

ISKANJE PLANETOV ZUNAJ NAŠEGA OSONČJA Z MIKROLEČENJEM

MATIJA BATIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Iskanje planetov z gravitacijskim mikrolečenjem temelji na ojačitvi svetlobe zvezde v ozadju zaradi prehoda planeta daleč pred njo. V članku so na začetku predstavljene preostale metode iskanja planetov ter diskusija o vprašanju, kaj sploh lahko definiramo kot planet. Nato sledi izpeljava preprostega modela mikrolečenja in vključitev popravkov modela. Nato sta predstavljeni dve izbrani odkritji planetov z mikrolečenjem, ki nakazujeta na težave pri uporabi te metode. Sledi pregled zmogljivosti, ki jih mikrolečenje dosega v primerjavi z ostalimi metodami, ter izpostavitve njegovih pomanjkljivosti. Članek se zaključi z napovedjo prihodnjih odkritij planetov z mikrolečenjem.

SEARCHING FOR EXOPLANETS THROUGH GRAVITATIONAL MICROLENSING

The search for planets through gravitational microlensing is based on the temporary magnification of light from a background star caused by a planet passing far in front of it. The article begins with a brief overview of other methods used to detect planets and discusses the question of what should be considered a planet. This is followed by a derivation of a simple microlensing model and a discussion of its corrections. Two selected planet discoveries made through microlensing are then presented, illustrating some of the challenges associated with this method. Finally, the capabilities of microlensing that cannot be matched by other detection techniques are discussed and compared with other methods and its limitations are presented. The article concludes with an outlook on future planet discoveries through gravitational microlensing.

1. Uvod

Z odkritjem prvega planeta zunaj našega Osončja okoli zvezde glavne veje¹ leta 1995 se je odprlo novo področje raziskav v astronomiji. Do sedaj smo odkrili več kot 8000 potrjenih² eksoplanetov. Na njihov obstoj večinoma sklepamo posredno in pri tem uporabljamo različne metode. V spodnjem seznamu na kratko opišemo te metode in število tako odkritih planetov (do 15. junija 2026):

- s slikanjem (1241, od tega 861 blodečih): Izmerimo svetlobo planeta kot samostojnega nebesnega telesa.
- z metodo radialne hitrosti (1362): Zaznamo spreminjanje hitrosti oddaljevanja zvezde od nas zaradi njenega gibanja okoli skupnega težišča s planetom. Hitrost določimo preko Dopplerjevega pojava na absorpcijskih črtah zvezde.
- s prehodi (4888): Zaznamo zmanjšanje svetlobnega toka z zvezde zaradi prehoda planeta čez zvezdino ploskev.
- z astrometrijo (295): Opazimo odmike od pričakovane lege zvezde v ravnini neba zaradi njenega gibanja okoli skupnega težišča s planetom.
- s časomerstvom (212): Izmerimo spreminjanje oddaljenosti zvezde od nas zaradi gibanja okoli težišča s planetom. To zaznamo kot periodične spremembe v času med prihodi signalov z zvezde (npr. pulzov), ki imajo sicer značilno periodično naravo.
- s spremenljivostjo časa prehoda (44): Zaradi prisotnosti dodatnih planetov prehodi že odkritega planeta preko ploskve zvezde niso v enakih časovnih razmakih.

¹V zvezdi glavne veje, kot je Sonce, se spaja vodik v helij.

²V podatkovni bazi exoplanet.eu šteje planet za potrjenega, če je njegov obstoj nedvoumno potrjen v sprejetem znanstvenem članku ali na strokovni konferenci.

- z mikrolečenjem (374): Odkrivamo jih preko karakteristične ojačitve zvezde v ozadju zaradi gravitacijskih učinkov teles vzdolž smeri pogleda.

Z ostalimi metodami smo odkrili približno 100 planetov [1].

V zadnjem času pridobiva na pomenu odkrivanje planetov z gravitacijskim mikrolečenjem, saj smo jih s to metodo odkrili več kot 200 v zadnjih petih letih. V prihodnjih letih je predvideno bistveno povečanje števila planetov, odkritih s to metodo, predvsem zaradi Vesoljskega teleskopa Nancy Grace Roman, ki je bil izstreljen 30. avgusta 2026.

2. Definicija planeta

Planeti so nastali z zgoščevanjem preostalega plina in prahu v protoplanetarnem disku, ki je obkrožal novonastalo zvezdo.

Prva definicija planeta, sprejeta na Generalni skupščini Mednarodne vesoljske zveze avgusta 2006 v Pragi, definira planet kot nebesno telo, ki: „(a) je v orbiti okoli Sonca, (b) ima dovolj mase, da njegova lastna gravitacija premaga sile togega telesa, tako da zavzame (praktično okroglo) obliko hidrostatskega ravnovesja, (c) je očistilo okolico svoje orbite“ [2]. To definicijo lahko razširimo na planete zunaj našega Osončja, tako da planet definiramo kot telo v orbiti okoli poljubne zvezde [3]. Za planete zunaj našega Osončja se uporablja tudi izraz eksoplaneti.

Definicija planeta je bila sprejeta v kontekstu našega Osončja in je povezana predvsem s spodnjo mejo mase planeta. Za klasifikacijo nebesnih teles zunaj našega Osončja pa je precej pomembnejša zgornja meja mase, saj izven Osončja lahkih teles še nismo odkrili.

Pri določanju zgornje meje mase planetov si lahko pomagamo s središčno temperaturo, saj je ta močno odvisna od mase objekta. Za začetek jedrskih reakcij je treba doseči določeno temperaturo. Zvezde so definirane kot tista nebesna telesa, ki so dovolj masivna, da v njih dosežemo temperaturo za fuzijo vodika v helij, proces, ki vodi do velike količine nastale energije in močno vpliva na nadaljnjo evolucijo telesa. Najnižja temperatura za fuzijo je potrebna pri fuziji devterija ($p + {}^2H \rightarrow \gamma + {}^3He$). Telesa, ki so prelahka za gorenje vodika, a dovolj masivna za gorenje devterija, imenujemo rjave pritlikavke. Njihova masa je med $\sim 13 M_J$ ³ in približno 80 M_J (nekoliko odvisno od prisotnosti elementov težjih od helija). Torej bi bilo smiselno definirati planete kot premalo masivne za jedrske reakcije, kar pomeni lažje od $\sim 13 M_J$ [4].

Takšna meja je popolnoma smiselna, vendar se pri iskanju planetov pojavi problem, ker je površina nekoliko bolj masivnih teles enaka. Artie P. Hatzes in Heike Rauer [5] sta opazila, da masa in povprečna gostota objektov med 0,3 M_J in 60 M_J zelo dobro sledita linearni odvisnosti, ki se na zgornji meji obrne. Prav tako imajo telesa na tem območju radij podoben Jupitrovemu. Zato predlagata, da se telesa med 0,3 M_J in 60 M_J štejejo za orjaške planete.

2.1 Blodeči planeti

Blodeči planeti so telesa planetarnih mas, ki so bila izvržena iz svoje tirnice okoli zvezde.

Ko zaznamo prosto telo planetarne mase, pri bolj masivnih telesih ni mogoče ugotoviti, ali so nastala kot planeti ali s kolapsom medzvezdnega molekularnega oblaka, kot nastajajo tudi zvezde. Spodnja meja mase teles, ki lahko nastanejo s kolapsom medzvezdnega oblaka, ni znana; trenutno ocenjujemo da znaša $\sim 4 M_J$ ali manj. Telesa planetarne mase, ki so nastala s kolapsom oblaka in ne dosežejo mase zvezde, tudi štejemo med rjave pritlikavke.

O načinu nastanka odkritih teles Jupitrovih mas lahko le sklepamo. Mlajša kot je zvezdna okolica, manjša je verjetnost, da gre za izvržen masivni planet, saj je bilo malo časa, da bi tak planet nastal in bil izvržen. Verjetnost je manjša tudi zaradi redkosti tako masivnih planetov, zlasti okoli manj masivnih zvezd [6].

³ M_J označuje maso Jupitra, ki znaša $1,898 \cdot 10^{27}$ kg.

V astrofizikalni skupnosti ni točno določene meje med planeti in rjavimi pritlikavkami. Večina katalogov eksoplanetov za zgornjo mejo uporablja $60 M_J$, to definicijo uporabljam tudi v tem članku. Ker imajo izmerjene mase tudi napake, telo obravnavam kot planet, če je mejna masa $60 M_J$ znotraj intervala zaupanja meritve. Vse proste rjave pritlikavke do te meje štejem med blodeče planete. Če masa planeta ni znana, se za mejni polmer planeta privzame $\sim 2 R_J$ ⁴ [1].

3. Izpeljava gravitacijskega mikrolečenja

Izpeljava je povzeta po viru [7]. V splošni teoriji relativnosti je prostor-čas ukrivljen zaradi prisotnosti mase. Svetloba se po ukrivljenem prostoru giblje po najkrajši poti. To se v tridimenzionalnem prostoru odraža kot odklon svetlobnega žarka, ki ga označimo z α (slika 1). V limiti majhnih kotov ta odklon znaša

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 b}, \quad (1)$$

kjer je b vpadni parameter (slika 1). Ta kot je dvakrat večji, kot bi ga dobili za klasično točkasto telo z maso m , ki se giblje s hitrostjo c , ko je še daleč stran od mnogo bolj masivnega telesa z maso M in pot nadaljuje po hiperbolični tirnici. K sreči se nam masa v klasični izpeljavi pokrajša. Če se masivni objekt mase M , ki deluje kot leča L , znajde na zveznici med opazovalcem O in točkastim svetilom S , je situacija osno simetrična (slika 1). Opazovalec vidi sliko svetila kot obroč s kotnim polmerom θ_E okoli leče. Ob predpostavki, da je kot α veliko manjši od enega radiana in posledično razdalja b veliko manjša od D_{OL} , je tudi kotni polmer Einsteinovega obroča θ_E veliko manjši od enega radiana.

Zato velja $SI = \theta_E D_{OS} = \alpha D_{LS}$ ter $b = \theta_E D_{OL}$. Za α vstavimo uklonski kot iz enačbe (1) in po združitvi obeh enačb dobimo $\theta_E D_{OS} = \frac{4GM \cdot D_{LS}}{c^2 \cdot \theta_E D_{OL}}$. Torej je kotni polmer Einsteinovega obroča

$$\theta_E = \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_{OS} D_{OL}} \right)^{1/2}. \quad (2)$$

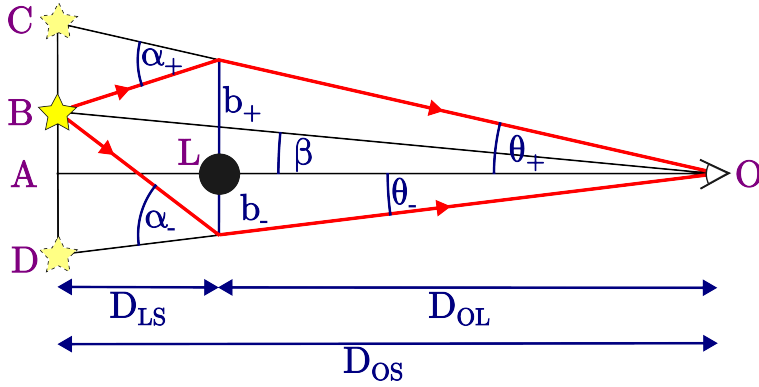
Če je kot θ_E majhen, mora biti poravnava za pojav Einsteinovega obroča izjemno natančna. Če poravnava ni popolna, se simetrija sistema poruši. V primeru, ko je svetilo za majhen kot β odmaknjeno od zveznice opazovalca in leče (slika 2), velja $AB + BC = AC$, oziroma $\beta D_{OS} + \alpha D_{LS} = \theta D_{OS}$. Če v to enačbo vstavimo uklonski kot α iz enačbe (1) in upoštevamo, da je tudi v tem primeru $b = \theta D_{OL}$, dobimo $\beta D_{OS} + \frac{4GM \cdot D_{LS}}{c^2 \cdot \theta D_{OL}} = \theta D_{OS}$. Enačbo delimo z D_{OS} in v drugem členu na levi strani prepoznamo izraz za θ_E^2 . Dobljeno enačbo še množimo s θ in po preureditvi izpeljemo kvadratno enačbo gravitacijskega lečenja za točkasto maso za primer svetila izven osi:

$$\theta^2 - \beta\theta - \theta_E^2 = 0 \quad (3)$$

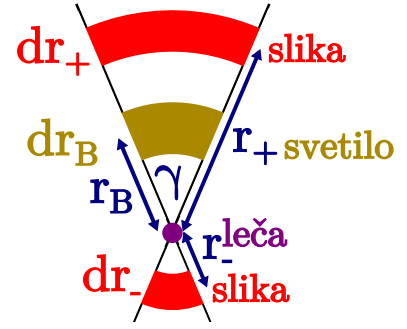
z rešitvama

$$\theta_{\pm} = \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2}. \quad (4)$$

⁴ R_J označuje radij Jupitra, ki znaša $7,1492 \cdot 10^7$ km.



Slika 2. Skica gravitacijskega lečenja pri svetilu (B), izmaknjenem od osi med opazovalcem (O) in lečo (L) za majhen kot β . Opazovalec sedaj vidi dve sliki svetila, ki izgledata, kot da bi prihajali iz smeri točk C in D. Točka A leži na zveznici opazovalca in leče, oddaljena za D_{OS} . Razdalje so označene enako kot na sliki 1.



Slika 3. Skica stanja v ravnini neba, kot ga vidi opazovalec. Leča se nahaja v vrhu kota. Svetilo zavzema tanek krožni lok debeline dr_B in kotne širine γ na razdalji r_B od vrha kota. Zaradi gravitacijskega lečenja nastaneta dve sliki svetila na razdaljah r_+ in r_- od vrha kota ter debelinama dr_+ in dr_- .

V primeru gravitacijskega mikrolečenja so ti koti tako majhni (reda velikosti ločnih milisekund ali pa še manj), da jih s teleskopi ne moremo razločiti. Na prisotnost lečenja pa lahko sklepamo na podlagi ojačitve slike lečenega svetila. Svetilo in nastali sliki nista popolnoma točkasti. V ravnini neba (slika 3) vidimo svetilo in sliki kot tanke krožne loke pod kotom γ , v vrhu katerega se nahaja leča. Površina tankega krožnega loka znaša $r\gamma \cdot dr$. V primeru svetila na razdalji leče je $r_B = \beta D_{OL}$, v primeru slik pa $r_{\pm} = \pm \theta_{\pm} D_{OL}$, kjer sem upošteval, da je $\theta_- < 0$. Povečava (tj. razmerje med površino slike in površino svetila) za posamezno sliko torej znaša

$$A_{\pm} = \pm \frac{\theta_{\pm} D_{OL} \gamma \cdot D_{OL} d\theta_{\pm}}{\beta D_{OL} \gamma \cdot D_{OL} d\beta} = \pm \frac{\theta_{\pm}}{\beta} \frac{d\theta_{\pm}}{d\beta} = \pm \frac{\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}}{2\beta} \cdot \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{2\beta}{2\sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}} \right). \quad (5)$$

Pri gravitacijskem lečenju se ohranja površinska svetlost, saj svetilo seva v vse smeri enako in je kroglja na razdalji D_{LS} od svetila enakomerno osvetljena. Ojačitev je torej enaka vsoti povečav za zgornjo in spodnjo sliko:

$$\begin{aligned} A &= A_+ + A_- = \frac{u + \sqrt{u^2 + 4}}{4u} \left(1 + \frac{u}{\sqrt{u^2 + 4}} \right) - \frac{u - \sqrt{u^2 + 4}}{4u} \left(1 - \frac{u}{\sqrt{u^2 + 4}} \right) \\ &= \frac{1}{2u} \left(\sqrt{u^2 + 4} + \frac{u^2}{\sqrt{u^2 + 4}} \right) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}, \end{aligned} \quad (6)$$

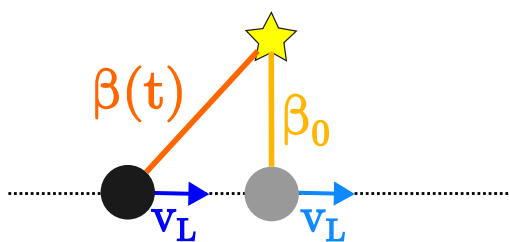
kjer uvedemo $u = \frac{\beta}{\theta_E}$. Če je $\beta \gg \theta_E$, je ojačitev enaka ena, torej svetlobni tok ni povečan. Pri $u = 1$ je ojačitev $A = 1,34$, pri zelo dobrih poravnava ($u \ll 1$) pa ojačitev narašča kot $1/u$. Ojačitev je torej znatna, kadar je $\beta \lesssim \theta_E$.

Poravnava se spreminja, ker se telesa v vesolju gibljejo. Recimo, da opazovalec in svetilo mirujeta, leča pa se premika s projekcijo hitrosti v_L pravokotno na smer pogleda (slika 4). Če je ob najmanjšem odstopanju leče od zveznice med svetilom in opazovalcem čas $t = t_0$, je kot med lečo in svetilom ob poljubnem času

$$\beta(t) = \sqrt{\beta_0^2 + \left(\frac{v_L(t - t_0)}{D_{OL}} \right)^2}. \quad (7)$$

Torej je ojačitev kot funkcija časa

$$A(t) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}, \quad u(t) = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{t - t_0}{\tau} \right)^2}, \quad (8)$$



Slika 4. Skica stanja v ravnini, pravokotni na smer pogleda. Svetilo (zvezdica) in opazovalec mirujeta, leča pa se giblje s projekcijo hitrosti v_L pravokotno na smer pogleda. Kotna razdalja med svetilom in lečo je označena z $\beta(t)$, pri čemer je β_0 najmanjša kotna razdalja, ki jo leča doseže ob času $t = t_0$. Položaj leče ob času $t = t_0$ je prikazan s svetlejšim odtenkom.

kjer uvedemo značilni čas lečenja $\tau = \theta_E D_{OL}/v_L$, v katerem se leča v ravnini neba premakne za Eisteinov kotni polmer.

3.1 Preverjanje predpostavke

Pri gravitacijskem lečenju je uklonski kot obratno sorazmeren z vpadnim parametrom. Svetloba doseže največji uklonski kot, ko je njen vpadni parameter enak radiju leče, saj se žarki z manjšim vpadnim parametrom ustavijo v njeni notranjosti. Za primer Sonca ta kot znaša

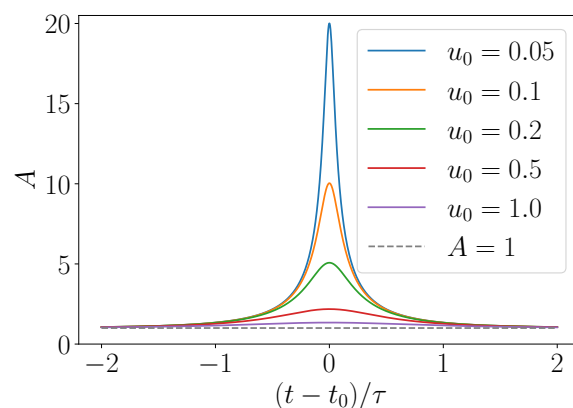
$$\alpha = \frac{4GM_\odot}{c^2 R_\odot} = 8,47 \cdot 10^{-6} \text{ rad} = 1,75''.$$
 (9)

Najtežje zvezde dosegaajo $100 M_\odot$ ⁵. Z izjemo končnih stanj masivnih zvezd pa zvezde niso manjše od $0,01 R_\odot$ (take tudi ne presegajo znatno mase Sonca). Torej, z izjemo ekstremnih primerov, uklonski kot ostane pod 1° in je približek majhnih kotov ustrezen.

4. Svetlobna krivulja mikrolečenja

Iz enačbe (8) je razvidno, da je ojačitev odvisna le od relativne natančnosti poravnave u . Tako lahko za poljubno majhno maso dosežemo velike ojačitve, le večjo srečo moramo imeti (slika 5). Da znatna ojačitev zaradi telesa planetarne mase ni bistveno manj verjetna od ojačitve telesa zvezdne mase, pripomore korenska odvisnost mase v enačbi (2). Zato je za enako ojačitev kot pri leči Sončeve mase potreben približno tridesetkrat manjši β za lečo Jupitrove mase oziroma približno šeststokrat manjši β za lečo Zemljine mase.

Trenutno je omejujoči dejavnik pri zaznavanju ojačitve leč majhnih mas kratek značilni čas. Če vzamemo tipično vrednost lastnega gibanja zvezd $v_L/D_{OL} \sim 15 \mu\text{as}/\text{dan}$, je značilni čas lečenja za planete mase Zemlje nekaj ur, za planete mase Jupitra nekaj dni, za zvezde Sončeve mase pa nekaj mesecev [8].



Slika 5. Svetlobne krivulje mikrolečenja za 5 različnih vrednosti najboljše relativne poravnave $u_0 = \beta_{\min}/\theta_E$, izračunane po enačbi (8).

4.1 Svetlobna krivulja mikrolečenja zaradi zvezde s planetom

Planet, ki se giblje okoli svoje zvezde, zaznamo tako, da je na svetlobno krivuljo mikrolečenega svetila zaradi planetove zvezde naložena bistveno ožja krivulja mikrolečenja zaradi planeta. Ojačitev zaradi planeta nastopi, kadar sta planet in svetilo res dobro poravnana ali kadar se slika svetila, lečena zaradi planetove zvezde, premakne mimo planeta. Ker je ta slika (enačba (4)) približno na kotni oddaljenosti θ_E od planetove zvezde, je za planete na taki oddaljenosti največja verjetnost, da jih odkrijemo [8].

⁵ $M_\odot$ označuje maso Sonca, ki znaša $1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg} \approx 1048 M_J$.

5. Popravki k obravnavanemu modelu mikrolečenja

Večino dogodkov mikrolečenja lahko opišemo z doslej opisanim modelom točkaste leče in svetila. Pri dolgotrajnih dogodkih mikrolečenja, torej takšnih, ki trajajo znaten del periode Zemlje okoli Sonca, je treba upoštevati popravke zaradi gibanja Zemlje okoli Sonca. Opazimo lahko celo razlike v svetlobni krivulji zaradi različnega zornega kota pri opazovanjih iz različnih krajev na Zemlji ali iz Zemlje in satelita. Zaznamo lahko tudi spreminjanje krivulje zaradi vrtenja Zemlje okoli svoje osi. Vsi ti učinki so posledica paralakse.

Če imamo v zornem polju teleskopa blizu lečene zvezde še eno zvezdo, ki je fotometrično ne moremo ločiti od lečene, je navidezna ojačitev sistema zvezd, ki ga vidimo kot eno svetilo, manjša. Ta pojav vpliva tudi na krajše izmerjeno karakteristično trajanje lečenja. Temu pojavu pravimo mešanje (ang. *blending*). Zato zelo gosta zvezdna polja niso najlažja za opazovanje.

Če je vpadni parameter b zvezde, ki deluje kot svetilo, primerljiv z razsežnostjo svetila ali manjši, obravnava svetila kot točkastega ni ustrezna. Takrat je za določitev mase leče potrebno integrirati po površini svetila. Seveda moramo za to poznati kotno razsežnost svetila. Iz znane oddaljenosti in gostote svetlobnega toka, ki nas doseže od svetila, lahko izračunamo njegov izsev. Če poznamo še njegov spekter, lahko določimo njegov radij in posledično kotno velikost. Če so učinki razsežnosti svetila znatni, lahko določimo celo lastno gibanje leče, torej kotno gibanje v ravnini, pravokotni na smer pogleda.

V približno 10% primerov zaznamo mikrolečenje na sistemu dveh teles, ki sta v vlogi leče, kar lahko povzroči svetlobne krivulje, ki so precej drugačne od krivulje za eno lečo, še posebej, če sta masi obeh leč primerljivi in imata obhodni čas primerljiv s trajanjem lečenja ali krajši. Prav tako je zanimiv pojav lečenje dvojnega sistema kot svetila [8].

6. Opazovanje dogodkov mikrolečenja

Zaradi redkosti dogodkov mikrolečenja in njihove nenapovedljivosti nima smisla usmeriti teleskopa v eno zvezdo in meriti gostoto svetlobnega toka, ki dospe do nas. To je smiselno izvajati le na velikem vzorcu zvezd v polju, katerim pogosto merimo svetlobni tok. Pri tem si pomagamo s teleskopom s širokim zornim poljem.

Bolj kot je leča oddaljena od svetila, večji bo učinek lečenja. To lahko podpremo tako, da v enačbo (2) vstavimo $D_{OS} = D_{LS} + D_{OL}$. Ko novo enačbo odvajamo po D_{LS} , dobimo

$$\frac{d\theta_E}{dD_{LS}} = \left(\frac{4GM}{2c^2} \right)^{1/2} \frac{D_{OL}^{1/2}}{D_{LS}^{1/2} (D_{LS} + D_{OL})^{3/2}} > 0. \quad (10)$$

Poleg tega je pri bolj oddaljenem svetilu večji volumen vesolja, v katerem prisotno telo povzroči ojačitev. Zato je ugodno izbrati za pregled čim bolj gosto zvezdno polje svetlih zvezd, ki je dovolj oddaljeno od nas, a ne preveč, da izmerjena gostota svetlobnega toka zvezd ni prenizka. Zato preglede za iskanje dogodkov mikrolečenja usmerjamo skozi Baadejevo okno, območje proti središču Galaksije z razmeroma majhno količino medzvezdnega prahu, ki se nahaja približno 8 kpc⁶ stran od nas v smeri ozvezdja Strelca. Ta smer je zelo primerna za preglede tudi zato, ker se tako mi kot središčna odebelitev nahajamo v zvezdnem disku, ravnini večine zvezd v naši Galaksiji. Torej je vzdolž smeri pogleda do središčne odebelitve veliko zvezd, ki lahko povzročijo mikrolečenje.

V gostem zvezdnem polju v središčni odebelitvi lahko pride tudi do mešanja. Če na zvezdi v središčni odebelitvi zaznamo mikrolečenje s prisotnim mešanjem, moramo pri določanju lastnosti leče

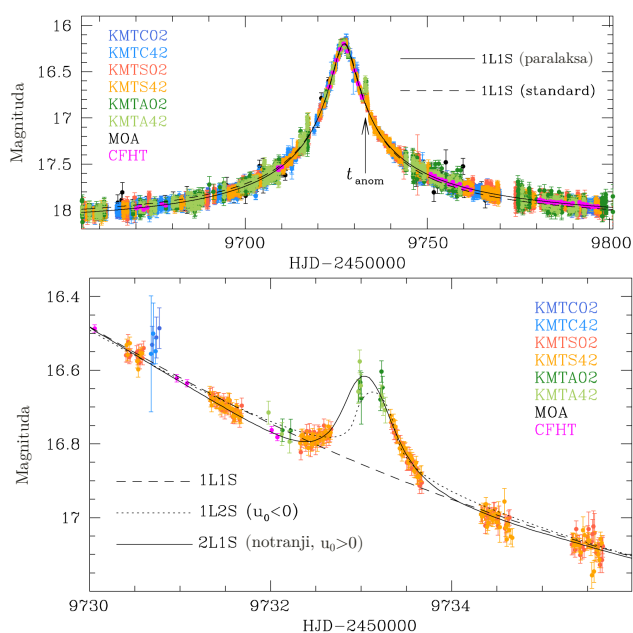
⁶Parsek (pc) je enota za merjenje astronomskih razdalj in ustreza razdalji, pri kateri je astronomska enota, približno povprečna razdalja med Zemljo in Soncem, vidna pod kotom ene ločne sekunde. En parsek je približno 3,26 svetlobnega leta.

upoštevati vpliv sosednje zvezde. To lahko izmerimo s teleskopi v vesolju ali s teleskopi z adaptivno optiko, ki zmanjšajo razmazanje slike zaradi učinkov atmosfere s približno $1''$ na uklonsko ločljivost teleskopa. Da se zvezde dovolj razmaknejo in je ta meritev mogoča, je treba počakati približno desetletje [8].

Pri iskanju dogodkov mikrolečenja v haloju⁷ naše Galaksije pregledujejo astronomi polje v smeri bližnjih galaksij Veliki in Mali Magellanov oblak. Ker se telesa v haloju gibljejo počasneje, mikrolečenja trajajo dlje in jih je zato lažje opaziti in izmeriti [9].

Pregledi neba s širokokotnim teleskopom se osredotočijo na izbrano zvezdno polje. Ker je bilo v preteklosti zorno polje teleskopov precej manjše od proučevanega zvezdnega polja, zvezd niso spremljali stalno. Zaradi snemanja več zvezd v eni ekspoziciji trajanje ekspozicije in položaj lečene zvezde na sliki nista bila optimalna. Zato so pregledi neba kmalu po razvoju sposobnosti zgodnjega odkrivanja mikrolečenja že v levem repu svetlobne krivulje (slika 5) te dogodke hitro objavljali, da omogočijo spremljanje ostalim astronomom s teleskopi, razporejenimi po Zemlji, ki se posvetijo posameznemu dogodku. To omogoča bolj kontinuirano sledenje svetlobni krivulji in optimizacijo ekspozicije vsaj za zanimivejše dogodke. Danes je zaradi večjih zornih polj preglednih teleskopov glavna vloga nadaljnjih opazovanj z drugimi teleskopi zapolnjevanje vrzeli (npr. podnevi) ter potrditev opazovanj [8].

7. Določanje parametrov iz meritev



Slika 6. Meritve magnitude in najboljše prilagoditvene krivulje različnih modelov (pred L je število leč, pred S pa število svetil) za dogodek mikrolečenja z lečo MOA-2022-BLG-249. Na vodoravni osi je heliocentrični julijanski datum, ki šteje dni od 1. 1. 4713 pr. n. št. ob 12.00 po UTC. Prirejeno po: [10].

HJD - 2450000 = 9721,48 dneva) v mednarodnem sodelovanju Microlensing Observations in Astrophysics (MOA). V svetlobni krivulji, ki je dosegla vrh 27. maja, so približno šest dni po vrhu zaznali perturbacijo, ki se najbolj sklada s prisotnostjo planeta. Razsežnost in oddaljenost lečene

Običajno poznamo približno oddaljenost svetila, saj je to pogosto zvezda v središčni odebelitvi, ki je od nas oddaljena ~ 8 kpc. O leči običajno vemo še manj, le to, da nam je bližje kot svetilo. V številnih primerih torej razdalj ne poznamo in jih zaradi nastopanja tako mase kot oddaljenosti v enačbi (2) ne moremo dobiti iz prilagajanja svetlobni krivulji. Iz nje lahko dobimo le razmerje mase planeta in zvezde preko razmerja karakterističnih časov lečenja. V večini primerov smo torej primorani za določitev parametrov sistema uporabiti statistiko. Običajno uporabimo Bayesovo analizo z galaktičnim modelom, ki upošteva porazdelitev zvezd v Galaksiji, tipične hitrosti zvezd, verjetnost leč različnih mas itd.

7.1 Planet MOA-2022-BLG-249b zvezde MOA-2022-BLG-249

V članku [10] iz junija 2023 so avtorji z obdelavo podatkov s sredine leta 2022 poročali o odkritju rdeče pritlikavke s super-Zemljo. Dogodek so prvi zaznali 22. maja 2022 (na sliki 6 ob

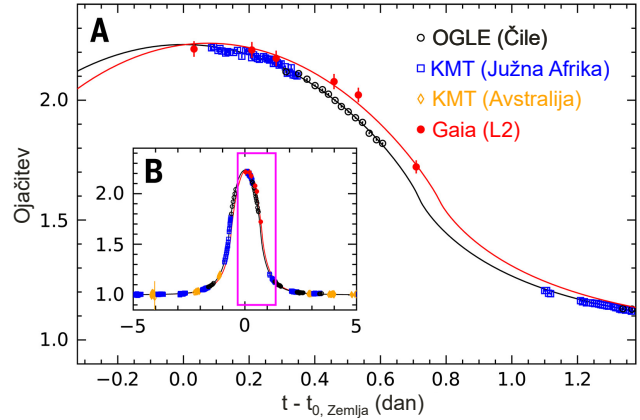
⁷To je krogla, ki objema zvezdni disk z značilnimi spiralnimi rokavi naše Galaksije in v kateri je precej manjša gostota zvezd.

zvezde so ocenili iz njenih lastnosti. Lečenje je trajalo več mesecev, zato so lahko opazili učinke gibanja Zemlje okoli Sonca. Ker v meritvah ni bilo očitnih vplivov razsežnosti svetila, so lahko določili le zgornjo mejo tega vpliva in posledično najmanjšo $\theta_{E, \min} \approx 0,48$ mas. Iz teh podatkov oddaljenosti in mase niso uspeli določiti, zato so uporabili Bayesovo analizo. Ugotovili so, da gre za $D_{OL} = (2,00 \pm 0,42)$ kpc oddaljen sistem zvezde mase $M_* = (0,18 \pm 0,05) M_{\odot}$ s planetom mase $M_p = (4,83 \pm 1,44) M_{\oplus}$,⁸ ki je bil med lečenjem na projicirani razdalji $a_{\perp} \sim 1,5$ a.e.

7.2 Blodeči planet KMT-2024-BLG-0792/OGLE-2024-BLG-0516

V članku [11] iz januarja letos so avtorji z obdelavo podatkov z začetka maja 2024 poročali o odkritju blodečega planeta Saturnove mase. Dogodek sta neodvisno zaznala dva pregleda neba za iskanje dogodkov mikrolečenja na Zemlji, zato ima telo tudi dve imeni. Izmerjena ojačitev je prikazana na sliki 7.

S pomočjo popravkov zaradi razsežnosti lečene rdeče orjakinje v ozadju so določili $\theta_E = (18,6 \pm 0,9) \mu\text{as}$. Na podlagi lastnosti lečene zvezde so določili njeno oddaljenost kot $D_{OS} = 7,93^{+0,54}_{-0,51}$ kpc. Pri določanju oddaljenosti planeta pa so imeli veliko srečo; blizu največje ojačitve je satelit Gaia v približno 1,5 milijona kilometrov oddaljeni točki L2 izmeril svetlost lečene zvezde kar šestkrat, čeprav običajno isto zvezdno polje obišče le približno enkrat mesečno. Tako so lahko na podlagi zamika približno 1,9 ure med največjima ojačitvama na Zemlji in pri Gaji določili oddaljenost planeta kot $D_{OL} = 3,05^{+0,58}_{-0,43}$ kpc. Masa blodečega planeta tako znaša $M = 0,219^{+0,075}_{-0,046} M_J$. Ta primer je prvi, pri katerem za določitev mase blodečega planeta niso potrebovali Bayesove analize.



Slika 7. Meritve ojačitve in najboljše prilagoditvene krivulje za dogodek mikrolečenja z lečo KMT-2024-BLG-0792/OGLE-2024-BLG-0516. Prirejeno po: [11]. Objavljeno z dovoljenjem avtorja.

8. Primerjava z ostalimi metodami odkrivanja planetov

Kot je razvidno s slike 8, metoda iskanja planetov z mikrolečenjem seže bistveno dlje od ostalih; le časomerstvo, metoda za eksotične zvezde z masivnimi planeti, ji pride blizu. Preostale metode so omejene na našo neposredno okolico.

Z vsemi metodami je večina odkritih planetov precej masivnih, ker jih je lažje odkriti, vendar je to odstopanje manj očitno pri mikrolečenju. Čeprav je lažje odkriti čim bolj masiven planet, je zelo masivnih planetov odkritih manj kot nekoliko manj masivnih, zato lahko sklepamo, da so precej redki.

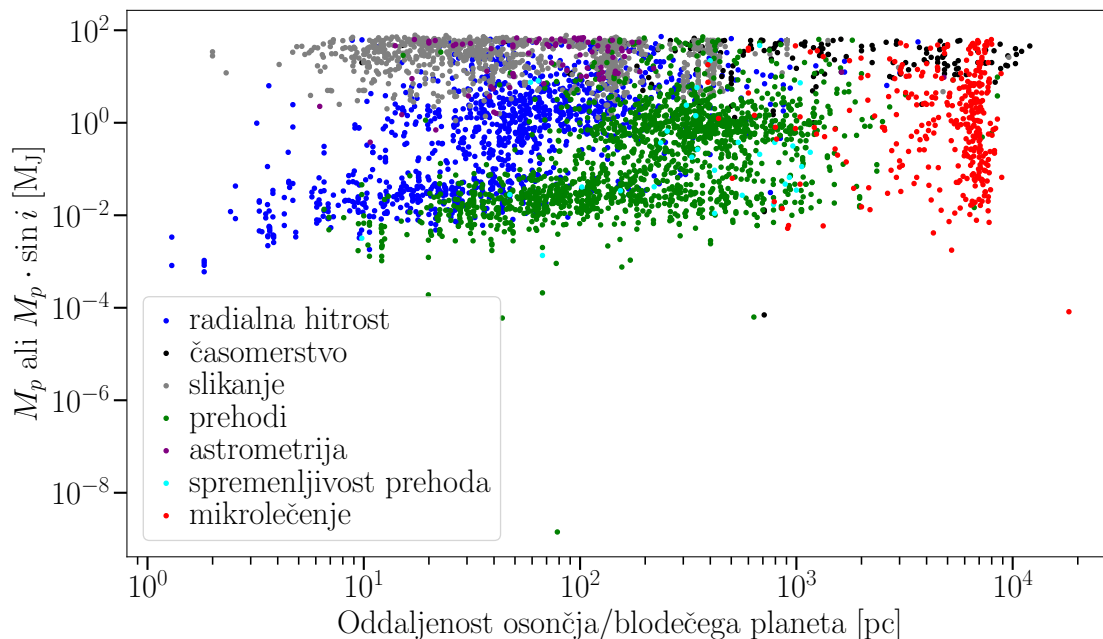
Pri merjenju radialne hitrosti, prehodih, spremenljivosti časa prehoda in časomerstvu so najlažje opazljivi planeti z manjšimi velikimi polosmi (slika 9). Za slikanje in astrometrijo je ugodnejša daljša velika polos, a v primeru astrometrije ne preveč dolga, da lahko opazimo premike v času trajanja pregleda neba. Lažji izmed odkritih planetov z veliko polosjo podobno Zemljini ali večjo so bili vsi odkriti z mikrolečenjem. Daljše velike poloski kot z mikrolečenjem smo izmerili le s slikanjem, a so tako odkriti planeti nadpovprečno masivni.

Zaznava prehoda planeta preko zvezdine ploskvice je možna le, ko je inklinacija⁹ sistema blizu 90° . Amplituda radialne hitrosti je večja, čim bližje je inklinacija 90° . Za astrometrijo in slikanje

⁸ $M_{\oplus}$ označuje maso Zemlje, ki znaša $5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg} \approx 0,0031 M_J$.

⁹To je kot med normalo na tir in smerjo proti Zemlji.

pa je nekoliko ugodnejša čim nižja inklinacija. Pri mikrolečenju je najboljša inklinacija takšna, da planet leži na projicirani kotni razdalji θ_E .



Slika 8. Mase in oddaljenosti od nas za poznane planete do 15. 6. 2026. Za nekatere planete, odkrite z radialno hitrostjo, nimamo podatka o masi, saj se s to metodo lahko določi le $M_p \sin i$, zato je za te primere na grafu prikazana ta vrednost, torej spodnja meja mase. Zaradi preglednosti napake niso prikazane. Vir podatkov: [1].

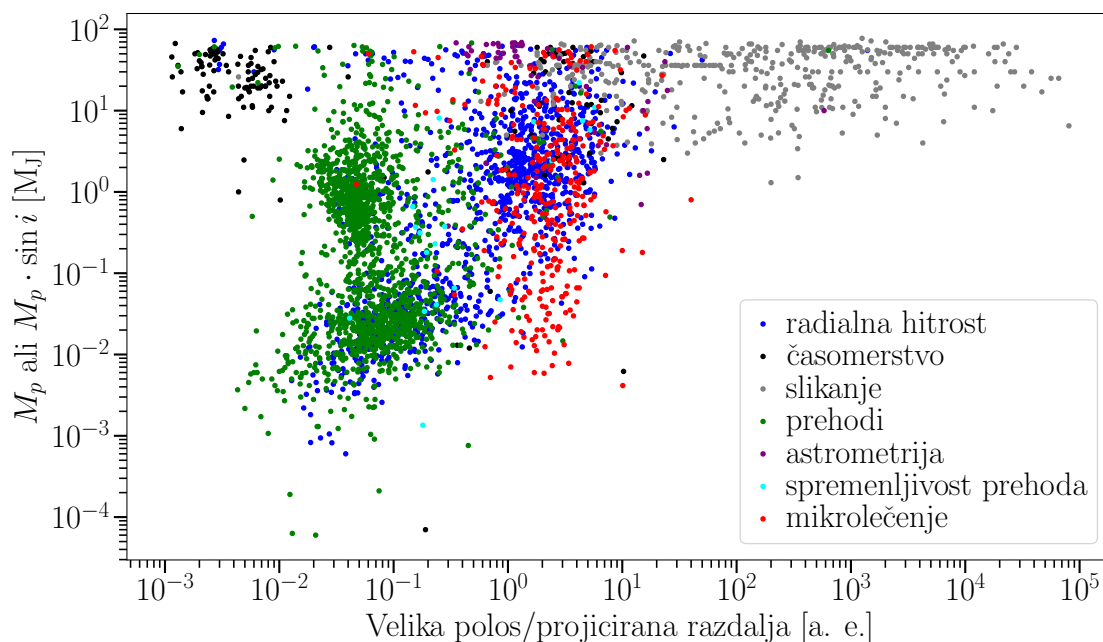
Pojavi za detekcijo planeta so v vseh primerih, razen pri mikrolečenju, periodične narave, kar pomeni, da je meritve mogoče kasneje enostavno preveriti, izboljšati njihovo natančnost ali jih izvesti še z drugimi metodami. Mikrolečenje pa je enkratni dogodek, poleg tega sta zvezda in planet običajno preveč oddaljena in prešibka, da bi bila uporaba drugih metod mogoča.

Mikrolečenje je edina metoda, ki ima potencial zaznati običajne blodeče planete, ki so manjši in temni. Blodeče planete lahko odkrivamo še s slikanjem, ki pa je omejeno na večje, čim bolj vroče in torej nedavno izvržene planete. Ta potencial še ni bil izkoriščen, saj smo z mikrolečenjem doslej zaznali le približno 15 blodečih planetov, če k njim ne štejemo sistemov rjave pritlikavke s planetom.

9. Prihodnost iskanja planetov z mikrolečenjem

V naslednjih letih pričakujemo znatno povečanje števila planetov, odkritih z gravitacijskim mikrolečenjem. Pregled DREAMS (Dark Energy Camera Rogue Earths and Mars Survey) je za obdobje 2025–2028 pridobil 56 noči opazovanj na štirimetrskem teleskopu Blanco v Čilu. Teleskop je opremljen s kamero DECam s širokim zornim poljem 3 deg^2 , ki pokrije celotno preiskovano polje velikosti $\sim 5 \text{ deg}^2$ v smeri proti središčni odebelitvi v dveh ekspozicijah. Februarja 2026 so objavili prvo odkritje in proučili ločljivost za detekcijo blodečih planetov, ki predvideva detekcijo planetov Marsove mase ($\sim 0,1 M_\oplus$) v bližini središčne odebelitve in celo Lunine mase ($\sim 0,01 M_\oplus$) za planete v disku Galaksije, kar je možno predvsem zaradi precej več zbrane svetlobe posameznega svetila kot v drugih pregledih za iskanje mikrolečenja. V pregledu pričakujejo odkritje več kot 100 blodečih planetov z mikrolečenjem [12–14].

Izstrelitev Nasinega vesoljskega teleskopa Nancy Grace Roman v točko L2, oddaljeno 1,5 milijona kilometrov je bila 30. avgusta 2026. To je prvi vesoljski teleskop, ki bo del opazovalnega časa namenil iskanju dogodkov mikrolečenja. Del misije, namenjen mikrolečenju, bo pregledoval polje veliko $1,7 \text{ deg}^2$ proti največji zgostitvi zvezd v središčni odebelitvi, ki ga bo pregledal v šestih



Slika 9. Mase in velike polosi od nas za poznane planete do 15. 6. 2026. Za nekatere planete, odkrite z radialno hitrostjo, nimamo podatka o masi, saj se s to metodo lahko določi le $M_p \sin i$, zato je za te primere na grafu prikazana ta vrednost, torej spodnja meja mase. Kadar podatka o veliki polosi ni, kar je običajno pri slikanju in mikrolečenju, je uporabljena projicirana razdalja na ravnino neba. Zaradi preglednosti napake niso prikazane. Vir podatkov: [1].

sekvencah, tako da bo celotno polje pregledal v 12 minutah. Ta pregled bodo izvajali v šestih obdobjih spomladi in jeseni v petletni misiji, skupaj 438 dni. Teleskop bo imel ločljivost za detekcijo planetov z maso nad $\sim 0,02 M_{\oplus}$. V tem času pričakujejo, da bodo opazili ~ 1400 planetov, težjih od $\sim 0,1 M_{\oplus}$, v tirnicah okoli zvezd in ~ 250 blodečih planetov z maso med $\sim 0,1 M_{\oplus}$ in $\sim 100 M_{\oplus}$. Če bomo imeli srečo, bomo morda odkrili tudi kakšno masivno eksoluno v orbiti okoli večjega planeta. Opazovanja iz vesolja bodo ob hkratnih opazovanjih z Zemlje v številnih primerih omogočila določitev oddaljenosti leče [15–19].

Za iskanje dogodkov mikrolečenja na celotnem nebu bo poskrbela Legacy Survey of Space and Time na observatoriju Vere C. Rubin v Čilu, ki je začel z 10-letnim zbiranjem podatkov. Z ogromnim zornim kotom $9,6 \text{ deg}^2$ bo večino časa slikal iz Čila vidno nočno nebo v krajših ekspozicijah. Večino neba bo obiskal dvakrat s približno 33 minutami vmes in nato znova dva do štiri dni kasneje. Vse podatke bodo dnevno obdelali in poslali sedem milijonov kategoriziranih obvestil o zanimivih dogodkih upravičenim astronomom. Del teh dogodkov bodo tudi dogodki mikrolečenja zaradi masivnejših leč. Ob podrobnejšem spremljanju teh dogodkov z drugimi teleskopi bomo odkrili tudi kakšen planet ob taki zvezdi [20].

LITERATURA

- [1] The Extrasolar Planets Encyclopaedia, *Catalogue*, <https://exoplanet.eu>, Dostopano: 15. 6. 2026.
- [2] XXV International Astronomical Union General Assembly, *Definition of a Planet in the Solar System, Resolution B5*, 2006.
- [3] International Astronomical Union, *Pluto and the Developing Landscape of Our Solar System*, <https://www.iau.org/IAU/Science/What-we-do/Pluto-and-the-Developing-Landscape-of-Our-Solar-System.aspx>, Dostopano: 19. 2. 2026.
- [4] A. Burrows, W.B. Hubbard, J.I. Lunine in J. Liebert, *The theory of brown dwarfs and extrasolar giant planets*, *Reviews of Modern Physics* **73** (2001), 719–765.
- [5] A.P. Hatzes in H. Rauer, *A Definition for Giant Planets Based on the Mass-Density Relationship*, *The Astrophysical Journal Letters* **810** (2015), L25.

- [6] K.L. Luhman, C. Alves de Oliveira, I. Baraffe, G. Chabrier, T.R. Geballe, R.J. Parker, Y.J. Pendleton in P. Tremblin, *A JWST Survey for Planetary Mass Brown Dwarfs in IC 348*, The Astronomical Journal **167** (2024), 19.
- [7] T. Zwitter, *Zvezde, osončja in njihovo opazovanje*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, 2025.
- [8] Y. Tsapras, *Microlensing Searches for Exoplanets*, Geosciences **8** (2018), 365.
- [9] S. Sajadian, *On the detection of free-floating planets through microlensing towards the Magellanic Clouds*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **506** (2021), 3615.
- [10] C. Han, A. Gould, Y.K. Jung, I.A. Bond, W. Zang, S.J. Chung in M.D. Albrow et al., *MOA-2022-BLG-249Lb: Nearby microlensing super-Earth planet detected from high-cadence surveys*, Astronomy & Astrophysics **674** (2023), A89.
- [11] S. Dong, Z. Wu, Y.H. Ryu, A. Udalski, P. Mróz, K.A. Rybicki in S.T. Hodgkin et al., *A free-floating-planet microlensing event caused by a Saturn-mass object*, Science **391** (2026), 96–99.
- [12] Westlake University, *Westlake University Astronomy Team Launches Rogue Planet Detection Program*, https://en.westlake.edu.cn/news_events/westlakenews/Science_Technology/202508/t20250808_57313.html, Dostopano: 9. 3. 2026.
- [13] H. Yang, W. Zang, Y.H. Ryu, T. Sumi, J. Zhang, H. Li in C. Han et al., *KMT-2025-BLG-1616Lb: First Microlensing Bound Planet From DREAMS*, The Astronomical Journal **171** (2026), 151.
- [14] H. Yang, I. I, K. K, D. D in C. C, *DECam Rogue Earths And Mars Survey (DREAMS)*, NOIRLab Survey Proposal 2025B-560332, <https://time-allocation.noirlab.edu/#/proposal/details/560332>, Dostopano: 9. 3. 2026.
- [15] M. Lastovka, B.S. Gaudi, S.A. Johnson, M.T. Penny, E. Kerins in N.J. Rattenbury, *Predictions of the Nancy Grace Roman Space Telescope Galactic Exoplanet Survey. III. Detectability of Giant Exomoons of Wide-separation Giant Planets*, The Astronomical Journal **170** (2025), 258.
- [16] M.T. Penny, B.S. Gaudi, E. Kerins, N.J. Rattenbury, S. Mao, A.C. Robin in S. Calchi Novati, *Predictions of the WFIRST Microlensing Survey. I. Bound Planet Detection Rates*, The Astrophysical Journal Supplement Series **241** (2019), 3.
- [17] S.A. Johnson, M. Penny, B.S. Gaudi, E. Kerins, N.J. Rattenbury, A.C. Robin in S. Calchi Novati et al., *Predictions of the Nancy Grace Roman Space Telescope Galactic Exoplanet Survey. II. Free-floating Planet Detection Rates*, The Astronomical Journal **160** (2020), 123.
- [18] I. Swafford, *Journey to Center of Milky Way With Upcoming NASA Roman Core Survey*, <https://www.nasa.gov/missions/roman-space-telescope/journey-to-center-of-milky-way-with-upcoming-nasa-roman-core-survey/>, Dostopano: 9. 3. 2026.
- [19] NASA Roman Mission Team, *Hello, World! NASA Shares New Home for Roman Space Telescope Updates*, <https://science.nasa.gov/blogs/roman/2026/06/03/hello-world-nasa-shares-new-home-for-roman-space-telescope-updates/>, Dostopano: 15. 6. 2026.
- [20] Vera C. Rubin Observatory, *Observing Strategy*, <https://survey-strategy.lsst.io/index.html>, Dostopano: 9. 3. 2026.