

ДИРЕКТНИ СОФТВЕРСКИ ДОПРИНОС У ИН-КАЈНД ФОРМИ СА КАТЕДРЕ ЗА АСТРОНОМИЈУ УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ (SER-SAG-S1), ЗА ОПСЕРВАТОРИЈУ ВЕРА Ц. РУБИН (2020-2025)

АНЂЕЛКА Б. КОВАЧЕВИЋ¹, ДРАГАНА ИЛИЋ¹,
ЛУКА Ч. ПОПОВИЋ^{2,1}

¹ Универзитет у Београду, Математички факултет, Катедра
за астрономију, Студентски трг, 11 000 Београд, Србија
E-mail: andjelka.kovacevic@math.rs, dragana.ilic@math.rs,

² Астрономска опсерваторија, Волгина 7, Београд, Србија
E-mail: lpopovic@aob.rs

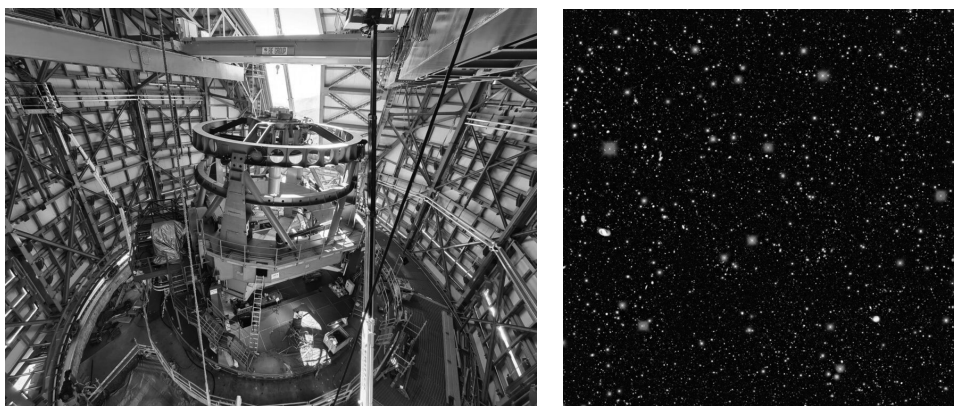
Резиме: Пројекат *Legacy Survey of Space and Time (LSST)*, који ће реализовати Опсерваторија Вера Ц. Рубин, представља један од најамбициознијих подухвата у савременој оптичкој астрономији. Овај пројекат ће омогућити систематско, дубоко и широко посматрање неба током десет година, производећи преко 100 петабајта података, са преко 2.5 милиона појединачних посматрања. Основна научна мотивација пројекта обухвата испитивање тамне материје, променљивих астрономских појава, структуре Сунчевог система и наше Галаксије. У овом раду представљамо доприносе учешћа српског SER-SAG-S1 тима кроз ин-кајнд софтверски допринос реализацији LSST пројекта чији почетак очекујемо половином јуна или јула 2025. године.

Кључне речи: *Vera C. Rubin Observatory - Legacy Survey of Space and Time (LSST)*, активна галактичка језгра, двојни системи квазара, статистичке методе

1. УВОД

Развој технологије омогућио је радикалне промене у начину на који посматрамо свемир. Астрономија више није ограничена само на посматрање појединачних објеката кроз телескопе на Земљи или у свемиру, већ у све већој мери зависи од широких прегледа неба који се ослањају на дигиталну технологију детектора и систематску анализу великих скупова података. У том контексту, пројекат *Legacy Survey of Space and Time (LSST)*, који ће спровести Опсерваторија Вера Ц. Рубин, представља корак ка потпуној трансформацији динамичке астрономије у временском домену. Овај пројекат има капацитет да небо посматра дубоко, широко и у континуитету, током десетогодишњег периода, при чему ће се генерисати подаци без преседана у историји астрономије (Ivezic et al 2019).

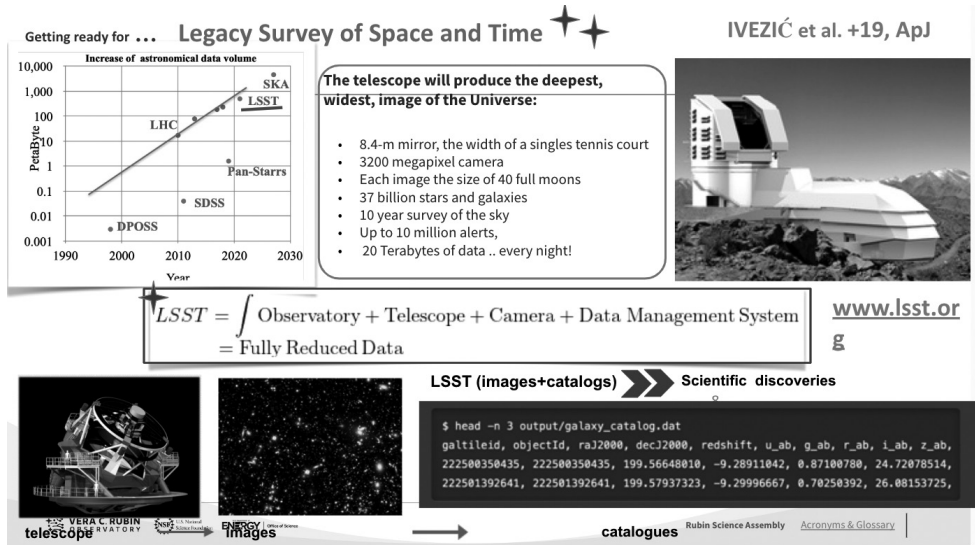
Телескоп LSST има пречник главног огледала од 8.4 метра и опремљен је највећом до сада изграђеном дигиталном камером од 3200 мегапиксела (Слика 1). Свака појединачна експозиција покрива видно поље од 9.6 квадратних степени, што је приближно величини 40 пуног Месеца, а сваки "кадар" садржи и до десет милиона галаксија. План мисије предвиђа да се током десет година посматрања покрије половина неба са око 1000 експозиција по свакој тачки, у шест фотометријских филтера (u, g, r, i, z, y), чиме се добија временски низ који омогућава динамичку анализу свемира. Очекује се да ће се на крају мисије генерисати око 100 петабајта података, са укупно 2.5 милиона појединачних "посматрања" и мерењима за преко 40 милијарди астрономских објеката (<https://rubinobservatory.org/explore/how-rubin-works/technology>). Основна радна јединица у прикупљању података је "посматрање" која подразумева две узастопне експозиције од по 15 секунди, што укупно даје 30 секунди експозиционог времена по посматрачкој јединици (Ivezić et al 2019, Bianco et al 2022).



Слика 1. Лево: LSST 3.2-гигапикселна дигитална камера и Симонијев телескоп за преглед неба. Троделни систем огледала телескопа (8.4 m, 5 m и 3.4 m) омогућава брзо и прецизно усмеравање у року од приближно 5 секунди. Извор фотографије: Rubin Obs/NSF/AURA. Десно: Слика из *Deep Lens Survey* (DLS), која открива десет пута више галаксија по јединици површине у односу на *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), док ће LSST покривати 50.000 пута већу површину у шест оптичких филтера. Извор фотографије: *Deep Lens Survey* / UC Davis / NOAO.

Научне мотивације које стоје иза LSST мисије су разнородне, али дубоко повезане. Један од централних циљева је испитивање структуре и еволуције Универзума кроз прецизна мерења тамне енергије, тамне материје и параметара који одређују експанзију космоса. Посебан значај има космологија која ће се изучавати путем гравитационих сочива, барионских акустична осцилација, супернових и јата галаксија. Поред тога, LSST ће донети револуцију у посматрањима у временском домену, омогућавајући откривање променљивих звезда, супернових експлозија, и неочекиваних догађаја који до сада нису били детектовани. У области Сунчевог система, ова мисија омогућиће систематско праћење објеката блиских Земљи, као што су астероиди који могу се сударити са нашом планетом, као и удаљених транснептуних тела и комета. Такође,

кроз детаљно мапирање звезда у нашој Галаксији, LSST ће допринети разумевању структуре Млечног пута, динамике звезда и међузвездане материје (видети Bianco et al 2022).



Слика 2. За десетогодишњи период посматрања LSST биће детектовано више од 37 милијарди објеката, уз продукцију до 20 терабајта редукованих података сваке ноћи. Горња врста панела приказује раст запремине астрономских података током последњих деценија, док средњи и доњи панели илуструју како се синергија између Симони телескопа, слика и каталога води ка научним открићима.

У поређењу са претходним прегледима неба, као што су SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*), DES (*Dark Energy Survey*) или Euclid, LSST се истиче не само по дубини и ширини покривености, већ и по капацитету да објекте прати у времену. Док већина пројеката обезбеђује један или неколико погледа на исти регион неба, LSST ће омогућити редовно и често посматрање, са просечно два проласка по ноћи по једном пољу.

Ова репетитивност омогућава праћење краткотрајних феномена и варијабилности на временским скалама које раније нису биле достижне у великом обиму.

Целокупна инфраструктура LSST-а се заснива на јединственој интеграцији опсерваторије, телескопа, камере и система за управљање подацима, што омогућава потпуно редуковане податке доступне истраживачима (Слика 2). Пројекат је већ ушао у завршну фазу припрема, а научна заједница широм света, укључујући и истраживаче из Србије, интензивно се припрема за еру података које ће LSST омогућити. Ин-кајнд допринос SER-SAG-S1 тима са Математичког факултета Универзитета у Београду (<https://www.lsst.org/scientists/international-drh-list>), укључује развој алгоритама за аутоматско моделовање кривих сјаја квазара, откривање периодичности у условима црвеног шума, као и методе за класификацију и откривање неочекиваних објеката у великом скупу података. Ови доприноси постављају темеље за будуће научне резултате и учешће Србије у глобалној ери астрономије временског домена.

2. LSST ИНФРАСТРУКТУРА ЗА УПРАВЉАЊЕ ПОДАЦИМА И ОБИМ СОФТВЕРСКОГ РАЗВОЈА

У основи рада Опсерваторије *Вера Ц. Рубин* налази се изузетно сложен и рафиниран систем за управљање подацима који је осмишљен тако да омогући аутоматску обраду и дистрибуцију података у реалном и одложеном режиму. Сваке ноћи, телескоп ће генерисати око 20 терабајта "сирових" података, углавном у виду серија експозиција од по 30 секунди које покривају цело видљиво небо сваких неколико дана. Ови подаци ће се аутоматски прослеђивати кроз посебне научне и техничке канале до обраде у оквиру специјализованих сервера. У року од најмање 60 секунди од експозиције, систем ће генерисати до 10 милиона упозорења на променљиве и пролазне изворе, укључујући и објекте Сунчевог система. Упоредо с тим, у року од 24 сата биће доступни производи брзе обраде као резултати анализа разлика слика (*Difference Image Analysis* - DIA). На крају сваке године, уз дефинисане рокове, корисницима ће бити доступни и коначни производи годишњих (као и десетогодишњих обрада), укључујући преко 5.5 милиона слика резолуције 3.2 гигапиксела и каталоге са преко 37 милијарди астрономских објеката. Сви ови подаци биће доступни преко *Rubin Science Platform* (RSP) — интегрисаног окружења које укључује веб интерфејсе, Jupyter радне свеске, API сервисе, приступ базама података и софтверске алате за анализу.

Успостављање и одржавање овако напредног система захтева глобалну инфраструктуру и снажну рачунарску подршку. Мрежа локација обухвата саму опсерваторију на планини Серо Пачон у Чилеу, где се налази телескоп и камера, базну станицу у Ла Серени за први ниво складиштења и приступа подацима, национални центар у Урбани (NCSA) у САД као центар за обраду и складиштење другог нивоа, и европски центар у Лиону, Француска, који обезбеђује дугорочно складиштење и учешће у обради. Над свим овим процесима надзира се рад из седишта у Тусону, Аризона, где се налазе управљачки и образовни капацитети Опсерваторије.

Уз инфраструктуру, кључни стуб LSST пројекта је софтвер. Систем за управљање подацима, заједно са научним процесним линијама, представља један од највећих отворених софтверских пројеката у астрономији данас. Развојни кодови су написани у мешавини језика као што су Python, C++, Java, JavaScript и Kotlin, са преко милион линија кода и коментара. Софтвер је дизајниран тако да буде отпоран на систематске грешке, са осетљивошћу на кашњење и могућношћу реаговања у реалном времену. Сложеност овог система чини софтверску архитектуру суштинском не само за функционалност инструмента, већ и за интегритет научних резултата.

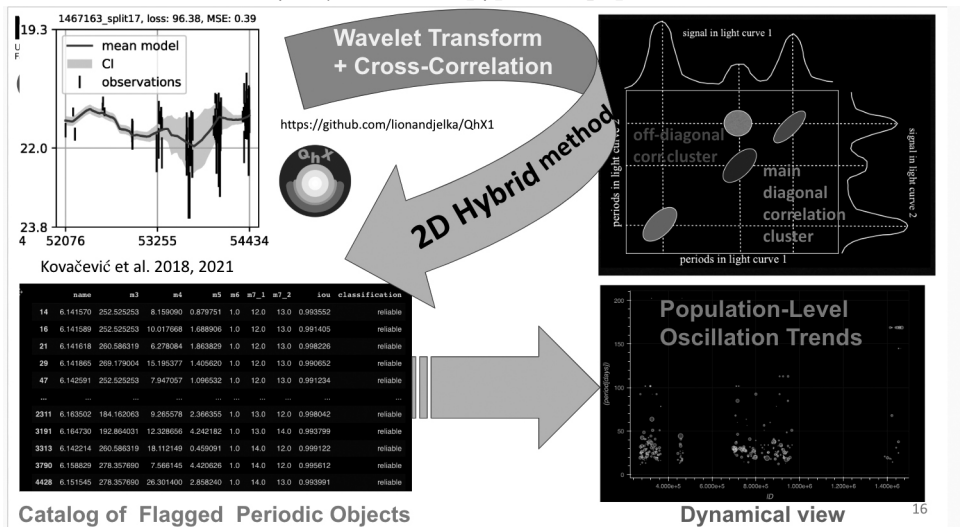
3. УЛОГА СРБИЈЕ И SER-SAG-S1 ИН-КАЈНД ДОПРИНОС

LSST ће развити до неслућених размера динамичку астрономију у временском домену, односно праћење објеката који се мењају током времена. Ове промене могу бити у положају, као у случају астероида и комета, или у сјају, као код променљивих звезда, супернових експлозија или активних галактичких језгара (АГЈ). Разлике у положају могу указивати на брзе процесе, као што су

објекти који су у нашем Сунчевом систему, или на споре, као што су сопствена кретања звезда. Промене у сјају могу бити периодичне, нерегуларне или потпуно непредвидиве, а систематско праћење ових извора омогућава правовремено откривање и класификацију феномена. Сложена таксономија варијабилности коју је предложио Eyer & Mowlavi (2007) послужила је SER-SAG-S1 тиму као полазиште за развој алгоритама који ће аутоматски моделовати криве сјаја квазара и категорисати изворе на основу периодичности.

Допринос Србије кроз SER-SAG ин-кајнд програм осигурава права на податке за шест главних истраживача из Београда. У оквиру доприноса за 4 главна истраживача који обезбеђује SER-SAG-S1 тим са Математичког факултета предвођен Анђелком Ковачевић, Сашом Симићем и Младеном Николићем развија се директабилни софтвер за обраду података, укључујући неуронске процесе који моделирају криве сјаја квазара као и посебне методологије за детекцију осцилација у њима. Почетком јануара 2025. године потписан је и званични IDRA (*International Data Rights Agreement*) уговор између Рубин опсерваторије, AURA-е и SER-SAG тима. Директори Рубин опсерваторије су препознали значај доприноса српских колега, при чему је Боб Блум, директор операција, истакао да ће доприноси у аналитичком коду и додатним телескопским ресурсима значајно унапредити способности целе заједнице.

У оквиру ове сарадње развијени су софтверски пакети QNPy (*Quasar Neural Process in Python*, Čvorović-Hajdinjak et al. 2022, 2024, Kovačević et al. 2023), базиран на пробабилитичким неуронским процесима и QhX (*Quasar harmonic eXplorer*) намењен за детекцију периодичности у црвеном шуму. Ови алати омогућавају моделовање и класификацију светлосних кривих и генеришу базе података. Оба пакета су објављена на рури платформи (Слика 3).



Слика 3. Дијаграм SER-SAG-S1 директабилног софтверског доприноса: проток информација се креће од QNPy модела или измерених кривих сјаја до QhX модула (горњи ред слика, с леба на десно). Детектоване осцилације се потом складиште у облику нумеричких каталога (доле лево) или су дате у динамичком приказу (доле десно).

3.1 Научни допринос SER-SAG-S1 тима у оквиру LSST пројекта

Први резултати обухватају евалуацију LSST симулација посматрања (OpSim, Kovačević, Plić, Popović et al. 2021) који су проценили колико избор каденце утиче на реверберационо мапирање АГЈ кривих сјаја. Поред тога, тим је припремио и два интерна документа за LSST *AGN Science Collaboration* који се тичу метрика варијабилности за процену ефикасности различитих каденци.

Резултат заједничког рада SER-SAG-S1 тима и коаутора из LSST *AGN Science Collaboration* (Kovačević, Radović, Plić, Popović, et al. 2022) који представља процену LSST стратегија у циљу мапирања структуре акреционих дискова АГЈ путем фотометриске реверберације. Ова публикација служи и као теоријски основ за дизајн будућих посматрачких програма.

У оквиру LINCC иницијативе (*From Data to Software to Science with LSST*, Breivik et al. 2022), SER-SAG тим је представио своју методу за машинско учење базиране на условним неуронским процесима за моделовање АГЈ светлосних кривих. Осим тога, SER-SAG-S1 тим учествовао је на LSST *AGN SC Data Challenge* и освојио прво место, за рад који је укључивао тестирање различитих метода класификације АГЈ на основу података из SDSS базе. Приказани резултати укључују корелациону анализу између филтера и конфузионе матрице за различите методе дубоког учења као што су ANN, SVM, XGBoost и Random Forest (Savić et al. 2023).

Заједничка студија инкајнд тима из Хрватске и SER-SAG-S1 која се бави еволуцијом Mg II линије у спектру квазара SDSS J2320+0024, као потенцијалног кандидата за двојни систем блиских супермасивних црних рупа, а који служи и као студија случаја релевантна за LSST операције и посматрања ових још увек непотврђених двојних система квазара (Fatović et. al. 2023, 2025).

SER-SAG-S1 тим је такође био активан у групама за праћење кандидата за двојне системе АГЈ. Драгана Илић је коруководилац *AGN SC binary follow-up* подгрупе од 2025 године. У оквиру рада ове групе, Драгана Илић и Анђелка Ковачевић учествовале су у иницијативи за NOIRLab-Gemini посматрачки предлог за 2025. годину, за спектроскопско праћење најперспективнијих краткoпериодичних бинарних АГЈ система.

У априлу 2025. године, приликом првог успешног снимка LSST камере (*LSSTCam First Photon*), значајно место у LSST комисионој фази заузела је и Марина Павловић, некадашња чланица SER-SAG-S1 тима, сада као званични LSST *Commissioning Scientist* (Слика 4). Овај моменат симболично означава укључење локалног кадра у централне активности највећег астрономског пројекта нове генерације.

3.2 Међународна сарадња, активности у заједници и истакнути доприноси тима SER-SAG унутар LSST пројекта

Током јануара 2024. године, Катедру за астрономију посетили су проф. др Жељко Ивезић, директор изградње Рубин опсерваторије, као и Ловро Палаверса, координатор хрватског инкајнд тима. Том приликом представљени су досадашњи резултати сарадње, а одржана је и презентација за студенте и сараднике са факултета.



Слика 4. Др Марина Павловић (прва с десна) у командној соби LSST у тренутку добијања првог фотона. Сliku је направио William O'Mullane која је у приватној колекцији др Марине Павловић. Извор фотографије: RubinObs/NOIRLab/SLAC/DOE/NSF/AURA/W. O'Mullane.

У оквиру активности на популаризацији науке и укључивању јавности, у фебруару 2024. објављена су два текста у дигиталном часопису Министарства науке Републике Србије – Елементаристи. Интервју са проф. др Жељком Ивезићем указује на значај научне поларизације као дела LSST мисије, док други текст чији је аутор Драгана Илић и Лука Поповић, описује допринос српских научника у откривању тајни свемира кроз учешће у LSST пројекту. У раду су представљени и резултати са LSST@Europe конференције, која се организује у сарадњи са европским инкајнд тимовима (Београд 2016, Рим 2022, Пореч 2023, Ла Палма 2024).

У оквиру партнерства са хрватским инкајнд тимом реализован је LSST *Kick-starter* пројекат финансиран од стране *Heising-Simons* фондације, који је обезбедио складишни капацитет преко 250TB података. Чланови SER-SAG-S1 тима активно учествују у радним телима *AGN Science Collaboration*: Драгана Илић и Анђелка Ковачевић су пуноправни чланови AGN SC; Илић је чланица комисије за чланство, док је Ковачевић чланица комисије за етику, као и ауторка и аналитичарка првог званичног пописа чланова AGN SC.

На 66. Међународном сајму технике у Београду, одржаном од 21. до 24. маја 2024. године, SER-SAG тим је представио LSST и актуелне ин-кајнд активности Србије у оквиру Рубин опсерваторије (Слика 5). Програм је организовала Драгана Илић, уз подршку студената мастер програма *Master programme in Astro-*

physics and Space Science (MASS, Луке Ч. Поповића, и Анђелке Ковачевић. Постављена је инсталација са поређењем огледала LSST, *James Webb Space Telescope* и *Hubble Space Telescope* као и видео симулација "Space Surveyors" и звучна визуелизација светлосних кривих квазара. Ова активност је реализована у сарадњи са Министарством науке, технолошког развоја и иновација и приказана на штанду "Закорачи у одрживу будућност".



Слика 5. Посетиоци на изложбеној поставци LSST и SER-SAG тима на 66. Међународном сајму технике у Београду, одржаном од 21. до 24. маја 2024. године.

4. ЗАКЉУЧАК

Уместо класичног закључка, овај рад се завршава најавом догађаја "Опсерваторија Рубин: први поглед у Универзум", који ће се одржати 23. јуна 2025. године у Дому омладине у Београду, у организацији Драгана Илић, Луке Ч. Поповића као програм менаџера SER-SAG тима, и Анђелке Ковачевић као руководиоца директабилног софтверског доприноса SER-SAG-S1 тима.

Овај догађај је део глобалне иницијативе и конференције за штампу на којој ће бити најављен почетак LSST прегледа неба и приказане прве слике добијене на Опсерваторији Рубин. Главна прослава "*Rubin Observatory First Look*" (<https://rubinobservatory.org/news/rubin-first-look>) биће одржана у Националној академији наука Сједињених Америчких Држава у Вашингтону. Почетак рада Опсерваторије Рубин представља квантни скок у динамичкој астрономији, упоредив са револуционарном улогом коју су телескопи *James Webb Space*

Telescope и *Hubble Space Telescope* имали у отварању нових погледа на Свемир и разумевању нашег места у њему. Поносни смо што су наши научници део овог светски значајног пројекта, што је препознало и Министарство науке, технолошког развоја и иновација.

Захвалница

А.Б.К., Д.И., и Л.Ч.П., захваљују се на финансијској подршци Универзитета у Београду – Математичког факултета (уговор број 451-03-136/2025-03/200104) и Астрономске опсерваторије у Београду (уговор број 451-03-136/2025-03/200002).

ЛИТЕРАТУРА

- Bianco, F. B., Ivezić, Ž., Jones, R. L., Graham, M. L., Marshall, P., Saha, A., et al.: 2022, Optimization of the Observing Cadence for the Rubin Observatory Legacy Survey of Space and Time, *Astrophysical Journal Supplement Series*, **258**, 1.
- Breivik, K., Connolly, A. J., Ford, K. E. S., et al.: 2022, From Data to Software to Science with the Rubin Observatory LSST, *arXiv e-prints*, arXiv:2208.02781.
- Eyer, L., Mowlavi, N.: 2008, Variable stars across the observational HR diagram, *Journal of Physics Conference Series*, **118**, 012010.
- Fatović, M., Palaversa, L., Tisanić, K., Thanjavur, K., Ivezić, Ž., et al.: 2023, Detecting Long-period Variability in the SDSS Stripe 82 Standards Catalog, *Astronomical Journal*, **165**, 138.
- Fatović, M., Ilić, D., Kovačević, A. B., Palaversa, L., Simić, S., et al.: 2025, Time evolution of Mg II in SDSS J2320+0024: Implications for a subparsec binary supermassive black hole system, *Astronomy & Astrophysics*, **695**, A208.
- Ivezić, Ž., Kahn, S. M., Tyson, J. A., Abel, B., Acosta, E., Allsman, R., et al.: 2019, LSST: From Science Drivers to Reference Design and Anticipated Data Products, *Astrophysical Journal*, **873**, 111.
- Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Radović, V., Jankov, I., Yoon, I., et al.: 2021, On possible proxies of AGN light-curves cadence selection in future time domain surveys, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **505**, 5012–5028.
- Kovačević, A. B., Radović, V., Ilić, D., Popović, L. Č., Assef, R. J., Sánchez-Sáez, P., et al.: 2022, The LSST Era of Supermassive Black Hole Accretion Disk Reverberation Mapping, *Astrophysical Journal Supplement Series*, **262**, 49.
- Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Andrić Mitrović, N., Nikolić, M., Pavlović, M. S., et al.: 2023, Deep Learning of Quasar Lightcurves in the LSST Era, *Universe*, **9**, 287.
- Savić, Đ. V., Jankov, I., Yu, W., Petrecca, V., Temple, M. J., Ni, Q., et al.: 2023, The LSST AGN Data Challenge: Selection Methods, *Astrophysical Journal*, **953**, 138.
- Čvorović-Hajdinjak, I., Kovačević, A. B., Ilić, D., Popović, L. Č., Dai, X., Jankov, I., et al.: 2022, Conditional Neural Process for nonparametric modeling of active galactic nuclei light curves, *Astronomische Nachrichten*, **343**, e210103.
- Čvorović-Hajdinjak, I.: 2024, Modeling Quasar Variability Through Self-Organizing Map-Based Neural Process, *Serbian Astronomical Journal*, **208**, 17–27.

**DIRECT SOFTWARE IN-KIND CONTRIBUTION FROM THE
DEPARTMENT OF ASTRONOMY, UNIVERSITY OF BELGRADE
(SER-SAG-S1), TO THE VERA C. RUBIN OBSERVATORY (2020–2025)**

The Legacy Survey of Space and Time (LSST), to be conducted by the *Vera C. Rubin* Observatory, represents one of the most ambitious undertakings in contemporary optical astronomy. This project will enable systematic, deep, and wide-field monitoring of the night sky over a ten-year period, generating more than 100 petabytes of data from over 2.5 million individual visits. The primary scientific motivations include the investigation of dark matter, variable astrophysical phenomena, the structure of the Solar System, and our Galaxy. In this paper, we present the contributions of the Serbian SER-SAG-S1 team through their in-kind software development for the LSST, whose operational start is anticipated in mid-June or July 2025.

Keywords: *Vera C. Rubin Observatory* - Legacy Survey of Space and Time, active galactic nuclei, binary quasar systems, statistical methods.