razlika između dve temperature u slučaju većih gustina vodonika može biti posledica činjenice da fotojonizacija nije jedini mehanizam koji dovodi do stvaranja emisionih linija (Dumont et al. 1998), odnosno da je moguće da i drugi procesi, pored sudarne ekscitacije doprinose formiranju linija. U svakom slučaju, zaključak je da se promena temperature može objasniti fluktuacijama

gustine vodonika, a ne samo promenom fluksa kontinuuma. Goad & Koratkar (1998) su pokazali da promena fluksa linija kod NGC 5548 nije čisto posledica promene fluksa jonizujućeg kontinuuma, već da to može bit rezultat promene spektralne raspodele kontinuuma ili fizičkih karakteristika BLR gasa (Goad & Koratkar 1998). BLR temperatura NGC 5548 procenjena BP metodom može biti reprodukovana CLOUDY simulacijama, jedino što je neophodan vrlo pažljiv izbor ulaznih parametara simulacija. Na kraju, rezultati numeričkih simulacija doprinose zaključku da se BP metod može koristiti u slučaju nekih galaksija za procenu temperature u BLR (Ilić 2007).

6.3 Fizički procesi unutar BLR galaksije NGC 4151

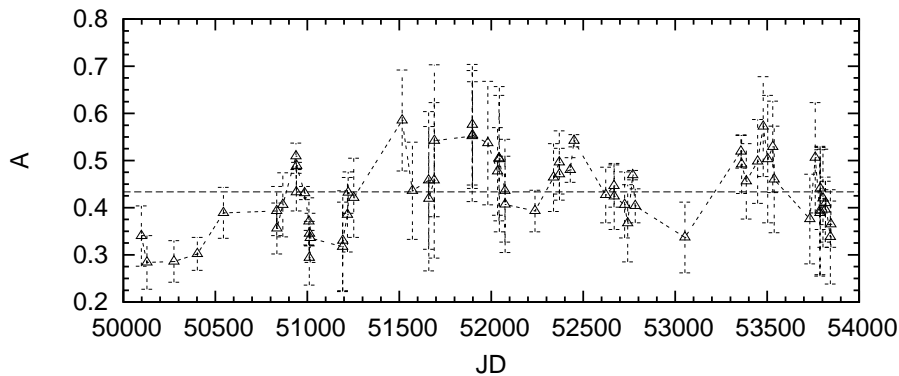


Slika 39: Primeri Bolzman-plota za linije Balmerove serije aktivne galaksije NGC 4151 za različite epohe. F_n je fluks izračunat na osnovu jednačine 3.5.7.

6.3.1 BP koeficijent za NGC 4151

Budući da je već pokazano da se Bolzman-plot metod može primeniti u slučaju aktivne galaksije NGC 4151 (Popović 2003), BP metod je primenjen na svaku seriju merenja. Metod je primenjen na prve tri linije Balmerove serije i određen

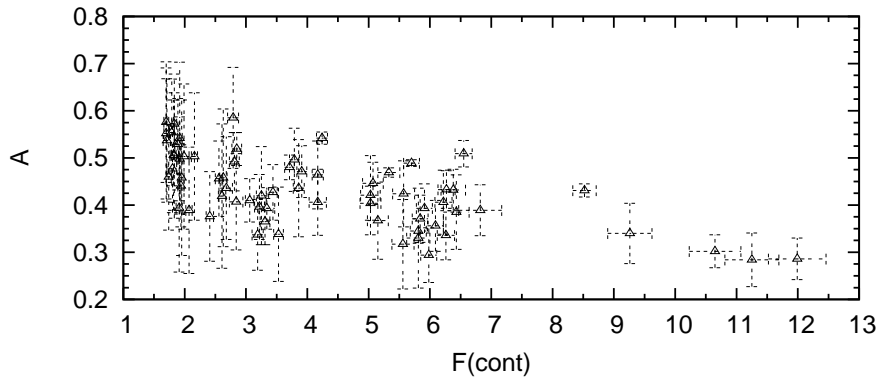
je parametar A na osnovu jednačine 3.5.7, koji može da predstavlja neku indikaciju temperature u BLR ove galaksije. Parametar A je dobijen iz najboljeg fita merenih vrednosti, a greška ΔA predstavlja asimptotsku standardnu grešku (unutar 1σ). Vrednosti parametra A i greška ΔA su date u Tabeli 8 zajedno sa fluksevima tri prve linije Balmerove serija. Na Slici 39 su dati primeri Bolcman-plota za NGC 4151 iz nekoliko epoha, i to su dati primeri sa različitim greškama fita p^{35} gde je $p \in [1.4 - 36.5]\%$. Jasno se vidi sa Slike 39 da se ne dobija dobar linearan fit ove tri tačke. Sa druge strane, na Slici 40 data je promena parametra temperature A u razmatranom periodu od 11 godina, gde je srednja vrednost parametra $A \sim 0.434$, dok je zavisnost parametra temperature A od fluksa kontinuuma na 5117 \AA data na Slici 41. Ukoliko se predstavi zavisnost odnosa Balmerovih linija $H\alpha$ i $H\beta$ u funkciji od parametra temperature A , dobija se da su sve tačke raspoređene u okolini (mada je velika većina iznad) krive koja predstavlja teorijski odnos ovih linija dobijen uz pretpostavku da važi Saha-Bolcmanova raspodela (odjeljak 3.5, Slika 4).



Slika 40: Promena parametra temperature A aktivne galaksije NGC 4151 u periodu od 11 godina (1996 - 2006).

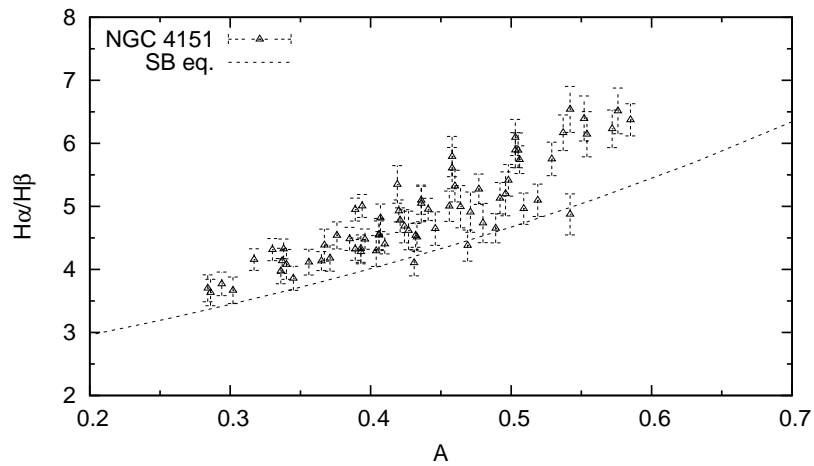
Dobijene vrednosti parametra temperature A su u opsegu očekivanih vrednosti za BLR, a i Slika 42 pokazuje da su odnosi $H\alpha/H\beta$ linija bliski teorijskim predviđanjima u slučaju da važi Saha-Bolcmanova raspodela koja je preduslov za primenu BP metoda. Međutim greške fita za tri Balmerove linije pomoću jednačine 3.5.7 su velike (Tabela 8). Činjenica da se fituju samo tri za razliku od uobičajenih pet linija Balmerove serije (npr. prethodni slučaj aktivne galaksije NGC 5548) bi trebalo znatno da smanji grešku fita. Na osnovu toga zaključujemo da BP metod nije pouzdan za procenu temperature BLR i ne može se primeniti u slučaju galaksije NGC 4151. Jedno od mogućih objašnjenja zašto BP metod ne može da se primeni na širokolinijsku oblast NGC 4151 je činjenica da je moguće da dve oblasti različitih fizičkih karakteristika doprinose

³⁵Greška je dobijena kao standardna greška fita metodom najmanjeg kvadrata.



Slika 41: Zavisnost parametra temperature A aktivne galaksije NGC 4151 od fluksa kontinuuma na 5117 \AA , koji je dat u jedinicama $10^{-14} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

ukupnom fluksu Balmerovih linija.



Slika 42: Zavisnost odnosa $H\alpha/H\beta$ od parametra temperature A za NGC 4151 u posmatranom periodu od 11 godina. Isprekidanom linijom su data predviđanja ovog odnosa uz pomoć Saha-Bolcmanove jednačine (odjeljak 3.5, Slika 4).

Tabela 8: Fluksevi Balmerovih linija, $H\alpha$, $H\beta$ i $H\gamma$ aktivne galaksije NGC 4151, parametar temperature A i greška u procentima. Datum posmatranja je dat u julijskim danima (oduzeto je 2400000JD) a fluksevi su u $10^{-12}\text{erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Izmereni fluksevi su preuzeti iz rada Shapovalova et al. (2008).

#	datum	$F_{H\alpha}$	$F_{H\beta}$	$F_{H\gamma}$	A	p[%]
1	50097.6	33.41 ± 0.63	8.19 ± 0.32	3.89 ± 0.29	0.340 ± 0.064	18.8
2	50128.0	34.34 ± 0.65	9.28 ± 0.36	4.52 ± 0.34	0.284 ± 0.057	20.1
3	50275.3	35.72 ± 0.68	9.83 ± 0.38	4.65 ± 0.35	0.286 ± 0.044	15.4
4	50402.6	39.95 ± 0.76	10.89 ± 0.42	5.00 ± 0.38	0.302 ± 0.035	11.6
5	50543.6	32.15 ± 0.80	7.44 ± 0.12	3.34 ± 0.20	0.389 ± 0.054	13.9
6	50833.6	31.65 ± 0.98	7.31 ± 0.14	3.26 ± 0.19	0.393 ± 0.052	13.2
7	50834.6	31.03 ± 0.96	7.54 ± 0.14	3.47 ± 0.20	0.356 ± 0.054	15.2
8	50867.4	33.34 ± 1.03	7.34 ± 0.14	3.36 ± 0.20	0.406 ± 0.068	16.8
9	50938.3	33.60 ± 1.04	6.77 ± 0.13	2.64 ± 0.15	0.509 ± 0.028	5.5
10	50940.5	30.78 ± 0.95	6.82 ± 0.13	2.88 ± 0.17	0.433 ± 0.040	9.2
11	50942.5	29.87 ± 0.93	6.42 ± 0.12	2.43 ± 0.14	0.489 ± 0.007	1.4
12	50985.3	34.03 ± 1.05	8.29 ± 0.16	3.12 ± 0.18	0.431 ± 0.014	3.2
13	51008.7	31.09 ± 0.96	7.44 ± 0.14	3.36 ± 0.20	0.371 ± 0.050	13.5
14	51010.7	28.62 ± 0.89	7.59 ± 0.14	3.68 ± 0.21	0.294 ± 0.058	19.7
15	51011.6	28.82 ± 0.89	7.47 ± 0.14	3.26 ± 0.19	0.345 ± 0.026	7.5
16	51015.7	31.15 ± 0.97	7.84 ± 0.15	3.64 ± 0.21	0.336 ± 0.052	15.5
17	51191.9	28.47 ± 0.51	6.85 ± 0.16	3.54 ± 0.20	0.317 ± 0.095	29.9
18	51193.0	28.47 ± 0.51	6.60 ± 0.15	3.46 ± 0.20	0.330 ± 0.106	32.1
19	51218.6	35.24 ± 0.63	7.86 ± 0.18	3.74 ± 0.21	0.385 ± 0.079	20.5
20	51221.7	36.73 ± 0.66	8.09 ± 0.19	3.45 ± 0.20	0.432 ± 0.044	10.2
21	51252.9	29.45 ± 0.53	6.16 ± 0.14	2.89 ± 0.16	0.421 ± 0.084	19.9
22	51515.6	22.94 ± 0.41	3.60 ± 0.08	1.58 ± 0.09	0.585 ± 0.107	18.3
23	51571.9	23.57 ± 0.85	4.67 ± 0.10	2.26 ± 0.06	0.436 ± 0.103	23.6
24	51659.8	20.19 ± 0.73	3.60 ± 0.08	1.88 ± 0.06	0.458 ± 0.146	31.9
25	51660.8	19.04 ± 0.69	3.56 ± 0.07	1.94 ± 0.06	0.419 ± 0.153	36.5
26	51689.7	17.89 ± 0.64	3.09 ± 0.06	1.68 ± 0.05	0.458 ± 0.165	36.0
27	51690.7	19.68 ± 0.71	3.01 ± 0.06	1.53 ± 0.04	0.542 ± 0.161	29.7
28	51895.9	15.92 ± 0.57	2.49 ± 0.05	1.20 ± 0.04	0.552 ± 0.139	25.2
29	51897.0	16.61 ± 0.60	2.55 ± 0.05	1.18 ± 0.03	0.576 ± 0.128	22.2
30	51898.0	16.22 ± 0.58	2.64 ± 0.06	1.20 ± 0.04	0.554 ± 0.113	20.4
31	51981.7	14.31 ± 0.41	2.32 ± 0.04	1.11 ± 0.05	0.537 ± 0.131	24.4
32	52034.6	12.97 ± 0.38	2.46 ± 0.04	1.13 ± 0.05	0.477 ± 0.093	19.5
33	52041.8	13.31 ± 0.39	2.26 ± 0.04	1.11 ± 0.05	0.505 ± 0.133	26.4
34	52043.7	13.71 ± 0.40	2.25 ± 0.04	1.16 ± 0.05	0.503 ± 0.154	30.6
35	52074.7	17.38 ± 0.50	3.41 ± 0.05	1.67 ± 0.07	0.436 ± 0.109	25.0

Tabela 8: Nastavak tabele sa prethodne strane.

#	datum	$F_{H\alpha}$	$F_{H\beta}$	$F_{H\gamma}$	A	p[%]
36	52075.7	15.08 ± 0.44	3.13 ± 0.05	1.54 ± 0.06	0.407 ± 0.102	25.1
37	52237.6	21.66 ± 0.63	5.06 ± 0.08	2.22 ± 0.09	0.393 ± 0.044	11.2
38	52338.7	19.93 ± 0.54	3.99 ± 0.16	1.77 ± 0.10	0.464 ± 0.072	15.5
39	52369.7	19.39 ± 0.52	3.73 ± 0.15	1.60 ± 0.09	0.496 ± 0.067	13.5
40	52370.7	19.29 ± 0.52	3.93 ± 0.15	1.67 ± 0.09	0.471 ± 0.055	11.7
41	52429.7	20.55 ± 0.55	4.34 ± 0.17	1.72 ± 0.09	0.480 ± 0.026	5.4
42	52450.4	21.93 ± 0.59	4.50 ± 0.18	1.57 ± 0.09	0.542 ± 0.013	2.4
43	52622.0	19.95 ± 0.54	4.32 ± 0.17	1.91 ± 0.10	0.427 ± 0.059	13.8
44	52666.9	22.26 ± 0.62	4.79 ± 0.14	2.03 ± 0.10	0.446 ± 0.045	10.1
45	52667.9	23.24 ± 0.65	4.96 ± 0.14	2.25 ± 0.11	0.424 ± 0.070	16.5
46	52724.8	22.59 ± 0.63	4.96 ± 0.14	2.28 ± 0.11	0.406 ± 0.070	17.3
47	52741.8	23.50 ± 0.66	5.36 ± 0.16	2.60 ± 0.12	0.367 ± 0.082	22.3
48	52769.3	24.39 ± 0.68	5.57 ± 0.16	2.06 ± 0.10	0.469 ± 0.010	2.1
49	52782.7	24.98 ± 0.70	5.82 ± 0.17	2.49 ± 0.12	0.404 ± 0.036	8.9
50	53053.0	20.35 ± 0.53	4.92 ± 0.11	2.40 ± 0.09	0.337 ± 0.075	22.3
51	53357.6	18.91 ± 0.49	3.71 ± 0.09	1.46 ± 0.06	0.519 ± 0.035	6.7
52	53361.5	17.85 ± 0.46	3.48 ± 0.08	1.48 ± 0.06	0.492 ± 0.062	12.6
53	53386.9	19.21 ± 0.52	3.84 ± 0.08	1.74 ± 0.06	0.456 ± 0.080	17.5
54	53447.8	16.62 ± 0.45	3.07 ± 0.06	1.38 ± 0.04	0.498 ± 0.089	17.9
55	53478.7	15.08 ± 0.41	2.42 ± 0.05	1.07 ± 0.04	0.572 ± 0.106	18.5
56	53503.3	14.79 ± 0.40	2.51 ± 0.05	1.24 ± 0.04	0.503 ± 0.135	26.9
57	53530.7	15.07 ± 0.41	2.62 ± 0.05	1.17 ± 0.04	0.529 ± 0.097	18.3
58	53538.3	13.25 ± 0.36	2.49 ± 0.05	1.21 ± 0.04	0.460 ± 0.113	24.6
59	53732.0	15.84 ± 0.43	3.49 ± 0.07	1.73 ± 0.06	0.376 ± 0.095	25.3
60	53761.5	16.59 ± 0.35	2.89 ± 0.05	1.37 ± 0.09	0.506 ± 0.117	23.1
61	53786.9	15.64 ± 0.33	3.16 ± 0.05	1.69 ± 0.11	0.389 ± 0.134	34.5
62	53787.5	16.57 ± 0.35	3.31 ± 0.05	1.77 ± 0.12	0.394 ± 0.136	34.5
63	53788.5	16.39 ± 0.34	3.31 ± 0.05	1.54 ± 0.10	0.441 ± 0.087	19.7
64	53803.8	16.90 ± 0.35	3.43 ± 0.05	1.68 ± 0.11	0.420 ± 0.104	24.8
65	53816.4	17.83 ± 0.37	3.98 ± 0.06	1.84 ± 0.12	0.396 ± 0.069	17.4
66	53817.4	17.79 ± 0.37	4.04 ± 0.06	1.76 ± 0.12	0.410 ± 0.046	11.2
67	53843.7	19.68 ± 0.41	4.55 ± 0.07	2.34 ± 0.15	0.338 ± 0.100	29.5
68	53846.4	19.01 ± 0.40	4.60 ± 0.07	2.08 ± 0.14	0.365 ± 0.049	13.4

7 Zaključci

U ovoj doktorskoj disertaciji razmatrani su fizički uslovi u širokolinijskoj oblasti aktivnih galaksija i prikazane su neke metode za grubu procenu fizičkih parametara. Kombinujući rezultate numeričkih simulacija dobijenih pomoću programa CLOUDY (numerički kod za simulaciju izlaznog spektra fotojonizovanih regiona) i posmatranih spektralnih karakteristika AGJ, dat je direktan i jednostavan metod kojim se mogu proceniti fizičke osobine, temperatura i koncentracija širokolinijskog regiona, koristeći posmatrane emisione linije. U istraživanju su korišćena posmatranja aktivnih galaksija NGC 5548 i NGC 4151 dobijena 6m teleskopom SAO-a u Rusiji i 2.1m INAOE teleskopom u Meksiku, ali i uzorak od 20 aktivnih galaksija preuzet iz SDSS spektralne baze podataka. Najvažniji rezultati ove doktorske disertacije su:

- (i) koristeći CLOUDY program za simuliranje uslova u plazmi širokolinijskog regiona kod AGJ, pokazano je da za neke vrednosti koncentracije vodonika n_H i jonizujućeg fluksa fotona Φ_H , fluksevi Balmerovih linija mogu biti fitovani pomoću Bolcman-plota (BP) sa greškom manjom od 10% (Slike 6 - 8);
- (ii) analizirajući rezultate simulacija koje imaju grešku BP fita manju od 10%, zaključeno je da se Balmerove linije i odnos linija helijuma $R = F(\text{He II } \lambda 4686)/F(\text{He I } \lambda 5876)$, mogu koristiti u proceni fizičkih uslova u BLR, odnosno za procenu temperature i koncentracije vodonika, što je prvi put primenjeno u ovom radu;
- (iii) predložen metod (poglavlje 4.2.3), kao i metod koji predlaže Laor (2006) su do sada jedini metodi za direktnu procenu termodinamičkih parametara unutar BLR pomoću posmatranih širokih emisionih linija a koji zaobilaze kompleksne numeričke simulacije;
- (iv) opisan metod je primenjen na uzorak od 20 galaksija iz SDSS spektralne baze. Procenjene BLR temperature su u opsegu $T_{\text{BLR}} = 4000 - 18000$ K dok je koncentracija vodonika u opsegu $n_H = 10^{8.6} - 10^{11.5} \text{ cm}^{-3}$. Ove vrednosti su u saglasnosti sa prethodnim procenama fizičkih uslova unutar BLR (videti npr. Osterbrock & Ferland 2006);
- (v) primenjen je BP metod na široke komponente Balmerovih linija promerljive aktivne galaksije NGC 5548 posmatrane u periodu od 1996. do 2004. godine i pokazano je da BP može da se primeni za BLR ove galaksije, odnosno da naseljenost viših energetskih nivoa ($n > 2$) vodonika prati Saha-Bolcmanovu raspodelu;

- (vi) BLR temperatura kod NGC 5548 se u periodu od 9 godina menjala od 5000 K (u 2002. god.) do 15000 K (u 1998. god.). Srednja BLR temperatura je 10000 K, što je vrednost očekivana za širokolinijski region, dok maksimum BLR temperature odgovara epohi kada su i Balmerove linije bile najintenzivnije. Pokazano je da postoji visok stepen korelacije ($r = 0.85$) između promena optičkog AGJ kontinuuma i temperature. Ovo je prvi put da je potvrđena takva korelacija i ona ukazuje na prisustvo akrecionog diska u BLR kod NGC 5548, što je i ranije predlagano (Shapovalova et al. 2004);
- (vii) simulirani su uslovi u širokolinijskom regionu galaksije NGC 5548 uz pomoć CLOUDY programa za različite vremenske epohe i pokazano je da se BLR temperature procenjene pomoću BP metoda mogu reprodukovati CLOUDY simulacijama, kao i da promena u BLR temperaturi može biti rezultat promene koncentracije vodonika;
- (viii) primenjen je BP metod na široku komponentu Balmerovih linija promenljive aktivne galaksije NGC 4151 posmatrane u periodu od 1996. do 2006. godine. Pokazano je da BP metod nije pouzdan za procenu BLR temperature u slučaju galaksije NGC 4151. Jedno od mogućih objašnjenja zašto BP metod ne može da se primeni na širokolinijsku oblast NGC 4151 je činjenica da je moguće da dve oblasti različitih fizičkih karakteristika doprinose ukupnom fluksu Balmerovih linija.

Ovim radom dat je prvi put ovakav način procene temperature i koncentracije vodonika u širokolinijskoj oblasti aktivnih galaksija na osnovu posmatranih linija Balmerove serije vodonika i linija helijuma, koje su uvek pokrivene optičkim posmatranjima. Samim tim dat je doprinos razumevanju fizičkih procesa unutar ovih regiona i strukture aktivnih galaksija uopšte. U budućem radu trebalo bi više ispitati mehanizme zagrevanja, odnosno jonizacije širokolinijskog regiona, kao i povezanosti fizičkih karakteristika sa kinematikom i geometrijom ovih sredina. Takođe, trebalo bi obratiti pažnju na povezanost optičke emisije iz ovih regiona sa emisijom u drugim spektralnim oblastima, npr. zračenje iz X ili radio-područja.

8 Literatura

- [1] Agekyan, T.A. 1972, *Osnovi teorii oshibok*, Nauka, Moscow
- [2] Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Korista, K. T., Carswell, R. F., Hamann, F., Phillips, M. M., Verner, D., Wilkes, B. J., Williams, R. E., 1996, *ApJ*, 461, 664
- [3] Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Korista, K. T., Hamann, F., LaCluyzé, A., 2004, *ApJ*, 615, 610
- [4] Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Korista, K. T., Verner, D. A., 1995, *ApJL*, 455, 119
- [5] Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Martin, P. G., Corbin, M., Cota, S., Peterson, B. M., Slettebak, A., 1991, *ApJ*, 374, 580
- [6] Bentz, M. C., Denney, K. D., Cackett, E. M., Dietrich, M., Fogel, J. K. J. et al., 2007a, *ApJ*, 662, 205
- [7] Bentz, M. C., Denney, K. D., Peterson, B. M., Pogge, R. W., 2007b, in *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, ASP Conference Series, eds. L. C. Ho and J.-M. Wang, 373, 380
- [8] Bentz, M. C., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Vestergaard, M., Onken, C. A., 2006, *ApJ*, 644, 133
- [9] Bevington, P. R., Robinson, D. K., 2003, *Data reduction and error analysis for the physical sciences*, 3rd ed., Boston, MA: McGraw-Hill
- [10] Binette, L., Dopita, M., Tuohy, I. R., 1985, *ApJ*, 297, 476
- [11] Binette, L., Wang, J., Villar-Martin, M., Martin, P. G., Magris, C. G., 1993a, *ApJ*, 414, 535
- [12] Binette, L., Wang, J., Zuo, L., Magris, C. G., 1993b, *AJ*, 105, 797
- [13] Binney, J., Merrifield, M., 1998, *Galactic Astronomy*, Princeton: Princeton Univ. Press
- [14] Blandford, R. D., McKee, C. F., 1982, *ApJ*, 255, 419
- [15] **Bon, E., Popović, L. Č., Ilić, D., 2006, *New Astronomy Rev.*, 50, 716**

- [16] Brotherton, M. S., Wills, B. J., Steidel, R., Sargent, W. L. W., 1994, ApJ, 423, 131
- [17] Bruhweiler, F., Verner, E., 2008, ApJ, 675, 83
- [18] Burstein, D., Heiles, C., 1982, AJ, 87, 1165
- [19] Casebeer, D. A., Leighly, K. M., Baron, E., 2006, ApJ, 637, 157
- [20] Chen, K., Halpern, J. P., 1989, ApJ, 344, 115
- [21] Chen, K., Halpern, J. P., Filippenko, A. V., 1989, ApJ, 339, 742
- [22] Clavel, J., Boksenberg, A., Bromage, G. E., Elvius, A., Penston, M. V., Perola, G. C., Santos-Lleo, M., Snijders, M. A. J., Ulrich, M. H., 1990, MNRAS, 246, 668
- [23] Collin-Souffrin S., 1986, A&A, 166, 115
- [24] Collin, S., Hure, J.-M., 2001, A&A, 372, 50
- [25] Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., 2001, ApJ, 562, 29
- [26] Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Bruhweiler, F. C., Ruiz, J. R., 2001, ApJ, 555, 633
- [27] Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Gabel, J. R., Schmitt, H. R., Filippenko, A. V., Ho, L. C., Shields, J. C., Turner, T. J., 2004, ApJ, 612, 152
- [28] Crenshaw, D. M., Kraemer, S. B., Turner, T. J., Collier, S., Peterson, B. M. et al. 2002, ApJ, 566, 187
- [29] Dumont, A-M., Collin-Souffrin, S., Nazarova, L., 1998, A&A, 331, 11
- [30] Dopita, M. A., Sutherland, R. S., 2003, Astrophysics of the Diffuse Universe, Springer Berlin Heidelberg
- [31] Eracleous, M., Halpern, J. P., 1994, ApJS, 90, 1
- [32] Eracleous, M., Halpern, J. P., 2003, ApJ, 599, 886
- [33] Eracleous, M., Halpern, J. P., 2004, ApJS, 150, 181
- [34] Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, MNRAS, 167, 31
- [35] Ferland, G. J., 1999, in Quasars and Cosmology, ASP Conference Series, eds. G. Ferland and J. Baldwin, 162, 147
- [36] Ferland, G. J., 2003, ARA&A, 41, 517

- [37] Ferland, G. J., 2006, Hazy, A Brief Introduction to Cloudy 06.02, University of Kentucky Internal Report
- [38] Ferland, G. J., Korista, K. T., Verner, D. A., Ferguson, J. W., Kingdon, J. B., Verner, E. M., 1998, PASP, 110, 761
- [39] Ferland, G. J., Netzer, H., 1979, ApJ, 229, 274
- [40] Ferland, G. J., Netzer, H., Shields G. A., 1979, ApJ, 232, 382
- [41] Ferland, G. J., Persson, S. E., 1989, ApJ, 347, 656
- [42] Ferland, G. J., Peterson, B. M., Horne, K., Welsh, W. F., Nahar, S. N., 1992, ApJ, 387, 95
- [43] Gabel, J. R., Kraemer, S. B., Crenshaw, D. M., George, I. M., Brandt, W. N. et al., 2005, ApJ, 631, 741
- [44] Gaskell, C. M., 1988, in Active Galactic Nuclei , ed. H.R. Miller & P.J. Wiita (Berlin:Springer), 61
- [45] Gaskell, C. M., 1996, ApJL, 464, 107
- [46] Gaskell, C. M., Klimek, E. S., Nazarova, L. S., 2007, sent to ApJ, astro-ph/0711.1025
- [47] Goad, M. R., Koratkar, A. P., 1998, ApJ, 495, 718
- [48] Goad, M. R., O'Brien, P. T., Gondhalekar, P. M., 1993, MNRAS, 263, 149
- [49] Goad, M. R., Wanders, I., 1996, ApJ, 469, 113
- [50] Griem, H. R., 1997, Principles of plasma spectroscopy, Cambridge: Cambridge University Press
- [51] Gruenwald, R. B., Viegas, S., 1992, ApJS, 78, 153
- [52] Hutchings, J. B., Crenshaw, D. M., Kaiser, M. E., Kraemer, S. B., Weistrop, D., Baum, S., Bowers, C. W., Feinberg, L. D., Green, R. F., Gull, T. R., Hartig, G. F., Hill, G., Lindler, D. J., 1998, ApJL, 492, 115
- [53] Ilić, D., 2005, **Magistarska teza "Kinematičke i fizičke osobine emisionih oblasti aktivne galaksije Mrk 817"**
- [54] Ilić, D., 2006, **Aktivna galaktička jezgra: primer galaksije Mrk 817, Beograd: Zadužbina Andrejević, 79 str, ISSN 1450 - 653X, 173, ISBN 86 - 7244 - 560 - 0**

- [55] Ilić, D., 2007, *Serb. Astron. J.*, **175**, 15
- [56] Ilić, D., La Mura, G., Popović, L. Č., Shapovalova, A. I., Ciroi, S., Chavushyan, V. H., Rafanelli, P., Burenkov, A. N., Mercado, A., 2006a, *IAUS*, **238**, 383.
- [57] Ilić, D., Popović, L. Č., Bon, E., Mediavilla, E., Chavushyan, V. H., 2006b, *MNRAS*, **371**, 1610
- [58] Ilić, D., Popović, L. Č., Ciroi, S., La Mura, G, Rafanelli, P., 2008a, in preparation
- [59] Ilić, D., Popović, L. Č., Ciroi, S., Rafanelli, P., 2008b, *Rev Mex AA - Conf. Ser.*, **32**, 102
- [60] Kaiser, M. E., Bradley, L. D. II, Hutchings, J. B., Crenshaw, D. M., Gull, T. R., Kraemer, S. B., Nelson, C. H., Ruiz, J., Weistrop, D., 2000, *ApJ*, **528**, 260
- [61] Kallman, T. R., McCray, R., 1982, *ApJS*, **50**, 263
- [62] Kaspi, S., 2007, *ASPC*, **373**, 13
- [63] Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H. et al. 1996, *ApJ*, **470**, 336
- [64] Kaspi, S., Maoz, D., Netzer, H., Peterson, B. M., Vestergaard, M., Jannuzi, B. T., 2005, *ApJ*, **629**, 61
- [65] Kaspi, S., Smith, P. S., Netzer, H., Maoz, D., Jannuzi, B. T., Giveon, U., 2000, *ApJ*, **533**, 631
- [66] Kollatschny, W., 2003, *A&A*, **407**, 461
- [67] Kollatschny, W., Bischoff, K., Robinson, E. L., Welsh, W. F., Hill, G. J., 2001, *A&A*, **379**, 125
- [68] Kong, M.-Z., Wu, X.-B., Han, J.-L, Mao, Y.-F., 2004, *CJA&A*, **4**, 518
- [69] Konjević, N., 1999, *Phys. Rev.*, **316**, 339
- [70] Korista, K. T., Goad, M. R., 2000, *ApJ*, **536**, 284
- [71] Korista, K. T., Goad, M. R., 2004, *ApJ*, **606**, 749
- [72] Krolik, J. H., 1999, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey

- [73] Krolik, J. H., Horne, K., Kallman, T. R., Malkan, M. A., Edelson, R. A., Kriss, G. A., 1991, ApJ, 371, 541
- [74] Kwan, J., 1984, ApJ, 283, 70
- [75] Kwan, J., Krolik, J., 1981, ApJ, 250, 478
- [76] **La Mura, G., Popović, L. Č., Ciroi, S., Rafanelli, P., Ilić, D., 2007a, AIPC, 938, 82**
- [77] **La Mura, G., Popović, L. Č., Ciroi, S., Rafanelli, P., Ilić, D., 2007b, ApJ, 671, 104**
- [78] Laor, A., 2006, ApJ, 643, 112
- [79] Lyuty, V. M., 2005 Pis'ma in Astronom. Zhurnal 31, 723 (rus)
- [80] Maoz, D., Netzer, H., Mazeh, T., Beck, S., Almoznino, E., Leibowitz, E., Brosch, N., Mendelson, H., Laor, A., 1991, ApJ, 367, 493
- [81] Marziani, P., Sulentic, J. W., Dultzin-Hacyan, D., Calvani, M., Moles, M., 1996, ApJS, 104, 37
- [82] McGill, K. L., Woo, J., Treu, T., Malkan, M. A., 2008, ApJ, 673, 703
- [83] Metzroth, K. G., Onken, C. A., Peterson, B. M., 2006, ApJ, 647, 901
- [84] Mundell, C. G., Wrobel, J. M., Pedlar, A., Gallimore, J. F., 2003, ApJ, 583, 192
- [85] Murray, N., Chiang, G., 1997, ApJ, 474, 91
- [86] Nahar, S. N., Pradhan, A. K., 1997, ApJS, 111, 339
- [87] Netzer, H., 1975, MNRAS, 171, 395
- [88] Netzer, H., 1985, ApJ, 289, 451
- [89] Netzer, H., 1993, ApJ, 411, 594
- [90] Netzer, H., Brotherton, M. S., Wills, B. J., Han, M., Wills, D., Baldwin, J. A., Ferland, G. J., Browne, I. W. A., 1995, ApJ, 448, 27
- [91] Netzer, H., Ferland, G. J., 1984, PASP, 96, 593
- [92] Netzer, H., Maoz, D., 1990, ApJL, 365, 5
- [93] Netzer, H., Maoz, D., Laor, A., Mendelson, H., Brosch, N., Leibowitz, E., Almoznino, E., Beck, S., Mazeh, T., 1990, ApJ, 353, 108

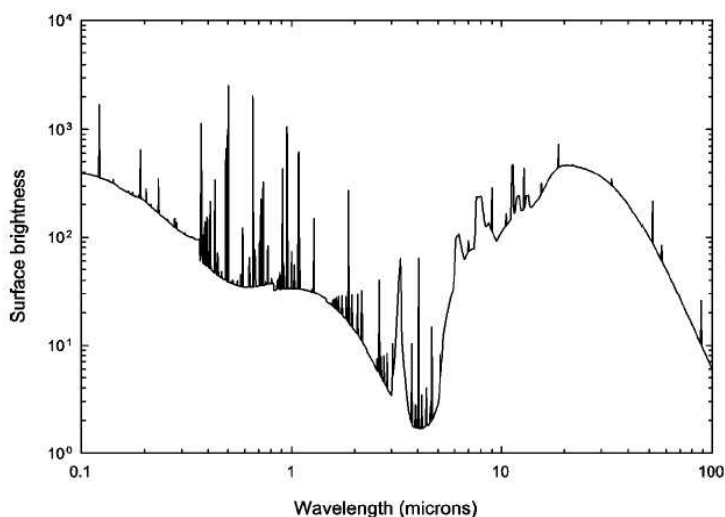
- [94] Netzer, H., Peterson, B. M., 1997, *Astronomical Time Series*, ed. D. Maoz, A. Sternberg, E. M. Leibowitz (Dordrecht: Kluwer), 85
- [95] O'Brien, P. T., Goad, M. R., Gondhalekar, P. M., 1994, *MNRAS*, 268, 845
- [96] Osterbrock, D. E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, University Science Books, Sausalito, California
- [97] Osterbrock, D. E., Ferland, G. J., 2006, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei* (2nd ed.), University Science Books, Sausalito, California
- [98] Padovani, P., Rafanelli, P., 1988, *A&A*, 205, 53
- [99] Peterson, B. M., 1993, *PASP*, 105, 207
- [100] Peterson, B. M., 1988, *PASP*, 100, 18
- [101] Peterson, B. M., 2004, *An Introduction to Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press
- [102] Peterson, B. M., Bentz, M. C., Desroches, L.-B., Filippenko, A. V., Ho, L. C., Kaspi, S., Laor, A., Maoz, D., Moran, E. C., Pogge, R. W., Quillen, A. C., 2005, *ApJ*, 632, 799
- [103] Peterson, B. M., Berlind, P., Bertram, R., Bischoff, K., Bochkarev, N. G. et al., 2002, *ApJ*, 581, 197
- [104] 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
- [105] Peterson, B. M., Wandel, A., 1999, *ApJ*, 521, 95
- [106] Petitjean, P., Boisson, C., Péquignot, D., 1990, *A&A*, 240, 433
- [107] Popović, L. Č., 2003, *ApJ*, 599, 140
- [108] Popović, L. Č., 2006a, *ApJ*, 650, 1217 (an Erratum)
- [109] Popović, L. Č., 2006b, *Serb. Astron. J.*, 173, 1
- [110] Popović, L. Č. et al. 2008b, in preparation
- [111] **Popović, L. Č., Mediavilla, E. G., Bon, E., Ilić, D., 2004, *A&A*, 423, 909**

- [112] Popović, L. Č., Mediavilla, E. G., Bon, E., Stanić, N., Kubičela, A., 2003, ApJ, 599, 185
- [113] Popović, L. Č., Mediavilla, E. G., Kubičela, A., Jovanović, P. 2002, A&A, 390, 473
- [114] Popović, L. Č., Stanić, N., Kubičela, A., Bon, E., 2001, A&A, 367, 780
- [115] **Popović, L. Č., Shapovalova, A. I., Chavushyan, V. H., Ilić, D., Burenkov, A. N., Mercado, A., Ciroi, S., Bochkarev, N. G., 2008a, PASJ, 60, 1**
- [116] Popović, L. Č., Vince, I., Atanacković-Vukmanović, O., Kubičela, A., 1995, A&A, 293, 309
- [117] Rees, M., Netzer, H., Ferland, G. J., 1989, ApJ, 347, 640
- [118] Romanishin, W., Balonek, T. J., Ciardullo, R., Miller, H. R., Peterson, B. M., Sadun, A. C., Stirpe, G. M., Takagishi, K., Taylor, B. W., Zitelli, V., 1995, ApJ, 455, 516
- [119] Sergeev, S. G., Pronik, V. I., Sergeeva, E.A. 2001, ApJ, 554, 245
- [120] Sergeev, S. G., Doroshenko, V. T., Dzyuba, S. A., Peterson, B. M., Pogge, R. W., Pronik, V. I., 2007, ApJ, 668, 708
- [121] Seyfert, C. K., 1943, ApJ, 97, 28
- [122] Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, A&A, 24, 337
- [123] Shapovalova, A. I., Burenkov, A. N., Bochkarev, N. G., 1996, Bull. Spec. Astrophys. Obs., 41, 28
- [124] Shapovalova, A. I., Doroshenko, V. T., Bochkarev, N. G., Burenkov, A. N., Carrasco, L. et al., 2004, A&A, 422, 925
- [125] Shapovalova, A. I., Popović, L. Č., Collin, S., Burenkov, A. N., Chavushyan, V. H. et al., 2008, A&A, 486, 99
- [126] Shields, J. C., Freland, G. J., 1993, ApJ, 402, 425
- [127] Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., Davis, M., 1998, ApJ, 500, 525
- [128] Stirpe, G. M., 1990, A&AS, 85, 1049
- [129] Stirpe, G. M., 1991, A&A, 247, 3
- [130] Strateva, I. V., Strauss, M. A., Hao, L., Schlegel, D. J., Hall, P. B. et al., 2003, AJ, 126, 1720

- [131] Sulentic, J. W., Marziani, P., Dultzin-Hacyan, D., 2000, *ARA&A*, 38, 521
- [132] Sutherland, R., Dopita, M., 1993, *ApJS*, 88, 253
- [133] Ulrich M.-H., 2000, *A&AR*, 10, 135
- [134] Ulrich, M.-H. & Horne, K., 1996, *MNRAS*, 283, 748
- [135] Ulvestad, J. S., Wong, D. S., Taylor, G. B., Gallimore, J. F., Mundell, C. G., 2005, *AJ*, 130, 936.
- [136] Vanden Berk, D. E., Richards, G. T., Bauer, A., Strauss, M. A., Schneider, D. P. et al., 2001, *AJ*, 122, 549
- [137] Vestergaard, M., Peterson, B. M., 2005, *ApJ*, 625, 688
- [138] Viegas, S., Contini M., 1994, *ApJ*, 428, 113
- [139] Vlasyuk ,V. V., 1993, *Bull. Spec. Astrophys. Ops.*, 36, 107
- [140] Wandel, A., Peterson, B. M., Malkan, M. A., 1999, *ApJ*, 526, 579
- [141] Zheng, W., Binette, L., Sulentic, J. W., 1990, *ApJ*, 365, 115

9 DODATAK A - CLOUDY

Kod za numeričke simulacije spektra CLOUDY nam omogućava da razumemo kompleksne fizičke sredine pomoću fundamentalnih fizičkih zakona (Ferland et al. 1998). Program je zamišljen da metodom iteracije simulira fizičke uslove (odnosno temperatursku, jonizacionu i hemijsku strukturu oblaka gasa) i predvidi rezultujući izlazni spektar gasa u non-LTE³⁶ režimu, koji je izložen spoljašnjem izvoru zračenja (kao što je npr. slučaj kod HII regiona ili emisioh oblasti AGJ). Primer jednog takvog izlaznog spektra dat je na Slici 43. Radi se o čuvenoj Orionovoj maglini. Programski kod CLOUDY je otvorenog tipa i dostupan je svima za upotrebu, a tim naučnika svakodnevno radi na njegovom razvijanju i poboljšanju.



Slika 43: Primer predviđenog izlaznog spektra Orionove magline dobijenog CLOUDY simulacijom (Ferland 2003).

9.1 Nastanak i razvoj CLOUDY programa

Kod za numeričke simulacije spektra CLOUDY je osmislio i razvio Gary J. Ferland sa saradnicima (Ferland et al. 1998), prvo u FORTRAN programskom jeziku, ali su poslednje verzije prerađene za C i C++ programske jezike. Kod se razvija od 1978. godine i prva mu je namena bila da simulira emisione

³⁶Gas koji nije u lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži.

oblasti aktivnih galaksija. Međutim, tokom godina kod se sve više razvijao i proširivao svoju namenu. Ilustracije radi veličina koda (odnosno broj programerskih linija) se povećavala oko 7% godišnje. Poslednja stabilna verzija je izašla u julu 2007. godine (verzija C07.02.01), pri čemu je u poslednjoj verziji ceo kod prerađen u C++, te je oko 30% brži, rađeno je na stabilnosti i uklanjanju grešaka, na dodavanju novih komandi, kao i na ažuriranju atomskih parametara i uključivanju dodatnih fizičkih procesa (npr. interakcije između čestica prašine i molekula, turbulencija, itd.). Pored Ferlanda, tim kolega koji su najviše doprineli razvoju koda su: Peter G. Martin, Hagai Netzer, Peter van Hoof, Peter Martin, i Joe Weingartner. Na ovom mestu želim još jednom da se zahvalim Stefanu Ciroi-u i Peter van Hoof-u na pomoći u radu i razumevanju samog koda.

9.2 Osnovne fizičke pretpostavke korišćene u programu

Program CLOUDY računa neravnotežnu jonizaciju, toplotno i hemijsko stanje oblaka koji može (ali i ne mora) biti izložen spoljašnjem izvoru zračenja. Uobičajena pretpostavka koja se uzima je da atomski procesi imaju dovoljno vremena da postanu ravnotežni. Koncentracija jedne vrste čestica ili naseljenost energetskog nivoa je data jednačinom ravnoteže koja ima sledeći oblik

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \sum_{(j \neq i)} n_j R_{ji} + S - n_i \left(\sum_{(j \neq i)} R_{ij} + L \right) = 0 \text{ [cm}^{-3}\text{s}^{-1}\text{]}. \quad (9.1.1)$$

Ovde R_{ji} predstavlja verovatnoću [s^{-1}] kojom čestice iz stanja j prelaze u stanje i , S je verovatnoća pojavljivanja novih atoma u stanju i po jedinici zapremine [$\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$], a L je verovatnoća kojom oni nestaju [s^{-1}]. Ova jednačina, zajedno sa jednačinom zakona održanja energije i naelektrisanja, u potpunosti opisuje problem koji CLOUDY rešava metodom iteracija. U većini simulacija, pretpostavlja se da je oblak statičan, dok je geometrija jednodimenziona. Svi procesi prenosa zračenja u liniji i kontinuumu su tretirani pomoću verovatnoća da foton napusti oblak gasa.

Velika prednost CLOUDY koda za simulaciju spektra fotojonizovanog gasa je to što daje kao rezultat veliki broj konkretnih fizičkih osobina oblaka gasa na osnovu jako malog broja slobodnih parametara (pri čemu postoje standardne vrednosti za neke od parametara, ali je i cilj da se njihove vrednosti odrede iz posmatranja). Program radi tako što na osnovu ulaznih parametara, rešavajući jednačine statističke ravnoteže i zakona održanja energije i naelektrisanja, odredi stepen jonizacije, koncentraciju čestica, temperaturu, hemijski sastav oblaka gasa i naseljenost energetskih nivoa unutar atoma, a zatim izračuna izlazni spektar (kod predviđa intenzitete više miliona linija, praktično nema gornje granice). Neophodni ulazni parametri moraju da sadrže sledeće

podatke: a) oblik i intenzitet spoljašnjeg polja zračenja koje osvetljava oblak, tzv. ulazni kontinuum; b) hemijski sastav gasa i procenat zastupljenosti čestica prašine; c) geometriju oblaka gasa, uključujući i njegove radijalne dimenzije i zavisnost gustine od radijusa.

9.2.1 Kontinuum

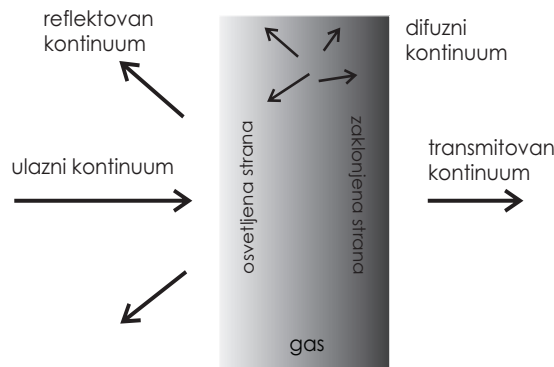
Obavezno je u ulaznom fajlu navesti oblik i intenzitet spoljašnjeg kontinuuma koji obasjava oblak gasa. Obično se različite komande koriste za ova dva parametra, mada postoje i neke kojima se zadaju oba. Što se tiče oblika kontinuuma, trebalo bi zadati fizički opravdan izgled kontinuuma, koji pokriva ceo opseg talasnih dužina ako je moguće. Oblik kontinuuma može biti opisan nekim od zakona zračenja (npr. zračenje crnog tela, zakono zračenje ili neki stepeni zakon), ili interpoliran iz zadate tabele tačaka ili zadat kao izlazni spektar neke od ranijih simulacija. Takođe, u samom programu postoji nekoliko standardnih modela za kontinuum, npr. za razne modele zvezdanih atmosfera ili nekoliko tipova AGJ (npr. komanda za standardnu tabelu AGN je: `table AGN`).

Intenzitet kontinuuma može biti dat ili kao fluks po jedinici površine oblaka ili kao luminoznost emitovana u celom prostornom uglu 4π od strane izvora u centru. Ove veličine se mogu zadati fluksom fotona, gustinom fluksa, luminoznošću na nekoj proizvoljnoj talasnoj dužini ili zadavanjem apsolutne vizuelne ili bolometrijske zvezdane veličine izvora kontinuuma, pri čemu program mora biti u stanju da izračuna fluks fotona [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$] koji pada na unutrašnju stranu oblaka, pa je u slučaju luminoznosti potrebno zadati rastojanje oblaka od izvora kontinuum, tzv. unutrašnji radijus (ukoliko se ne zada, uzima se standardna vrednost od 10^{30}cm , što daje kao rezultat skoro plan-paralelnu geometriju).

9.2.2 Geometrija oblaka gasa

Kod uvek podrazumeva da je geometrija sferna i radi samo u jednoj dimenziji. Može se preći u plan-paralelan sistem zadavanjem unutrašnjeg radijusa mnogo većeg od dimenzija oblaka. Takođe, kod standardno uzima da je gas konstantne gustine i da u potpunosti ispunjava svoju zapreminu, ali naravno mogu se zadati razni zakoni raspodele pritiska i modeli koji uzimaju da je samo deo zapremine ispunjen gasom. Strana oblaka koja je okrenuta ka izvoru jonizujućeg zračenja naziva se *osvetljena strana*, dok se suprotna strana naziva *zaklonjena strana*. Osvetljena strana je generalno uvek veće temperature i stepena jonizacije.

CLOUDY pretpostavlja da je geometrija otvorenog tipa, što znači da je faktor pokrivanja (*covering factor*) gasa mali. Naravno, ovo se može promeniti



Slika 44: Šema otvorene geometrije jonizovanog gasa i kontinuumu koji su uzeti u obzir u simulacijama.

posebnim zadavanjem velike vrednosti faktoru pokrivanja tako da foton koji napusti oblak u pravcu izvora kontinuumu uvek interaguje sa gasom na drugoj strani (zatvorena geometrija).

Program radi tako što podeli oblak na tanke koncentrične ljuske, koje se nazivaju zone. Zone su podeljene tako da je njihova debljina dovoljno mala da fizički uslovi u zoni budu skoro konstantni. Na primer u slučaju optički gustog modela HII regiona, program tipično izračuna od 100 do 200 zona. Fizički uslovi prve i poslednje zone su uvek dati u izlaznom fajlu, ali ako se prethodno zada, mogu se štampati i rezultati za među-zone.

9.2.3 Hemijski sastav

Što se tiče hemijskog sastava, program detaljno razmatra 30 najlakših elemenata. CLOUDY uzima u obzir sva stanja jonizacije. U rekombinacione mehanizme ubraja sve poznate razmene naelektrisanja, radijativne rekombinacije i procese dielektrične rekombinacije. Od jonizacionih procesa uključuje fotojonizaciju sa valentnog energetskog stanja, unutrašnjih i mnogih ekscitovanih energetskih nivoa, kao i sudarnu jonizaciju kako termalnim elektronima tako i razmenom naelektrisanja. U hemijski sastav uključeni su i mnogi molekuli (H u H₂ i C ili O u CO). U ulaznoj datoteci može se zadati sunčev hemijski sastav, koji postoji kao standard u samom programu, a postoji i nekoliko drugih standardnih. Naravno, može se zadati i proizvoljan hemijski sastav.

9.2.4 Definicije osnovnih veličina

Ovde su date definicije nekih osnovnih veličina koje se koriste u programu, i koje su korišćene u radu:

◇ **Gustina vodonika**, $n(\text{H})$, je ukupna gustina vodonika definisana kao:

$$n(\text{H}) = n(\text{H}^0) + n(\text{H}^+) + 2n(\text{H}_2) + \sum_{\text{ostali}} n(\text{H}_{\text{ostali}}) [\text{cm}^{-3}], \quad (9.1.2)$$

gde su $n(\text{H}^0)$, $n(\text{H}^+)$ i $n(\text{H}_2)$ koncentracije neutralnog, jonizovanog i molekula vodonika, respektivno, a $n(\text{H}_{\text{ostali}})$ predstavlja vodonik u svim molekulima koji ga sadrže. Ako nije zadato drugačije, ova gustina je konstantna kroz oblak. Zadaje se komandom *hden 9.4*, gde broj označava logaritam željene gustine vodonika.

◇ **Linijaska gustina vodonika**, $N(\text{H})$, je definisana kao:

$$N(\text{H}) = \int n(\text{H})f(r)dr [\text{cm}^{-2}], \quad (9.1.3)$$

gde je $f(r)$ faktor popunjenosti oblasti (odnosno *filling factor*) koji izražava koliki deo ukupne zapremine stvarno sadrži gas (ostatak zapremine se može smatrati vakuumom). Ovaj parametar praktično određuje optičku gustinu oblaka, i može da se zada kao jedan od kriterijuma za zaustavljanje iteracija (komanda *stop column density 23*, određuje da se iteracije zaustavljaju kada linijska gustina dostigne vrednost $N(\text{H}) = 10^{23} \text{cm}^{-2}$). Naime, kod neće ni konvergirati ukoliko nije konvergirao u prvih desetak iteracija. Najčešći problem nekonveriranja je da zadata linijska gustina ili debljina sloja uzrokuju da se simulacija završi vrlo blizu jakog jonizujućeg fronta. To dovodi do toga da male promene fizičkih uslova dovode do velikih promena u optičkoj dubini, i to je fizički a ne numerički problem. Program neće imati problema sa konvergencijom ukoliko se optička dubina koristi kao kriterijum za zaustavljanje daljih iteracija.

◇ **Parametar jonizacije**, U , predstavlja bezdimenzioni odnos broja fotona koji jonizuju vodonik i ukupne gustine vodonika. Ovde je definisan kao:

$$U \equiv \frac{Q(\text{H})}{4\pi r_o^2 n(\text{H})c} \equiv \frac{\Phi(\text{H})}{n(\text{H})c}, \quad (9.1.4)$$

gde je r_o rastojanje između centralnog izvora jonizujućeg zračenja i osvetljene strane oblaka, $n(\text{H})$ je ukupna gustina vodonika, c je brzina svetlosti, $Q(\text{H})$ je broj jonizujućih fotona a $\Phi(\text{H})$ je površinski fluks jonizujućih fotona. Naredba se zadaje u obliku *ionizationparameter = -1*, gde je broj zadat u logaritamskoj skali.

◇ **Broj jonizujućih fotona**, $Q(\text{H})$, se zadaje komandom $Q(\text{H}) = 57.429$ (gde je navedeni broj proizvoljno zadat) i predstavlja logaritam ukupnog broja jonizujućih fotona emitovanih od strane centralnog izvora. Ova veličina definiše se kao

$$Q(\text{H}) = 4\pi R_\star^2 \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{\pi F_\nu}{h\nu} d\nu [\text{s}^{-1}], \quad (9.1.5)$$

i predstavlja u osnovi komandu za luminoznost. Kod uzima standardne granice ovog integrala ($1 - 7.354 \times 10^6$ Ridberga³⁷), ali i drugi proizvoljan opseg može biti zadat.

◊ **Fluks jonizujućih fotona**, $\Phi(H)$, se zadaje komandom $\Phi(H) = 22.247$ (gde je navedeni broj proizvoljno zadat). Ova komanda zadaje logaritam površinskog fluksa fotona koji jonizuju vodonik i koji pada na obasjanu stranu oblaka. Definisana je kao

$$\Phi(H) \equiv \frac{Q(H)}{4\pi r_o^2} \equiv \frac{R_*^2}{r_o^2} \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{\pi F_\nu}{h\nu} d\nu \text{ [s}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{]}, \quad (9.1.6)$$

i proporcionalan je optičkoj dubini eksitovanih linija, na primer Balmerovih linija.

9.3 Instalacija i pokretanje CLOUDY programa

Programski kod CLOUDY je otvorenog tipa i dostupan je svim zainteresovanim. Da bi se kod instalirao i pripremio za korišćenje potrebno je proći nekoliko jednostavnih koraka. Sam program, baze atomskih podataka i upustvo HAZY, gde je detaljno opisan kod, instalacija i rad, mogu se naći na zvaničnoj internet prezentaciji www.nublado.org. Sve prethodne verzije koda se takođe mogu naći, ali je preporuka samih autora da se koristi poslednja stabilna verzija (u trenutku pisanja ove disertacije to je verzija C07.02.01). Program se može instalirati na bilo kojem operativnom sistemu, a dalje u tekstu su dati primeri za linux.

U CLOUDY paketu se nalaze program, baze atomskih podataka, upustvo i test-simulacije. Ukoliko se rade simulacije sa zvezdanim kontinuumom, treba posebno skinuti i bazu spektralnih energetskih raspodela zvezdanog kontinuum. Svaka od navedenih grupa podataka sadrži i svoje mini upustvo u vidu *readme.htm* fajla. Preporučuje se da se svi ovi podaci čuvaju u jednom direktorijumu (npr. */home/user/cloudy/*). Sledeći korak se sastoji u menjanju fajla *path.cpp* koji se nalazi u direktorijumu gde je jezgro koda, a koji daje putanju do direktorijuma gde se nalaze baze podataka tj. */data/* direktorijum. Dalje treba kompajlirati kod u C++, gde u zavisnosti od operativnog sistema pod kojim se instalira kod (windows, linux ili mac) treba koristiti odgovarajući kompajler. Za linux je preporučljivo koristiti *g++* kompajler, odnosno sledeće komande za optimalno kompajliranje:

```
>g++ -ansi -c -O3 -fno-math-errno -funsafe-math-optimizations -Wall *.cpp
```

³⁷1 Ridberg = 2.18×10^{-11} erg ili 1 Ridberg = 13.6eV.

```
>g++ -funsafe-math-optimizations -o cloudy.exe *.o
```

Na kraju, treba proveriti validnost koda koristeći test-paket koji sadrži veliki broj test-slučajeva. Prvi test koji proverava da li bilo šta uopšte radi je:

```
>cloudy.exe <enter>
```

```
>test <enter>
```

Program se startuje naredbom *cloudy.exe* koja poziva određenu ulaznu datoteku (u obliku *ime_ulazne_datoteke.in*) i zadaje ime izlaznoj datoteci (u obliku *ime_izlazne_datoteke.out*), gde su i ulazni i izlazni fajl obične tekstualne datoteke. Sintaksa je sledeća:

```
>cloudy.exe <ime_ulazna_datoteka.in> ime_izlazna_datoteka.out
```

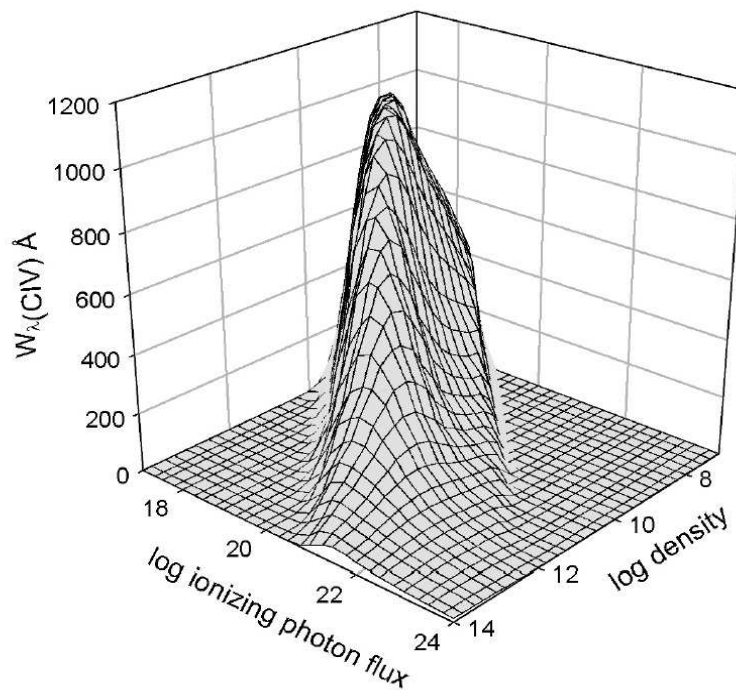
Pre toga poželjno je kopirati *cloudy.exe* fajl koji pokreće kod u */bin/* direktorijum lokalnog korisnika u slučaju linux platforme (npr. */home/user/bin/cloudy.exe*), kako bi se mogao pokrenuti iz bilo kojeg direktorijuma. Primeri nekih ulaznih datoteka, kao i detaljan opis izlazne datoteke biće dati u sledećim poglavljima.

9.4 Ulazni fajl

CLOUDY program se izvršava setom komandnih linija, koje se obično stave u jednu ulaznu datoteku. Program radi na principu iteracije, i kada izračuna model koji konvergira, kreira se izlazna datoteka. Neophodni ulazni parametri moraju da sadrže sledeće podatke: a) oblik i intenzitet spoljašnjeg polja zračenja koje osvetljava oblak, tzv. upadni kontinuum; b) hemijski sastav gasa i procenat zastupljenosti čestica prašine; c) geometriju oblaka gasa, uključujući i njegove radijalne dimenzije i zavisnost gustine od radijusa. Osim ovih mogu se zadati i mnogi drugi parametri, može se uticati i na izgled izlaznog fajla, a moguće je čuvanje samo određenih veličina, kako bi posle bile lakše analizirane (npr. može se izgled i intenzitet izlaznog kontinuuma sačuvati u posebnoj datoteci). Komande se sastoje iz ključne reči od 4 slova i broja, koji obično ima logaritamsku vrednost i može sadržati i dodatna slova. Blok ulaznih naredbi se završava praznom linijom ili znakom-za-kraj-datoteke, i nije bitno kojim se redom navode komande. Program počinje tako što pročita sve ulazne komande, osim komentara, koji su obeleženi jednim od sledećih znakova: #, %, /, c_ i ignorisani su pri izvršavanju programa. Sve ulazne komande, kao i vrednosti koje su direktno njima određene, se štampaju na početku izlaznog fajla.

9.5 Primeri simulacija

Pomoću CLOUDY programa moguće je simulirati fizičke uslove u različitim objektima gde emisija dolazi iz fotojonizovanog gasa (HII regioni, planetarne magline, nove, uskolinijski regioni aktivnih galaksija, itd.) i predvideti njihove emisione spektre. Takođe moguće je radi boljeg razumevanja karakteristika i fizičkih procesa unutar ovih regiona praviti mreže modela varirajući samo određene parametre. Primer jedne takve mreže simulacija dat je na Slici 45. U ovom odeljku dati su primeri nekih ulaznih datoteka korišćenih za simuliranje uslova različitih magličastih objekata, preuzeti iz upustva *Hazy*.



Slika 45: Procena ekvivalentne širine CIV $\lambda 1549$ dubleta za širok opseg gustina i jonizujućeg fluksa fotona oblaka gasa koji emituje linije u slučaju aktivnog galaktičkog jezgra. Na z -osi je data ekvivalentna širina CIV $\lambda 1549$ linije, dok su na x i y -osi dati logaritmi gustine vodonika [cm^3] i jonizujućeg fluksa fotona [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$], respektivno (Ferland 2006).

◇ **Eta Car Nova:** U ovom modelu omotač nove Eta Carinae je obasjan relativno slabim poljem zračenja. Gas je gust i bez čestica prašine.

```
title dense nova shell
table star kurucz 35000
absolute bolometric magnitude -8.1
```



```

radius 12
hden 10 sphere
iterate to convergence
print last iteration
punch overview last file='nova.ovr'
punch results last file='nova.rlt'
c nova.in

```

◇ **Orion Nebula:** Ovo je model Orionove magline sličan modelu HII regiona dat u Baldwin et al. (1991). Čestice prašine su dodate komandom za zastupljenost (*abundances*). Komanda za konstantan pritisak uslovljava hidrostatičku ravnotežu.

```

title conditions similar to Orion nebula blister
sphere
table star kurucz 39,600K
phi(h) 13.0
turbulence 8 km/sec
hden 4
abundances hii region
constant pressure
iterate
print last iteration
punch overview last file='orion.ovr'
punch results last file='orion.rlt'
c orion.in

```

◇ **Ferland & Persson BLR model:** Ovaj model širokolinijskog regiona aktivnih galaksija dali su Ferland & Persson (1989).

```

title final F+P BLR model table 3
stop column density 25.5
iterate to convergence
print last
ionization parameter -0.5
hden 9.5
table agn
plot continuum
punch overview last file='blr.ovr'
punch results last file='blr.rlt'
c blr.in

```

◇ **Kwan & Krolik BLR model.** Ovo je "standardni" BLR model prezentovan u radu Kwan & Krolik (1981).

```

title Kwan+Krolik Ap.J. 250, 478 BLR model

```

```

init file='c84.ini'
constant gas pressure
f(nu) -7.32148
abundances he-1 c-3.699 n-4 o-3.1549 ne-4 na=-8 mg-4.5229
continue al-10 si-4.4229 s-10 ar-10 ca-10 fe-4.5229 ni=-8
stop column density 23
interpolate (0 -5) (.05 -5) (.1 0) (1 -0.5) (7.353 -2.233)
continue (735 -3.233) (800 -15) (8,000,000 -15)
print last iteration
normalise 1216 100
iterate to convergence
plot continuum range -3
hden 9.60206
punch overview last file='kk.ovr'
punch results last file='kk.rlt'
c kk.in

```

◇ **NLR model:** Ovo je jedan od modela za uskolinijsku oblast aktivnih galaksija predstavljen na konferenciji u Lexingtonu (*Lexington Meeting*).

```

title Hagai's nlr model for Lexington Meeting
init file='c84.ini'
diel kludge 0
hden 4
stop column 22
abundances -1 c-3.52 n-4 o-3.097 ne-4 na-9
cont mg-4.523 al-8 si-4.523 s-4.824 a-9 ca-8 fe-8 ni-9
interpolate (0 -10) (0.08 -10) (0.1 1) (3676 -4.935) (4700 -11)
continue (4750 -20) (7,400,000 -30)
phi(h) 12.47712
iterate
print faint .01
print last iteration
punch overview last file='nlr.ovr'
punch results last file='nlr.rlt'
c nlr.in

```

◇ **BLR model NGC 5548:** Ovo je model sličan onome koji je dat u Ferland et al. (1992) za BLR Sejfert galaksije NGC 5548.

```

title BLR model from Ferland et al. 1992
hden = 11.0
print last iteration
ionization parameter -1.0
stop column density 26.0

```

```
iterate to convergence
table agn break 100 microns
punch unit 11, overview last file='n5548.ovr'
punch unit 12, results last file='n5548.rlt'
c n5548.in
```

9.6 Izlazni fajl

Ime izlazne datoteke zadaje se prilikom pokretanja CLOUDY programa. Ona ima standardnu formu, ali se na ispisivanje izlaznih veličina može uticati zadavanjem određenih komandi u ulaznoj datoteci. U izlaznom fajlu se upisuju samo rezultati poslednje iteracije, ali se mogu upisivati i među-rezultati. Ovde će biti opisano kako izgleda standardni izlazni fajl.

Na početku izlaznog fajla upisuju se sve zadate ulazne komande, kao i vrednosti fizičkih veličina koje se direktno izračunavaju iz zadatih veličina. Zatim sledi blok informacija o kontinuumu koji pada na obasjanu stranu oblaka i hemijski sastav oblaka. Dalje sledi pregled karakteristika prve i poslednje zone u oblaku. Opis svake zone počinje linijom koja navodi broj zone, njenu elektronsku temperaturu, ukupnu gustinu vodonika, elektronsku gustinu, udaljenost od centralnog izvora zračenja do centra zone, debljinu zone, i još neke osobine koje su rezultat simulacije. Sledeća linija daje relativne doprinose pritisku zračenja raznih emisionih linija ukoliko je taj doprinos veći od 5%, dok preostale linije daju relativne naseljenosti jonizacionih stanja ostalih elemenata, među kojima su još mnogi detalji vezani za uslove unutar zone.

Posle opisa zona, u izlaznom fajlu ispisuju se objašnjenja zašto je zaustavljena dalja iteracija. Vrlo je važno utvrditi da je dalji proračun zaustavljen iz željenih razloga. Zatim se ispisuju neka upozorenja i komentari na koje treba obratiti pažnju. Kod je napisan tako da bude samostalan i samosvestan, i zato postoji ova provera koja će nas uveriti da je sve valjano. Program će upozoriti ukoliko zbog nečega izlazni parametri ne budu u opsegu validnosti, ili ako neki od parametara nije ispravno zadat ili ako se tokom računanja desi nešto nepredviđeno. Ovo je suštinska odlika koda budući da se često koristi za pravljenje mreža od nekoliko hiljada modela, te je manuelna provera svakog pojedinačnog modela praktično nemoguća.

Dalje se ispisuje izračunat spektar emisionih linija. Prve dve kolone odnose se na element i talasnu dužinu svake spektralne linije. Treća kolona je logaritam luminoznosti ili intenziteta linije, dok poslednja, četvrta kolona daje relativni intenzitet linije u odnosu na referentnu liniju, koja je standardno $H\beta$ linija. Treća kolona će biti ili luminoznost ili intenzitet u zavisnosti od toga kako je zadat upadni kontinuum, odnosno da li je zadat pomoću luminoznosti ili fluksa. Ispisuju se vrednosti samo za najjače emisione linije, a može se posebno zadati da se štampaju relativni intenziteti najslabijih linija.

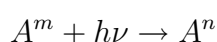
Konačno, poslednja stranica izlazne datoteke sadrži srednje vrednosti nekih veličina, npr. elektronske temperature, parametra jonizacije, optičke dubine u raznim linijama i delovima kontinuuma, intenzitet kontinuuma koji napušta oblak, i mnoge druge osobine oblaka gasa.

Sve gore navedeno su delovi standardnog ispisa programa, pri čemu postoje mnoge dodatne opcije. Detaljno o tome, kao i ostalim karakteristikama programa, može se naći u upustvu programa *Hazy*.

10 DODATAK B - *Atomski procesi*

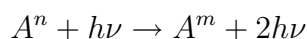
U ovom dodatku su navedeni i kratko opisani neki od najvažnijih atomskih procesa koji doprinose kontinualnom i linijskom spektru u bliskoj X, UV i optičkoj oblasti spektra elektromagnetnog zračenja, koji uključuju brojne interakcije između atoma, jona, elektrona i fotona, kao što su apsorpcija, emisija, jonizacija, rekombinacija, ekscitacija i deekscitacija.

- **Apsorpcija:** Foton energije $h\nu$ može da ekscituje atom iz energetske stanja m u više energetske stanje n :



Ovaj proces se dešava sa verovatnoćom koja je proporcionalna naseljenosti N_m energetske nivoa m i gustini energije U_ν upadnog zračenja, gde je verovatnoća prelaza proporcionalna Ajnštajnovom koeficijentu za apsorpciju B_{mn} , koji svi zajedno definišu stopu prelaza $R = U_\nu B_{mn} N_m$. Ovaj proces je tipa diskretnog vezano-vezanog prelaza koji daje apsorpcione linije u spektru.

- **Stimulisana emisija:** Elektron u ekscitovanom stanju n je stimulisan fotonom energije $h\nu$ iz spoljnog polja zračenja, da pređe u niže energetske stanje m , i tokom tog procesa emituje se drugi foton energije $h\nu = E_n - E_m$:



Verovatnoća ovog procesa je takođe proporcionalna gustini energije U_ν upadnog zračenja, kao što je slučaj sa apsorpcijom, naseljenosti N_n gornjeg energetske nivoa n i Ajnštajnovom koeficijentu za stimulisanu emisiju B_{nm} , pa je stopa prelaza data kao $R = U_\nu B_{nm} N_n$. Ovaj proces je odgovoran za lasersku emisiju, za koju je neophodna inverzna naseljenost energetskih nivoa.

- **Spontana emisija:** Za razliku od stimulisane emisije, u ovom procesu nije neophodan upadni foton, već se elektron spontano vraća iz višeg energetske stanja n u niže energetske stanje m , što je praćeno emisijom fotona energije $h\nu = E_n - E_m$:



Verovatnoća je određena Ajnštajnovim koeficijentom za spontanu emisiju A_{nm} , pa je stopa prelaza data kao $R = A_{nm} N_n$. Ovaj proces je odgovoran

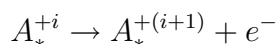
za emisione linije u spektru. Kvantna mehanika daje sledeće veze između ova tri Ajnštajnova koeficijenta

$$A_{nm} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} B_{nm}$$

$$g_m B_{mn} = g_n B_{nm}$$

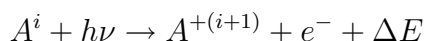
gde su g_m i g_n statističke težine energetskih nivoa m i n .

- **Autojonizacija:** Ako je jon u dvostruko ekscitovanom i nestabilnom stanju A_*^{+i} ,³⁸ može doći to autojonizacije, odnosno spontane jonizacije bez uticaja dodatnog elektrona ili fotona, gde na kraju procesa ostaju jon i slobodan elektron

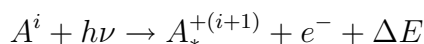


Ukoliko se izbaci elektron iz nižeg energetskog stanja, onda elektron iz višeg energetskog stanja mora da zauzme njegovo mesto kako bi se jonu vratila njegova stabilnost.

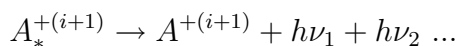
- **Fotojonizacija:** Ovaj proces je vezano-slobodni proces, gde upadni foton ima energiju veću od jonizacionog praga (što je na primer za slučaj vodonika energija od 13.6 eV), te vezani elektron postaje slobodan od atoma. Prelaz iz jonizacionog stanja i u susedno jonizaciono stanje $i + 1$ se šematski predstavlja:



gde je ΔE kinetička energija predata oslobođenom elektronu, koja predstavlja razliku upadne energije fotona i energije jonizacije atoma E_i : $\Delta E = h\nu - E_i$. Ukoliko je upadni foton dovoljno velike energije, to može dovesti jonizovane emitere u ekscitovano stanje, koji zatim kaskadno, radijativnom deekscitacijom dolaze do osnovnog stanja:



a zatim



Prethodno opisana fotojonizacija opisuje oslobađanje elektrona sa spoljašnjih energetskih nivoa. Ukoliko je upadna energija fotona još veća, javlja se mogućnost da se oslobodi elektron sa unutrašnjih energetskih ljuski u procesu tzv. fotojonizacije sa unutrašnjih energetskih ljuski, koji takođe dovodi do promene u elektronskoj konfiguraciji ekscitovanih emitera. To

³⁸U daljem tekstu emitere su obeleženi oznakom A gde se oznaka $+$ odnosi na pozitivno naelektrisan jon, a oznaka $*$ na ekscitovan emiter.

može biti praćeno radijativnim povratkom u osnovno stanje. Međutim, u ovom specijalnom slučaju, drugi vid fotojonizacije, tzv. **Ože jonizacija** (*Auger ionization*) postaje ne samo energetski moguć proces već i više verovantan. To je fotojonizacija emitera sa unutrašnjih K ili L ljuski iz stanja i u stanje $i + 1$, koja je praćena autojonizacijom bez emisije fotona u stanje $i + m + 1$, a završava se radijativnim kaskadnim povratkom u osnovno stanje tog jona:

$$\begin{aligned} A^i + h\nu &\rightarrow A_{**}^{+(i+1)} + e^- + \Delta E_1 \\ A_{**}^{(i+1)} &\rightarrow A_*^{(i+m+1)} + m e^- + \Delta E_2 \\ A_*^{(i+m+1)} &\rightarrow A^{(i+m+1)} + h\nu_1 + h\nu_2 \dots \end{aligned}$$

Treba obratiti pažnju da autojonizacija bez emisije fotona može proizvesti više od jednog elektrona, odnosno da je broj m veći od 1 iznad neke energije praga, i da se povećava što se povećava broj energetski mogućih Ože jonizacija. Takođe, pri fotojonizaciji sa unutrašnje energetske ljuske praćenoj Ože jonizacijom, oslobađaju se dva visokoenergetska elektrona (energije i nekoliko stotina elektron volti). Ovi brzi elektroni su sposobni da dalje ili zagrevaju gas ili sudarno ekscituju i/ili jonizuju okolne emitere sa ekscitacionim ili jonizacionim potencijalom manjim od njihove energije.

- **Sudarna jonizacija:** Ovaj proces se dešava kada se slobodni elektron, dovoljno velike energije, sudari sa emiterom u jonizacionom stanju i i dovede do oslobodanja elektrona, obično spoljašnjih, te jon dolazi u stanje $i + 1$:

$$A^i + e^- \rightarrow A^{+(i+1)} + 2e^- - \Delta E_{A^i}$$

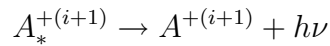
Energija jednaka jonizacionom potencijalu emitera ΔE_{A^i} je preuzeta od upadnog elektrona, što znači da je sudarna jonizacija proces koji efektivno hladi elektronski gas. Ukoliko je energija upadnog elektrona veća od sume jonizacione i ekscitacione energije, jonizacija može direktno da dovede do ekscitacije više jonizovanog jona, koja je praćena radijativnim povratkom u osnovno stanje. Kada je energija upadnog elektrona dovoljno velika može doći do ekscitacije više od jednog elektrona što dovodi atom u vrlo nestabilno stanje, koje se stabilizuje izbacivanjem elektrona bez emisije fotona, koje može biti praćeno i radijativnim prelazima koji vraćaju jonizovan atom nazad u njegovo osnovno stanje:

$$A^{+i} + e^- \rightarrow A_*^{+i} + e^- - E_1$$

praćeno

$$A_*^{+i} \rightarrow A_*^{+(i+1)} + e^- + E_2$$

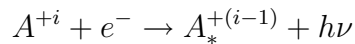
a zatim



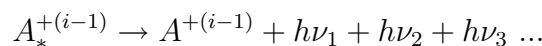
Ovaj proces je poznat pod imenom **ekscitacija-autojonizacija** i češće se dešava kod težih elemenata koji imaju veliki broj elektrona na unutrašnjoj ljusci a samo jedan ili dva elektrona na spoljašnjoj ljusci.

- **Radijativna rekombinacija (ili rekombinacija pomoću dve čestice):**

To je slobodno-vezani proces koji je inverzan proces fotojonizaciji, gde dolazi do zahvatanja elektrona od strane jona, gde se višak energije izračuje u vidu fotona. U većini slučajeva, elektron je zahvaćen u neko od ekscitovanih stanja, obično u stanje visokog glavnog kvantnog broja i velikog ugaonog momenta. Rekombinovan ali i dalje ekscitovan jon emituje više fotona pri kaskadnom povratku u osnovno stanje:

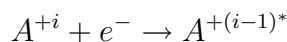


a zatim



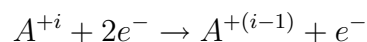
Foton u prvom redu doprinosi rekombinacionom kontinuumu jer energija zahvaćenog elektrona može imati bilo koju vrednost. Sa druge strane, fotoni $\nu_1, \nu_2, \nu_3 \dots$ dolaze iz kvantnih prelaza između vezanih stanja i iz toga razloga se nazivaju rekombinacione linije.

- **Dielektrična rekombinacija:** Ovaj proces je često dominantniji od radijativne rekombinacije. Ovde dolazi do ekscitacije unutrašnjeg elektrona, zahvatom jednog slobodnog elektrona:



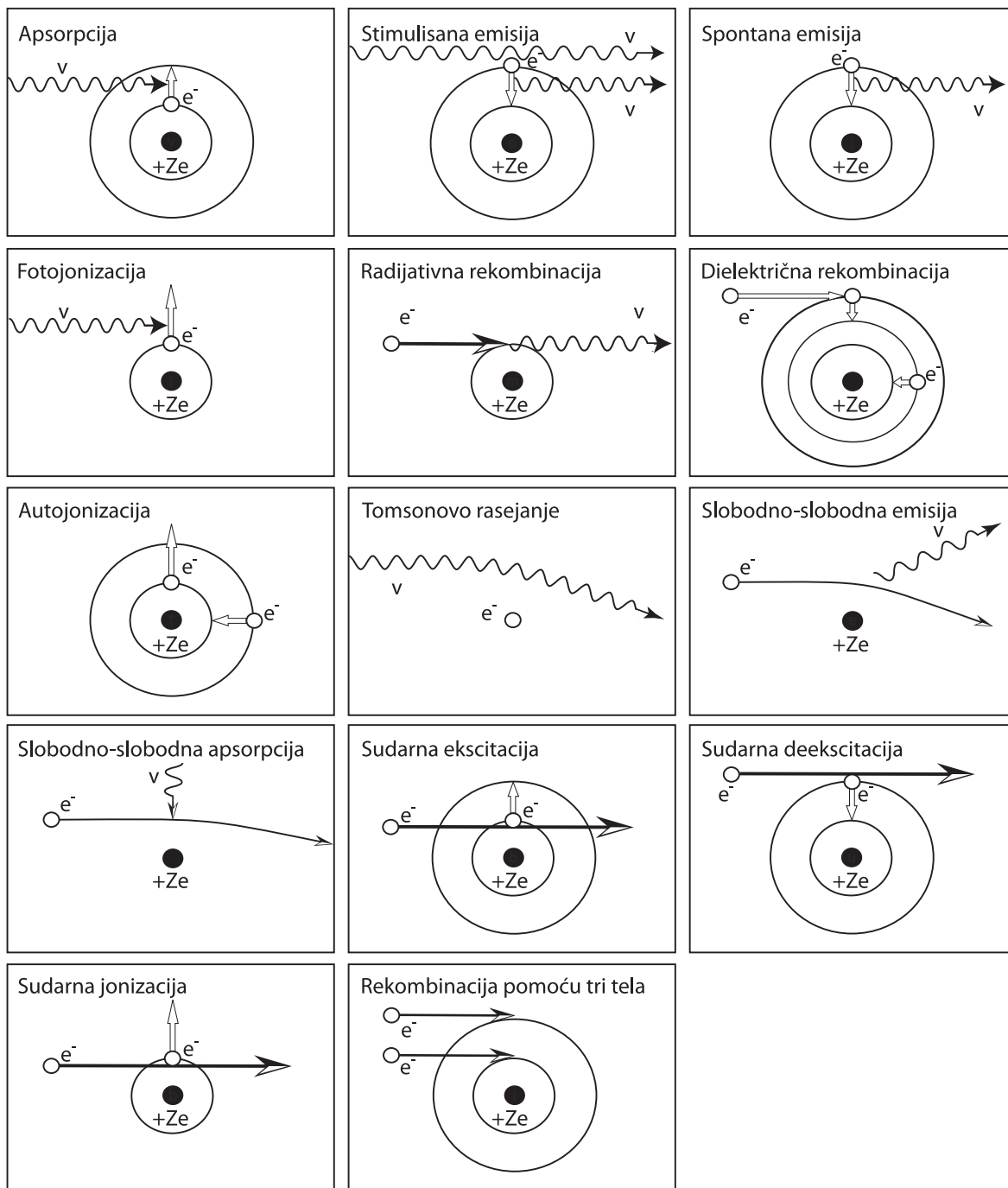
gde je $A^{+(i-1)*}$ izuzetno nestabilan, $i - 1$ puta jonizovan, element sa dva elektrona u ekscitovanom stanju, odnosno jedan elektron je u autojonizacionom stanju, a drugi je u ekscitovanom stanju. Jon se prvo stabilizuje tako što se jedan valentni elektron vrati nazad u osnovno stanje (uz emisiju fotona), a zatim se kaskadno vraća u osnovno stanje radijativnom deekscitacijom uz emisiju fotona tj. rekombinacionih linija $\nu_1, \nu_2, \nu_3 \dots$

- **Rekombinacija pomoću tri čestice:** To je inverzan proces procesu sudarne jonizacije, gde emiter A sudarom sa elektronom prelazi iz i u $i - 1$ jonizovano stanje, pri čemu ne dolazi do emisije fotona:



Ovaj proces je značajan 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 nastaje pri sudaru dva jona gde dolazi do interakcije oblaka elektrona u jonima u kojoj je moguće da dođe do izmene elektrona između dva jona. Proces je vrlo efikasan u slučaju kada su u sistemu bliske energije stanja A_1^{+j}, A_2^{+l} i $A_1^{+j\pm 1}, A_2^{+l\pm 1}$. 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. Važan primer razmene naelektrisanja za fotojonizovan gas na niskim temperaturama je između neutralnog vodonika i jedanput jonizovanog kiseonika, kao i razmena naelektrisanja između neutralnog azota i jonizovanog vodonika.
- **Tomsonovo rasejanje:** Ovo je proces koji doprinosi emisiji u kontinuumu (kao i ostali navedeni procesi), odnosno ne zavisi od talasne dužine fotona, gde dolazi do rasejanja fotona na slobodnim elektronima u plazmi.
- **Slobodno-slobodna emisija:** Naziva se još i zakočno zračenje i rezultat je neelastičnog rasejanja elektrona na jonima, gde je energija emitovanog fotona jednaka razlici energija upadnog i rasejanog elektrona $h\nu = E_2 - E_1$.
- **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:** U ovom procesu relativistički elektroni krećući se helikoidalno oko linija sila magnetnog polja, zrače u visokom stepenu linearno polarizovano sinhrotronsko zračenje.
- **Kreacija/anihilacija para e^\pm :** To je proces stvaranja parova (elektron - pozitron) iz visokoenergetskih γ fotona.



Slika 46: Dijagrami koji opisuju procese apsorpcije, emisije, jonizacije, rekombinacije, ekscitacije i deekscitacije. Atomi i joni naelektrisanja $+Ze^-$ su označeni punim kružićima, elektroni praznim kružićima, elektronske orbite krugovima, elektronski prelazi strelicama, dok su fotoni predstavljeni krivudavim strelicama. Vreme teče od leva ka desno.