

Наставно-научном већу
Математичког факултета
Универзитета у Београду

Одлуком Наставно-научног већа Математичког факултета Универзитета у Београду, донетој на седници одржаној 28.4.2025. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације **“Анализа променљивости активних галактичких језгара комбинованом применом самоорганизујућих мапа и неуронских процеса”**, кандидаткиње Иве Чворовић – Хајдињак. Након прегледа дисертације, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Основни подаци о кандидату и дисертацији

Биографија кандидаткиње: Ива Чворовић – Хајдињак, рођена 01.11.1983. године у Београду, где је завршила „Шесту београдску гимназију“. Завршила је основне студије на Математичком факултету Универзитета у Београду 2012. године, смер методика наставе (просечна оцена 7.27), затим мастер студије на Катедри за астрономију (2018–2019) са просечном оценом 10, а тренутно је на докторским студијама на истом факултету (од 2020), са просечном оценом 9.88. Поред научних истраживања, њено радно искуство обухвата позиције у ИТ сектору, укључујући *Qinshift*, где ради као оперативни инжењер, *AI* где је радила као стручњак за ИТ системе, *NCR* где је радила као консултант за софтвер, и *Euronet* где је била ангажована као технички аналитичар. Добитница је више признања, међу којима се издвајају стипендија *LSST Corporation Enabling Science Call* (2021), као и учешће у победничком тиму *LSST AGN Data Challenge* (2022). Чланица је више пројеката, међу којима је и UB-MATF SER-SAG-S1 тим, који доприноси развоју софтвера за потребе LSST мисије. Објавила је 7 научних радова из области истраживања презентоване у овој дисертацији у часописима из категорије M21-M23, од којих један као самостални рад у часопису категорије M23. Учествовала је у презентовању својих и тимских радова и активности на бројним локалним и међународним конференцијама.

Наслов дисертације: Анализа променљивости активних галактичких језгара комбинованом применом самоорганизујућих мапа и неуронских процеса

Обим дисертације и библиографија: Дисертација се састоји од 7 поглавља представљених на 98 страна, библиографије и прилога (укупно 166 стране). Главни део дисертације чине увод, теоријски увод, истраживачки део који описује коришћене податке и методе, резултате и дискусију, закључак, који су праћени литературом са исцрпним списком референци, прилозима и биографијом аутора.

2. Предмет и циљ дисертације

Предмет ове дисертације је истраживање временске променљивости оптичке емисије активних галактичких језгара (АГЈ). Опште је прихваћено да већина масивних галаксија садржи супермасивну црну рупу у језгру, док мањи број галаксија, познат као активне галаксије, садржи АГЈ које емитује јако електромагнетно зрачење у готово целом електромагнетном спектру. За разлику од звезда, њихово зрачење настаје конверзијом гравитационе потенцијалне енергије при акумулацији материјала у супермасивну црну рупу. АГЈ су кључна за истраживање и разумевање акреције материје под екстремним условима које описује општа теорија релативности. Међутим, механизми који доводе до променљивости емисије су још увек предмет расправе. Предложена објашњења укључују нестабилности акреционих дискова, нехомогености при акрецији, термалне флукутације, магнеторотирајуће нестабилности, експлозије супернових као и репроцесирање фотона између диска и короне. Иако је физичко порекло променљивости неизвесно, његово моделовање омогућава изучавање својстава АГЈ као што су геометрија емисионог региона, маса супермасивне црне рупе, али и класификацију АГЈ.

Важно је истаћи да стохастичка променљивости АГЈ има спектралну густину снаге (*Power Spectral Density, PSD*) која одговара црвеном шуму. Зато *PSD* има амплитуду која расте са временском скалом и достиже плато на одређеној фреквенцији. До сада је у оптичком домену било могуће изучавати променљивост на временским скалама реда величине десетине дана па навише, док је у другим доменима, као што је Х-зрачење, променљивост искључиво на кратким скалама (< дан). Са новим прегледима неба у оптичком домену, омогућена су испитивања и оптичког *PSD* на временским скалама мањим од неколико дана. Због турбулентне акреције са апериодичним и готово фракталним понашањем у непосредној околини црне рупе, предложени стохастички модели (нпр. континуирани временски ауторегресивни процес првог реда, Орнштајн-Уленбеков процес или пригушена случајна шетња - *damped random walk, DRW*) имају све више проблема са конвергенцијом, високом рачунском комплексношћу и слабо одређеним опсезима параметара како расте број посматраних АГЈ као и новодобијених података са свемирских опсерваторија. Зато се све више у литератури тврди да напредак у анализи променљивости АГЈ не може бити постигнут увођењем сложенијих стохастичких модела, јер би то отежало повезивање феноменолошких параметара са основним физичким процесима у околини супермасивних црних рупа.

Овај став, заједно са трећим таласом развоја алгоритама вештачких неуронских мрежа, који се могу применити у различитим пољима, укључујући и астрономију (тзв. Ера ненадгледаног и генеративног дубоког учења) довео је до великих помака вангалактичке заједнице у испитивању примене алата дубоког учења за анализу кривих сјаја АГЈ, као што су рекурентни и рекурентни варијациони аутоенкодери, стохастичко-рекурентне, конволуционе и мреже са механизмом пажње, као и неуронске имплементације Гаусових процеса. У светлу ових изазова, предмет предложене докторске дисертације је увођење новог алата за издвајање информација кодираних у стохастичкој оптичкој променљивости активних галактичких језгара, заснованог на условним неуронским процесима и ненадгледаном учењу. Иако условни неуронски

процеси припадају параметарским моделима јер у себи садрже енкодер и декодер неуронске мреже. они функционално имитирају понашање непараметарских метода као што су гаусови процеси, при чему нема унапред дефинисан кернел, што овом приступу даје могућност да моделује сложене варијације на широком распону временских скала и допринесе бољем разумевању физичких механизма унутар АГЈ.

У оквиру докторске дисертације спроведена је анализа на репрезентативном узорку оптичких кривих сјаја АГЈ, предложене су нове методе и приступи дизајнирани са циљем скалабилности ка великим скуповима података. Посебна пажња посвећена је избору алата машинског учења и ненадгледаног кластеровања који су применљиви у условима сличним онима очекиваним у Опсерваторије Вера Ц. Рубин и њеног декадног пројекта (*Legacy Survey in Space and Time, LSST*), односно, анализи милиона кривих сјаја, нерегуларно узоркованих, са различитим нивоима шума и непотпуности. Стога ова дисертација представља методолошки оквир и доказ концепта за даљу примену на *LSST* обиму података, уз могућност проширења предложених модела на реалне податке велике запремине.

Посебно је важно истаћи да је у дисертацији примењен модел неуронских процеса (*Neural process, NP*) који припадају класи мета-учећих модела (*meta-learners*) и за разлику од класичних неуронских мрежа, не захтевају милионе улазних примера нити велике рачунарске ресурсе. Уместо тога, они уче дистрибуцију функција на нивоу популације и способни су да генерализују на нове објекте већ са неколико посматрања по објекту. Ова својства чине их изузетно погодним за услове какви се очекују у *LSST* пројекту, где се обрађује велики број објеката, али са ограниченим и неравномерним узорковањем у појединачним светлосним кривама. Такође, у дисертацији се примењују самоорганизујуће мапе (*self-organizing map, SOM*), метода ненадгледаног учења која убрзава и побољшава процес учења ако се криве сјаја претходно разврстају у кластере са сличним тополошким особинама у мање-димензионом простору.

Научни циљ докторске дисертације је испитивање кључних својстава променљивости АГЈ комбиновањем алата за класификацију кривих сјаја према тополошким карактеристикама и њиховим моделовањем, уз повезивање резултата дубоког учења са физичким својствима АГЈ. За потребе овог рада, изабран је репрезентативан скуп од 139 светлосних кривих квазара који су јаки извори Х-зрачења и посматрани су у оквиру *SWIFT/BAT* програма, а поседују дугорочне оптичка посматрања у *ASAS-SN* бази података (*All-Sky Automated Survey for SuperNova*). Реч је о изворима са недовољно разјашњеном комплексном фотометријском варијабилношћу, што укључује познате објекте као што су 3C 273, Mrk 6, IC 4329A и IRAS 09149–6206. Њихове криве садрже разнолике и веома изазовне појаве попут флерова, потенцијалних квазипериодичне осцилације, дуготрајне трендове и нагле промене градијената, што их уз нерегуларног узорковање података чини идеалним кандидатима за тестирање робустности савремених приступа моделирању.

3. Основне хипотезе од којих се полазило у истраживању

Истраживање полази од претпоставке да не познајемо било какву претходну информацију о моделу флуksа F посматраном у временима t_{obs} . Надаље, претпоставља

се да неуронски процес (*Neural process*, *NP*) дефинише условну расподелу $p(y|x.Z.\theta)$ над излазним променљивама y , које представљају предвиђања флуksа кривих сјаја у непосматраним временским тренуцима, узимајући у обзир улазне посматране вредности флуksа x за посматране тренутке, непознате параметре модела θ везане за физичку позадину посматране временске серије и подскуп посматраних података који се зове контекстни скуп Z . Кључна компонента *NP* је уграђивање контекстних скупова Z у простор репрезентације мање димензије путем енкодера $E:Z \rightarrow E(Z)$, који је вишеслојни перцептрон. Ова спецификација модела омогућава да *NP* изведу мета-учење кривих сјаја АГЈ, пошто се предвиђања могу генерисати у ходу из нових контекстних скупова у време тестирања.

Додатно, тестирана је хипотеза да скраћење потребног времена учења и повећање тачности *NP* модела може бити постигнуто претходном стратификацијом кривих сјаја употребом *SOM* методе ненагледаног учења. Добијена дводимензиона *SOM* мапа представља нискорезолуциону верзију топологије улазног параметарског простора кривих сјаја, али очувава корелације које постоје у оригиналним подацима, што омогућава идентификацију посебних карактеристика (кластера) у улазном каталогу кривих сјаја. Како алгоритам ефикасно класификује нове улазне податке на основу претходно виђених примера, након обуке, *SOM* се може користити за кластеровање нових улаза, чак и ако садрже само подскуп информација коришћених за обуку оригиналне мапе.

4. Кратак опис садржаја дисертације

Рад је подељен на теоријски увод (поглавља 1-2) и истраживачки део (поглавља 3-6), који описује коришћене податке и методе, резултате и дискусију. Затим следи закључак, литература са исцрпним списком референци, прилози и биографија аутора. Структура текста је следећа:

Резиме

Abstract

Садржај

1. Увод (1-12)

2. Променљивост (13-44)

3. Подаци (45-50)

4. Методе (51-65)

5. Резултати (66-89)

6. Дискусија резултата (90-96)

7. Закључак и будући рад (97-98)

Литература (99-115)

Прилози (116-165)

Биографија аутора (166-166)

У сажецима је на српском и енглеском дат кратак опис циља истраживања, почетних хипотеза, као и метода и података који су коришћени приликом доношења до иницијалних резултата.

У првом поглављу, Увод, поставља се општи оквир истраживања. Дефинише се значај временске променљивости АГЈ, идентификују се основни изазови у анализи кривих сјаја и формулишу истраживачки циљеви и доприноси овог рада.

Друго поглавље, Променљивост АГЈ у различитим таласним доменима, пружа преглед посматрачких карактеристика АГЈ кроз различите делове електромагнетног спектра. Посебан акценат стављен је на идентификацију физичких процеса који доприносе променљивости у сваком од домена.

Треће поглавље, под називом Подаци, посвећено је избору и припреми података коришћених у истраживању и даљој анализи. Описани су критеријуми селекције кривих сјаја, као и поступци обраде и оптимизације података за примену метода дубоког учења.

У четвртном поглављу, Методе, детаљно су представљени развијени методолошки приступи, саморганизујуће мапе и кондиционални неуронски процеси. Изложена је конструкција саморганизујућих мапа за класификацију кривих сјаја, као и моделовање временских серија применом неуронских процеса.

Пето поглавље, Резултати приказује добијене моделе и њихове анализе, обухвата опис добијених резултата класификације и предикције кривих сјаја. Анализирана је тачност и ефикасност развијених модела, као и идентификовани обрасци променљивости у кривама сјаја АГЈ.

Шесто поглавље, Дискусија, посвећено је интерпретацији научних импликација добијених резултата, анализи ограничења примењених метода и разматрању могућности за даље унапређење истраживачког приступа. Седмо поглавље, Закључци и будући правци истраживања, сумира остварене циљеве дисертације, истиче главне доприносе и предлаже потенцијалне правце за будућа истраживања у области анализе временске променљивости активних галактичких језгара.

На крају дисертације, у Прилозима, приказани су графички резултати моделовања кривих сјаја квазара помоћу неуронских процеса. Прилог 1 садржи резултате моделовања без претходног кластеровања, док Прилози 2, 3 и 4 приказују резултате добијене након примене кластеризације методом саморганизујућих мапа. Ови резултати визуелно подржавају дискусију о утицају препроцесирања на тачност и ефикасност модела.

5. Остварени резултати и научни допринос дисертације

Докторска дисертација представља значајан допринос анализи фотометријске променљивости АГЈ уз примену дубоког учења, као и успостављању везе између модела учења и одредђених физичких АГЈ својстава. Полазећи од идеје да је променљивост АГЈ-а производ интеракције вишеструких физичких механизма, од термалних нестабилности у акреционом диску, преко репроцесирања, па до могућих квазипериодичних осцилација изазваних разним процесима или прецесијом диска, овај рад је развио хибридни поступак који повезује ненадгледано учење и генеративно моделирање. Генеративни модел, условни неуронски процес (*QNPu*), је коришћен за

реконструкцију временских серија, али у оквиру ове дисертације је додатно унапређен кроз увођење претпроцесора у виду ненандгледаног учења путем самоорганизујућих мапа (*SOM*), који врши кластеризацију кривих сјаја пре него што оне буду моделиране неуронским процесима.

Посебан значај рада лежи у примени контекстуалног латентног простора неуронских процеса. Уместо да претпоставља униформне ембедоване представе за све објекте, овај приступ омогућава да се латентни простор динамички гради на основу контекстног скупа посматрања, што омогућава да се исти модел примени и на густо и на ретко узорковане криве, без губитка структуралне флексибилности. Та контекстуалност је посебно важна у физички хетерогеним системима као што су АГЈ, где различити режими акреције могу довести до веома различитих временских скала и амплитуда флукуација. На тај начин сваки објект, односно АГЈ, може бити репрезентована у латентном простору који одражава његове физичке особине, као што је процес акреције гаса, ниво флукуација, и специфичне временске скале. Такав модел је од посебног значаја за нерегуларно узорковане податке, какви се јављају у реалним условима, и омогућава учење кривих сјаја и у условима великих података попут *LSST* прегледа неба.

Истраживање је урађено на репрезентативном скупу од 139 АГЈ за које су дугорочне (окирно 2000 дана) оптичке криве сјаја преузете из *ASAS-SN* базе података. Узорак је пажљиво одабран да садржи објекте са недовољно разјашњеном комплексном фотометријском променљивошћу, што укључује познате објекте као што су 3C 273, Mrk 6, IC 4329A и IRAS 09149–6206. Њихове криве садрже разнолике и веома изазовне појаве попут флерова, потенцијалних квазипериодичне осцилације, дуготрајне трендове и нагле промене градијената, што их уз нерегуларног узорковање података чини идеалним кандидатима за тестирање робусности савремених приступа моделирању. Детаљна анализа је показала да кластеризација светлосних кривих путем *SOM* алгорита омогућава боље груписање кривих према морфолошким сличностима, при чему се добијају кластери који не само да имају статистичку хомогеност већ и физичку интерпретабилност. На пример, један кластер је показао ‘S’-обликовану структуру у просечној кривој, што указује на могућу квазипериодичну осцилацију унутар акреционог диска код објекта у овом кластеру. Други кластери садрже криве сјаја са асиметричним интензивним и брзим профилима пораста и пада сјаја, што би могло указивати на епизодне промене у стопи акреције или чак на прелазак између различитих стања диска, што је познато из хидродинамичких симулација.

Моделирање кривих сјаја познатих објекта са сложенем променом сјаја, као што су 3C 273, Mrk 6 и IC 4329A, показало је да се *QNPu* много прецизније и брже адаптира на појаве у промени сјаја када је обука ограничена на кластер са сличним кривама, него када се тренира на целом скупу. Посебно истичемо да је у кластерима са ниском и умереном варијабилношћу модел успео да ухвати fine промене у сјају ових објекта, што указује на осетљивост *QNPu* модела на могуће суптилне осцилације или промене у акреционом диску које могу бити повезане са slabим топлотним нестабилностима, градијентима у расподели температуре или локалним променама. Уједно, време обраде је вишеструко скраћено, што је од суштинског значаја за реалну примену у ери великих прегледа неба као што је *LSST*.

Комисија констатује да је овај рад поставио стабилне и скалабилне основе за примену на криве сјаја АГЈ у оквиру *LSST* података али и потенцијал за даље проширење на друге класе објеката са стохастичном променљивошћу што чини овај рад отвореним оквиром за будућа истраживања.

6. Објављени и саопштени резултати из области истраживања презентованог у тези

6.1. Објављени научни радови у међународним часописима

1. Čvorović-Hajdinjak, I., 2024, Modeling Quasar Variability Through Self-Organizing Map-Based Neural Process, Serbian Astronomical Journal, 208, 17-27. DOI: <https://doi.org/10.2298/SAJ2408017C> (M23, IF = 0.8)
2. Čvorović-Hajdinjak, I., Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Dai, X., Jankov, I., Radović, V., Sánchez-Sáez, P., & Nikutta, R. 2022, Conditional Neural Process for Nonparametric Modeling of Active Galactic Nuclei Light Curves, Astronomische Nachrichten, 343, e210103. DOI: <https://doi.org/10.1002/asna.20210103> (M23, IF = 1.1)
3. Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Andrić Mitrović, N., Nikolić, M., Pavlović, M. S., Čvorović-Hajdinjak, I., Knežević, M., & Savić, D. V. 2023, Deep Learning of Quasar Lightcurves in the LSST Era, Universe, 9, 287. DOI: 10.3390/universe9060287 (M22, IF = 2.3)
4. Kovačević, A. B., Radović, V., Ilić, D., Popović, L. Č., Assef, R. J., Sánchez-Sáez, P., Nikutta, R., Raiteri, C. M., Yoon, I., Homayouni, Y., Li, Y.-R., Caplar, N., Čvorović-Hajdinjak, I., et al. 2022, The LSST Era of Supermassive Black Hole Accretion Disk Reverberation Mapping, The Astrophysical Journal Supplement Series, 262, 49. DOI: 10.3847/1538-4365/ac88ce (M21a, IF = 8.6)
5. Jankov, I., Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Radović, V., Čvorović-Hajdinjak, I., Nikutta, R., & Sánchez-Sáez, P. 2022, Photoreverberation Mapping of Quasars in the Context of Legacy Survey of Space and Time Observing Strategies, Astronomische Nachrichten, 343, e210090. DOI: 10.1002/ASNA.20210090 (M23, IF = 1.1)
6. Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Radović, V., Jankov, I., Yoon, I., Caplar, N., Čvorović-Hajdinjak, I., & Simić, S. 2021, On Possible Proxies of AGN Light-Curves Cadence Selection in Future Time Domain Surveys, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 505, 5012. DOI: 10.1093/mnras/stab1595 (M21, IF = 4.8)
7. Kovačević, A. B., Yi, T., Dai, X., Yang, X., Čvorović-Hajdinjak, I., & Popović, L. Č. 2020, Confirmed Short Periodic Variability of Subparsec Supermassive Binary Black Hole Candidate Mrk 231, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, 4069. DOI: 10.1093/mnras/staa737 (M21, IF = 4.8)

6.2 Саопштења на научним конференцијама

1. Čvorović - Hajdinjak, I., Kovačević, A., Raju, A., Pavlović, M., Ilić, D., Popović, L. on Modeling Quasar Variability Through Self-Organizing Map-Based Neural Process. 22 –

25. July 2024, Catching supermassive black holes with Rubin-LSST: Towards novel insights and discoveries into AGN science, Rome, Italy
2. **Čvorović - Hajdinjak, I.**, Kovačević, A., Ilić, D., Popović, L., Sanchez Saez, P., Nikutta, R. on Conditional Neural Process for AGN light curve modeling, 28. June – 2. July 2021. European Astronomical Society Annual Meeting, Virtual
3. **Čvorović - Hajdinjak, I.**, Jankov, I., Rakić, N., Sanchez Saez, P., Ilić, D., Kovačević, A., Radović, V., Nikutta, R. on Building Deep Learning Engine for AGN Light-Curves. 19 – 23. July 2021, Supermassive Black Hole Studies with the Legacy Survey of Space and Time, Virtual
4. **Čvorović - Hajdinjak, I.**, Kovačević, A., Ilić, D., Popović, L., Sanchez Saez, P., Nikutta, R. on Conditional Neural Process for AGN light curve modeling, 09 – 13. August 2021. LSST Community Workshop 2021, Virtual
5. **Čvorović - Hajdinjak, I.**, Deep learning of AGN spectral variability, 23 - 27. July 2021. the 13th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics, Belgrade. Serbia
6. **Čvorović-Hajdinjak I.** et al., AGN light curve modeling via artificial neural network process, 13 - 17. September 2021, Crimean AGN Conference "Galaxies with Active Nuclei on Scales from Black Hole to Host Galaxy"
7. **Čvorović-Hajdinjak I.**, Modeli klasifikacije egzoplaneta prema potencijalnoj nastanjivosti dobijeni metodama mašinskog učenja, 6-7. December, 2019. The tenth Symposium "Mathematics and Applications" 2019, Belgrade, Serbia

8. Закључак и предлог

Докторска дисертација **“Анализа променљивости активних галактичких језгара комбинованом применом самоорганизујућих мапа и неуронских процеса”**, кандидаткиње Иве Чворовић – Хајдињак предстаља целовито научно дело. Област истраживања оптичке променљивости АГЈ изложена је структурно, са јасним дефинисањем проблема, методама које су коришћене, описом посматрачких података и коришћених иновативних метода анализе, презентацијом и дискусијом добијених резултата, што је поткрепљено обимним списком коришћене литературе. Поглавља дисертације представљају независне јединице које су повезане у целину како би се добила комплетнија слика о проблему проучавања променљивости АГЈ. Такође, кандидат је показао познавање и разумевање физике АГЈ, као и примене комплексних рачунских алгоритама на астрономске теме.

Резултати дисертације представљају важан научни допринос у области истраживања анализе светлосних кривих АГЈ. Посебно значајан резултат представља развој нове аналитичке методе базиране на комбинацији неуронских процеса и методама кластеровања самоорганизујућим мапама, који је јавно доступан научној заједници у виду *QNPu* програмског пакета. Имајући у виду да је овај алат искључиво вођен подацима, могуће га је искористити и за анализу емисије дугих природних и друштвених феномена, што му даје додатну важност. Истичемо да су добијени резултати изузетно релевантни у области вангалактичке астрономије и део су прихваћеног директног доприноса тима Математичког факултета Вера Ц. Рубин *LSST* пројекту.

Кандидаткиња је објавила укупно седам научних радова из области истраживања ове докторске дисертације у међународним научним часописима са SCI листе, од чега су резултати из једног самосталног рада и два коауторска рада приказани у самој дисертацији.

Имајући у виду горе речено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Математичког факултета Универзитета у Београду да прихвати овај извештај и да позитивну оцену докторске дисертације „Анализа променљивости активних галактичких језгара комбинованом применом самоорганизујућих мапа и неуронских процеса“ кандидаткиње Иве Чворовић – Хајдињак и одреди комисију за њену одбрану.

У Београду, 9. јуна 2025



проф. др Драгана Илић,
редовни професор Математичког
факултета



проф др Лука Ч. Поповић,
научни саветник Астрономске
опсерваторије и редовни професор
Математичког факултета



проф. др Душан Онић,
ванредни професор Математичког
факултета



проф. др Младен Николић,
ванредни професор Математичког
факултета



др Александра Типријановић,
Associate Scientist, Fermi National
Accelerator Laboratory