ALTERNATOR
Misliti znanost.

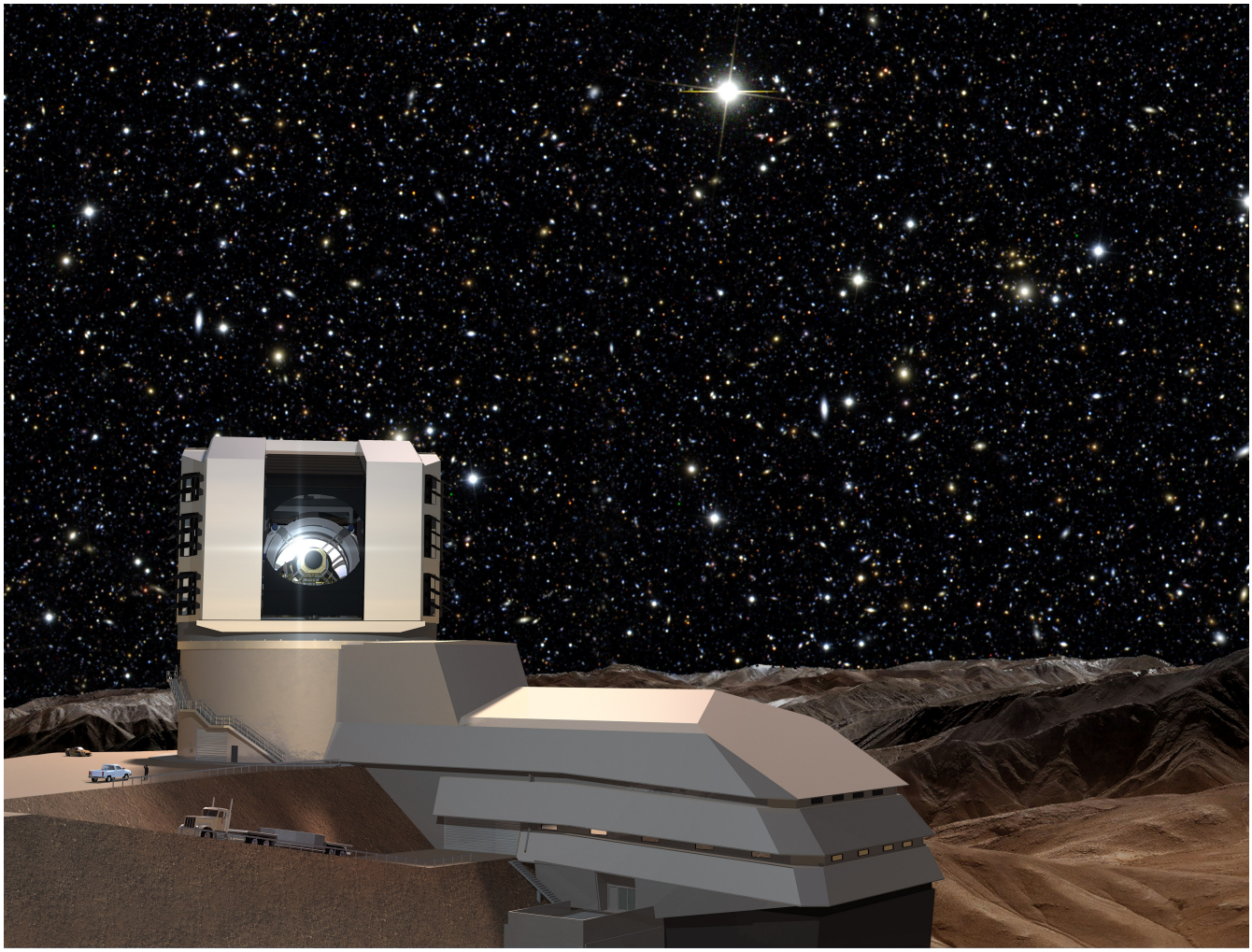
Bliski iz globin vesolja

23. 3. 2023

Number: 12/2023

Author:

- Andreja Gomboc



Todd Mason, Mason Productions Inc. / LSST Corporation

Tisočletja je bilo z zvezdami posuto nočno nebo simbol kozmičnega reda. Navidezno dnevno vrtenje neba in spremembe, povezane z izmenjavanjem letnih časov, so se pravilno in napovedljivo ponavljale, medsebojne razdalje zvezd na nebu – in vzorci, ki so jih predniki in prednice povezali v like ozvezdij – pa se niti v tisočletjih niso opazno spremenile. Zvezde niso izginjale niti se niso pojavljale nove. Nočno nebo je bilo videti urejeno, nespremenljivo, večno. Ta kozmični red je občasno zmotil le kakšen obisk »zvezde repatice« – kometa ali »gostujoče zvezde« – na videz nove zvezde, ki se je pojavila in čez nekaj tednov ugasnila.

Z iznajdbo teleskopa pred 400 leti, z vedno večjimi objektivi (ki lahko zberejo več svetlobe) in uporabo naprednih instrumentov in detektorjev (od risanja na roko preko fotografskih plošč do digitalnih kamer), ki jih v vesoljski dobi človeštvo pošilja tudi nad plašč Zemljinega ozračja, so astronomi in astronomke s svojim pogledom prodirali vedno globlje v vesolje. Razvoj opazovalne astronomije in teoretičnih, matematično-fizikalnih modelov vesoljskih teles in procesov je potekal v tesni povezavi z razvojem drugih ved in tehnologije ter pripeljal do sodobne slike vesolja. Na tej poti so izmerili razdalje do številnih zvezd v naši Galaksiji in ugotovili, da so tudi nam najbližje zvezde svetlobna leta daleč – tako daleč, da njihovega relativnega gibanja s prostimi očmi nikakor ne moremo zaznati. Odkrili so, da je poleg naše Galaksije v vesolju še na stotine milijard galaksij, ki so od nas oddaljene milijone in milijarde svetlobnih let. Nastale so v nekaj sto

milijonih let po prapoku, v katerem je pred 13,8 milijardami let nastalo vesolje.

V končno starem vesolju seveda tudi zvezde niso večne. Živijo od več milijonov do več deset milijard let in se v času človeškega življenja ali obstoja civilizacij na Zemlji ne spremenijo znatno (razen redkih izjem). Z opazovanji ujamemo zgolj bežne trenutke v njihovem razvoju. Lahko pa teoretično modeliramo njihov razvoj vse od rojstva v medzvezdnih oblakih plina do tihega ali burnega (angl. *whimper or bang*) konca. Zvezde podobne našemu Soncu ugasnejo v bele pritlikavke, zvezde z veliko maso eksplodirajo kot supernove – te so naši predniki videli kot »gostujoče zvezde«. Od njihovih sredic ostanejo izredno goste nevtronske zvezde, črne luknje ali pa morda – če jih eksplozija povsem uniči – nič.

Pa vendar se spreminja

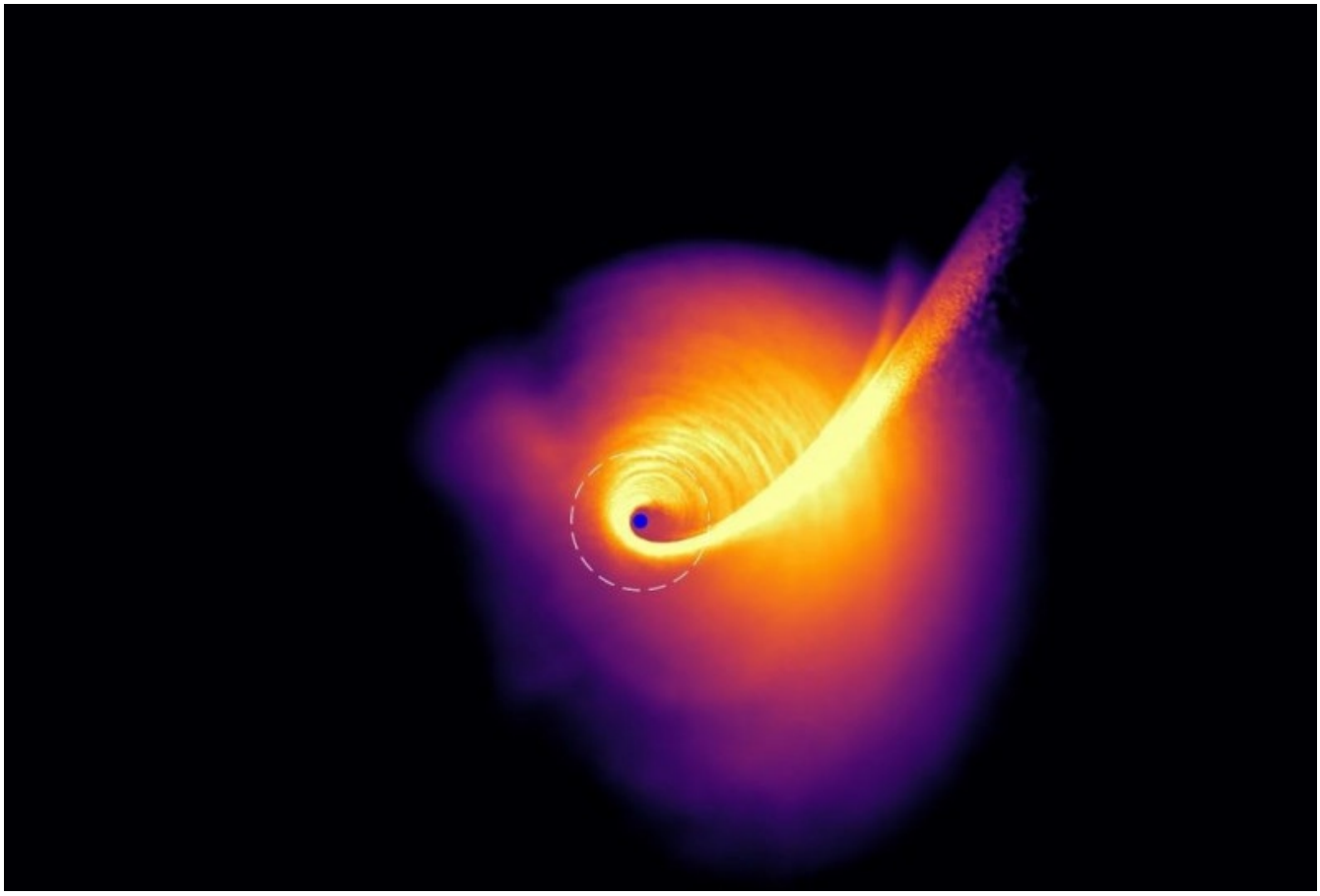
Stoletja so astronomske raziskave ostajale omejene na relativno majhno število nebesnih teles. Teleskopi z velikim zornim poljem niso mogli zaznati oddaljenih, šibkih objektov, veliki teleskopi, ki so videli dlje, pa so tipično imeli majhno zorno polje. V zadnjih nekaj desetletjih je tehnološki napredek omogočil *velike preglede neba* v različnih valovnih dolžinah ali vrstah svetlobe: od gama in rentgenske preko ultravijolične, vidne in infrardeče svetlobe pa vse do mikrovalovne in radijske. Z njimi so ustvarili 3-dimenzionalne *karte vesolja*. Doslej največji astronomski katalog ustvarja evropski satelit Gaia (https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia) in vsebuje podatke o slabih dveh milijardah nebesnih teles, večinoma zvezd v naši Galaksiji.

Ob podrobnem pregledovanju neba se razkrijejo tudi spremembe na nebu. Projekti, kot sta satelita Swift (https://swift.gsfc.nasa.gov/) in Fermi (https://fermi.gsfc.nasa.gov/) ter teleskopa na Zemljinem površju Zwicky transient facility (https://www.ztf.caltech.edu/) in Panoramic survey telescope and rapid response system (https://panstarrs.ifa.hawaii.edu/pswww/) , opazujejo isti del neba večkrat, primerjajo nove posnetke s prejšnjimi in iščejo razlike. Tako odkrijejo objekte, ki so se na nebu premaknili – asteroidi in kometi (telesa v našem Osončju, ki se premikajo glede na »ozadje« veliko bolj oddaljenih zvezd) – in raznovrstne objekte, ki se jim spreminja sij: različne tipe spremenljivih zvezd in različne vrste t. i. novih, *tranzientnih* (kratkotrajnih ali prehodnih) izvorov svetlobe na nebu (angl. *astrophysical transients*). Med te prištevamo vse izvore svetlobe, ki se nenadoma pojavijo in potem sčasoma, na časovnih skalah krajših od sekunde pa vse do več let, izginejo oziroma ugasnejo pod mejo detekcije naših instrumentov. Pojavijo se lahko v katerikoli valovnih dolžinah ali vrstah svetlobe. Med njimi so dogodki v lokalnem vesolju (naši Galaksiji in njeni okolici), lahko pa tudi svetli dogodki v bolj oddaljenih delih vesolja, v drugih galaksijah. Med slednje spadajo hitri radijski izbruhi, plimska raztrganja zvezd, supernove, izbruhi sevanja gama in dogodki gravitacijskih valov.

Tranzienti izven naše Galaksije

Hitri radijski izbruhi (angl. *fast radio bursts*) so kratkotrajni bliščі radijske svetlobe, ki so zaenkrat precejšnja uganka. Vemo, da se pojavljajo v drugih galaksijah in da so verjetno povezani z magnetarji – nevtronskimi zvezdami z zelo močnim magnetnim poljem. Doslej zaznanih je nekaj sto, nekateri izvori med njimi so ponavljajoči, kar pomeni, da ne gre (v vseh primerih) za katastrofične dogodke, v katerih bi bil objekt povsem uničen.

Drugače pa je z drugimi omenjenimi. Vemo, da se v (verjetno vseh) središčih galaksij nahajajo masivne črne luknje z masami med sto tisoč do deset milijard mas Sonca. Podobno kot Luna deluje na Zemljo s svojo plimsko silo, deluje tudi črna luknja s plimsko silo na telesa v svoji bližnji okolici. Ta je lahko tako močna, da zvezdo, ki jo zanese dovolj blizu masivne črne luknje, povsem raztrga in uniči (https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023arXiv230200607J/abstract) . *Dogodke plimskih raztrganj zvezd* (angl. *tidal disruption events*) opazimo kot svetel bliščˇ svetlobe (https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023A%26A...669A.140P/abstract) (od radijskih do rentgenskih valovnih dolžin), ki prihaja iz središča galaksije in lahko traja od več tednov do več let. Doslej so jih v različnih pregledih neba opazili slabih sto.

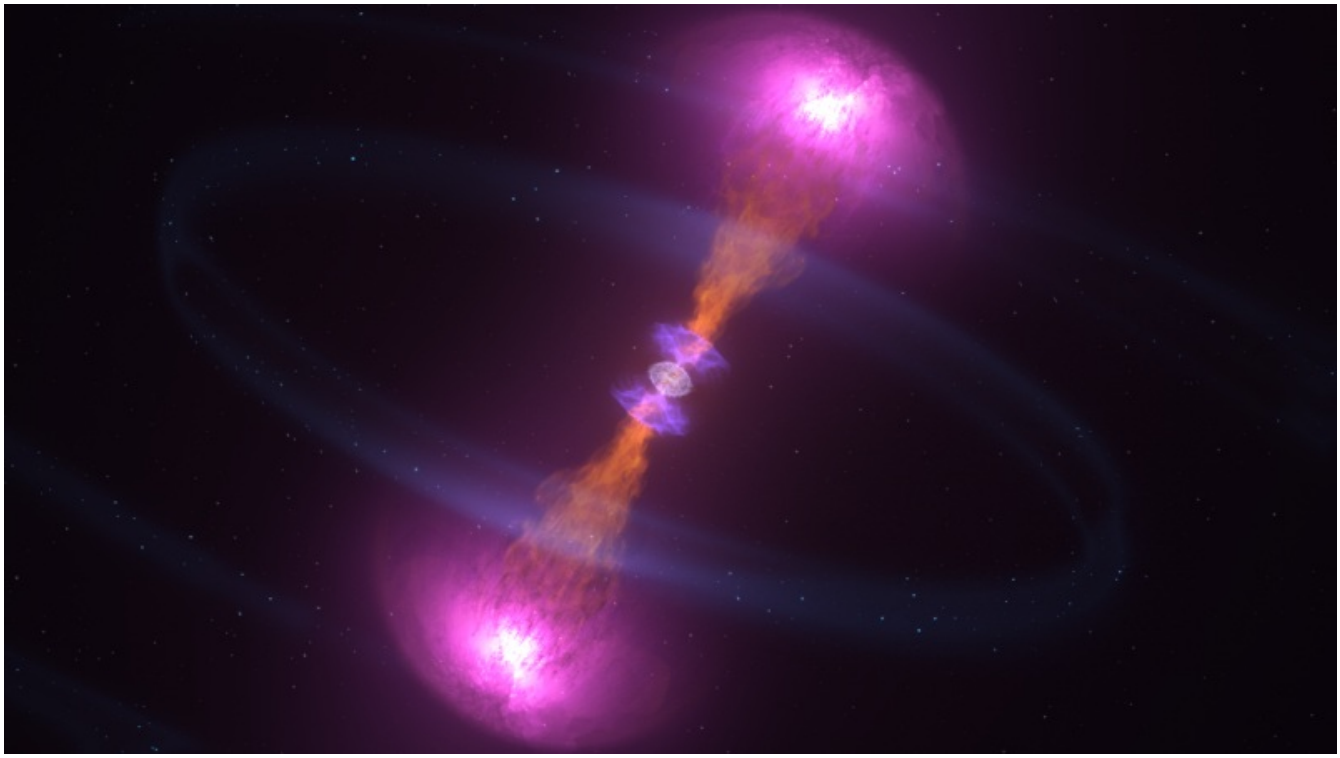


Slika 1: Hidrodinamska simulacija plimskega raztrganja Soncu podobne zvezde v bližini črne luknje z maso 106 mas Sonca. Bel črtkan krog prikazuje velikost območja, znotraj katerega je plimska sila črne luknje (majhen moder krog) močnejša od lastne gravitacije, ki sicer drži zvezdo skupaj. Barve predstavljajo gostoto snovi (naraščajoča od vijolične do rumene). Avtor: Taj Jankovič, simulacija narejena s kodo PHANTOM (https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2018PASA...35...31P/abstract)

Različne vrste *supernov* so posledica eksplozije masivnih zvezd ob koncu življenjske poti ali posebnih parov zvezd, v katerih je vsaj ena bela pritlikavka. Supernove so zelo pogoste, sodobni pregledi neba jih v zadnjih nekaj letih zaznavajo okoli 20.000 letno.

Izbruhe sevanja gama (https://www.nasa.gov/feature/goddard/2023/nasa-s-fermi-captures-dynamic-gamma-ray-sky-in-new-animation) (angl. *gamma ray bursts*) sateliti v povprečju zaznajo nekajkrat na teden in nastanejo na dva načina. Dolgi izbruhi – tisti, ki v gama svetlobi trajajo več kot 2 sekundi – nastanejo ob smrti zelo masivnih, vrtečih se zvezd. Medtem ko se sredica zvezde sesede v nevtronsko zvezdo ali črno luknjo, iz središča navzven prevrtata zvezdo dva nasprotno usmerjena curka, ki se s skoraj svetlobno hitrostjo širita v okoliški prostor. Kratki izbruhi sevanja gama – ki v gama svetlobi trajajo manj kot 2 sekundi – pa nastanejo ob zlitju dveh nevtronskih zvezd in morda tudi ob zlitju nevtronske zvezde in črne luknje. Ob teh zlitjih nastajajo gravitacijski valovi, ki jih od leta 2015 detektirajo gravitacijski observatoriji LIGO (https://www.ligo.caltech.edu/) in Virgo (https://www.virgo-gw.eu/) .

Večina od doslej okoli 100 detektiranih kandidatov za *dogodke gravitacijskih valov* je nastala ob zlitjih dveh črnih lukenj. V takih primerih se sprosti velika količina energije v obliki gravitacijskih valov, ne pričakujemo pa, da bi nastala tudi svetloba oziroma t. i. elektromagnetni dvojnik (angl. *EM counterpart*). Drugače je v primeru zlitja dveh nevtronskih zvezd. V dogodku GW 170817 (https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.161101) , ki je nastal ob zlitju dveh nevtronskih zvezd, so poleg gravitacijskih valov zaznali tudi svetlobo: elektromagnetni dvojnik (https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa91c9) v gama svetlobi (izbruh sevanja gama GRB 170817) in v optičnih valovnih dolžinah. Odkritje optičnega dvojnika (https://doi.org/10.1126/science.aap9811) je omogočilo točno določitev položaja dogodka na nebu, identifikacijo galaksije gostiteljice in podrobna fotometrična (https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa8fc7) , spektroskopska (https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa9029) in polarimetrična (https://doi.org/10.1038/s41550-017-0285-z) opazovanja. Ta doslej edini primer detekcije gravitacijskih valov in svetlobe iz istega dogodka je prinesel več pomembnih rezultatov, med njimi dokaz, da zlitja nevtronskih zvezd povzročajo kratke izbruhe sevanja gama in da so pomemben (morda celo najpomembnejši) način nastanka težkih elementov (https://doi.org/10.1038/nature24298) (npr. zlata, platine) v vesolju.



Slika 2: Ilustracija dogodka gravitacijskih valov in kratkega izbruha sevanja gama GW/GRB 170817. Sevanju gravitacijskih valov (nakazani so s svetlo modrimi loki) sta sledila curka snovi, ki sta se gibala s skoraj svetlobno hitrostjo in sta proizvedla gama svetlobo (rožnata). Video si lahko ogledate tu (https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a012700/a012740/12740_NS_Merger_Update_H264_1080.mp4) . Vir: NASA Goddard space flight center/CI Lab

Večji kot je del neba, ki ga observatoriji redno opazujejo, večje je število ujetih »bliskov« oziroma tranzientov. To število se povečuje tudi z »globino«, do katere segajo opazovanja: čim šibkejše izvore lahko detektirajo, tem dlje v vesolje sežejo in zaobjamejo večjo prostornino. V tej je večje število vesoljskih teles in s tem večja verjetnost, da se zgodi tudi kak sicer redek dogodek, kakršen je trenutek smrti neke zvezde ali zlitje dveh nevtronskih zvezd. Povsem možno je, da so med opaženimi »bliski« tudi zaenkrat neznane vrste tranzientih pojavov, saj mnogi ugasnejo še preden uspemo pridobiti dovolj podatkov, da bi lahko razvozlali, kje in kaj se je zgodilo.



Slika 3: Observatorij Vere Rubin na gori Cerro Pachón v Čilu. Vir: Rubin Obs/NSF/AURA

Observatorij Vere Rubin in projekt LSST

Velike spremembe na številnih področjih astronomije, tudi astrofizikalnih tranzientov, obeta pregled neba v optični svetlobi *Legacy survey of space and time* (https://www.lsst.org/) , ki bo potekal na Observatoriju Vere Rubin (https://en.wikipedia.org/wiki/Vera_Rubin) (krajše: Rubin LSST). Observatorij je v gradnji na gori Cerro Pachón (https://goo.gl/maps/phTAJqJJHuiZUnwJ7) v Čilu, vodijo ga ZDA, v projektu pa sodeluje več kot 20 drugih držav, med njimi tudi Slovenija (Center za astrofiziko in kozmologijo (https://www.ung.si/sl/raziskave/center-za-astrofiziko-in-kozmologijo/)

Univerze v Novi Gorici). »Prvo luč« pričakujemo konec leta 2024, pričetek polnega znanstvenega delovanja v začetku 2025.

Projekt Rubin LSST je poseben po tem, da ima teleskop optični sistem iz treh zrcal, ki mu omogoča obenem velik premer zrcala (8,4 metra) in veliko zorno polje (9,6 kvadratnih stopinj). Z enim posnetkom bo pokril del neba, v katerega bi lahko spravili približno 40 polnih Lun. Celotno vidno nebo bo lahko posnel v nekaj nočeh. Opazovanja bo ponavljal 10 let, vsak del vidnega neba bo v povprečju obiskal okrog 800-krat in vsakič posnel sliko v enem izmed šestih barvnih filtrov (*ugrizy*). Globina posameznega posnetka v rdečem *r* filtru bo na logaritemski skali magnitud 24,5, kar pomeni, da bodo na njem vidni izvori svetlobe, ki so 25 milijonkrat temnejši od najšibkejših zvezd, ki jih še vidimo s prostimi očmi. Ko bodo vse posnetke istega dela neba sešteli, bodo segli še dlje – na njih bodo vidni tudi izvori, ki so še za 3 magnitude oziroma 16-krat temnejši. Zloženi en ob drugega bodo posnetki kazali časovno spremenljivost neba in bodo nekakšen barvni film vesolja.

Način, na katerega bo Rubin LSST (https://www.youtube.com/watch?v=h6QYjNjivDE) pregledoval nebo, je premišljeno izbran tako, da bo dobljeni (isti) set podatkov služil za raziskave na zelo različnih področjih. Štiri glavne znanstvene teme projekta Rubin LSST bodo: telesa v našem Osončju, naša Galaksija, temna energija in temna snov, tranzienti in spremenljive zvezde.

Spremenljive in tranzientne objekte bo Rubin LSST identificiral s primerjavo več posnetkov istega dela neba: nov posnetek bo z metodo odštevanja slik (angl. *image differencing*) primerjal s prejšnjimi, našel vse izvore svetlobe, ki so se premaknili ali spremenili sij (tudi če so se pojavili ali izginili nad/pod mejo detekcije) ter preveril, da gre za realen astronomski izvor (ne za pojav v ozračju ali instrumentalno napako). V samo 60 sekundah po tem, ko bo nov posnetek narejen, bo seznam vseh sprememb poslal izbranim *brokerjem* – računalniškim sistemom na različnih koncih sveta, ki jih bodo avtomatsko analizirali, na podlagi vseh razpoložljivih informacij klasificirali in informacije razposlali naprej znanstveni skupnosti. Raziskovalke in raziskovalci se bodo na podlagi teh informacij odločili, ali in za katere od njih bodo sprožili dodatna opazovanja z drugimi teleskopi in sateliti, da bodo lahko sestavili celovitejšo razumevanje dogodka.

Sam projekt Rubin LSST ne bo izvajal dodatnih sledilnih opazovanj za tranziente, ki jih bo odkril. Teh bo namreč ogromno, po ocenah bo vsako noč zaznal na tisoče ali celo milijone spremenljivih objektov in tranzientov. Med njimi naj bi bilo okoli 1000 supernov in 10 plimskih raztrganj zvezd na noč (https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6989%20) . Rubin LSST bo izjemoma opravljal le sledilna opazovanja dogodkov gravitacijskih valov. Lokacije izvorov gravitacijskih valov na nebu zaenkrat z gravitacijskimi detektorji LIGO in Virgo ni možno določiti zelo natančno. Rubin LSST pa je s velikim zornim poljem in hkrati »globino« posnetkov nadvse primeren instrument za iskanje njihovih optičnih dvojnikov. Ker poznamo doslej le en tak primer (GW 170817) in je pričakovani znanstveni pomen dodatnih zaznanih dvojnikov zelo velik, so pri Rubin LSST pripravljeni del opazovalnega časa nameniti tem sledilnim opazovanjem.

Izobilje podatkov Rubin LSST

Rubin LSST ima veliko zorno polje. Da ga bo ustrezno pokril, bo uporabljal največjo digitalno kamero (https://www.lsst.org/about/camera) doslej. Ta je velika kot majhen avtomobil in ima kar 3,2 milijardi slikovnih točk ter kotno ločljivost oziroma »ostrino vida«, s katero bi razločili žogico za golf z razdalje 40 kilometrov. Količina dobljenih podatkov bo ustrezno velik izziv. Vsako noč bo Rubin LSST zbral okoli 20 tera bajtov (TB) podatkov, kar je toliko, kolikor je *Sloan digital sky survey* (https://classic.sdss.org/) , ki je naredil podrobno 3D karto vesolja, zbral v desetletju med leti 2000 in 2010. Analiza podatkov bo večinoma potekala »na daljavo« (v oblaku) s posebnimi orodji in metodami. Podatkovna baza Rubin LSST bo vsebovala skupno 30 bilijonov opazovanj okoli 20 milijard zvezd naše Galaksije in 17 milijard galaksij. S tem bo Rubin LSST število znanih vesoljskih objektov povečal za cel red velikosti. Bogastvo in kakovost podatkov bosta omogočala iskanje odgovorov na kopico raznovrstnih astronomskih vprašanj, tudi takih, ki si jih v tem trenutku niti še ne znamo zastaviti.

Sodobni pregledi neba razkrivajo veliko bolj dinamično in minljivo podobo vesolja, kot jo kaže pogled na mirno nočno nebo s prostim očesom. Na nebu se pravzaprav ves čas nekaj dogaja: asteroidi se premikajo, spremenljive zvezde mežikajo, vmes pa v navidez povsem naključnem trenutku in na naključnem delu neba zvezde eksplodirajo ali se zlijejo. V nekaj letih bo naša slika vesolja s pomočjo Rubin LSST še veliko bogatejša in bolj pisana. Dosedanje izkušnje pri raziskovanju vesolja in kozmičnega (ne)reda so nas naučile, da pričakujemo tudi presenečenja – nepričakovana odkritja in nova vprašanja.

*** Slovenija in Rubin LSST**: Rubin LSST je primer globalne znanosti v globalnem svetu. Preko t. i. prispevkov v naravi (angl. *in-kind contributions*) je poln dostop do opazovalnih podatkov (celotna količina 60 PB) in vseh orodij za njihovo analizo omogočen tudi raziskovalcem in raziskovalkam iz drugih držav (ne le ZDA, ki financirajo projekt, in Čila, ki nudi lokacijo). Za Slovenijo to pomeni, da nam relativno majhen vložek omogoča polno sodelovanje pri raziskavah na vrhuncu tehnoloških in znanstvenih zmogljivosti in vse prednosti, ki jih to prinaša: dostop do vrhunskega znanja in ohranjanje mednarodne konkurenčnosti Slovenije na področju astronomije v naslednjem desetletju in še dlje. Raziskovalne teme, ki nas v Centru za astrofiziko in kozmologijo Univerze v Novi Gorici najbolj zanimajo, so tranzienti, zlasti plimska raztrganja zvezd v bližini masivnih črnih lukenj, dogodki gravitacijskih valov, supernove ter temna energija in temna snov.