

UNIVERZITET U BEOGRADU  
MATEMATIČKI FAKULTET



Aleksandra Božilović

# VETROVI PRAŠINE U AKTIVNIM GALAKTIČKIM JEZGRIMA

master rad

Beograd, 2023.

**Mentor:**

dr Dragana ILIĆ, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet

**Članovi komisije:**

dr Marko STALEVSKI, viši naučni saradnik  
Astronomska opservatorija, Beograd  
Univerzitet u Gentu, u Belgiji

dr Luka POPOVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu, Matematički fakultet  
Astronomska opservatorija, Beograd

*Zahvaljujem se dr Marku Stalevskom, pod čijim rukovodstvom je radena ova master teza, na velikoj pomoći i strpljenju tokom procesa pisanja ovog rada. Takođe se zahvaljujem prof. dr Dragani Ilić na pomoći i korisnim sugestijama.*

**Naslov master rada:** Vetrovi prašine u aktivnim galaktičkim jezgrima

**Rezime:** Prema standardnom modelu aktivnih galaktičkih jezgara (AGJ), akrecioni disk i oblaci gasa oko crne rupe obavijeni su tzv. „torusom“ prašine. Međutim, novija posmatranja uz pomoć najsavremenijih instrumenata u infracrvenom domenu, nagovestila su da velike količine prašine bivaju izbačene u vidu svojevrsnih „vetrova prašine“. Poređenjem posmatranja bliske aktivne galaksije Circinus sa rezultatima numeričkih simulacija prenosa zračenja, uspostavljen je prototip modela ovih vetrova prašine. U narednoj fazi istraživanja, potrebno je da se model primeni na veći uzorak AGJ. U sklopu izrade ovog master rada, izračunali smo opsežnu biblioteku modela za različite vrednosti parametara koji opisuju vetrove prašine. U tu svrhu, korišćen je programski kod SKIRT, koji omogućava simuliranje prenosa zračenja kroz prašinu. Izmerili smo pojedine osobine dobijenih spektralnih energijskih raspodela modela (npr. spektralne nagibe, širinu i jačinu silikatne emisije), i uporedili ih sa modelima torusa, a neke od njih i sa posmatranim vrednostima. Analizirali smo raspodelu vrednosti ovih karakteristika u zavisnosti od parametara modela. Rezultati ove teze i izračunata biblioteka modela predstavljaju polaznu osnovu za dalja istraživanja strukture i osobina vetrova prašine u AGJ-ovima, i za tumačenje posmatranja sa svemirskog teleskopa Džejms Veb.

**Ključne reči:** aktivna galaktička jezgra, torus prašine, prenos zračenja, monte-karlo simulacije

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Aktivna galaktička jezgra . . . . .	1
1.2	Vrste i klasifikacija AGJ . . . . .	3
1.3	Unifikacioni model i struktura AGJ . . . . .	7
1.4	Torus prašine . . . . .	10
1.5	Vetrovi prašine u AGJ . . . . .	13
1.6	Cilj i struktura rada . . . . .	17
<b>2</b>	<b>Metod</b>	<b>19</b>
2.1	Prenos zračenja kroz prašinu . . . . .	19
2.2	Prenos zračenja pomoću Monte Karlo metode . . . . .	21
2.3	Programski kod SKIRT . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Model</b>	<b>24</b>
3.1	Primarni izvor zračenja . . . . .	24
3.2	Geometrijska raspodela prašine . . . . .	25
3.3	Osobine prašine . . . . .	26
3.4	Biblioteka modela vetrova prašine . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Rezultati i diskusija</b>	<b>28</b>
4.1	Odlike spektralnih energetske raspodela modela . . . . .	31
4.2	Poređenje sa posmatranjima . . . . .	38
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>40</b>
	<b>Literatura</b>	<b>42</b>

# Glava 1

## Uvod

### 1.1 Aktivna galaktička jezgra

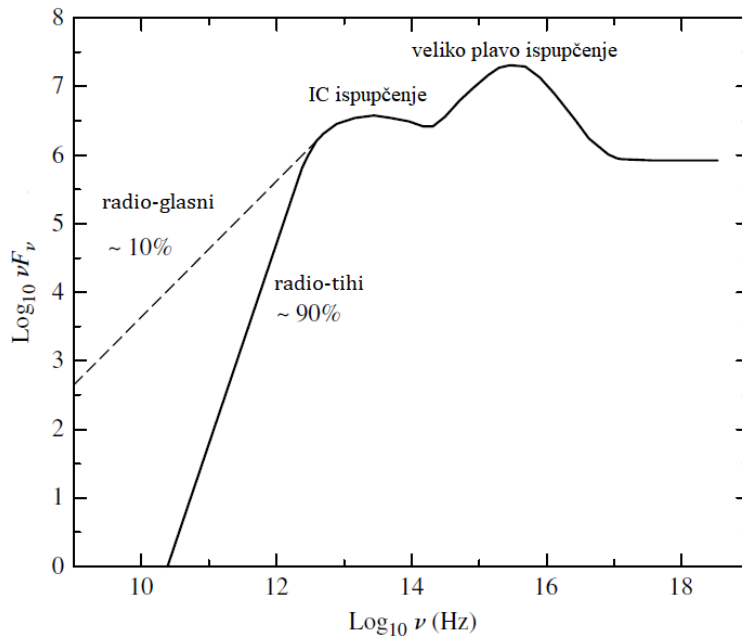
Aktivne galaksije su one iz čijih se središta emituje zračenje nekoliko redova veličine veće nego što bi se to očekivalo od jezgara normalnih galaksija. One čine manje od 10% svih poznatih galaksija, a njihova jezgra nazivamo aktivnim galaktičkim jezgrima (AGJ).

Luminoznost AGJ može dostići vrednosti  $10^{42} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$  i zaseniti sjaj okolnih zvezda iz matične galaksije, čineći ga zanemarljivim u ukupnom sjaju galaksije. Intenzivno zračenje AGJ nije zvezdanog porekla, već potiče iz male oblasti koja se poklapa sa središtem galaksije. O kompaktnosti ove oblasti svedoči nam izrazita promenljivost u spektralnim osobinama AGJ. Naime, sjaj ovih objekata može se menjati na skalama od nekoliko minuta do nekoliko meseci i godina. Pošto period promene sjaja mora odgovarati vremenu potrebnom da svetlost pređe s jednog na drugi kraj objekta, velike brzine promene sjaja ukazuju na male prostorne dimenzije AGJ. Ovako ekstremno oslobađanje energije, koje dolazi iz jako male zapremine, može se objasniti prisustvom supermasivne crne rupe ( $M > 10^6 M_{\odot}$ ), koja aktivno vrši akreciju materije, stvarajući oko sebe tanki akrecioni disk. Snažna aktivnost koju detektujemo nastaje usled pretvaranja gravitacione potencijalne energije u toplotu i zračenje.

Tokom prethodnih nekoliko decenija prikupljen je veliki broj posmatračkih dokaza koji nam govore da supermasivne crne rupe obitavaju u centrima skoro svih masivnih galaksija. Faza u kojoj one aktivno „gutaju” materijal koji ih okružuje, kratkotrajna je u odnosu na životni vek samih galaksija, ali postoje nagoveštaji da ona može imati veliki uticaj na njihov razvoj i evoluciju. [28] Naime, smatra se

da AGJ mogu sprečiti akreciju gasa na galaksije, ili obustaviti formiranje zvezda u njima, ali mehanizmi ovih interakcija nisu dovoljno razjašnjeni ([1]). Stoga, da bi smo razumeli rast i razvoj galaksija, moramo razumeti strukturu i evoluciju AGJ.

AGJ zrače u kontinuumu i u linijama, preko celog elektromagnetnog spektra - od  $\gamma$  do radio-oblasti. Kontinualno zračenje potiče iz središnjeg izvora, a može nastati termalnim i netermalnim mehanizmima. Termalno zračenje opisano je zakonima zračenja crnog tela, a kod AGJ ono potiče od vrelog gasa iz akrecionog diska, koji zrači u optičkom, ultraljubičastom(UV) i X-domeni. Ovo zračenje se u optičkom i UV delu spektralne raspodele ispoljava u vidu „velikog plavog ispučenja” (*big blue bump*), koje može sadržati značajne količine bolometrijske luminoznosti izvora. U infracrvenoj oblasti spektra prisutno je „infracrveno ispučenje” (*infrared bump*), koje doprinosi termalnom kontinuumu, a pretpostavlja se da potiče od emisije vrela prašine ( $T < 2000$  K) iz oblasti izvan akreconog diska. Ove dve karakteristike mogu se videti na skici kontinuumu AGJ, koja je prikazana na slici 1.1.



Slika 1.1: Skica kontinuumu za različite tipove AGJ. (adaptirano iz knjige [10])

Netermalno kontinualno zračenje proističe od relativističkih elektrona, koji zrače sinhrotronski u jakom magnetnom polju. Najsnažniji izvor netermalne emisije su radio-mlazevi, koji se pružaju duž magnetne ose sistema, normalno na akrecioni

disk. Maksimum ovog zračenja se nalazi u radio-domenu, ali će se ono prostirati i biti snažno čak i u oblasti X-zračenja.

Emisione linije kod AGJ ne vode poreklo od zvezda iz galaksije domaćina, već nastaju u emisionim oblasti malo dalje od crne rupe. Uzrokuje ih gore pomenu- to visokoenergetsko, kontinualno zračenje, koje je snažan izvor jonizacije u ovim oblastima. Emisione linije prisutne su u optičkom, UV, infracrvenom i X-opsegu, a po obliku mogu biti uske i široke. Uske nastaju iz dozvoljenih i zabranjenih elektronskih prelaza, a široke samo iz dozvoljenih. Pošto različite linije nastaju u različitim sredinama, na osnovu izgleda linija i odnosa njihovih intenziteta možemo dobiti informacije o fizičkim i kinematičkim osobinama ovih oblasti. Linije koje potiču od zvezda iz galaksije domaćina uglavnom su apsorpcione, i zbog svog slabog intenziteta teško uočljive u spektrima AGJ.

Razlike u spektralnim karakteristikama AGJ dovele su do njihove podele u odvojene klase, prema obliku i jačini kontinuuma i spektralnih linija.

## 1.2 Vrste i klasifikacija AGJ

Na osnovu spektralnih odlika, AGJ možemo podeliti u sledeće kategorije: Sejfertove galaksije, kvazare, blazare, radio-galaksije i aktivna galaktička jezgra slabog sjaja. Ukratko će biti opisan svaki od ovih tipova, uključujući i podtipove.

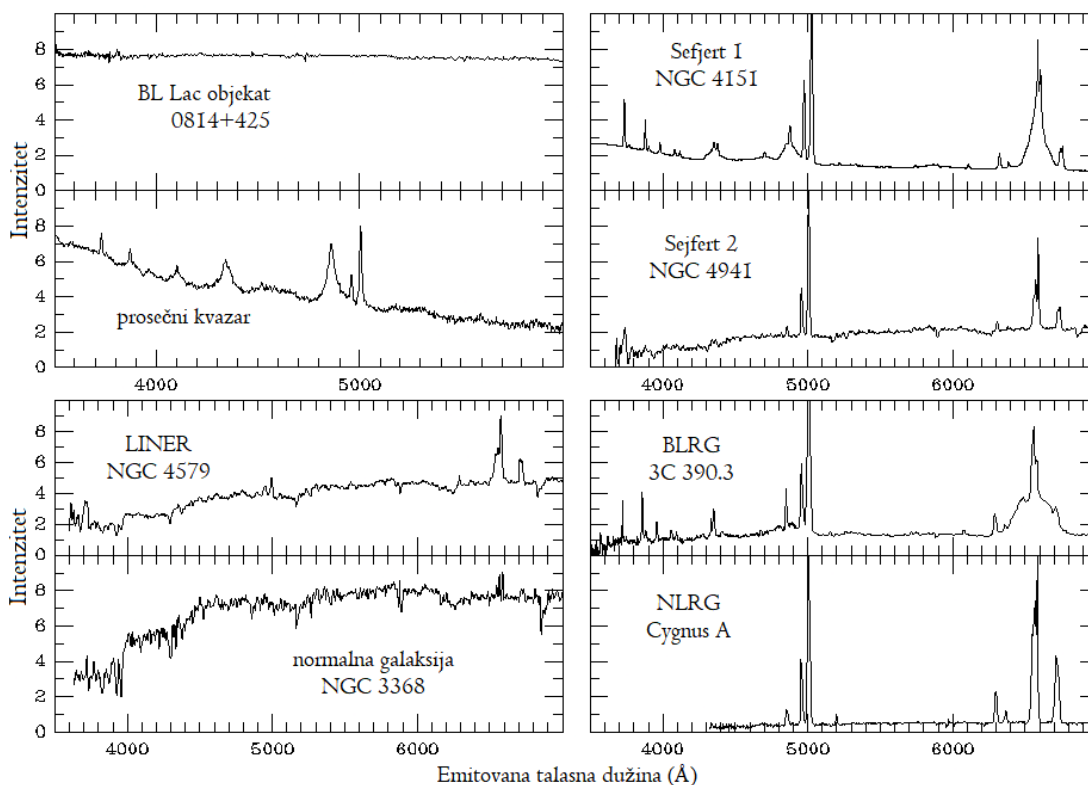
Na slici 1.2 uporedno su prikazani tipični spektri različitih tipova AGJ.

### Sejfertove galaksije

Sejfertove galaksije otkrio je Karl Sejfert (*Carl Seyfert*), 40-tih godina prošlog veka, kada je primetio da postoji određeni broj galaksija sa izrazito sjajnim jezgrom, koje emituju široke emisione linije visokog stepena jonizacije. Sejfertove galaksije su slabi radio-izvori i oko 90% svih Sejfertovih galaksija, koje su dovoljno blizu da njihov oblik može biti razlučen teleskopima, čine spiralne galaksije tipa Sb ili SBb.

Na osnovu spektralnih osobina napravljena je podela na Sejfertove galaksije tipa 1 i tipa 2. Sejfert 1 imaju veoma široke emisione linije, koje potiču od dozvoljenih prelaza (H I, He I, He II), ali i uske linije, koje dolaze kako iz dozvoljenih, tako i iz zabranjenih prelaza (kao što su [O III] i [S II]). Treba napomenuti da su čak i uske linije široke u poređenju sa spektralnim linijama normalnih galaksi-





Slika 1.2: Optički spektri različitih vrsta AGJ. U levom donjem uglu je spektar i jedne normalne galaksije. (preuzeto sa: <https://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/spectra.html>)

ja. Širina linija pripisuje se Doplerovom širenju, što ukazuje da dozvoljene linije potiču iz oblasti sa brzinama gasa između 1000 i 5000 km/s, dok zabranjene linije odgovaraju brzinama od oko 500 km/s. Sejfert 2 galaksije u svojim spektrima sadrže samo uske linije, i dozvoljene i zabranjene, sa karakterističnim brzinama kretanja gasa od oko 500 km/s. Uglavnom su slabijeg sjaja i kontinuuma u odnosu na Sejfert 1 galaksije. Primer spektara ova dva podtipa Sejfertovih galaksija vidimo na slici 1.2 u gornjem desnom kvadrantu. Pored ova dva tipa postoje i podklase kao što su npr. Sejfert tipa 1.9 i 1.5, koje se razlikuju prema udelu uske i široke komponente u vodonikovim linijama.

Podtipovi Sejfert galaksija koji emituju najviše X-zračenja su tip 1 i tip 1.5, dok se kod tipa 2 ono teže uočava. Pretpostavlja se da kod njih postoji materijal ogromne linijske gustine, koji zaklanja i apsorbuje ovu vrstu zračenja.

## Kvazari

Kvazari su pronađeni početkom 60-tih godina. U početku se mislilo da su u pitanju zvezde veoma čudnovatog spektra, sa intenzivnim radio-zračenjem, promenljivim sjajem i do tada nepoznatim linijama u vidljivoj oblasti. Misteriju iza ovih spektralnih linija uspeo je da odgonetne Martin Šmit (*Maarten Schmidt*), shvativši da su u pitanju klasične linije Balmerove serije vodonika, ali jako pome- rene ka crvenom delu spektra. Ovo otkriće značilo je da se objekat koji je proučavao (3C 273) nalazi na crvenom pomaku  $z = 0.16$ , što ga je činilo do tada najudaljeni- jim posmatranim objektom (na rastojanju od 680 Mpc). Ovako velike udaljenosti podrazumevale su da sjaj ovog vangalaktičkog objekta mora biti ogroman - 1000 puta veći od sjaja Mlečnog puta.

Usled njihovog zvezdolikog izgleda, ovakvi objekti nazvani su kvazi-stelarni radio izvori (*Quasi-Stellar Radio Sources*), ili skraćeno - kvazari. Ubrzo su otkriveni i mnogi drugi objekti ove vrste, međutim, ispostavilo se da samo oko 10% svih njih ispoljava jako radio-zračenje. Stoga je napravljena podela na radio-jake i radio- slabe kvazare, a uveden je i neutralniji naziv, kvazi-stelarni objekti (QSO), mada se u literaturi češće sreće kvazar kao sveopšti naziv.

Kvazari su najsjajnija vrsta aktivnih galaktičkih jezgara, sa apsolutnom bolo- metrijskom magnitudom koja doseže  $M_{bol} \leq -23$ . Nalaze se u eliptičnim galaksi- jama, a najudaljeniji kvazar pronađen je na crvenom pomaku  $z > 7.5$ . Po svojim osobinama su jako slični Sejfertovim galaksijama. Razlikuju se najviše po tome što kvazari imaju mnogo veće luminoznosti, i mnogo šire linije, koje trpe crveni pomak. Na slici 1.2 prikazan je kompozitni spektar dobijen na osnovu više pojedinačnih kvazara.

Poput Sejfertovih galaksija, kvazari se mogu na osnovu spektralnih osobina podeliti na tipove 1 i 2.

## Blazari

Termin blazar skovao je 70-tih godina E. Spiegel, od naziva „BL Lac” i „kvazari”. On obuhvata vrlo sjajne, radio-glasne, kompaktne AGJ-ove, sa velikom varijabil- nošću i visokim stepenom polarizacije na radio i optičkim talasnim dužinama.

Prvi otkriveni objekat iz ove klase jeste BL Lacertae, pronađen u severnom sazvežđu Lacerta (Gušter). Isprva je bio klasifikovan kao promenljiva zvezda, zbog njegove nepravilne promene sjaja, pa mu je dat naziv koji koristi za promenljive

zvezde. Tek mnogo godina kasnije, utvrđeno je da je reč o novoj vrsti AGJ.

Blazari su jezgra uglavnom eliptičnih galaksija, sa spektrima koji sadrže ne-termalni optički kontinuum i jaku emisiju u  $\gamma$  i radio-oblasti. Spektri najčešće ne poseduju emisione linije, te je određivanje crvenog pomaka veliki problem. Kod blazara se često sreću mlazevi relativističke materije koji zrače u X,  $\gamma$  i radio-domeni, i u kojima može biti detektovano superluminalno<sup>1</sup> kretanje plazme.

Postoji nekoliko podtipova blazara. Oni koji su lišeni, ili imaju slabe spektralne linije, nazvani su BL Lac objektima. Njih karakteriše i brza vremenska promenljivost, takva da im se luminoznost može promeniti do 30% za samo 24 sata. Primer spektra BL Lac objekta nalazi se na slici 1.2. Osim njih, u blazare spadaju i optički intenzivno promenljivi kvazari (*Optically Violently Variables* – OVV), koji se takođe nazivaju i radio-kvazari sa ravnim spektrom (*Flat Spectrum Radio Quasars* – FSRQ). Iako su slični BL Lac objektima obično poseduju mnogo veće luminoznosti, i za razliku od BL Lac objekata u spektrima im se mogu se primetiti široke optičke emisione linije kakve poseduju kvazari.

## Radio-galaksije

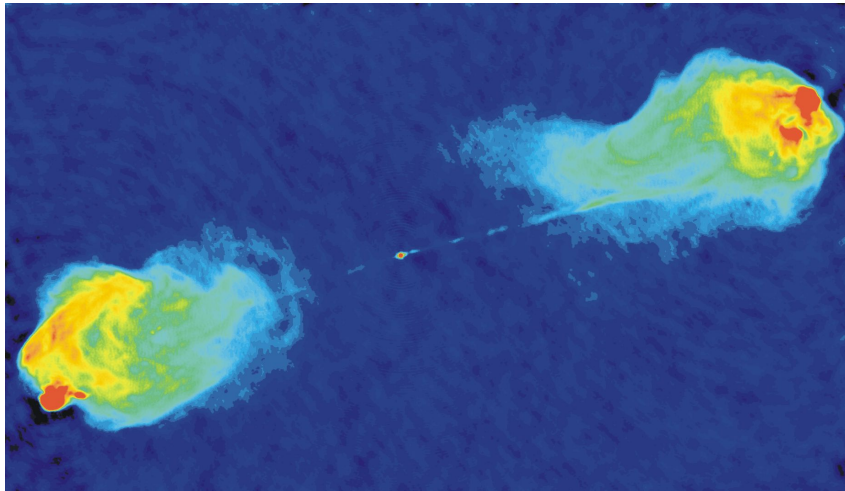
Naziv radio-galaksija je još jedan način da se imenuju sva radio-glasna AGJ. Osim iz jezgra, radio zračenje ovakvih galaksija dolazi nam i iz ovalnih struktura, koje nazivamo radio-ovalima (*radio lobes*). One su postavljene simetrično u odnosu na AGJ, na ogromnim međusobnim rastojanjima (od stotinu do par miliona parseka), a na nekim snimcima se mogu uočiti i tanke, pravolinijske strukture, koje ih povezuju sa jezgrom, i koje zovemo radio-mlazevima (*radio-jets*). Obe ove pojave mogu se videti na slici 1.3.

Prema širini spektralnih linija, radio-galaksije možemo razvrstati u 2 podtipa: radio galaksije sa širokim linijama (*Broad Line Radio Galaxies* – BLRG) i radio galaksije sa uskim linijama (*Narrow Line Radio Galaxies* – NLRG). Primeri spektara se mogu videti na slici 1.2 u donjem desnom kvadrantu.

Postoje velike sličnosti između Sejfertovih i radio-galaksija, međutim, Sejfertove galaksije su uglavnom radio-tihi izvori, i nalaze se u spiralnim, dok su u slučaju radio-galaksija to uvek džinovske eliptične galaksije. Prema još jednoj podeli, radio-glasna AGJ dele se na radio-glasne izvore sa radio zračenjem iz kompaktne oblasti

---

<sup>1</sup>Superluminalno kretanje – ono koje je prividno veće od brzine svetlosti.



Slika 1.3: VLA slika lažnih boja (*false color image*) radio-galaksije Cignus A, koja prikazuje dva radio-ovala i radio-mlaz koji se proteže od galaksije do desnog ovala. Crvenom bojom prikazane su oblasti najsjajnijeg radio-zračenja, dok plava predstavlja regione slabije emisije. Cyg A je radio galaksija uskih linija (NLRG). Centralna cD galaksija se ne pojavljuje na ovoj radio slici. (izvor: NRAO/AUI)

koja se poklapa sa jezgrom (*Core Dominant* – CD) i na izvore sa radio-zračenjem koje je najjače iz radio-ovala (*Lobe Dominant* – LD).

## AGJ slabog sjaja

Aktivna galaktička jezgra slabog sjaja ili LINER-i (*Low Ionization Nuclear Emission-line Regions*) su objekti niske luminoznosti, koja može biti i do 5 redova veličine slabija nego kod ostalih AGJ. Kod njih je karakteristično prisustvo veoma jakih emisionih linija niskog stepena jonizacije, kao što su zabranjene linije [O I] i [N II], dok su linije dva ili tri puta jonizovanih elemenata veoma slabe.

LINER-i se nalaze u spiralnim galaksijama, a spektri im podsećaju na klasu Sejfert 2, pa je moguće da oni predstavljaju istu vrstu objekata samo sa nižom stopom akrecije. Primer spektra prikazan je na slici 1.2.

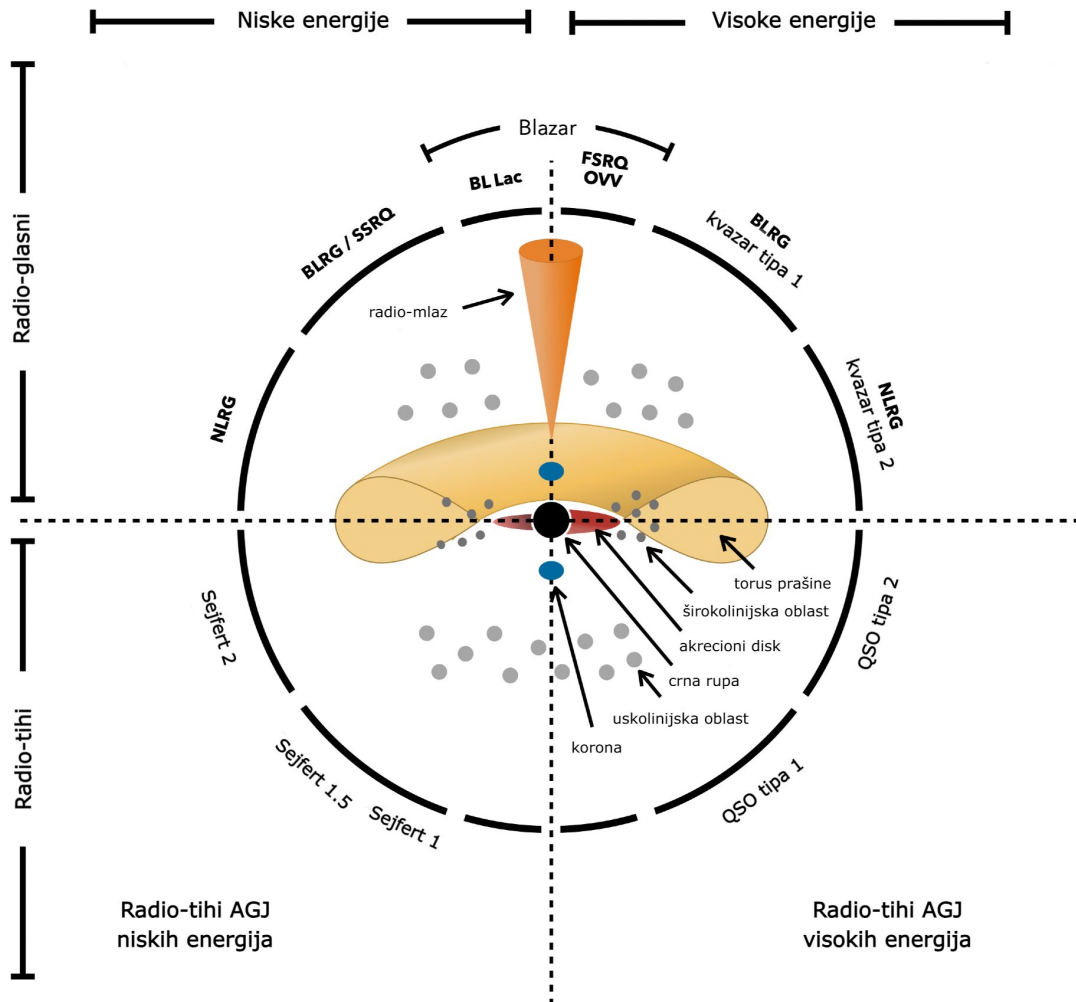
## 1.3 Unifikacioni model i struktura AGJ

U prethodnom poglavlju videli smo da među tipovima AGJ postoje brojne spektralne razlike, uključujući prisustvo ili odsustvo širokih emisionih linija, jačinu radio i X-zračenja, itd. S druge strane, postojalo je i mnogo sličnosti, kao što su

sjajno, kompaktno jezgro, kontinuum koji se proteže preko širokog opsega talasnih dužina, i promenljivost sjaja. Ovaj niz raznolikih zapažanja može se u velikoj meri objediniti i objasniti takozvanim unifikacionim modelom AGJ. Ideja za ovaj model nastala je zahvaljujući otkriću Roberta Antonučija (*Robert Antonucci*) i Džozefa Milera (*Joseph Miller*) iz 1985. Posmatrajući Sejfert 2 galaksiju NGC1068 u polarizovanoj svetlosti, njih dvojica su pronašli spektar karakterističan za galaksije tipa Sejfert 1, sa širokim emisionim linijama. Ovaj i slični slučajevi koji su od tada otkriveni impliciraju da se unutar Sejfert 2 nalaze jezgra Sejfert 1 galaksija. Ona su skrivena od direktnog pogleda posmatrača nekim optički debelim materijalom, kome je dat naziv „torus” prašine. Spektar Sejfert 1 galaksije vidi se zahvaljujući reflektovanom zračenju iz torusa, čije čestice su zaslužne i za polarizaciju svetlosti pri rasejanju.

Prema unifikacionom modelu, sva AGJ imaju isti centralni pogon - supermasivnu crnu rupu, koja oko sebe stvara akrecioni disk, koji je odgovoran za zračenje u kontinuumu i linijama. Crna rupa prosečne mase  $M_{BH} = 10^8 M_{\odot}$  ima Švarcšildov poluprečnik od  $10^{-5}$  pc, a akrecioni disk proteže se do  $10^{-3}$  pc. Njega okružuju oblaci gasa velike gustine, koji se kreću velikim brzinama ( $\sim 1000 - 10\,000$  km/s), posledično emitujući široke linije. Oni se nalaze na udaljenosti od  $10^{-3}$  pc do 0.1 pc od crne rupe, i čine širokolinijsku oblast (*Broad Line Region* - BLR). U nastavku se nalazi osnosimetrična prašnjava struktura, nazvana „torus”, koja obavlja širokolinijski region, i čiji se spoljašnji poluprečnik pruža do nekoliko desetina parseka. Jonizovani gas niže gustine i manjih brzina ( $\sim 100 - 900$  km/s), koji emituje uske linije, čini uskolinijsku oblast (*Narrow Line Region* - NLR), koja se proteže iznad torusa od 1 pc do nekoliko stotina, pa čak i hiljada parseka duž opšteg pravca otvora u torusu. Kod nekih AGJ, javljaju se i jonizacioni konusi, koji su detektovani pretežno kod radio-slabih Sejfert 2 galaksija. Ove strukture mogu imati dimenzije od  $\sim 20$  pc do  $\sim 60$  pc i nazivaju se još i proširenim uskolinijskim oblastima. U njima se nalazi gas male gustine, jonizovan od strane kontinuumu AGJ, a detektuju se pomoću [O III]  $\lambda 5007$  linije. S druge strane, AGJ koja su radio-glasni izvori mogu posedovati usmerene mlazeve relativističkih čestica, odnosno radio-mlazeve.

U unifikacionom modelu suštinsku ulogu igra „torus” prašine, koji vrši apsorpciju zračenja - prvenstveno onog iz širokolinijskih regiona i X-zračenja. Shodno tome, spektralne razlike koje opažamo posledica su različitih orijentacija akrecionog diska i torusa u odnosu na posmatrača, ali uticaj imaju i različite stope akrecije, i mase centralnih crnih rupa.



Slika 1.4: Šematski prikaz unifikacionog modela. Tip objekta koji vidimo zavisi od ugla gledanja, i od toga da li AGJ proizvodi radio-mlaz (da li je radio-glasan ili radio-tih) i od stope akrecije na supermasivne crne rupe. Na šemi su predstavljene i tipične komponente AGJ (radio-mlaz je predstavljen samo na radio-glasnoj strani šeme, ali smatra se da su mlazevi kod radio-glasnih objekata uvek dvostrani). (autor slike: J. E. Thorne; adaptirano i preuzeto sa: <https://zenodo.org/record/6381013>)

Na slici 1.4 predstavljen je model AGJ i naznačeno je koje vrste AGJ se ispoljavaju pod kojim uglovima posmatranja. Kada se prašnjavi torus posmatra sa strane, crna rupa, akrecioni disk i širokolinijska oblast su skriveni. Tada u spektru vidimo emisione linije samo iz uskolinijskog regiona, i infracrvenu emisiju iz samog torusa. U ovom slučaju detektujemo Sejfert 2, NLRG i kvazare tipa 2. Ukoliko nam pravac posmatranja omogućava da gledamo u centralni region – vidljive su i široke i uske linije. U ovom slučaju detektujemo Sejfert 1, BLRG i kvazare tipa 1. Ukoliko gledamo u pravcu radio-mlaza, direktno ka jezgru, emisija iz radio-mlaza dominiraće nad uskim ili širokim linijama i spektri će izgledati bezizražajno. U ovom slučaju se detektuju blazari, BL Lac objekti ili OVV.

(U poglavljima 1.1, 1.2 i 1.3 kao literatura su korišćene knjige: [10] i [44])

## 1.4 Torus prašine

Kao što je spomenuto u prethodnom poglavlju, torus je tvorevina predviđena unifikacionim modelom, koja je odgovorna za apsorpciju, rasejanje i polarizaciju zračenja. Prašina iz torusa apsorbuje većinu UV i optičkog zračenja, re-emitujući ga u infracrvenom području. Osim od prašine, torus se sastoji i od molekularnog i neutralnog gasa linijske gustine  $N_H \sim 10^{24} - 10^{25} \text{ cm}^{-2}$ . Pored ostalih uloga, torus je odgovoran i za kolimaciju zračenja iz AGJ, proizvodeći kod nekih AGJ dvostruki konusni oblik u uskolinijskoj oblasti, koji zovemo jonizacionim konusima. [40] Najveći deo svog zračenja torus emituje u srednjem infracrvenom (SIC) području.

Granica između širokolinijske oblasti i torusa određena je temperaturom sublimacije prašine. Oblast sublimacije je razlučena ([25], [63]) uz pomoć VLTI (*Very Large Telescope Interferometer*) i Keck interferometra, iz čijih posmatranja je ustanovljeno da je unutrašnji radijus torusa povezan sa luminoznošću AGJ kao  $r \propto L^{1/2}$  ([27]).

Važna odlika srednjeg IC područja u spektrima AGJ, koja je povezana sa torusom i njegovim zaklanjanjem centralnih oblasti, jeste silikatna linija na  $9.7 \mu\text{m}$ . Kod AGJ tipa 1, prema unifikacionom modelu, možemo videti prašinu iz vrelih, unutrašnjih delova torusa, te se silikatna linija pojavljuje u emisiji. U slučaju AGJ tipa 2, objekat gledamo sa strane, kroz hladnu prašinu, koja zaklanja unutrašnje regione i tada vidimo silikatnu apsorpciju. U praksi su, međutim, prisutna odstupanja od ovog pravila ([48], [32]), te se posmatranja ne mogu objasniti jednostavnim

modelima torusa.

### Modeli torusa

Kao posledica činjenice da je torus bilo nemoguće razlučiti teleskopima, tokom godina su se razvili različiti modeli torusa, koji su pokušavali da reprodukuju posmatrane spektralne energetske raspodele (SER; eng. *spectral energy distribution*), kao i fizička svojstva torusa. Prvobitni modeli u IC opsegu ([42], [43]) su, radi jednostavnosti, pretpostavljali uniformnu raspodelu gustine prašine, iako se još tada znalo da ona ne može u tom obliku opstati u ekstremnim uslovima koji vladaju u AGJ ([29]), i da bi ona trebalo da bude raspoređena u obliku grudvi.

Kasnije su nastali malo složeniji modeli, koji se grubo mogu podeliti u dve vrste - na fizičke i geometrijske/ad-hok modele. Fizički modeli uzimaju u obzir procese kao što su uticaj AGJ i supernovih na okolni međuzvezdani gas, zatim, priliv materijala i održanje diska ([49], [62], [61]).

Geometrijski modeli pokušavaju da reprodukuju IC spektralne energetske raspodela, pretpostavljajući određenu geometriju i sastav prašine ([37], [38], [18], [55], [51]). Korisni su za izvođenje statističke analize koristeći uzorke galaksija i, izvođenje trendova u parametrima torusa između AGJ tipa 1 i 2. Geometrijski modeli koji se sreću su „glatki”, „grudvasti” ili modeli dvo-faznog medijuma [15]. Grudvasti modeli su ostvarili značajan napredak u objašnjavanju IC zračenja različitih uzoraka AGJ ([18], [2], [36], [3], [30]). Oni, međutim, ne mogu objasniti, odnosno reprodukovati neke spektralne karakteristike, kao što je npr. „ispupčenje” na 3  $\mu\text{m}$  u bliskoj infracrvenoj (BIC) oblasti kod Sejfert 1 galaksija i Palomar-Grin kvazara. Ovo bi moglo da ukazuje na neku prašinu koja nije uračunata u okviru modela, ili na kontaminirajući fluks iz uskolinijskog regiona ([36], [3]). Ovaj višak zračenja u bliskoj IC oblasti može biti objašnjen malo sofisticiranijim dvo-faznim modelima [55], koji pretpostavljaju da je veliki broj grudvi velike gustine uronjen u glatku komponentu male gustine. Osim toga, „ispupčenje” u bliskoj IC oblasti se može reprodukovati i novijim modelima prenosa zračenja koji uključuju upliv gasa putem diska i vetar ([20]).

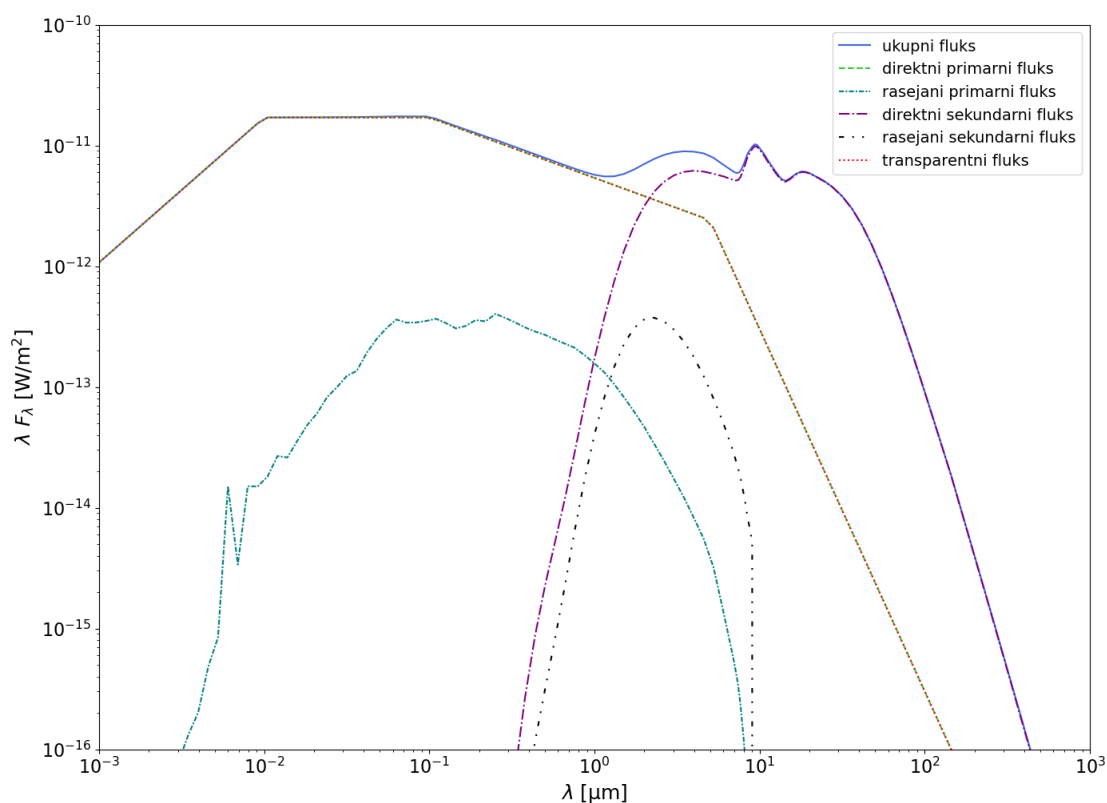
Međutim, skorašnja interferometrijska posmatranja (VLTI/MIDI), kojima je razlučena emisiju u srednjem IC opsegu obližnjih AGJ, pokazuju da zračenje prašine u velikoj meri potiče iz polarnih oblasti AGJ. Dakle, kod određenog broja galaksija, oblast između širokolinijskog i uskolinijskog regiona sastoji se iz dve strukture - polarne komponente i ekvatorijalnog diska/torusa. Polarna komponenta tuma-



či se postojanjem vetrova prašine, koji nastaju pod uticajem pritiska zračenja na čestice prašine [17]. Ove pojave detaljnije će biti objašnjene u narednom poglavlju.

### Biblioteka SKIRTOR

SKIRTOR<sup>2</sup> je primer biblioteke emisionih modela torusa prašine kod AGJ, koja koristi model dvo-faznog medijuma. Detalji o modeliranju mogu se naći u radovima [55] i [57]. Biblioteka spektralnih energetske raspodela napravljena je pomoću programskog koda SKIRT<sup>3</sup>, koji služi za simuliranje prenosa zračenja u astrofizičkim sistemima, i koji je zasnovan na Monte Karlo tehnici. Više reči o SKIRT-u biće u poglavlju 2.3.



Slika 1.5: Spektralna energetska raspodela tipičnog modela iz SKIRTOR biblioteke.

Na slici 1.5 predstavljen je primer spektralne energetske raspodele (SER) jednog tipičnog modela iz SKIRTOR biblioteke. Za svaki model biblioteke dostupni su

<sup>2</sup>sajt SKIRTOR biblioteke: <https://sites.google.com/site/skirtorus/sed-library>

<sup>3</sup>programski kod SKIRT: [https://skirt.ugent.be/root/\\_home.html](https://skirt.ugent.be/root/_home.html)

ukupni fluks i zasebne komponente koje ga čine: direktni primarni fluks, rasejani primarni fluks, direktni sekundarni fluks, rasejani sekundarni fluks i transparentni fluks. Primarni izvor fluksa zračenja je akrecioni disk, a ovde je aproksimiran tačkastim izvorom sa anizotropnom emisijom. Sekundarni izvor je zračenje prašine. Direktni fluks predstavlja ono zračenje koje je stiglo do instrumenta nakon što je apsorbovano ili rasejano od strane prašine. „Transparentni” fluks označava fluks primarnog izvora, bez uticaja prašine.

SKIRTOR biblioteka će u ovom radu biti korišćena za upoređivanje sa novom bibliotekom modela vetrova prašine.

## 1.5 Vetrovi prašine u AGJ

Skorašnjim napretkom IC interferometrije postalo je moguće razlučiti neke od obližnjih AGJ. Zahvaljujući tome je, kao što je pomenuto u prethodnom poglavlju, otkriveno da kod određenog broja ovih objekata u srednjem IC području postoji produžena emisija u polarnom pravcu, normalno na disk/torus prašine. Među ove objekte spadaju i dve najbliže Sejfert 2 galaksije - NGC1068 i galaksija Circinus ([24], [64], [46], [31]). Polarna komponenta predstavlja značajan deo ukupnog IC fluksa. Kod velikog broja objekata, pronađen je i polarni produžetak emisije na skalama reda veličine 10 do 100 parseka ([5]), koja se poklapa sa orijentacijom polarne komponente reda veličine parseka, koja je dobijena interferometrijom. To ukazuje na moguće zajedničko poreklo ovih pojava, što bi mogli biti vetrovi prašine, nastali pod uticajem pritiska zračenja na čestice prašine.

Aktivno jezgro galaksije Circinus je drugo po redu najsjanije AGJ u srednjoj IC oblasti i omogućava visoku prostornu rezoluciju (1 lučna sekunda = 20 pc), te je pogodna meta za razne studije u širokom opsegu talasnih dužina. Udaljeno je 4.2 Mpc, nagnuto pod uglom od  $65^\circ$  i zaklonjeno trakama prašine ([34], [45]). Ima sve osobine karakteristične za AGJ tipa 2: uske emisijske linije, komptonovski-neproizračno<sup>4</sup> (*Compton-thick*) jezgro [47], izražene jonizacione konuse, i emisijsku liniju Fe K $\alpha$  ([4].) Otkrivena je produžena emisija u obliku prečke koja se proteže do oko 2 lučne sekunde sa svake strane jezgra, u pravcu istok-zapad ([41]). Na osnovu podataka dobijenih pomoću Veoma velikog teleskopa interferometra

---

<sup>4</sup>Ukoliko u torusu/disku prašine ima dovoljno neutralnog vodonika on može apsorbovati većinu X-zračenja, koje nastaje inverznim Komptonovim rasejanjem UV-fotona na jako brzim elektronima u koroni oko akrecionog diska. Tada kažemo da je oblast komptonovski-neproizračna

(*Very Large Telescope Interferometer* - VLTI) otkrivene su dve komponente reda veličine parseka - ekvatorijalna komponenta u obliku diska i veća struktura u pravcu polarne ose ([59], [60]). Ekvatorijalna komponenta prati orijentaciju zakrivljenog maserskog diska. Slike dobijene pomoću instrumenta VISIR (*VLT Imager and Spectrometer for mid-InfraRed*) pokazuju prethodno detektovanu, istaknutu prečku, koja se prostire do 40 pc sa obe strane jezgra. Ona se ne može objasniti torusom - poravnata je sa polarnom komponentom i sa ivicom jonizacionog konusa, koja se vidi na optičkim talasnim dužinama.

Gore navedene čudnovate pojave u Circinusu inspirisale su seriju radova „Seciranje aktivnog galaktičkog jezgra u Circinusu” (*Dissecting the active galactic nucleus in Circinus*). U prvom od ovih radova [53] predložen je fenomenološki model emisije prašine ovog AGJ, koji uključuje kompaktni disk od prašine i prašjavu ljusku oblika konusa ili hiperboloida, koja se proteže na skalama reda veličine 10 parseka. Konusna ljuska je obasjana nagnutim akrecionim diskom sa anizotropnom emisijom. U radu su testirane različite geometrije koje bi mogle da objasne posmatranja. Na osnovu slika i spektralnih energetske raspodela, dobijenih pomoću simulacija prenosa zračenja, isključene su mogućnosti ljuske u obliku paraboloida, ili postojanje klasičnog torusa prašine, koji bi usmeravao zračenje iz akrecionog diska, obasjavajući prašinu iz galaksije.

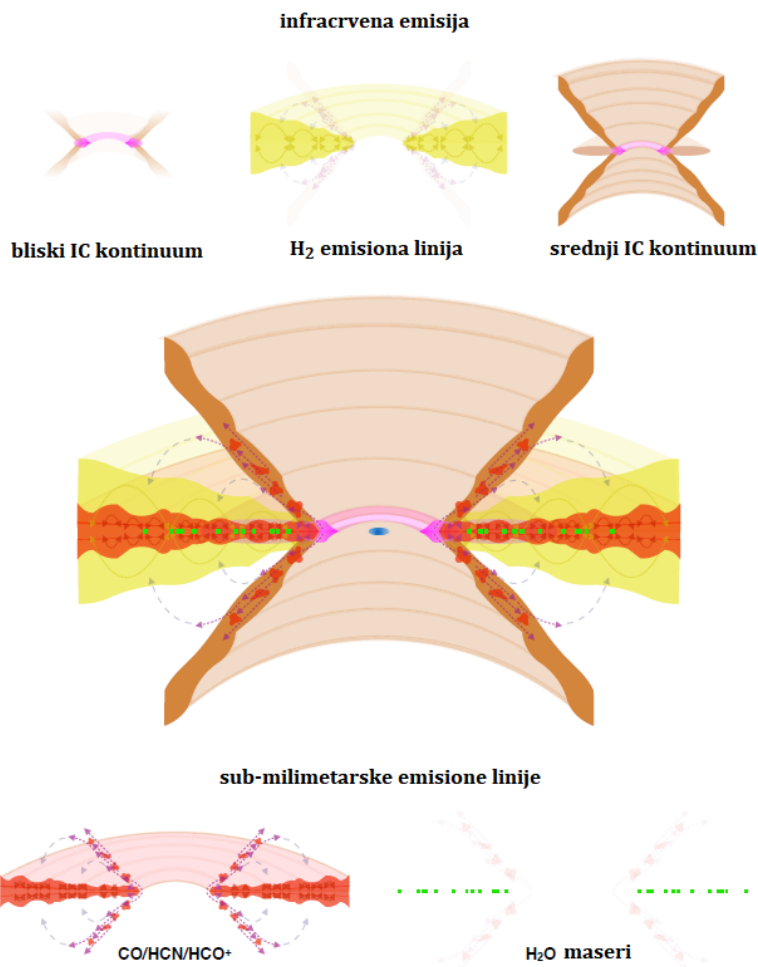
U sledećem radu [54] fokus je bio na usavršavanju ovog modela na manjim skalama, reda veličine parseka. Zaključeno je da su podaci dobijeni iz interferometrijskih posmatranja, za oblast ove veličine, na svim talasnim dužinama i bazama, u skladu sa modelom koji pretpostavlja postojanje strukture u obliku tankog diska i vetrova prašine u polarnom pravcu, u obliku šupljeg hiperboloida. Takođe je potvrđeno da model grudvastog torusa može reprodukovati integrisanu spektralnu energetske raspodelu u IC opsegu, ali ne i podatke iz interferometrijskih posmatranja.

U radu [22], koji nije deo ovog serijala, ali se takođe bavi jezgrom galaksije Circinus, pomoću snimaka u N-filteru, predstavljene su prve slike cirkumnuklearne prašine ovog AGJ. Pronađena je struktura u cirkumnuklearnoj prašini, koja se može razdvojiti na nekoliko komponenti: centralni, nerazlučeni fluks, tanki disk prečnika 1.9 pc, polarna emisija ( $4 \times 1.5$  pc), koja se proteže normalno na disk). Zaključeno je da se ova morfologija na velikim skalama dobro uklapa u model diska prašine i hiperboloidne ljuske, koji je predstavljen u radu [54], ali i da postoje neke neusaglašenosti, te da su potrebne modifikacije kad je u pitanju disk.

U trećem radu iz serijala „Seciranje aktivnog galaktičkog jezgra u Circinusu” [56], za proučavanje Circinusa (jezgra i jonizacionih konusa) korišćena je polarimetrija. Pokazano je da mape stepena polarizacije otkrivaju bi-konusnu morfologiju. Takođe, zaključeno je da, za razliku od ostalih isprobavanih geometrija, jedino model diska sa hiperboloidnom ljuskom i nagnutim akrecionim diskom može proizvesti polarizacioni ugao (od  $30^\circ$ ) dobijen iz posmatranja. Na skalama većim od nekoliko parseka, hiperboloid izgleda kao šuplji konus, i ovde korišćena polariometrijska posmatranja ne mogu razlikovati ove dve geometrije. Primećeno je da posmatranja u širokom opsegu talasnih dužina i tehnika – od X zraka i optičkih, do bliske IC i maserske emisije – daju konzistentnu sliku AGJ u galaksiji Circinus, koja je sada potvrđena dokazima iz optičkog polarimetrijskog snimanja.

Uzorak od 149 Sejfertovih galaksija ispitivan je u radu [5]. Galaksije su odabrane iz atlasa lokalnih AGJ u srednjem IC opsegu (koji je predstavljen u radu [6]). Kod 18 od ovih objekata jasno je detektovana produžena nuklearna emisija u srednjem IC području, koja dolazi iz polarnog regiona AGJ na razmerama od desetine do stotine parseka, odnosno, na razmerama mnogo većim od očekivanih veličina torusa. Niska stopa detekcije polarne emisije u AGJ objašnjena je činjenicama da AGJ mora biti odgovarajuće nagnuto, tj. zaklonjeno i dovoljno blizu, i sa dovoljnom snagom, da bi ona bila jasno razlučena. Utvrđeno je da postoji jaka korelacija između produžene emisije u srednjem IC opsegu i fluksa emisione linije [O IV] na  $25.89 \mu\text{m}$ , odnosno da oni verovatno potiču iz iste oblasti, i da je emiter najverovatnije prašina iz jonizacionih konusa i/ili oblaka iz uskolinijske oblasti. U radu [7] ispitivan je novi uzorak preuzet iz NED baze podataka (*NASA/IPAC Extragalactic Database*). Linija [O IV] je korišćena kao indikator bolometrijske luminoznosti kod AGN, i na osnovu vrednosti fluksa u ovoj liniji i inklinacije objekta, iz NED baze je od 596 obližnjih galaksija odabrano 8, i jedna van ove baze, za koje prethodno nije potvrđena polarna emisija. Detektovano je da i ovih 9 AGJ pokazuju polarnu emisiju, koja je poravnata sa osom sistema. Autori zaključuju da ovaj rezultat sugeriše da bi polarna prašina mogla biti sveprisutna karakteristika strukture AGJ, ili barem za ovde ispitani režim luminoznosti i Edingtonovih odnosa ( $42 < \log L_{\text{bol}} < 45$  i  $-3 < \log \lambda_{\text{Edd}} < 0$ ).

Novi opšti model, koji objašnjava pojave koje se ne mogu objasniti klasičnim modelom torusa, predložen je u radu [19]. Fokus rada bio je na radio-tihim AGJ, u režimu luminoznosti Sejfertovih galaksija. Razmatrane su strukture, koje se mogu empirijski odrediti iz posmatranja u IC i sub-milimetarskom opsegu, na skalama



Slika 1.6: Šematski prikaz multi-faznog prašnjavog molekularnog okruženja AGJ. U sredini je slika koja sadrži sve empirijski identifikovane komponente. Gornji red prikazuje komponente koje se mogu detektovati posmatranjem bliskog (unutrašnji deo diska - roze boja) i srednjeg IC kontinuuma (konus - braonkasta boja) i  $H_2$  emisione linije (debeli disk - žuta) u srednjem IC opsegu. U donjem redu predstavljeno je ono što se vidi iz molekularnih linija (tanki disk - crvena) u sub-milimetarskom opsegu, kao i iz emisije  $H_2O$  masera (zelena). Strelice pokazuju kinematiku odgovarajućih emisioh linija. (slika adaptirana iz rada [19])

manjim od 100 pc, i primenjeni su neki fundamentalni fizički principi, kako bi se objedinila posmatranja u oba opsega talasnih dužina. Otkrivene su multi-fazne strukture za više različitih komponenti. Slika 1.6 šematski prikazuje sve posmatrane faze, nacrtane odvojeno i zajedno. U nastavku su izložena zapažanja i zaključci autora o posmatranim strukturama.

Na velikim skalama ( $\sim 100$  pc), kroz ekvatorijalnu diskoliku komponentu, prašnjavi molekularni gas iz matične galaksije teče ka oblastima koje su u bližem okruženju crne rupe (sa radijusom sublimacije prašine  $r_{sub}$  kao granicom), te se disk može smatrati rezervoarom materijala kojim se crna rupa hrani.

Na skalama od  $5 - 10$  pc prašnjava molekularna materija ima relativno niske temperature  $T \sim 10$  K i ustanovljeno je da postoji vertikalna stratifikacija gustine. Unutrašnji, „vrelí“ deo raspodele prašnjavog molekularnog gasa je definisan temperaturom sublimacije prašine  $T \sim 1500 - 2000$  K. Dinamika prašnjavog gasa u ovom regionu će biti pod snažnim uticajem pritiska zračenja kako iz AGJ, tako i infracrvenog zračenja, što dovodi do nadimanja unutrašnjeg dela diska ( $1 - 5 r_{sub}$ ) i stvaranja uslova za pokretanje vetrova prašine. Ovaj „naduvani“ region će dominirati bliskim infracrvenim zračenjem AGJ, stvarajući višak zračenja („ispupčenje“) na  $3 - 5 \mu\text{m}$ , koji se vidi kod AGJ tipa 1.

Dakle, pod uticajem IC zračenja, u oblasti „naduvavanja“ može doći do potpunog oslobođenja prašnjavog gasa (linijskih gustina  $N_H \lesssim 10^{22} - 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ) od dejstva gravitacionog potencijala supermasivne crne rupe. Osim toga, ovaj gas će biti izložen zračenju i iz AGJ, čiji je pritisak jači od pritiska IC zračenja. Gas će pod njegovim uticajem početi da se širi radijalno, dalje od AGJ, što će na kraju ovoj oblasti dati hiperbolični oblik.

Prašnjavi molekularni vetar pod pritiskom zračenja odnosi značajne količine mase. Npr. za tipičnu Sejfertovu galaksiju luminoznosti  $L \sim 2 \times 10^{43} \text{ erg/s}$  procenjene su vrednosti brzine odliva materijala  $\dot{M}_w \sim 0.7 M_{\odot}/\text{god}$ . Brzine odliva se povećavaju sa luminoznošću AGJ - što je AGJ sjajnije uklanjaće veće količine gasa, čime će supermasivnoj crnoj rupi ograničiti snabdevanje masom. Ovo bi značilo da su prašnjavi molekularni vetrovi, zapravo, mehanizam za samoregulaciju aktivnosti kod AGJ-a i obezbeđuju uticaj AGJ na matičnu galaksiju.

## 1.6 Cilj i struktura rada

Predmet ovog rada je proučavanje pojave vetrova prašine u AGJ, čije postojanje su nagovestila novija posmatranja uz pomoć najsavremenijih instrumenata u IC domenu. Naime, otkriveno je da kod određenog broja obližnjih AGJ u srednjem IC području postoji produžena emisija u polarnom pravcu, normalno na disk/torus prašine i neki autori ukazuju na to da se ova posmatranja mogu objasniti postojanjem vetrova prašine, koji nastaju pod uticajem pritiska zračenja i izbacuju ovaj

prašnjavi materijal. Poređenjem posmatranja bliske aktivne galaksije Circinus sa rezultatima numeričkih simulacija prenosa zračenja, uspostavljen je prototip modela vetrova prašine. On podrazumeva prašinu raspoređenu u obliku tankog diska i vetrove prašine koji uzimaju oblik šupljeg hiperboloida. Na skalama većim od nekoliko parseka, hiperboloid izgleda kao šuplji konus, te se ove dve geometrije ne mogu razlikovati. U narednoj fazi istraživanja, potrebno je da se model primeni na veći uzorak AGJ. U sklopu izrade ovog master rada, izračunali smo opsežnu biblioteku modela za različite vrednosti parametara koji opisuju vetrove prašine. U tu svrhu, korišćen je programski kod SKIRT, koji omogućava simuliranje prenosa zračenja kroz prašinu. Izabrana je geometrija koja podrazumeva tanki disk i vetrove prašine u obliku šupljeg konusa, te se model skraćeno naziva disk+konus. Izmerili smo različite parametre (npr. spektralni nagibi, jačina silikatne linije, širina spektralne energetske raspodele, itd.) koji opisuju osobine dobijenih spektralnih energetske raspodele.

Ove osobine smo uporedili sa osobinama modela torusa prašine iz SKIRTOR biblioteke, a neke i sa posmatranim vrednostima. Analizirali smo raspodelu vrednosti spektralnih nagiba u zavisnosti od nekih parametara modela.

U prvoj glavi ovog master rada predstavljene su osnovne osobine AGJ, i dat je pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti proučavanja vetrova prašine. U narednoj glavi opisan je metod prenosa zračenja kroz prašinu pomoću Monte Karlo metode, na kojoj je baziran programski kod SKIRT, koji je korišćen za izračunavanje biblioteke modela vetrova prašine. U trećoj glavi detaljno je objašnjen model vetrova prašine i predstavljena je biblioteka disk+konus modela. U glavi 4 prikazane su slike i spektralne energetske raspodele tipičnog modela biblioteke modela vetrova prašine i predstavljeni su i analizirani rezultati merenja različitih osobina. Na samom kraju u glavi 5, dat je zaključak.

# Glava 2

## Metod

### 2.1 Prenos zračenja kroz prašinu

Zračenje ima dominantu ulogu u astrofizici, te je njegov prenos kroz sredinu jedan od najfundamentalnijih procesa, koji treba pažljivo osmotriti. Analiziranje zračenja koje objekat emituje pruža nam informacije, ne samo o izvoru tog zračenja, već i o sredini koja se nalazi između i u okolini datog objekta i posmatrača.

Čestice prašine imaju važnu ulogu u stvaranju zračenja i njegovoj obradi. Ona veoma efikasno apsorbuju i rasejavaju svetlost u opsegu od UV do blisko-infracrvenih talasnih dužina, a potom ponovno emituju apsorbovanu energiju u obliku infracrvenog i sub-milimetarskog zračenja.

Stacionarno polje zračenja opisuje se specifičnim intenzitetom  $I(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda)$ , gde je  $\mathbf{x}$  položaj u prostoru,  $\mathbf{n}$  je jedinični vektor koji označava pravac prostiranja zračenja, a  $\lambda$  je njegova talasna dužina. Specifični intenzitet predstavlja količinu energije koja se prenosi zračenjem u jediničnom intervalu talasnih dužina, kroz jedinični prostorni ugao, u jedinici vremena, kroz element jedinične površine koji je normalan na pravac  $\mathbf{n}$ . Specifični intenzitet zračenja može se menjati usled interakcije sa sredinom kroz koju prolazi. Neki od osnovnih procesa koji utiču na njegovu promenu su primarna emisija, apsorpcija, rasejanje i termalna re-emisija.

Primarna emisija predstavlja energiju zračenja koja se dodaje polju zračenja. Ona može biti zvezdana, ili npr. emisija zračenja iz AGJ, ili iz emisije magline, ili Bremštrahlung, itd. Apsorpcija je proces u kojem zrnca prašine „upijaju” elektromagnetno zračenje pretvarajući ga u unutrašnju energiju. Ona je okarakterisana masenim koeficijentom apsorpcije  $\kappa_{\text{abs}}$ .

Rasejanje je procesu u kome se, umesto pretvaranja zračenja u energiju, is-



to zračenje emituje u drugom pravcu. Ono kao i apsorpcija uklanja zračenje iz primarnog snopa, ali predstavlja i novi izvor zračenja. Karakteriše ga koeficijent rasejanja  $\kappa_{\text{sca}}$ .

Još jedan proces koji se mora uzeti u obzir pri prenosu zračenja kroz prašinu jeste termalna emisija same prašine. Čestice apsorbuju zračenje i ponovno ga emituju na talasnim dužinama većim od  $\sim 1 \mu\text{m}$ .

Jednačina prenosa zračenja (JPZ) opisuje promenu specifičnog intenziteta zračenja  $\mathbf{I}$ , sa rastojanjem  $s$  duž puta definisanog vektorom položaja  $\mathbf{x}$ , i smerom propagacije  $\mathbf{n}$ . Svi gore pomenuti mehanizmi mogu se uključiti u JPZ i ona tada izgleda ovako:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{I}}{ds}(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda) = & -\kappa_{\text{ext}}(\mathbf{x}, \lambda) \rho(\mathbf{x}) \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda) + \mathbf{j}_*(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda) + \mathbf{j}_d(\mathbf{x}, \lambda) \\ & + \kappa_{\text{sca}}(\mathbf{x}, \lambda) \rho(\mathbf{x}) \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}', \mathbf{x}, \lambda) \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{n}', \lambda) d\Omega'. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Prvi član sa desne strane označava apsorpciju. Koeficijent apsorpcije krije se u izrazu  $\kappa_{\text{ext}} = \kappa_{\text{abs}} + \kappa_{\text{sca}}$ . Veličina  $\rho(\mathbf{x})$  je masena gustina. Drugi član,  $\mathbf{j}_*(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda)$ , opisuje primarnu emisiju; treći član,  $\mathbf{j}_d(\mathbf{x}, \lambda)$ , predstavlja termalnu re-emisiju prašine, a poslednji - proces rasejanja. Fazna funkcija rasejanja data je izrazom  $\Phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}', \mathbf{x}, \lambda)$  i predstavlja verovatnoću da će foton koji se prvobitno kretao u pravcu  $\mathbf{n}'$  i koji je rasejan na položaju  $\mathbf{x}$ , imati novi pravac kretanja  $\mathbf{n}$ . Ona je normalizovana uslovom:

$$\int_{4\pi} \Phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}', \mathbf{x}, \lambda) d\Omega' = \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{n}, \mathbf{n}', \mathbf{x}, \lambda) d\Omega = 1, \quad (2.2)$$

gde je  $d\Omega$  element prostornog ugla.

Član koji predstavlja emisivnost prašine često na komplikovan i nelinearan način, zavisi od intenziteta samog polja zračenja. Ukoliko su zrnca prašine u termalnoj ravnoteži sa lokalnim međuzvezdanim poljem zračenja, emisivnost populacije zrnaca tipa  $i$  može biti zapisana kao izmenjena emisija crnog tela na ravnotežnoj temperaturi  $\mathbf{T}_i(\mathbf{x})$ . Sabirajući preko svih populacija, dobija se:

$$\mathbf{j}_d(\mathbf{x}, \lambda) = \sum_i w_i(\mathbf{x}) \kappa_{\text{abs},i}(\lambda) \rho(\mathbf{x}) \mathbf{B}[\mathbf{T}_i(\mathbf{x}), \lambda], \quad (2.3)$$

gde je  $\mathbf{B}(\mathbf{T}, \lambda)$  Plankova funkcija. Ravnotežna temperatura svakog tipa zrnaca prašine određena je uslovom da je ukupna količina apsorbovane energije jednaka ukupnoj količini emitovane energije:

$$\int_0^\infty \kappa_{\text{abs},i}(\lambda) \mathbf{J}(\mathbf{x}, \lambda) d\lambda = \int_0^\infty \kappa_{\text{abs},i}(\lambda) \mathbf{B}[\mathbf{T}_i, \lambda] d\lambda, \quad (2.4)$$

gde  $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \lambda)$  predstavlja srednji intenzitet polja zračenja:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, \lambda) = \frac{1}{4\pi} \int_{4\pi} \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda) d\Omega. \quad (2.5)$$

Ravnotežna temperatura zrnaca prašine je jasno određena njihovom veličinom i hemijskim sastavom. Na istoj lokaciji, zrnca prašine koja su različite veličine i/ili imaju različit hemijski sastav imaju različite ravnotežne temperature. Pretpostavka termalne ravnoteže ne važi u svim slučajevima. Zrnca prašine koja su veoma mala (uključujući policiklične aromatične ugljovodonike (PAH)) imaju malu toplotnu kapacitivnost i apsorpcija čak jednog UV/optičkog fotona može značajno zagrejati zrno. Ona neće postići termalnu ravnotežu, već će emitovati zračenje na temperaturama mnogo većim od ravnotežne temperature. Zračenje ovakvih zrnaca važno je za opisivanje emisije u srednjem IC području mnogih objekata. Uključujući ih u jednačinu 2.3 ona dobija oblik:

$$j_d(\mathbf{x}, \lambda) = \sum_i w_i(\mathbf{x}) \kappa_{\text{abs},i}(\lambda) \rho(\mathbf{x}) \left[ \int_0^\infty \mathbf{P}_i(\mathbf{T}, \mathbf{x}) \mathbf{B}(\mathbf{T}, \lambda) d\mathbf{T} \right]. \quad (2.6)$$

gde je  $\mathbf{P}_i(\mathbf{T}, \mathbf{x})$  raspodela temperature za zrna tipa  $i$  na položaju  $\mathbf{x}$ , u okviru koje je uključena zavisnost od hemijskog sastava, veličine zrna, i intenziteta i polja zračenja.

(Poglavlje je bazirano na preglednom radu [58])

## 2.2 Prenos zračenja pomoću Monte Karlo metode

Za rešavanje problema prenosa zračenja mogu se koristiti različite tehnike, a za 3D prenos zračenja prašine obično se upotrebljava Monte Karlo metoda. Njeno ime odražava raznolike stohastičke ili probablističke tehnike, kojima je zajedničko rešavanje jednačina putem uzorkovanja slučajnih brojeva.

U osnovi Monte Karlo metode je da se polje zračenja tretira kao tok određenog broja fotona, pri čemu je taj broj konačan. Prati se svaki pojedinačni foton i svaki njegov korak na putovanju kroz prašnjavi medijum. Karakteristike koje određuju

put svakog fotona (npr. mesto nastanka, početni pravac propagacije ili rastojanje duž puta do sledeće interakcije sa česticom prašine) određuju se probabilistički, generisanjem slučajnih brojeva iz odgovarajućih funkcija gustine verovatnoće (*probability density functions* - PDF). Na kraju simulacije, polje zračenja se rekonstruiše putem statističke analize putanja fotona.

Primera radi razmatraćemo najjednostavniji slučaj rešavanja problema uz pomoć Monte Karlo Metode, a to je problem prenosa zračenja za jednu talasnu dužinu. Tokom računanja, stanje svakog fotona beleži se zapisivanjem njegove energije, pozicije, pravca kretanja i stanja polarizacije.

Ciklus počinje „rođenjem” fotona, koji se emituje iz primarnog izvora zračenja, što je obično zvezda, ali može biti i npr. akrecioni disk ili emisiona maglina. Početna pozicija  $\mathbf{x}$  i pravac kretanja  $\mathbf{n}$  biraju se nasumično prema funkciji izvora  $j_*(\mathbf{x}, \mathbf{n}, \lambda)$ , i moraju biti uzorkovani na osnovu PDF.

Luminoznost svakog fotona  $L = L_{tot}(\lambda)/N$ , gde je  $L_{tot}$  ukupna luminoznost izvora, a  $N$  broj fotona u modelu. Krećući se kroz prašnjavu sredinu i naišavši na česticu prašine, foton može biti apsorbovan, ili rasejan u nekom pravcu. Verovatnoća da je interakcija događaj rasejanja jednaka je albedu prašine,  $a = \kappa_{sca}/\kappa_{ext}$ . U slučaju događaja apsorpcije, to je kraj fotonskog životnog ciklusa. Apsorbovana luminoznost fotona se čuva u ćeliji interakcije, ukoliko se u simulaciji želi izračunati emisija prašine. Ukoliko je u pitanju događaj rasejanja, određuje se novi pravac kretanja. U slučaju izotropnog rasejanja, pravac se generiše nasumično, a u slučaju anizotropnog, bira se na osnovu funkcija gustine verovatnoće. Nakon određivanja novog pravca kretanja, foton može nastaviti svoje putovanje kroz prašnjavu sredinu, gde će ili ponovo interagovati sa česticama prašine, ili nesmetano napustiti sistem. Celi ovaj proces se ponavlja za sve fotone sve dok i poslednji ne napusti prašnjavi medijum.

(Poglavlje je bazirano na preglednom radu [58])

## 2.3 Programski kod SKIRT

SKIRT (*Stellar Kinematics Including Radiative Transfer*) je C++ kod koji koristi Monte Karlo tehniku, kako bi imitirao fizičke procese, kao što su emisija, apsorpcija i rasejanje od strane sredine kroz koju se vrši prenos zračenja. Ove sredine mogu biti složeni astrofizički sistemi kao što su galaksije, zvezdorodne

oblasti, cirkumnulearni diskovi, itd.

Konfiguracija za određenu simulaciju je definisana u parametarskoj datoteci baziranoj na XML kodu, koja se može konstruisati kroz sesiju pitanja i odgovora na komandnoj liniji, ili sa opcionim grafičkim interfejsom. Ulazne postavke su: geometrijska raspodela gustine prašine, njen hemijski sastav, raspodela veličina zrna, geometrija i SER primarnog izvora zračenja, a kao rezultat dobijaju se SER i slike modela u zadatom opsegu talasnih dužina. Dostupno je mnoštvo ugrađenih geometrija, izvora zračenja, karakterizacija sredine, prostornih mreža, detektora i drugih instrumenata, a postoji i mogućnost uvoza modela generisanih hidrodinamičkim simulacijama.

SKIRT je potpuno otvorenog koda, s dokumentacijom i podrškom za različite nivoe stručnosti. Za vizualizaciju i naknadnu obradu podataka, postoji opcionalna komponenta „Pajton komplet alata za SKIRT” (PTS - *Python Toolkit for SKIRT*).

Za više detalja o mogućnostima SKIRT koda, i pristup dokumentaciji posetiti sajt: [https://skirt.ugent.be/root/\\_home.html](https://skirt.ugent.be/root/_home.html)

# Glava 3

## Model

U ovoj glavi biće predstavljene sve važne karakteristike modela vetrova prašine (ili skraćeno disk+konus) i biće opisana biblioteka modela, koja je izračunata pomoću SKIRT programskog koda.

### 3.1 Primarni izvor zračenja

U okviru modela vetrova prašine (disk+konus), akrecioni disk je primarni izvor zračenja, i može se aproksimirati tačkastim izvorom sa anizotropnom raspodelom zračenja, koja je na osnovu [39] data formulom:

$$L(\theta) \propto \cos \theta (2 \cos \theta + 1),$$

gde je sa  $\theta$  označen polarni ugao koordinatnog sistema. Prvi množitelj na desnoj strani predstavlja promenu projektovane površine, a drugi efekat potamnjenja ka rubu. Spektralna energetska raspodela (SER) može se dobro aproksimirati kombinacijom stepenih zakona sa različitim spektralnim indeksima, za različite opsege talasnih dužina:

$$\lambda L_\lambda \propto \begin{cases} \lambda^{1.2}, & 0.001 \leq \lambda \leq 0.01 [\mu\text{m}] \\ \lambda^0, & 0.01 \leq \lambda \leq 0.1 [\mu\text{m}] \\ \lambda^{-0.5}, & 0.1 \leq \lambda \leq 5 [\mu\text{m}] \\ \lambda^{-3}, & 5 \leq \lambda \leq 50 [\mu\text{m}] \end{cases}$$

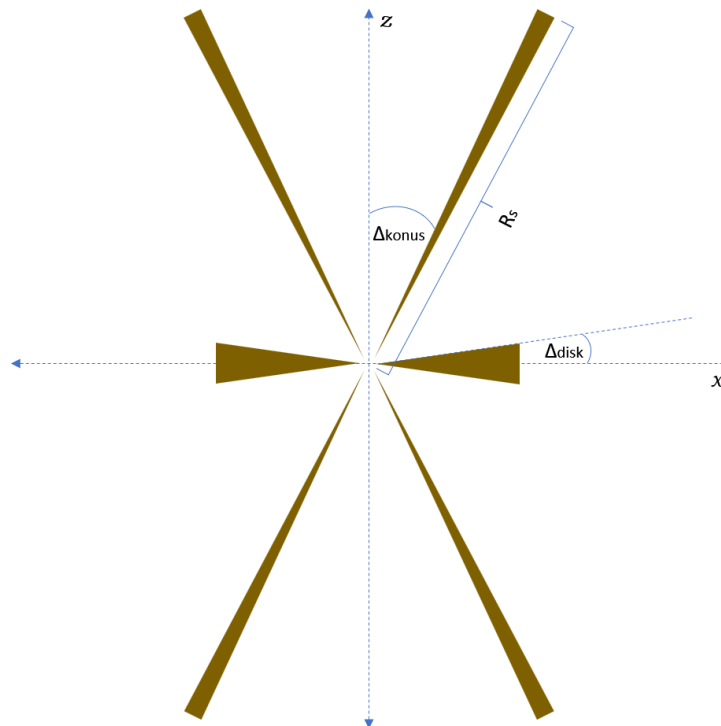
Ove vrednosti su u saglasnosti sa teorijskim i posmatračkim dokazima ([21, 11, 52, 9]). Bolometrijska luminoznost primarnog izvora koja je izabrana za model u ovom radu ima vrednost  $6 \times 10^{10} L_{\text{sun}}$ .

## 3.2 Geometrijska raspodela prašine

Prašina u modelu vetrova prašine (disk+konus) prostorno je raspoređena u dve komponente: (a) tanki „disk”, unutrašnjeg poluprečnika  $R_u^{\text{disk}} = 0.2$  pc i spoljašnjeg  $R_s^{\text{disk}} = 5$  pc, i (b) šuplji konus unutrašnjeg poluprečnika  $R_u^{\text{konus}} = 0.4$  pc. U obe komponente raspodela prašine opisana je sledećim zakonom gustine:

$$(r, \theta) \propto r^{-p} e^{-q|\cos \theta|},$$

gde su  $r$  i  $\theta$  koordinate u sfernom koordinatnom sistemu,  $p$  je eksponent, a  $q$  polarni indeks. Za konus je odabrano da vrednost parametra  $q$  bude 0. Ugao poluotvora diska  $\Delta_{\text{disk}}$  meri se od ekvatorijalne ravni do ivice diska, a ugao poluotvora konusa  $\Delta_{\text{konus}}$  - od polarne ose do unutrašnje ivice konusne ljuske, s tim da je ugao između spoljašnje i unutrašnje ivice konusa uvek  $10^\circ$ . Ukupna masa u disku i u konusnoj ljusci definisana je optičkim dubinama u srednjem IC opsegu na  $9.7 \mu\text{m}$  za disk  $\tau_{9.7}^{\text{disk}}$  i za konus  $\tau_{9.7}^{\text{konus}}$ . Na slici 3.1 prikazana je skica modela.



Slika 3.1: Skica modela

### 3.3 Osobine prašine

Sastav prašine i raspodela veličine zrna u okolini AGJ, trebalo bi da se razlikuju od onih u standardnoj međuzvezdanoj sredini, zbog izloženosti zrna prašine jakom zračenju. Naime, silikatna zrna mogu opstati samo na temperaturama do oko 1200 K, a grafitna se razaraju tek na oko 1900 K, a pored toga, manja zrna (obe vrste) razaraju na nižim temperaturama nego veća ([12, 13, 8]). Ove činjenice ukazuju na to da bi u uslovima koji vladaju u AGJ trebalo da dominiraju velike grafitne čestice. Za posmatračke dokaze koji favorizuju velika grafitna zrna pogledati radove [65] i [50].

Iz unutrašnjih oblasti, blizu radijusa sublimacije, pritisak zračenja pokreće vetrove prašine, pod čijim uticajem ona stiže u polarne regione. Stoga bi sastav prašine u ove dve oblasti trebalo da se podudara i da njime dominiraju velika grafitna zrna. Ovime, takođe, može biti objašnjeno zbog čega je silikatna emisija na 9.7  $\mu\text{m}$  kod AGJ tipa 1 često slabija nego što to predviđaju emisioni modeli. U slučaju AGJ tipa 2, kada sistem posmatramo sa strane, kroz prašnjavi disk, silikatna apsorpcija će i dalje biti ispoljena, jer će silikatna zrna biti prisutna u hladnijim oblastima diska.

Za model vetrova prašine (disk+konus) u ovom radu korišćena je mešavina silikatnih i grafitnih zrna prašine za disk, a u konusnoj ljusci prisutna su samo grafitna. Veličine zrna kreću se u rasponu  $a = 0.1 - 1 \mu\text{m}$ , a raspodela veličine prati MNR stepeni zakon  $\propto a^{-3.5}$  ([33]).

Sve navedene osobine prašine preuzete su iz rada [53].

### 3.4 Biblioteka modela vetrova prašine

Povodom izračunavanja biblioteke modela vetrova prašine, varirane su vrednosti raznih parametara sa ciljem proučavanja njihovih uticaja na SER modela. Parametri čije su vrednosti menjane su: inklinacija instrumenta  $i$ , nagib akrecionog diska  $AD_{nagib}$ , spoljašnji poluprečnik konusa  $R_s^{konus}$ , optička dobina diska  $\tau_{9.7}^{disk}$  i konusa  $\tau_{9.7}^{konus}$  u bliskom IC opsegu na 9.7  $\mu\text{m}$  (duž radijalnog pravca), zatim, eksponent  $p_{disk}$  i polarni indeks  $q_{disk}$  za disk, eksponent  $p_{konus}$  za konus, i ugao polutvora konusa  $\Delta_{konus}$  i diska  $\Delta_{disk}$ . Sve korišćene vrednosti navedene su u tabeli 3.1. Biblioteka modela sadrži ukupno 129 600 modela. Ograničili smo se, pre svega, na one vrednosti parametara za koje se očekuje da imaju najviše uticaja na SER,

zbog zahtevnosti simulacija po pitanju procesorskog vremena i potrebne memorije. Naime, prosečno vreme izvršavanja po simulaciji bilo je oko 1h 45min, a potrebna RAM memorija bila je oko 32GB.

Parametri	Vrednosti
$i$	$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$
$AD_{nagib}$	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$
<i>disk</i>	
$\tau_{9.7}^{disk}$	2, 4, 6, 8, 10
$p_{disk}$	0, 1
$q_{disk}$	0, 1
$\Delta_{disk}$	$10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$
<i>konus</i>	
$\tau_{9.7}^{konus}$	0.1, 1, 10
$p_{konus}$	0, 1
$R_s^{konus}$	50 pc, 100 pc, 200 pc
$\Delta_{konus}$	$20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$

Tabela 3.1: Vrednosti parametara biblioteke koji se menjaju

Broj fotona za svaku simulaciju bio je  $10^7$ , a za mrežu talasnih dužina izabrana je logaritamska raspodela u opsegu od 0.001 do 1000  $\mu\text{m}$ , sa finijom raspodelom od 2.7 do 25  $\mu\text{m}$ , radi bolje pokrivenosti ove oblasti. Za prostornu raspodelu prašine korišćena je trodimenzionalna prostorna mreža klase *Octtree*, sa kuboidnim ćelijama organizovanim u hijerarhijskom stablu. Octtree mreža rekurzivno deli kuboidni domen na 8 kockastih ćelija, sve dok svaka ćelija ne zadovolji određene kriterijume, ili dok se ne dostigne maksimalni nivo podele. Npr. prema najosnovnijem kriterijumu ćelija se deli sve dok masa prašine u svakoj ćeliji ne bude manja od zadatog udela ukupne mase prašine u mreži. Za tipični model vetrova prašine broj ćelija bio je oko 15 500 000.

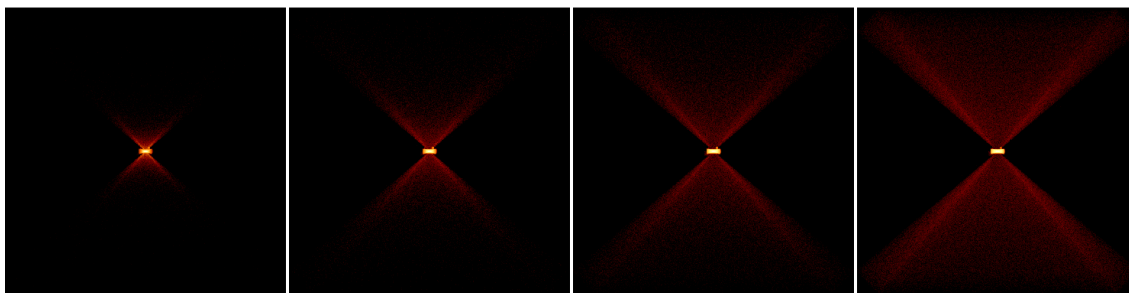


# Glava 4

## Rezultati i diskusija

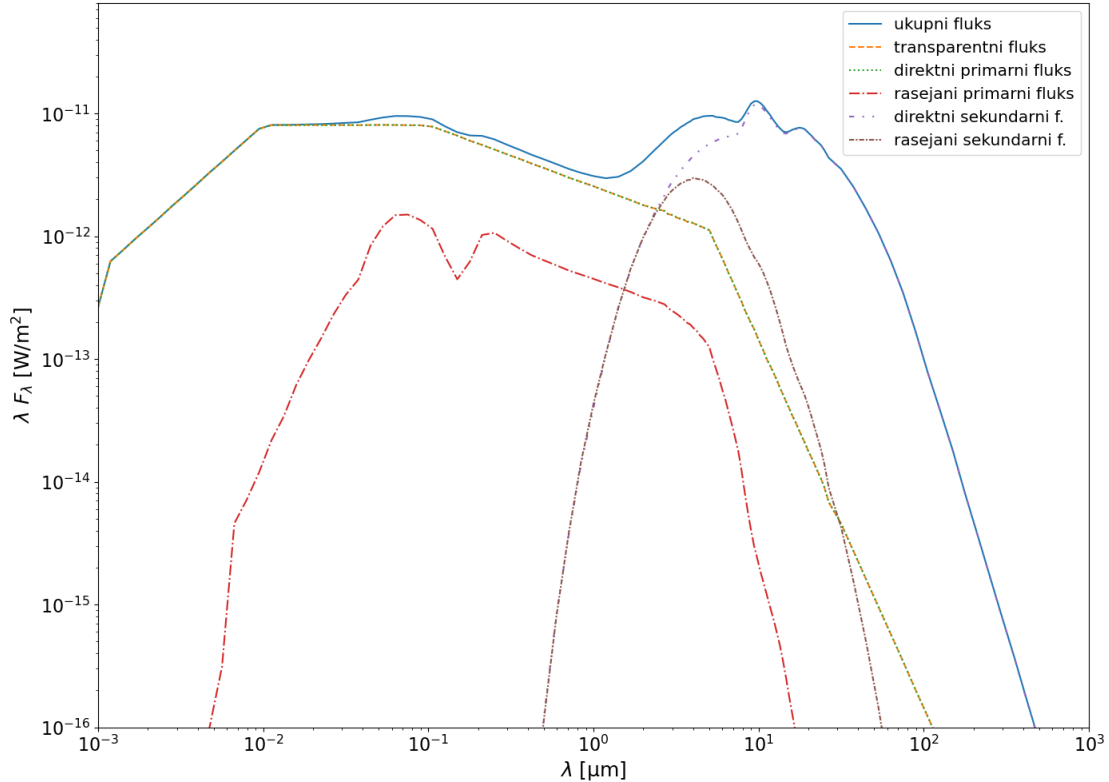
U prvom delu ove glave predstavljene su slike i spektralne energetske raspodele tipičnog modela biblioteke modela vetrova prašine (skraćeno disk+konus). Nakon toga, analizirane su odlike spektralnih energetske raspodele modela ove biblioteke tako što su upoređene sa osobinama spektralnih energetske raspodele modela torusa iz SKIRTOR biblioteke. Na kraju su karakteristike modela upoređene i sa jednom uzorkom posmatranjima.

Na slici 4.1 prikazan je tipični model vetrova prašine, gledan sa strane, pri inklinaciji instrumenta  $i = 90^\circ$ , za četiri različite talasne dužine: 7, 12, 18 i 25  $\mu\text{m}$ . Sa porastom talasnih dužina modeli izgledaju veće, jer se tada može videti zračenje hladnije prašine, koja se nalazi dalje od centralnog izvora.



Slika 4.1: Slike tipičnog modela disk+konus na nekoliko talasnih dužina (7, 12, 18 i 25  $\mu\text{m}$ ) pri inklinaciji  $i = 90^\circ$

Spektralne energetske raspodele (SER) za tipični model disk+konus, za dve različite inklinacije instrumenta, predstavljene su na slikama 4.2 i 4.3. Prva slika prikazuje slučaj kada je inklinacija  $i = 0^\circ$ , i AGJ posmatramo odozgo, kroz šuplji konus prašine, direktno ka akrecionom disku, koji možemo nesmetano da vidimo.

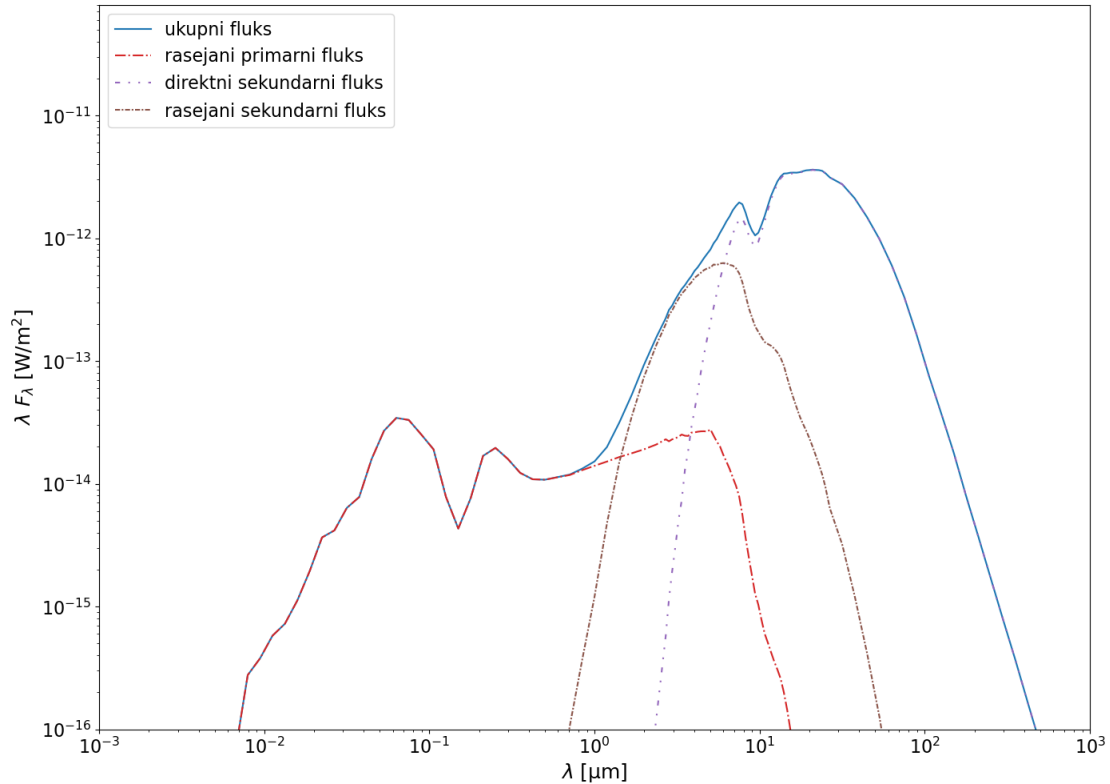


Slika 4.2: SER tipičnog modela disk+konus za inklinaciju  $i = 0^\circ$

Druga slika odnosi se na slučaj kada je  $i = 90^\circ$ , te AGJ posmatramo sa strane, kroz disk prašine, i akrecioni disk je zaklonjen.

Na graficima su prikazani ukupni fluks i njegove zasebne komponente:

- ukupni fluks: ukupni fluks koji je detektovao instrument, uključujući efekte ekstinkcije i emisije od strane medijuma.
- transparentni fluks: onaj fluks koji bi instrument detektovao kada ne bi bilo medijuma u modelu, odnosno, fluks primljen iz primarnog izvora, tj. iz akrecionog diska (koji je aproksimiran tačkastim izvorom sa anizotropnom raspodelom zračenja), kao da nije bilo ekstinkcije ili emisije iz medijuma.
- direktni primarni fluks: fluks koji potiče iz primarnog izvora, koji direktno stiže do instrumenta bez rasejanja (ali eventualno oslabljen apsorpcijom).
- rasejani primarni fluks: fluks koji potiče iz primarnog izvora, koji je bio rasejan u medijumu najmanje jednom pre nego što je stigao do instrumenta (i eventualno oslabljen apsorpcijom).



Slika 4.3: SER tipičnog modela disk+konus za inklinaciju  $i = 90^\circ$

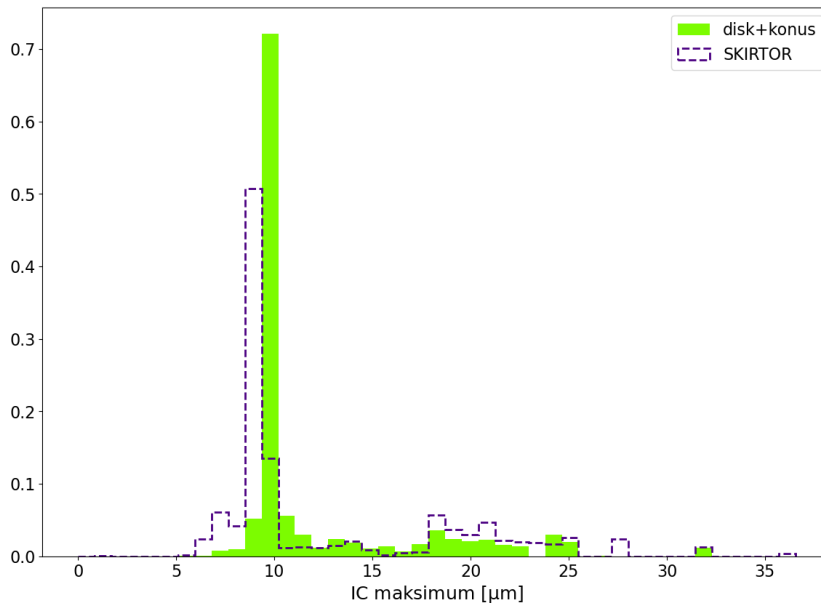
- direktni sekundarni fluks: fluks koji potiče iz sekundarnog izvora, tj. fluks zračenja prašine, koji direktno stiže do instrumenta bez rasejanja (ali eventualno oslabljen apsorpcijom).
- rasejani sekundarni fluks: fluks iz sekundarnog izvora koji je rasejan u medijumu najmanje jednom pre nego što je stigao do instrumenta (i eventualno oslabljen apsorpcijom).
- transparentni sekundarni fluks: fluks primljen iz sekundarnog izvora, kao da nije bilo ekstinkcije od strane medijuma nakon što je emitovao zračenje.

Na datim spektralnim energetske raspodelama, za ukupni fluks, uočava se razlika u pojavnom obliku silikatne linije na  $9.7 \mu\text{m}$ . Za slučaj kad  $i = 0^\circ$ , ona se vidi u emisiji, a za  $i = 90^\circ$  prisutna je u apsorpciji, usled optičke dubine prašine duž datih pravaca.

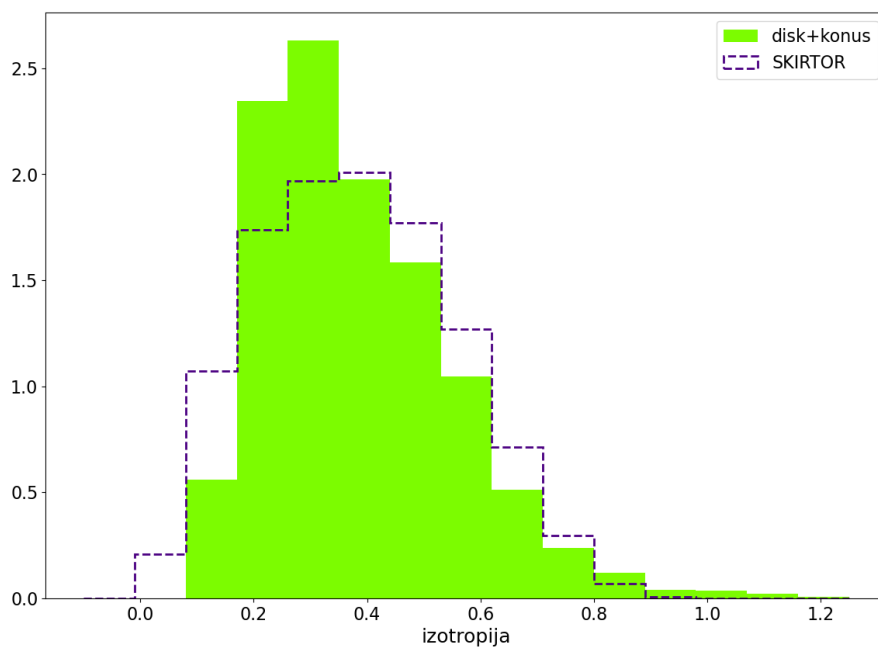
## 4.1 Odlike spektralnih energetske raspodela modela

Osobine spektralnih energetske raspodela modela disk+konus uporedili smo sa osobinama modela torusa prašine iz SKIRTOR biblioteke. Prve veličine koje smo merili su: maksimum emisije u IC opsegu (skraćeno IC maksimum), izotropija IC emisije i širina SER.

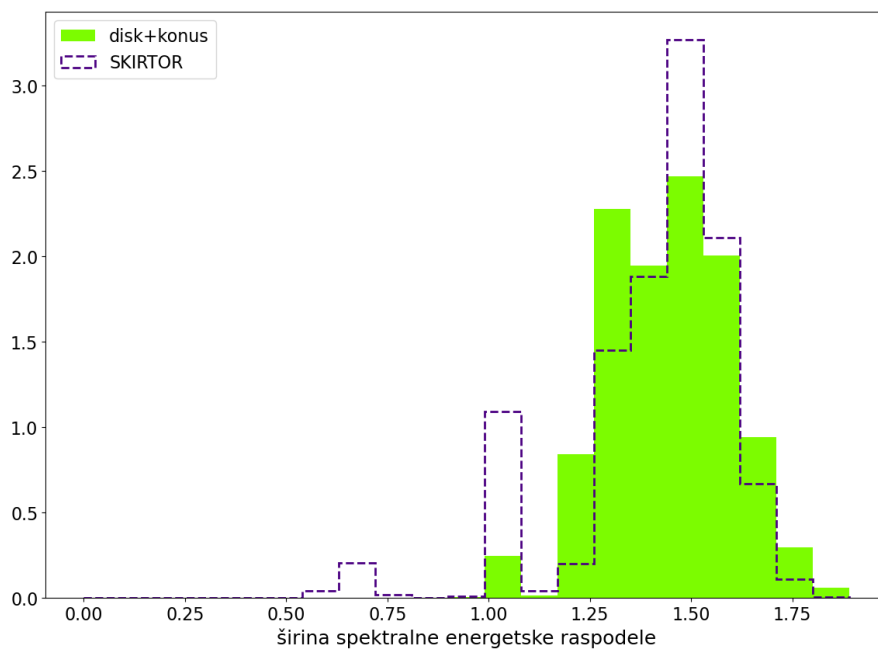
Maksimum emisije u IC opsegu definisan je kao talasna dužina na kojoj se u SER nalazi maksimum u IC području ([55]). Izotropija (anizotropija) IC emisije predstavljen je parametrom izotropije koji je definisan kao odnos ukupnog integrisanog IC fluksa gledano sa strane ( $i = 90^\circ$ ), i ukupnog integrisanog IC fluksa gledano odozgo ( $i = 0^\circ$ ) ([14]). Anizotropija u infracrvenoj emisiji se očekuje u svim sistemima sa geometrijom sličnom torusu, zbog toga što za  $i = 0^\circ$  imamo direktnu sliku primarnog izvora i unutrašnjeg, toplijeg regiona diska/torusa, dok su za  $i = 90^\circ$  oni zaklonjeni. Širina SER definisana je kao logaritamski interval talasnih dužina u kojem je snaga  $\lambda F_\lambda$  emitovana u IC području veća od jedne trećine svoje maksimalne vrednosti ([16]). Za apsolutno crno telo, ovaj parametar ima vrednost od oko 0.7, dok je u posmatranim spektrima njeno vrednost uvek veća od 1.3.



Slika 4.4: Maksimum IC emisije (za fluks zračenja prašine), normirana raspodela



Slika 4.5: Izotropija IC emisije (za fluks zračenja prašine), normirana raspodela



Slika 4.6: Širina SER (za fluks zračenja prašine), normirana raspodela

Na slikama 4.4, 4.5 i 4.6 prikazani su histogrami, redom, za svaku od ove tri veličine, za fluks zračenja prašine, za SKIRTOR i biblioteku modela disk+konus zajedno. Na histogramima se ne zapažaju značajne razlike između osobina ove dve biblioteke modela, iako su prisutna manja odstupanja. Napominjemo da zbog velike razlike u broju modela, koja iznosi ceo red veličine, ove dve biblioteke nisu direktno uporedive, pa su raspodele normirane. Za SKIRTOR biblioteku većina modela ima IC maksimum između 8.5 i 10  $\mu\text{m}$ , a za disk+wind vrednosti su između 9.5 i 10  $\mu\text{m}$ , što približno odgovara položaju silikatne linije na 9.7  $\mu\text{m}$ . Najveći broj modela obe biblioteke ima vrednosti izotropije u opsegu od  $\sim 0.2$  do  $\sim 0.5$ , odnosno, relativno veliku anizotropiju. Što se tiče širine SER, većina modela obe biblioteke ima vrednosti u opsegu od  $\sim 1.25$  do  $\sim 1.6$ .

Sledeće veličine koje smo merili za modele biblioteke SKIRTOR i biblioteke modela disk+konus i koje grubo opisuju SER modela su spektralni nagib  $\alpha$  i jačina silikatne linije  $Si_\lambda$  (na 9.7  $\mu\text{m}$ ). Njihove definicije preuzete su iz rada [15]. Spektralni nagib računa se kao:

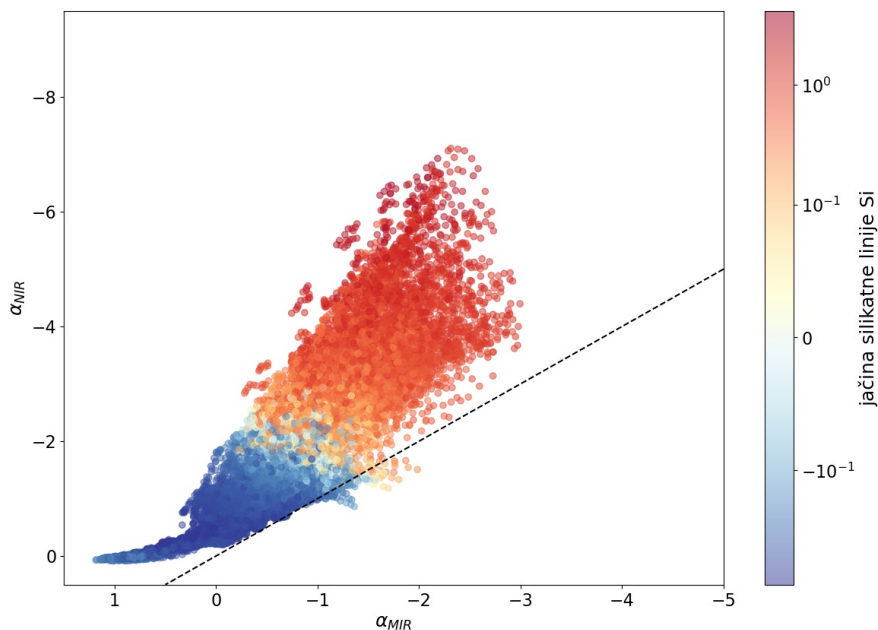
$$\alpha = -\frac{\log(F_\nu(\lambda_2)/F_\nu(\lambda_1))}{\log(\lambda_2/\lambda_1)},$$

gde  $\lambda_2 > \lambda_1$ . Negativne vrednosti  $\alpha$  znače da se fluks povećava, i obrnuto. Spektralni nagibi u bliskom, srednjem i dalekom IC opsegu označavaju se sa  $\alpha_{\text{NIR}}$  (*near-infrared* - NIR),  $\alpha_{\text{MIR}}$  (*mid-infrared* - MIR) i  $\alpha_{\text{FIR}}$  (*far-infrared* - FIR), respektivno. Vrednosti talasnih dužina  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  koje smo koristili za njihovo izračunavanje su: 3 i 6  $\mu\text{m}$  za  $\alpha_{\text{NIR}}$  i 8 i 14  $\mu\text{m}$  za  $\alpha_{\text{MIR}}$  prema radu [20], a 25 i 30  $\mu\text{m}$  za  $\alpha_{\text{FIR}}$  prema radu [15].

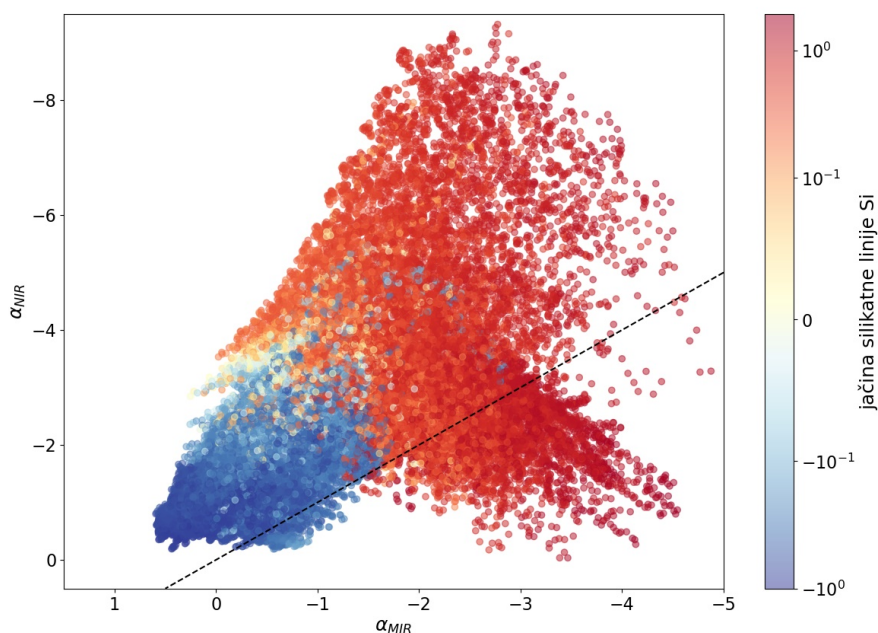
Jačina silikatne linije računa se prema formuli:  $Si_\lambda = -\ln(F_\nu(\lambda)/F_\nu(\text{kont.}))$ . Za potrebe računanja jačine silikatne linije na 9.7  $\mu\text{m}$ , kontinuum je usidren na rasponima talasnih dužina 7 – 7.5 i 14 – 15  $\mu\text{m}$  i aproksimiran linearnom interpolacijom.

Grafici odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{\text{MIR}}$  i  $\alpha_{\text{NIR}}$ , koji su obojeni prema jačini silikatne linije na 9.7  $\mu\text{m}$ , za modele biblioteke SKIRTOR i biblioteke modela disk+konus prikazani su na slikama 4.7 i 4.8, respektivno (sa istim opsezima na x i y-osama radi lakšeg poređenja). Na isti način, slike 4.9 i 4.10 prikazuju grafike odnosa  $\alpha_{\text{MIR}}$  i  $\alpha_{\text{FIR}}$ , obojenih prema jačini silikatne linije na 9.7  $\mu\text{m}$ , za SKIRTOR i disk+konus modele. Plava boja označava silikatnu emisiju, a crvena apsorpciju.

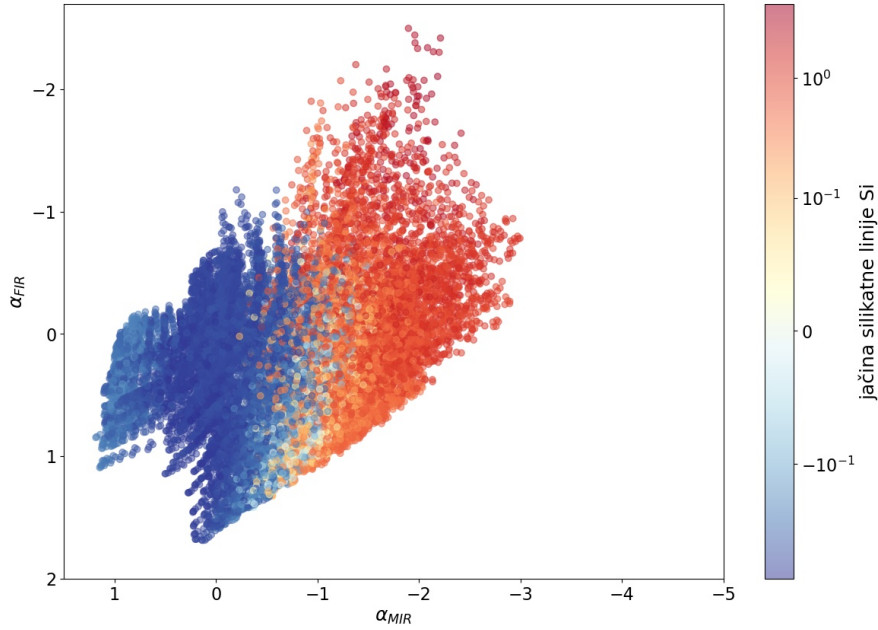
Na graficima  $\alpha_{\text{MIR}} - \alpha_{\text{NIR}}$  prikazana je isprekidana crna linija koja obeležava gde ova dva parametra imaju jednake vrednosti. Modeli klasičnog torusa general-



Slika 4.7: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{NIR}$ , obojen prema jačini silikatne linije na  $9.7 \mu m$ , za modele SKIRTOR biblioteke. Isprekidana crna linija obeležava gde ova dva spektralna nagiba imaju jednake vrednosti



Slika 4.8: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{NIR}$ , obojen prema jačini silikatne linije na  $9.7 \mu m$ , za biblioteku modela vetrova prašine. Isprekidana crna linija obeležava gde ova dva spektralna nagiba imaju jednake vrednosti

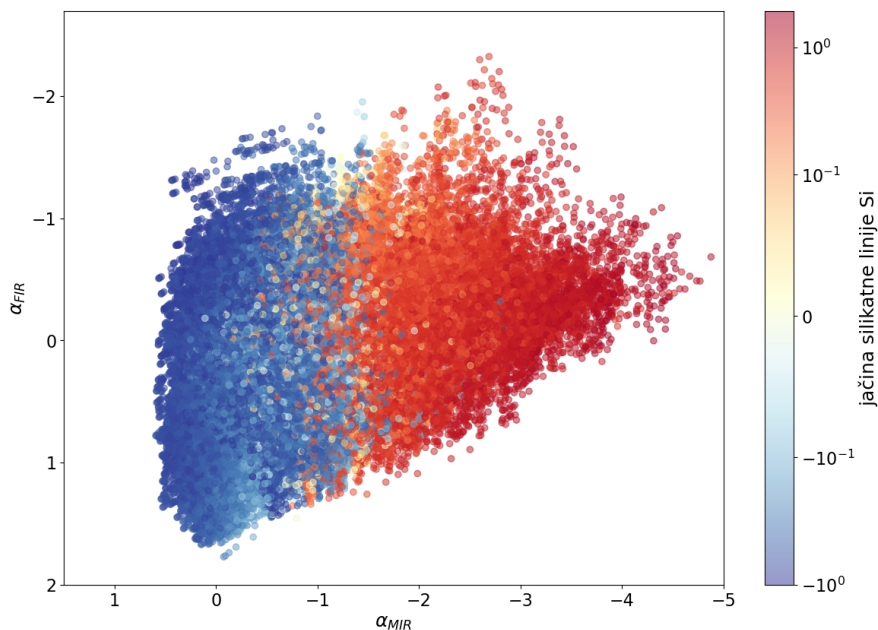


Slika 4.9: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{\text{MIR}}$  i  $\alpha_{\text{FIR}}$ , obojen prema jaćini sili-  
katne linije na  $9.7 \mu\text{m}$ , za modele SKIRTOR biblioteke

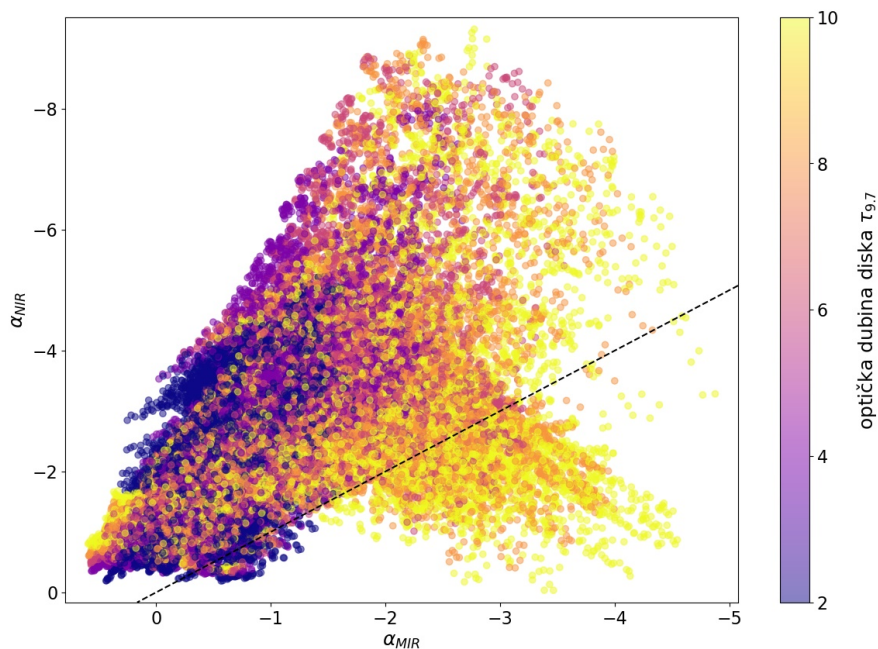
no pokrivaju parametarski prostor iznad ove linije, ali skoro da ih nema ispod nje [20]. Ovo je slućaj i kod SKIRTOR biblioteke, što se jasno moţe videti na slici 4.7. Ovi modeli ne mogu dobro reprodukovati IC ispućenje u opsegu  $3\text{--}5 \mu\text{m}$ , koje je viđeno kod mnogih AGJ tipa 1 ([26], [35]). Modeli sa spektralnim energetskim raspodelama koje sadrţe IC ispućenje trebalo bi da se nađu ispod ove isprekidane linije i predviđa se da oni mogu biti reprodukovani modelima koji ukljućuju disk i vetrove prašine [20]. Na slici 4.8 zaista se moţe videti da se veliki broj modela disk+konus nalazi ispod ove isprekidane linije, u skladu sa predviđanjima. Osim toga, modeli disk+konus generalno pokrivaju veći parametarski prostor nego modeli torusa, što se osim na graficima odnosa  $\alpha_{\text{MIR}}$  i  $\alpha_{\text{NIR}}$  moţe videti i na graficima odnosa  $\alpha_{\text{MIR}}$  i  $\alpha_{\text{FIR}}$  (slike 4.9 i 4.10).

Na ostalim slikama prikazani grafici  $\alpha_{\text{MIR}} - \alpha_{\text{NIR}}$  koji su obojeni na osnovu tri različita parametra. Na slici 4.11 taj parametar je optićka dubina diska  $\tau_{9.7}^{\text{disk}}$ , na slici 4.12, to je optićka dubina konusa  $\tau_{9.7}^{\text{konus}}$ , a na slici 4.13 ugao inklinacije instrumenta. Vidimo da se ispod isprekidane crne linije nalaze preteţno modeli sa većim vrednostima  $\tau_{9.7}^{\text{disk}}$ , malim vrednostima  $\tau_{9.7}^{\text{konus}}$  i većim inklinacijama.

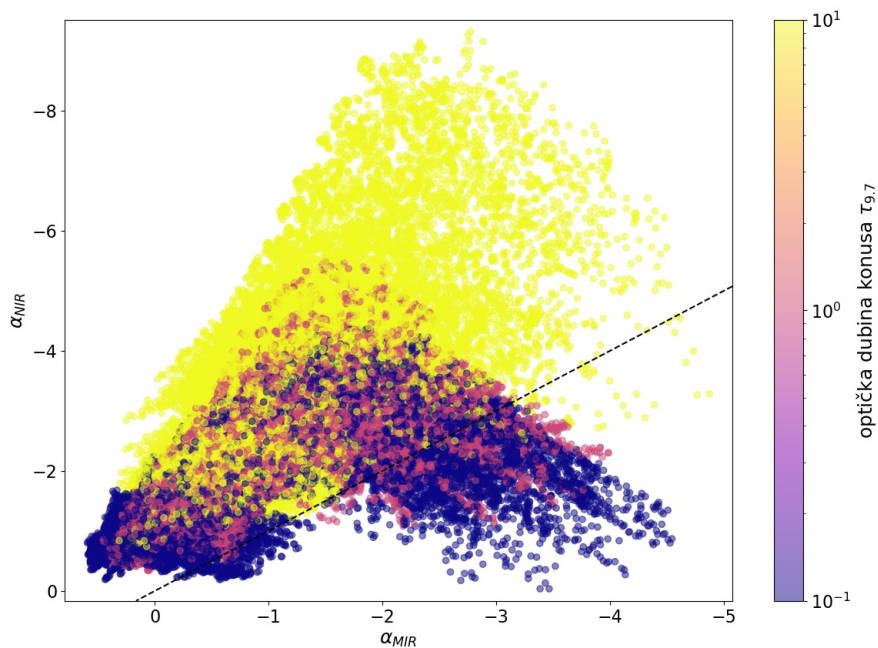




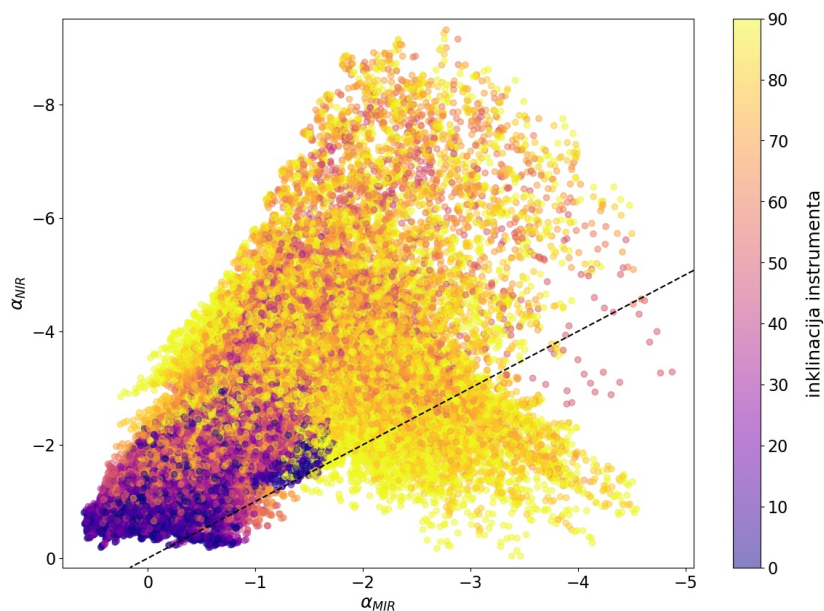
Slika 4.10: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{FIR}$ , obojen prema jačini silikatne linije na  $9.7 \mu m$ , za biblioteku modela vetrova prašine



Slika 4.11: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{NIR}$ , obojen prema optičkoj dubini diska  $\tau_{9.7}^{disk}$ , za biblioteku modela vetrova prašine. Isprekidana crna linija obeležava gde ova dva spektralna nagiba imaju jednake vrednosti



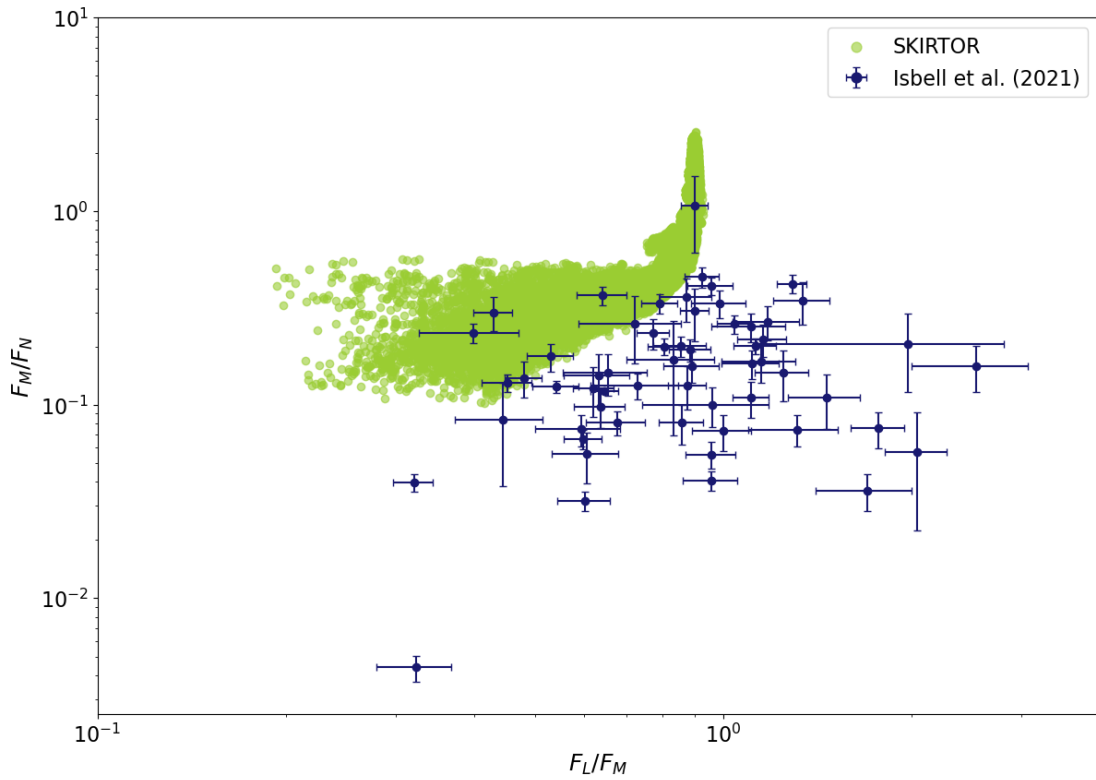
Slika 4.12: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{NIR}$ , obojen prema optičkoj dubini diska  $\tau_{9.7}^{konus}$ , za biblioteku modela vetrova prašine. Isprekidana crna linija obeležava gde ova dva spektralna nagiba imaju jednake vrednosti



Slika 4.13: Grafik odnosa spektralnih nagiba  $\alpha_{MIR}$  i  $\alpha_{NIR}$ , obojen prema inklinaciji instrumenta, za biblioteku modela vetrova prašine. Isprekidana crna linija obeležava gde ova dva spektralna nagiba imaju jednake vrednosti

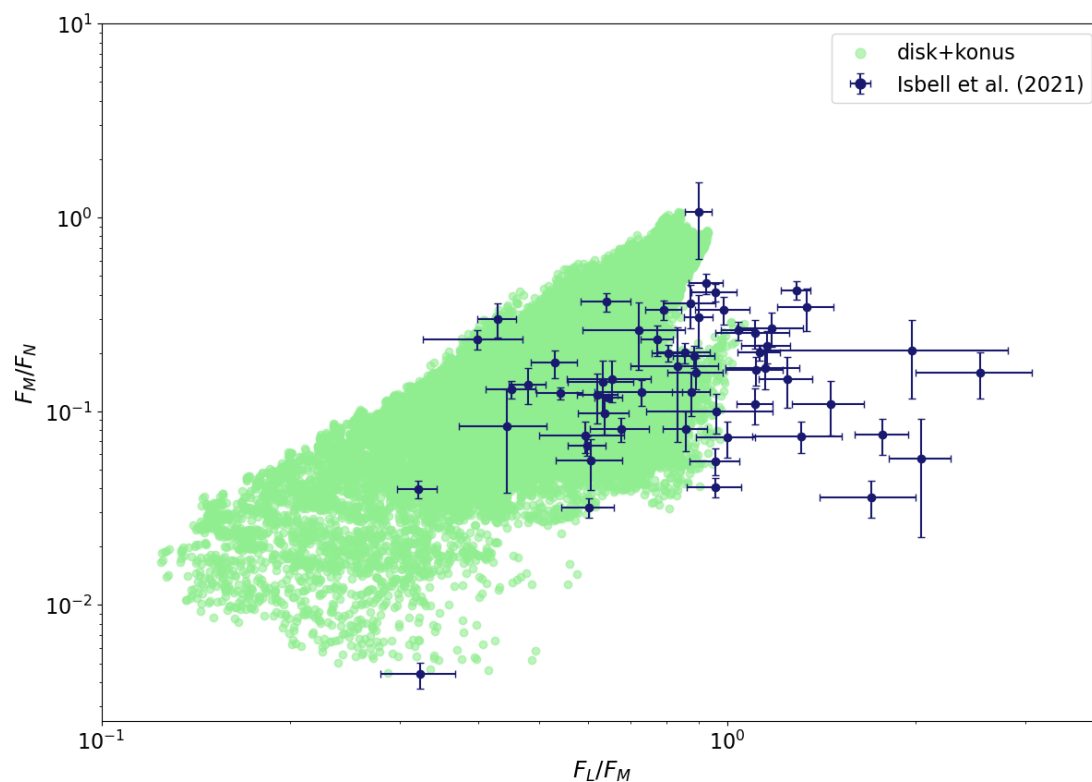
## 4.2 Poređenje sa posmatranjima

Modele iz SKIRTOR biblioteke i biblioteke modela disk+konus uporedili smo sa uzorkom posmatranja koji je predstavljen u radu [23], i koji će ovde ukratko biti opisan. Uzorak se sastoji od 119 lokalnih ( $z < 0.3$ ) AGJ, među kojima se nalaze Sejfert 1, Sejfert 2 i razni među-tipovi Sejfert galaksija, LINER-i, i zvezdorodne galaksije. AGJ su posmatrani pomoću ISAAC (*Infrared Spectrometer and Array Camera*) instrumenta na VLT i svaki je posmatran u L-filteru ( $\lambda_c = 3.78 \mu\text{m}$ ), ili M-filteru ( $\lambda_c = 4.66 \mu\text{m}$ ) ili u oba filtera. Posmatranja u oba filtera postoje za 87 AGJ. Uzorak je zamišljen tako da bude komplementaran uzorku iz atlasa lokalnih AGJ predstavljenog u radu [6], koji sadrži objekte posmatrane u N-filteru ( $12 \mu\text{m}$ ) i Q-filteru ( $18 \mu\text{m}$ ).



Slika 4.14: Odnosi flukseva  $F_L/F_M$  prema  $F_M/F_N$ . Poređenje modela iz SKIRTOR biblioteke (zelenja boja) sa posmatranjima iz rada [23] (teget)

Za potrebe upoređivanja ovog uzorka posmatranja sa modelima iz biblioteke SKIRTOR i biblioteke modela disk+konus, izračunati su odnosi flukseva u L, M i N-filterima, i to  $F_L/F_M$  i  $F_M/F_N$ , za obe biblioteke i posmatrani uzorak. Poređenje



Slika 4.15: Odnosi flukseva  $F_L/F_M$  prema  $F_M/F_N$ . Poređenje disk+konus modela (svetlozelena boja) sa posmatranjima iz rada [23] (teget)

uzorka sa modelima torusa predstavljeno je na slici 4.14, a poređenje sa modelima vetrova prašine može se videti na slici 4.15. Na osnovu ovih grafika zapaža se da modeli vetrova prašine mnogo bolje pokrivaju posmatrane odnose flukseva. Ovo je grub način poređenja pošto koristi samo tri talasne dužine, ali predstavlja dobar pokazatelj u korist modela vetrova prašine.

# Glava 5

## Zaključak

Predmet ovog rada bio je proučavanje vetrova prašine u AGJ. Njihovo postojanje nagovestila su novija posmatranja uz pomoć najsavremenijih instrumenata u IC domenu. Naime, smatra se da bi se produžena emisija koja je viđena u polarnom pravcu, normalno na disk/torus prašine mogla objasniti pojavom vetrova prašine, koji nastaju pod uticajem pritiska zračenja i izbacuju prašnjavi materijal u velikim količinama. Prototip modela vetrova prašine uspostavljen je na bliskoj aktivnoj galaksiji Circinus. U sklopu izrade ovog master rada, koristeći programski kod SKIRT, koji omogućava simuliranje prenosa zračenja kroz prašinu, izračunali smo opsežnu biblioteku modela vetrova prašine za različite vrednosti parametara koji ih opisuju. Vetrovi prašine su u obliku šupljeg konusa, pa se model skraćeno zove i disk+konus. Na osnovu dobijenih spektralnih energetske raspodele izmerili smo sledeće veličine: spektralne nagbe, jačinu silikatne linije, širinu spektralne energetske raspodele (SER), maksimum IC emisije, izotropiju IC emisije i flukseve u L, M i N-filteru. Analizirali smo raspodelu vrednosti spektralnih nagiba u zavisnosti od nekih parametara modela. Osobine naše biblioteke modela uporedili smo sa modelima torusa iz SKIRTOR biblioteke, a neke parametre uporedili smo i sa posmatranjima. Navodimo najvažnije rezultate i zaključke naše analize:

- Na histogramima koji predstavljaju maksimum emisije u IC opsegu, izotropiju IC emisije i širinu SER, ne zapažaju se značajne razlike između osobina modela SKIRTOR biblioteke i biblioteke modela vetrova prašine, iako su prisutna manja odstupanja.
- Grafici odnosa spektralnih nagiba u srednjem i bliskom IC području kao i u srednjem i dalekom IC području, pokazuju da modeli biblioteke modela

disk+konus pokrivaju veći parametarski prostor nego modeli torusa SKIR-TOR biblioteke. Za razliku od modela torusa, koji ne mogu dobro da reprodukuju IC ispućenje na 3-5  $\mu\text{m}$ , koje je viđeno kod mnogih AGJ tipa 1, modeli disk+konus nalaze se i u onom delu parametarskog prostora koji bi trebalo da zauzimaju modeli čije spektralne energetske raspodele sadrže ovo ispućenje. Za našu biblioteku ovo su pretežno modeli sa većim vrednostima  $\tau_{9.7}^{\text{disk}}$ , malim vrednostima  $\tau_{9.7}^{\text{konus}}$  i većim inklinacijama.

- Poređenja odnosa flukseva u L, M i N-filterima pokazuju da modeli vetrova prašine mnogo bolje pokrivaju posmatrane odnose flukseva, nego što to čine modeli torusa. Iako je ovo grub način poređenja, predstavlja dobar pokazatelj u korist modela vetrova prašine

U budućem radu, trebalo bi izvršiti poređenje sa posmatranjima u što širem IC opsegu, odnosno fitovanje fotometrijskih posmatranja na većem broju talasnih dužina, kao i spektara. Na taj način bi se mogli bliže odrediti i parametri modela kod pojedinačnih objekata. Nakon toga, trebalo bi da se za modele koji predstavljaju najbolje fitove, izračunaju i slike putem Monte Karlo simulacija prenosa zračenja i urade tzv. „sintetička posmatranja”, tj. da se simulira kako bi ti modeli izgledali posmatrani teleskopima kao što su VLT (*Very Large Telescope*) i JWST (*James Webb Space Telescope*), što bi nam omogućilo da poredimo i morfologiju i još bolje odredimo parametre. Na kraju bi moglo da se izvrši ponavljanje čitavog ovog rada na sličan način u domenu X-zračenja.

# Literatura

- [1] David M. Alexander i Ryan C. Hickox. „What drives the growth of black holes?” U: *New Astronomy Reviews* 56.4 (2012), str. 93–121.
- [2] C. Ramos Almeida i dr. „The infrared nuclear emission of Seyfert Galaxies on parsec scales: Testing the clumpy torus models”. U: *The Astrophysical Journal* 702.2 (2009), str. 1127.
- [3] Almudena Alonso-Herrero i dr. „Torus and active galactic nucleus properties of nearby seyfert galaxies: Results from fitting infrared spectral energy distributions and spectroscopy”. U: *The Astrophysical Journal* 736.2 (2011), str. 82.
- [4] Patricia Arévalo i dr. „The 2–79 keV X-ray spectrum of the Circinus galaxy with NuSTAR, XMM-Newton, and Chandra: a fully compton-thick active galactic nucleus”. U: *The Astrophysical Journal* 791.2 (2014), str. 81.
- [5] D. Asmus, Sebastian F. Hoenig i Poshak Gandhi. „The subarcsecond mid-infrared view of local active galactic nuclei. III. Polar dust emission”. U: *The Astrophysical Journal* 822.2 (2016), str. 109.
- [6] D. Asmus i dr. „The subarcsecond mid-infrared view of local active galactic nuclei–I. The N- and Q-band imaging atlas”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 439.2 (2014), str. 1648–1679.
- [7] Daniel Asmus. „New evidence for the ubiquity of prominent polar dust emission in AGN on tens of parsec scales”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 489.2 (2019), str. 2177–2188.
- [8] Richard Barvainis. „Hot dust and the near-infrared bump in the continuum spectra of quasars and active galactic nuclei”. U: *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 320, Sept. 15, 1987, p. 537–544. 320 (1987), str. 537–544.

- [9] Daniel M Capellupo i dr. „Active galactic nuclei at  $z \sim 1.5$ –I. Spectral energy distribution and accretion discs”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446.4 (2015), str. 3427–3446.
- [10] B. W. Carroll i D. A. Ostlie. *An Introduction to Modern Astrophysics*. Pearson custom library. Pearson, 2014.
- [11] Shane W. Davis i Ari Laor. „The radiative efficiency of accretion flows in individual active galactic nuclei”. U: *The Astrophysical Journal* 728.2 (2011), str. 98.
- [12] B. T. Draine. „The infrared signature of graphite grains”. U: *Astrophysical Journal, Part 2-Letters to the Editor (ISSN 0004-637X)*, vol. 277, Feb. 15, 1984, p. L71-L74. *Research supported by the Alfred P. Sloan Foundation*. 277 (1984), str. L71–L74.
- [13] B. T. Draine i Hyung Mok Lee. „Optical properties of interstellar graphite and silicate grains”. U: *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 285, Oct. 1, 1984, p. 89-108. *Research supported by the Alfred P. Sloan Foundation*. 285 (1984), str. 89–108.
- [14] C. P. Dullemond i I. M. Van Bemmelen. „Clumpy tori around active galactic nuclei”. U: *Astronomy & Astrophysics* 436.1 (2005), str. 47–56.
- [15] Omaira González-Martín i dr. „Exploring the Mid-infrared SEDs of Six AGN Dusty Torus Models. I. Synthetic Spectra”. U: *The Astrophysical Journal* 884.1 (2019), str. 10.
- [16] G. L. Granato i Luigi Danese. „Thick tori around active galactic nuclei: a comparison of model predictions with observations of the infrared continuum and silicate features”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 268.1 (1994), str. 235–252.
- [17] Sebastian F. Hoenig i dr. „Parsec-scale dust emission from the polar region in the type 2 nucleus of NGC 424”. U: *The Astrophysical Journal* 755.2 (2012), str. 149.
- [18] S. F. Hönig i dr. „The dusty heart of nearby active galaxies-I. High-spatial resolution mid-IR spectro-photometry of Seyfert galaxies”. U: *Astronomy & Astrophysics* 515 (2010), A23.
- [19] Sebastian F. Hönig. „Redefining the torus: A unifying view of AGN in the infrared and sub-mm”. U: *arXiv preprint arXiv:1909.08639* (2019).



- [20] Sebastian F. Hönig i Makoto Kishimoto. „Dusty winds in active galactic nuclei: reconciling observations with models”. U: *The Astrophysical Journal Letters* 838.2 (2017), str. L20.
- [21] Ivan Hubeny i dr. „Non-LTE models and theoretical spectra of accretion disks in active galactic nuclei. IV. Effects of Compton scattering and metal opacities”. U: *The Astrophysical Journal* 559.2 (2001), str. 680.
- [22] Jacob W Isbell i dr. „The dusty heart of Circinus-I. Imaging the circumnuclear dust in N-band”. U: *Astronomy & Astrophysics* 663 (2022), A35.
- [23] Jacob W. Isbell i dr. „Subarcsecond mid-infrared view of local active galactic nuclei. IV. The L-and M-band imaging atlas”. U: *The Astrophysical Journal* 910.2 (2021), str. 104.
- [24] W. Jaffe i dr. „The central dusty torus in the active nucleus of NGC 1068”. U: *Nature* 429.6987 (2004), str. 47–49.
- [25] Makoto Kishimoto i dr. „Exploring the inner region of type 1 AGNs with the Keck interferometer”. U: *Astronomy & Astrophysics* 507.3 (2009), str. L57–L60.
- [26] Makoto Kishimoto i dr. „Mapping the radial structure of AGN tori”. U: *Astronomy & Astrophysics* 536 (2011), A78.
- [27] Makoto Kishimoto i dr. „The innermost dusty structure in active galactic nuclei as probed by the Keck interferometer”. U: *Astronomy & Astrophysics* 527 (2011), A121.
- [28] John Kormendy i Luis C. Ho. „Coevolution (or not) of supermassive black holes and host galaxies”. U: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 51 (2013), str. 511–653.
- [29] Julian H. Krolik i Mitchell C. Begelman. „Molecular tori in Seyfert galaxies—Feeding the monster and hiding it”. U: *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 329, June 15, 1988, p. 702-711. Research supported by the Ball Corp., Rockwell International Corp., and Exxon Education Foundation. 329 (1988), str. 702–711.
- [30] Paulina Lira i dr. „Modeling the nuclear infrared spectral energy distribution of type II active galactic nuclei”. U: *The Astrophysical Journal* 764.2 (2013), str. 159.

- [31] N. López-Gonzaga i dr. „Revealing the large nuclear dust structures in NGC 1068 with MIDI/VLTI”. U: *Astronomy & Astrophysics* 565 (2014), A71.
- [32] R. E. Mason i dr. „The origin of the silicate emission features in the Seyfert 2 galaxy NGC 2110”. U: *The Astrophysical Journal* 693.2 (2009), str. L136.
- [33] John S. Mathis, William Rumpl i Kenneth H. Nordsieck. „The size distribution of interstellar grains”. U: *Astrophysical Journal, Part 1, vol. 217, Oct. 15, 1977, p. 425-433. NSF-supported research.* 217 (1977), str. 425–433.
- [34] M. Mezcua i dr. „The nuclear dust lane of Circinus: collimation without a torus”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters* 457.1 (2016), str. L94–L98.
- [35] Rivay Mor i Hagai Netzer. „Hot graphite dust and the infrared spectral energy distribution of active galactic nuclei”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 420.1 (2012), str. 526–541.
- [36] Rivay Mor, Hagai Netzer i Moshe Elitzur. „Dusty structure around type-I active galactic nuclei: clumpy torus narrow-line region and near-nucleus hot dust”. U: *The Astrophysical Journal* 705.1 (2009), str. 298.
- [37] Maia Nenkova i dr. „AGN dusty tori. I. Handling of clumpy media”. U: *The Astrophysical Journal* 685.1 (2008), str. 147.
- [38] Maia Nenkova i dr. „AGN dusty tori. II. Observational implications of clumpiness”. U: *The Astrophysical Journal* 685.1 (2008), str. 160.
- [39] Hagai Netzer. „Quasar discs–II. A composite model for the broad-line region”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 225.1 (1987), str. 55–72.
- [40] Hagai Netzer. „Revisiting the unified model of active galactic nuclei”. U: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 53 (2015), str. 365–408.
- [41] Christopher Packham i dr. „The extended mid-infrared structure of the circinus galaxy”. U: *The Astrophysical Journal* 618.1 (2004), str. L17.
- [42] Edward A. Pier i Julian H. Krolik. „Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. I-Calculational method and basic trends”. U: *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 401, no. 1, p. 99-109.* 401 (1992), str. 99–109.

- [43] Edward A. Pier i Julian H. Krolik. „Infrared spectra of obscuring dust tori around active galactic nuclei. II. Comparison with observations”. U: *The Astrophysical Journal* 418 (1993), str. 673.
- [44] Luka Č. Popović i Dragana Ilić. *Aktivna galaktička jezgra*. Matematički fakultet - Univerzitet u Beogradu, 2017.
- [45] M. Almudena Prieto i dr. „Unveiling the central parsec region of an active galactic nucleus: The circinus nucleus in the near-infrared with the very large telescope”. U: *The Astrophysical Journal* 614.1 (2004), str. 135.
- [46] David Raban i dr. „Resolving the obscuring torus in NGC 1068 with the power of infrared interferometry: revealing the inner funnel of dust”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 394.3 (2009), str. 1325–1337.
- [47] Claudio Ricci i dr. „Compton-thick accretion in the local universe”. U: *The Astrophysical Journal Letters* 815.1 (2015), str. L13.
- [48] Patrick F. Roche i dr. „An atlas of mid-infrared spectra of galaxy nuclei”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 248.4 (1991), str. 606–629.
- [49] M. Schartmann i dr. „Three-dimensional radiative transfer models of clumpy tori in Seyfert galaxies”. U: *Astronomy & Astrophysics* 482.1 (2008), str. 67–80.
- [50] Zhenzhen Shao, BW Jiang i Aigen Li. „On the optical-to-silicate extinction ratio as a probe of the dust size in active galactic nuclei”. U: *The Astrophysical Journal* 840.1 (2017), str. 27.
- [51] Ralf Siebenmorgen, Frank Heymann i Andreas Efstathiou. „Self-consistent two-phase AGN torus models-SED library for observers”. U: *Astronomy & Astrophysics* 583 (2015), A120.
- [52] Oren Slone i Hagai Netzer. „The effects of disc winds on the spectrum and black hole growth rate of active galactic nuclei”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 426.1 (2012), str. 656–664.
- [53] Marko Stalevski, Daniel Asmus i Konrad R. W. Tristram. „Dissecting the active galactic nucleus in Circinus–I. Peculiar mid-IR morphology explained by a dusty hollow cone”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 472.4 (2017), str. 3854–3870.

- [54] Marko Stalevski, Konrad RW Tristram i Daniel Asmus. „Dissecting the active galactic nucleus in Circinus–II. A thin dusty disc and a polar outflow on parsec scales”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 484.3 (2019), str. 3334–3355.
- [55] Marko Stalevski i dr. „3D radiative transfer modelling of the dusty tori around active galactic nuclei as a clumpy two-phase medium”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 420.4 (2012), str. 2756–2772.
- [56] Marko Stalevski i dr. „Dissecting the active galactic nucleus in Circinus–III. VLT/FORS2 polarimetry confirms dusty cone illuminated by a tilted accretion disc”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 519.3 (2023), str. 3237–3256.
- [57] Marko Stalevski i dr. „The dust covering factor in active galactic nuclei”. U: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458.3 (2016), str. 2288–2302.
- [58] Jürgen Steinacker, Maarten Baes i Karl D. Gordon. „Three-dimensional dust radiative transfer”. U: *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 51 (2013), str. 63–104.
- [59] Konrad R. W. Tristram i dr. „Resolving the complex structure of the dust torus in the active nucleus of the Circinus galaxy”. U: *Astronomy & Astrophysics* 474.3 (2007), str. 837–850.
- [60] Konrad R. W. Tristram i dr. „The dusty torus in the Circinus galaxy: a dense disk and the torus funnel”. U: *Astronomy & Astrophysics* 563 (2014), A82.
- [61] Keiichi Wada. „Radiation-driven fountain and origin of torus around active galactic nuclei”. U: *The Astrophysical Journal* 758.1 (2012), str. 66.
- [62] Keiichi Wada i Colin A. Norman. „Obscuring material around Seyfert nuclei with starbursts”. U: *The Astrophysical Journal* 566.1 (2002), str. L21.
- [63] Gerd Weigelt i dr. „VLTI/AMBER observations of the Seyfert nucleus of NGC 3783”. U: *Astronomy & Astrophysics* 541 (2012), str. L9.
- [64] Markus Wittkowski i dr. „VLTI/VINCI observations of the nucleus of NGC 1068 using the adaptive optics system MACAO”. U: *Astronomy & Astrophysics* 418.3 (2004), str. L39–L42.
- [65] Yanxia Xie, Aigen Li i Lei Hao. „Silicate dust in active galactic nuclei”. U: *The Astrophysical Journal Supplement Series* 228.1 (2017), str. 6.