

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO
ODDELEK ZA FIZIKO
PEDAGOŠKA SMER

Martin Čokl

Astronomija z Lego kockami - od dvojnih zvezd do eksoplanetov

DIPLOMSKO DELO

MENTORICA: doc. dr. Andreja Gomboc

Ljubljana, 2013

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina avtorja in Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani. Za objavlanje ali izkoriščanje rezultatov diplomskega dela je potrebno pisno soglasje avtorja, Fakultete za matematiko in fiziko ter mentorja.

Zahvala

Najprej bi se rad zahvalil mentorici doc. dr. Andreji Gomboc za idejo diplomskega dela ter za ves trud in napor, ki ga je vložila ob prebiranju in popraavljanju le tega. Hvaležen sem ji tudi za njeno prilagodljivost in za vso znanje, ki sem ga pridobil z njeno pomočjo.

Zahvaljujem se tudi svojim staršem, ki so mi omogočili študij fizike, svoji ženi, ki mi je ves čas stala ob strani, in vsem prijateljem, na katere sem se lahko kadar koli obrnil za kakšen nasvet in vzpodbudne besede.

Povzetek

Diplomsko delo je namenjeno predvsem učiteljem fizike in učiteljem izbirnega predmeta astronomija kot popestritev pouka pri sklopu "Zvezde in planeti". Diplomsko delo je namenjeno tudi vsem ljubiteljem astronomije in tistim, ki jih snov zanima in bi se radi o tej temi še malo bolj podučili.

Prvi del diplomskega dela predstavlja teoretično ozadje izbrane teme. Bralec se tako najprej seznani s tem, kaj je zvezda in kaj je planet / eksoplanet; spozna možnosti za nastanek eksoplanetov in se seznani z začetki odkrivanja eksoplanetov. Bralec prepozna tudi znane Keplerjeve zakone in se lahko poglubi v izpeljavo le teh s pomočjo malce kompleksnejših matematičnih operacij. Teoretično ozadje se zaključi s predstavitvijo metod odkrivanja eksoplanetov / dvojnih zvezd.

Drugi del diplomskega dela predstavlja mehanski model eksoplanetarne sistema oziroma dvojne zvezde iz Lego kock, ter osnove prekrivalne metode, vključno z meritvami svetlobne krivulje s pomočjo Vernierovega merilnika svetlobe. Najprej je predstavljen vpliv velikosti eksoplaneta na svetlobno krivuljo, nato vpliv oddaljenosti eksoplaneta od zvezde na svetlobno krivuljo, za konec pa je predstavljen še namišljen eksoplanetarni sistem in svetlobna krivulja, ki jo dobimo pri tem modelu. Zadnji del eksperimentalnega dela predstavlja še meritev dvojne zvezde in prikaz svetlobne krivulje, ki jo dobimo v primeru dvojne zvezde.

V tretjem delu diplomskega dela je opisan odziv učencev in učiteljev na predstavitev modela v šoli in ugotovite iz anket, ki so jih učenci in učitelji ob predstavitvi izpolnjevali.

Ključne besede

- astronomija v šoli
- izbirni predmet v osnovni šoli
- eksoplanet
- dvojne zvezde

Astronomy with Lego bricks - from binary stars to exoplanets

Abstract

The present thesis concerns mostly teachers of physics and teachers of optional subject "Astronomy" and will help them making frontal teaching more interesting and colorful when they will talk about "Stars and planets". The present thesis concerns also fans of astronomy and all those individuals, who are generally interested in the subject.

First part of the thesis presents the theoretical background of the selected topics. First the reader takes a note what the star is and what is the planet / exoplanet and learns about the first steps of detecting exoplanets. The reader also encounters the famous Kepler's laws and the mathematical derivation of them. The theoretical background ends with a presentation of methods for detection of exoplanets / binary stars.

The second part of the thesis presents a Lego model of an exoplanetary system and a Lego model of a binary star. This part of thesis is based on transit method and uses measurements of light curves with Vernier light detector. First, it presents the impact of the size of exoplanets on the light curve, then the impact of distance of exoplanets from the star on the light curve and at the end, a fictional exoplanetary system and light curve obtained in this model are presented. The last part of the experimental work is the measurement of light curves obtained in the case of a binary star system.

The third part of the thesis presents the response of students and teachers on the presentation of the model in the classroom. This part also presents findings about the survey, which students and teachers filled out during the presentation in the classroom.

Keywords

- Astronomy at school
- Optional subjects at school
- Exoplanet
- Binary star

Kazalo

1	Uvod	1
1.1	Zvezda	1
1.2	Planet	1
1.3	Motivacija	3
2	Na poti do eksoplanetov	4
2.1	Prva odkrivanja	4
2.2	Nastanek	5
2.3	Eksoplaneti	7
3	Gibanje dveh teles	9
3.1	II. Keplerjev zakon	11
3.2	I. Keplerjev zakon	12
3.3	III. Keplerjev zakon	14
4	Metode odkrivanja dvojnih zvezd in eksoplanetov	16
4.1	Dopplerjeva metoda oz. metoda radialnih hitrosti	16
4.2	Prekrivalna / tranzitna metoda	20
4.3	Astrometrija	26
4.4	Gravitacijsko mikrolečenje	27
4.5	Direktno slikanje in opazovanje	32
5	Tranzitna metoda odkrivanja eksoplanetov in dvojnih zvezd v šoli	34
5.1	Sestava poskusa za planete	35
5.2	Meritve in rezultati	37
5.3	Model dvojne zvezde	59

6	Izkušnje pri predstavitvi modela v šoli	64
6.1	Raziskovalna množica	64
6.2	Vzorec spremenljivk	65
6.3	Način zbiranja podatkov	65
6.4	Rezultati	66
6.5	Vprašalnik za učitelje	71
6.6	Vtisi v razredu	72
7	Zaključek	74
	Dodatek A Navodila za Lego planetarni model	77
	Dodatek B Navodila za Lego model dvojne zvezde	85
	Dodatek C Vprašalnik za učence	90
	Dodatek D Vprašalnik za učitelje	92

Uvod

1.1 Zvezda

Ko pogledamo v nočno nebo, vidimo vse polno svetlečih pikic, ki se po nebu premikajo. A če pogledamo naslednji dan ob isti uri, ugotovimo, da se slika ni bistveno spremenila od prejšnjega večera. Te svetle pike so večinoma zvezde. Za njihovo nočno premikanje je kriva rotacija Zemlje okoli njene osi. Če te pikice opazujemo skozi daljše časovno obdobje (več mesecev), ugotovimo, da se nočna slika ob določeni uri vseeno spremeni zaradi gibanja Zemlje in Sonca okoli skupnega težišča.

Iz zgodovine je znano, da so si različna ljudstva veliko pomagala z zvezdami. Tako je znano, da so tako egiptovske kot tudi inkovske piramide orientirane po zvezdah. Veliko piramid in templjev je obrnjenih tako, da Sonce ali pa katera od zvezd, kot je recimo Sirij, na točno določen dan v letu posveti na sarkofag ali kakšen drugi sveti predmet [1]. Zvezda Sirij je bila zelo pomembna za Egipčane, saj je obdobju, ko se je prvič prikazala na vzhodni strani nočnega neba tik pred Sončevim vzhodom, sledilo obdobje, ko so se v Egiptu začele poplave.

S proučevanjem zvezd so se ljudje začeli ukvarjati najprej predvsem zaradi lastnih potreb in niso vedeli, kaj te svetle pikice na nebu so. Šele v novejši dobi smo ugotovili, da so zvezde ogromni objekti, ki svetijo. Zaradi sevanja zvezde izgubljajo ogromno energije, katere izgubo nadomestijo s pomočjo jedrskih reakcij.

1.2 Planet

Že stari Grki so opazili na nebu svetle objekte, ki se premikajo glede na ostale zvezde. Te objekte so imeli Grki za božanska bitja, ki krožijo okoli Zemlje in tako pazijo na ljudi na Zemlji, poimenovali pa so jih z besedo planetes, kar v prevodu pomeni pohajkovalci. Šele

v času renesanse so takratni fiziki (Galileo Galilei, Johannes Kepler, Nikolaj Kopernik ...) odkrili, da planeti ne krožijo okoli Zemlje. V veljavo je začel stopati heliocentrični sistem.

Ob vedno več odkritih pohajkovalcih med zvezdami se je začela izoblikovati tudi definicija teh nebesnih teles. Planet je nebesno telo, ki:

- ima zadostno maso, da njegova lastna gravitacija premaga silo togosti in ga tako poveže v okroglo obliko, ter
- se giblje okoli skupnega težišča s Soncem in ni ne zvezda, ne naravni satelit kakšnega drugega planeta.

Zgornja definicija je zadostovala, dokler smo v našem Osončju imeli le devet večjih "teles", ki se gibljejo okoli skupnega težišča s Soncem. A ko so začeli odkrivati objekte, ki so večji kot dotlej najmanjši planet v našem Osončju (Pluton) in se gibljejo na večji orbiti kot Pluton, se je porodilo vprašanje, ali naj vsakih pet let spremenimo število planetov v našem Osončju, da bomo ljudje neprestano v dilemi, ali poznamo pravilno število planetov v Osončju, oziroma ali so odkrili že kakšen planet več in se je ta številka povečala; ali naj raje spremenimo definicijo, kaj je planet.

Mednarodna astronomska zveza (International Astronomical Union - IAU) se je odločila za zadnji korak [2] in je zato na svoji seji 24. avgusta 2006 sprejela tri "nova" poimenovanja članov Osončja.

1. Planet je nebesno telo, ki:
 - (a) se giblje po tirnici okoli Sonca,
 - (b) ima zadostno maso, da njegova lastna gravitacija premaga silo togosti in ga tako v hidrostatičnem ravnovesju poveže v okroglo obliko,
 - (c) je očistilo okolico svoje tirnice.
2. Pritlikavi planet je nebesno telo, za katerega držita trditvi (a) in (b) pri definiciji planeta, a to telo ni očistilo okolice svoje tirnice, zato ga ne moremo uvrstiti med planete. To telo tudi ni naravni satelit katerega od planetov.
3. Vsi ostali objekti, ki se gibljejo v Osončju (razen satelitov) so s skupno besedo poimenovani kot majhna telesa Osončja.

Po definiciji IAU-ja je planet nebesno telo v našem Osončju. Podobnim telesom v drugih osončjih pravimo eksoplaneti. Že odkar smo se ljudje začeli zavedati, da so poleg Zemlje v Osončju tudi drugi planeti, so se nam začela porajati vprašanja: "Smo v vesolju sami? A obstaja življenje še kje drugje razen na Zemlji? Kje, razen na Zemlji, bi se še lahko razvilo življenje v našem Osončju?" Odkar vemo za obstoj eksoplanetov, pa se sprašujemo, ali obstaja življenje na katerem od njih.

1.3 Motivacija

Ko se pogovarjaš z neastronomi in poveš, da te zanima astronomija, se velikokrat pojavi vprašanje: "A verjameš, da je v vesolju še kje življenje razen na Zemlji?" Preden lahko začneš iskati odgovor na to vprašanje, se moraš vprašati, kje sploh bi lahko življenje obstajalo. Odgovor je na planetu ali naravnem satelitu katerega od planetov, a ne na vsakem. Že v Osončju vidimo, da morajo biti razmere ravno prave, da se življenje sploh razvije. Če pogledamo druga osončja, se seveda pojavi vprašanje, kako neastronomu, ki so mu izrazi kot je mikrolečenje, spektroskopija, astrometrija, itd., neznani, najlažje razložiti metode odkrivanja eksoplanetov v drugih osončjih. Ker imamo vsi radi, da nam je snov, ki nam ni jasna, razložena na čim preprostejši način, po možnosti še s konkretnim primerom, in ker smo ljudje kar malo nevoščljivi, ko vidimo brezskrbno igro otrok, je včasih dobro, da prepustimo tudi otroku v sebi, da vzame v roke nekaj Lego kock ter sestavi preprost model planetarnega sistema ali sistema dvojnih zvezd. Na ta način lahko nazorno predstavimo osnovno idejo tranzitne metode za odkrivanje eksoplanetov in dvojnih zvezd.

Na poti do eksoplanetov

2.1 Prva odkrivanja

Leta 1782 sta John Goodricke in Edward Pigott objavila, da okoli zvezde Algol kroži še neko temnejše nebesno telo, ki bi lahko bilo eksoplanet, in povzroča, da se zdi kot da zvezda vsake toliko časa sveti nekoliko šibkeje [3]. Kaj kmalu so ugotovili, da ne gre za prvi odkriti eksoplanet, ampak za dvozvedje, v katerem je ena zvezda šibkejša od druge. Njuno odkritje je pripomoglo k razvoju tranzitne metode, s katero v dandanašnjih časih odkrivamo eksoplanete.

Dvajset let po odkritju tranzitne metode je leta 1802 William Wollaston odkril, da ima bela svetloba, ki prihaja z zvezd, v svojem spektru črne črte (tako imenovane absorpcijske črte) [3]. Črte nastanejo v zvezdini atmosferi in so tipične za elemente, ki to atmosfero sestavljajo. Odkrili so tudi, da so te črte lahko premaknjene proti rdečemu ali pa proti modremu delu spektra svetlobe. Glavni krivec za premik absorpcijskih črt je zvezda sama - če se zvezda od nas oddaljuje, so črte zaradi Dopplerjevega pojava premaknjene proti rdečemu delu spektra, če se nam zvezda približuje, pa so črte premaknjene proti modremu delu spektra.

Leta 1844 je Freidrich Bessel objavil, da ima najsvetlejša nočna zvezda na severni polobli, Sirij, temnega spremljevalca [4]. Spremljevalca je odkril s pomočjo majhnega opletanja trajektorije zvezde med njenim premikanjem glede na druge zvezde. Kasneje so ugotovili, da je spremljevalec bela pritlikavka. S pomočjo te detekcije se je razvila naslednja metoda za odkrivanje eksoplanetov - astrometrija.

Leta 1855 je bil William Stephen Jacob prvi, ki je trdil, da je odkril eksoplanet [5]. Mislil je, da bi tako lahko pojasnil navidezne nepravilnosti v orbitalnem gibanju dvojnega sistema 70 Ophiuchus. Leta 1868 je William Huggins prvi izmeril radialno hitrost zvezde s pomočjo Dopplerjevega premika [4]. V naslednjih dobrih 100 letih je bilo najavljenih še več deset napačnih trditev, da so odkrili eksoplanet, a se je na koncu vedno izkazalo,

da so na žalost večinoma odkrili manjše zvezde, ki so bile prešibke, da bi jih lahko ločili s pomočjo teleskopov. Zgodba se je ponavljala vse do leta 1988, ko so Bruce Campbell, Gordon Walker in Stephenson Yang prvi zares detektirali eksoplanet s pomočjo metode radialnih hitrosti [5]. Ta eksoplanet je bil potrjen šele leta 2003. Aleksander Wolszczan in Dale Frail sta leta 1992 odkrila, da se okoli pulzarja PSR B1257+12 gibljeta dva trdna planeta [3]. Leta 1995 sta Michel Mayor in Didier Queloz odkrila prvi eksoplanet okoli t.i. normalne zvezde (zvezde z glavne veje) [4]. Odkrila sta, da se okoli zvezde 51 Peg giblje eksoplanet, ki ima približno pol manjšo maso kot Jupiter. Leta 2001 je Nuno Santos odkril prvi eksoplanet, ki se nahaja v območju, kjer bi se lahko razvilo življenje (Habitable zone) [3], vendar ima šest-krat večjo maso kot Jupiter. Zadnje čase se v povezavi z eksoplaneti največ govori o zvezdi Gliese 581, saj naj bi se okoli nje gibalo 6 eksoplanetov, od katerih naj bi imela vsaj dva planeta približno enako maso kot Zemlja in naj bi bila od zvezde oddaljena ravno dovolj, da bi se nahajala v coni primerni za razvoj življenja (oziroma v bližini le te). Veliko govora je tudi o zvezdi Kepler 22 in njenem eksoplanetu Kepler 22b, saj naj bi bil tudi to Zemlji podoben eksoplanet, ki se giba v coni primerni za razvoj življenja.

2.2 Nastanek

2.2.1 Nastanek planetov

Planeti so stranski produkti pri formaciji zvezd, saj se zaradi gravitacijskega kolapsa velikega oblaka plina in prahu (oz. meglice) zvezda lahko obda z okoli 100 AE (1 AE je 1 astronomska enota - povprečna oddaljenost med Zemljo in Soncem oz. 150 milijonov kilometrov) velikim akrecijskim diskom, ki se vrtilno okoli sredice [6]. Nekaj snovi v tem disku še naprej pada proti protozvezdi, nekaj snovi pa se bo porabilo za nastanek planetov. Snov, ki je bližje protozvezdi, kroži hitreje, snov, ki je od nje bolj oddaljena, pa nekoliko počasneje, saj je v bližini protozvezde gravitacijska akrecija močnejša kot v bolj oddaljenih področjih. V tem t.i. Keplerjevem disku je gravitacijski pospešek tisti, ki povzroča kroženje snovi okoli protozvezde. Če se hoče torej snov premakniti proti protozvezdi, mora izgubiti vrtilno količino, kar naredi s pomočjo viskoznosti. Viskožno trenje, ki hoče sosednjim plastem izenačiti hitrost, prenaša vrtilno količino iz notranjih delov diska v zunanje dele. Notranji predeli tako izgubljajo vrtilno količino, se zavirajo in padajo proti protozvezdi. Ob počasni migraciji proti protozvezdi večina snovi pade na le to, nekaj snovi pa se zbere v lokalnih zgoščinah, iz katerih potem nastanejo planeti. Pri formaciji planetov je zelo pomembna tudi temperatura, saj ta določa, kakšen tip materiala se bo združil v planet. Zaradi segrevanja ob trenju in ker je v sredici vroča protozvezda, ki je nastala zaradi gravitacijskega sesedanja, so notranji predeli bolj vroči kot zunanji, zato se lahko tukaj ohranijo le težji elementi. Ob sesedanju molekularnega oblaka pa se ne

akumulira samo plin, ampak je zraven tudi ogromno prahu, ki se zaradi sedimentacije in trenja v 10 tisoč letih združi v tanke plasti v notranjosti akrecijskega diska. V disku ima veliko vlogo tudi elektrostatska sila, ki počasi združuje te prašne delce in oblikuje konglomerate zrnatih delcev [7]. Ti delci so veliki nekje med enim mikronom in enim milimetrom. Na tej točki večja zrna rastejo veliko hitreje kot manjša, kar je posledica električne sile in interakcije s plinom. V naslednjih 10 tisoč letih se tako že izoblikujejo 10 km velika telesa, ki jim rečemo planetesimali. Ob trkanju teh planetesimalov nastanejo še večji delci, seveda pa lahko pride ob trku tudi do fragmentacije. V naslednjih 100 tisoč letih nastanejo že prve večje tvorbe, ki so velike kot planetoidi (velikosti Ceresa). Te tvorbe rastejo na račun akumulacije manjših kamnov in plina. Kot smo že zapisali, kemijsko sestavo nastalih tvorb določa temperatura. Bližje protozvezdi, kjer nastajajo Zemlji podobni planeti, je bolj vroče, zato so ti predeli bogati s silikati in kovinami, medtem ko je plinskih in kapljevinskih snovi, kot so CO , H_2O , helij in vodik, malo, pa še te so ujete oziroma vezane na elemente, ki sestavljajo zrna. Na razdalji okoli 5 AE od zvezde, podobne Soncu, pa je temperatura dovolj nizka, da se lahko tvorijo ledena zrna. To je še posebno pomembno za vodne molekule, saj se lahko v teh predelih tvorijo tvorbe bogate z vodo [8].

Ko se enkrat tvorijo planetesimali veliki kot Ceres, gravitacija prevzame ključno vlogo. Trk in akumulacija sta dokaj naključna procesa, saj se mora snov znajti dovolj blizu, da pride do teh efektov, medtem ko gravitacija privlači snovi na veliko večjih razdaljah. Večji planetesimali tako rastejo na račun gravitacijskega zajetja manjših planetesimalov. Toplota, ki nastane zaradi teh trkov, in toplota, ki nastane zaradi radioaktivnih razpadov, stopi notranjost nekaterih planetesimalov in povzroči sedimentacijo težjih kovin v jedru. Sčasoma ti planetesimali počistijo svojo okolico in tako nastanejo planeti.

Nastanek Jupitru podobnih planetov se ne razlikuje bistveno od nastanka trdnih planetov. Ker je v zunanjih predelih nizka temperatura, več vodika in helija in s tem veliko več snovi za nastanek planetesimalov, se tukaj lahko formirajo večji planeti. Zaradi masivnejših sredic teh protoplanetov se lahko le ti obdajo z večjimi plinskimi plastmi (iz meglice se akumulirata predvsem vodik in helij), ki jih niti zvezdni veter, ko se zvezda rodi, ne more odpihniti stran od planeta.

V zunanjih plasteh akrecijskega diska protozvezde pa količina snovi zopet pade, saj je imela protozvezda na razpolago le omejeno količino snovi. V zunanjih predelih se zato formirajo manjše tvorbe. Na teh oddaljenostih lahko tako srečamo več planetoidov in manjših teles, ki, če jih zanese v bližino zvezde, počasi izhlapevajo in za sabo puščajo ogromne repe, v katerih je izhlapela snov (to so kometi).

Po okoli 10 milijonih let je nastajanje planetov končano. Protoplanetarni disk se je počasi stanjšal, bližje zvezdi so nastale manjše kamnite gmote, dlje stran pa večje gmote, ki so se obdale s plinskimi ovojnici. V tem času se je tudi zvezda rodila, zato se pojavi zvezdni veter, ki odpihne snovi (plin in prah), ki se niso porabile pri tvorbi planetov. Tako

so v planetarnem sistemu ostali samo večji planetesimali, planeti in objekti Kuiperjevega pasu.

2.3 Eksoplaneti

Planetarni sistemi so zelo različni. Okoli nekaterih zvezd so zaenkrat odkrili samo po en eksoplanet, za nekatere zvezde pa so odkrili, da se v njihovi okolici giblje več eksoplanetov. Pri odkrivanju eksoplanetov so še vedno najuspešnejši, ko gre za Jupitru podobne eksoplanete, saj je le te najlažje odkriti. Odkrili so, da orbite teh eksoplanetov niso nujno takšne kot pri Jupitru, temveč so lahko tudi bistveno manjše. A ker so nam razmere v Osončju še najbližje, pogosto primerjamo eksoplanete z našimi planeti. Do sedaj odkrite eksoplanete lahko nekako uvrstimo v šest skupin [5].

2.3.1 Vroči Jupitri

Večino do sedaj odkritih eksoplanetov lahko uvrstimo v to skupino. Gre za objekte, katerih masa je približno enaka Jupitrovi ali večja, do okoli desetkrat Jupitrove mase. Okoli 40 % vseh do sedaj odkritih eksoplanetov je bližje matični zvezdi, kot je razdalja med Zemljo in Soncem, zato so ti eksoplaneti zelo vroči. Kljub visokim temperaturam vodik in helij ne pobegneta, ker ju k eksoplanetu veže močna gravitacija, saj so ti vroči Jupitri zelo masivni. Te eksoplanete je najlažje odkriti, zato so jih do sedaj odkrili največ.

2.3.2 Vroči Neptuni

Ti eksoplaneti so zelo podobni vročim Jupitrom, le da so manj masivni. Meja je okoli petina mase Jupitra.

2.3.3 Hladni Jupitri

Okoli tretjina eksoplanetov je od zvezde oddaljena več kot 1 AE. Ker lahko te eksoplanete najlažje odkrijemo, če zvezda spada med pritlikave in manj sijoče zvezde, je tudi na površini eksoplaneta bistveno manjša temperatura kot v zgornjih dveh primerih (nekje tolikšna kot na Jupitru).

2.3.4 Super Jupitri

Gre za eksoplanete, ki imajo maso med pet in trinajst Jupitrovih mas. Eksoplaneti ne morejo imeti večje mase, kot je zgornja meja v prejšnjem stavku, saj bi bila sicer gravitacija dovolj velika, da bi se v jedru začele dogajati jedrske reakcije in bi objekt bil rjava pritlikavka.

2.3.5 Super Zemlje

Eksoplaneti, ki imajo večjo maso kot je Zemljina, a še vseeno ne tolikšno maso kot jo imata Neptun in Uran, se imenujejo super Zemlje. Ali so se ti eksoplaneti obdali z atmosfero ali ne, je odvisno od njihove evolucije in od bližine njihovi matični zvezdi.

2.3.6 Ekso Zemlje

To so eksoplaneti, ki so po masi najbolj podobni naši Zemlji. Te eksoplanete so naprej razvrstili v več skupin glede na njihovo maso oziroma oddaljenost od matične zvezde (Zlatolaskini eksoplaneti) oziroma primernosti za razvoj življenja (majhne modre pike) [9].

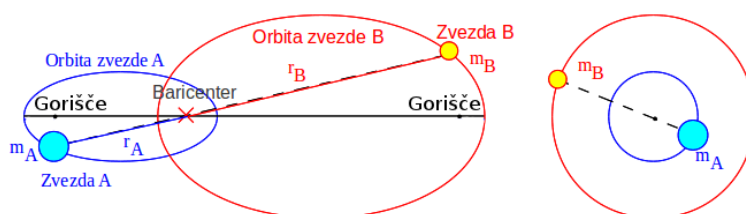
Odkrili pa so tudi eksoplanete, ki po dosedanjih opazovanjih nimajo matične zvezde, okoli katere naj bi se gibali. Masa in nastanek teh eksoplanetov je nekje na meji, da bi jih lahko uvrstili tudi že med rjave pritlikavke - torej zvezde, ki so ravno na meji svojega obstanka.

Zagotovo se bo razvrstitev eksoplanetov spreminjala, ko bomo izvedeli več o njih, možno pa je tudi, da se bo pojavila še kakšna nova skupina ali podskupina.

3

Gibanje dveh teles

Zvezde niso nujno same, ampak lahko imajo partnerico, s katero se gibljeta okoli skupnega težišča, ali pa imajo v svoji bližini več manjših teles (eksoplanetov). Oba primera povzročata, da se zvezda premika malo drugače, kot če bi bila sama (zvezda se giblje okoli skupnega težišča). Poglejmo naprej splošen model dveh teles z masama m_1 in m_2 , ki se gibljeta okoli skupnega težišča, kot to prikazuje slika (3.1). Na sliki sta označeni dve zvezdi A in B, ki se gibljeta po elipsah (oziroma po krožnicah v desnem primeru). Po I. Keplerjevem zakonu mora težišče sistema sovpadati z goriščema obeh elips. Ta točka je na sliki (3.1) označena kot baricenter (težišče). Ko postavimo nekam v polje koordinatni sistem, označimo z \vec{r}_1 oziroma \vec{r}_2 vektorja prve oziroma druge mase od koordinatnega izhodišča, z \vec{R}_0 pa vektor do težišča obeh mas. Med masama deluje gravitacijska sila, ki je centralna sila, kar pomeni, da deluje med centroma obeh teles, izračunamo pa jo lahko po formuli



Slika 3.1: Slika prikazuje dve zvezdi, ki se gibljeta okoli skupnega težišča. Na levi sliki je primer, ko se zvezdi gibljeta po elipsah, na desni pa primer, ko sta tirnici krožnici. Zvezdnica med obema zvezdama gre vedno skozi težišče (tisto gorišče, ki se pri obeh elipsah prekriva oz. središči obeh krožnic, ki sovpadata).

$$\vec{F}_{1,2} = Gm_1m_2 \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{\|\vec{r}_2 - \vec{r}_1\|^3}, \quad (3.1)$$

kjer smo z G označili gravitacijsko konstanto ($G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$). Z upoštevanjem enačbe (3.1) za gravitacijsko silo, lahko za obe zvezdi po II. Newtonovem zakonu zapišemo naslednji enačbi

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} &= \vec{F}_{1,2}, \\ m_2 \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} &= \vec{F}_{2,1}. \end{aligned} \quad (3.2)$$

Če enačbi (3.2) delimo s posameznima masama in ju odštejemo, pridemo do enačbe

$$\frac{\vec{F}_{2,1}}{m_2} - \frac{\vec{F}_{1,2}}{m_1} = \frac{d^2 \vec{r}_2}{dt^2} - \frac{d^2 \vec{r}_1}{dt^2} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}, \quad (3.3)$$

kjer smo vpeljali nov vektor $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$. Ob upoštevanju III. Newtonovega zakona in z vpeljavo reducirane mase

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}, \quad (3.4)$$

se enačba (3.3) pretvori v

$$\vec{F}_{1,2} = -\mu \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}. \quad (3.5)$$

Sedaj torej iščemo rešitve naslednje enačbe

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{G m_1 m_2}{\mu} \frac{\vec{r}}{\|\vec{r}\|^3}. \quad (3.6)$$

Najprej lahko ugotovimo, da velja naslednja enakost

$$\vec{r} \times \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{G m_1 m_2}{\mu} \frac{\vec{r} \times \vec{r}}{r^3} = 0, \quad (3.7)$$

kar implicira naslednjo enakost

$$\frac{d}{dt} \left(\vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{d\vec{r}}{dt} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \vec{r} \times \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = 0. \quad (3.8)$$

Torej je vektor

$$\vec{L} = \mu \vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad (3.9)$$

konstanten vektor. Ta vektor imenujemo vrtilna količina. Če je vektor vrtilne količine $\vec{L} \neq \vec{0}$, potem sta vektorja \vec{r} in $\frac{d\vec{r}}{dt}$ vedno pravokotna na vrtilno količino, torej se telesi gibljeta v ravnini in tej ravnini rečemo orbitalna ravnina.

Povezava med kartezičnimi koordinatami x, y in z ter krogelnimi koordinatami r, ϕ in θ je naslednja:

$$\begin{aligned}x &= r \cos \phi \sin \theta, \\y &= r \sin \phi \sin \theta, \\z &= r \cos \theta.\end{aligned}\tag{3.10}$$

Ker se naši telesi gibljeta v orbitalni ravnini, si lahko koordinatni sistem izberemo tako, da vektor \vec{r} leži samo v ravnini xy , zato je $\vec{r} = (r \cos \phi, r \sin \phi, 0)$, torej je:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{r}}{dt} &= \frac{d}{dt} (r \cos \phi, r \sin \phi, 0) \\&= \left(\frac{dr}{dt} \cos \phi - r \sin \phi \frac{d\phi}{dt}, \frac{dr}{dt} \sin \phi + r \cos \phi \frac{d\phi}{dt}, 0 \right),\end{aligned}$$

vektor vrtilne količine pa kaže v smeri osi z in je:

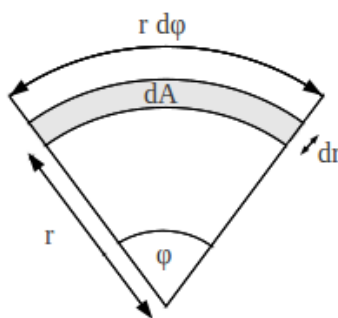
$$\vec{L} = \mu \vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} = \left(0, 0, \mu r^2 \frac{d\phi}{dt} \right).\tag{3.11}$$

3.1 II. Keplerjev zakon

Poglejmo si pomen zgornje enačbe (3.11).

Na sliki (3.2) vidimo, da lahko ploščino infinitezimalnega izseka elipse izračunamo kot

$$dS = dr(rd\phi) = r dr d\phi.\tag{3.12}$$



Slika 3.2: Ploščina infinitezimalnega izseka elipse v polarnih koordinatah.

Če ploščino integriramo od primarnega gorišča elipse do značilne razdalje r , je ploščina elipsinega izseka enaka

$$dS = \frac{1}{2}r^2 d\phi, \quad (3.13)$$

torej se zveznica med reducirano maso in primarnim goriščem elipse giblje s ploščinsko hitrostjo

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2}r^2 \frac{d\phi}{dt}. \quad (3.14)$$

Ko pogledamo enačbi (3.11) in (3.14), vidimo, da je

$$\frac{1}{2\mu}L = \frac{1}{2}r^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{dS}{dt}. \quad (3.15)$$

Ker je vrtilna količina konstantna, mora biti tudi časovni odvod ploščine konstanten. Tako smo prišli do II. Keplerjevega zakona, ki pravi, da zveznica med telesoma opiše v enakih časovnih intervalih enake ploščine, kar pomeni, da je ploščinska hitrost konstantna.

3.2 I. Keplerjev zakon

Ker je vektor vrtilne količine konstanten, velja:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{L} \right) = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \times \vec{L}. \quad (3.16)$$

Če v zgornjo enačbo vstavimo izraz (3.6), lahko izpeljemo sledeče:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \times \vec{L} &= -\frac{Gm_1m_2}{\mu r^3} \vec{r} \times \vec{L} \\ &= -\frac{Gm_1m_2}{r^3} \vec{r} \times \left(\vec{r} \times \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \\ &= -\frac{Gm_1m_2}{r^3} \left(\left(\vec{r} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \vec{r} - (\vec{r} \cdot \vec{r}) \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \\ &= -\frac{Gm_1m_2}{r^3} \left(\left(\vec{r} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \vec{r} - r^2 \frac{d\vec{r}}{dt} \right) \\ &= Gm_1m_2 \left(\frac{1}{r} \frac{d\vec{r}}{dt} - \frac{1}{r^2} \frac{dr}{dt} \vec{r} \right) \\ &= Gm_1m_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{r} \vec{r} \right). \end{aligned} \quad (3.17)$$

V zgornji izpeljavi smo uporabili naslednji vmesni razmislek:

$$\vec{r} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\vec{r} \cdot \vec{r}) = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} r^2 = r \frac{dr}{dt}. \quad (3.18)$$

Če enačbi (3.16) in (3.17) izenačimo in integriramo, vidimo, da je

$$\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{L} = Gm_1m_2 \left(\frac{1}{r}\vec{r} + \vec{e} \right), \quad (3.19)$$

kjer smo v enačbo vpeljali nov konstanten vektor \vec{e} . Izkazalo se bo, da je to vektor ekscentričnosti in je zato lastnost elipse. Ker je vektor \vec{e} usmerjen v smeri vektorskega produkta $\frac{d\vec{r}}{dt}$ in \vec{L} , je pravokoten na ta vektorja, torej leži v orbitalni ravnini. Ko pogledamo skrajni primer (ko sta telesi najdlje eno od drugega) in je vektor $\frac{d\vec{r}}{dt}$ pravokoten na vektor \vec{r} , ugotovimo, da je v tem primeru vektor ekscentričnosti usmerjen v smeri velike polosi. Ker je \vec{e} konstanten vektor, mora torej biti vedno usmerjen v tej smeri. Če sedaj pomnožimo enačbo (3.19) skalarno z vektorjem \vec{r} z leve strani, dobimo

$$\vec{r} \cdot \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{L} \right) = Gm_1m_2 \left(\frac{1}{r}\vec{r} \cdot \vec{r} + \vec{r} \cdot \vec{e} \right) = Gm_1m_2r(1 + e \cos \phi). \quad (3.20)$$

Na levi strani lahko tudi zamenjamo člene med skalarnim produktom in vektorskim produktom, zato je lahko za zgornji izraz zapišemo

$$\vec{r} \cdot \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \times L \right) = -\vec{L} \cdot \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{r} \right) = \frac{1}{\mu} \vec{L} \cdot \vec{L} = \frac{1}{\mu} L^2. \quad (3.21)$$

Ko enačbi izenačimo, dobimo

$$r = \frac{L^2 / (Gm_1m_2\mu)}{1 + e \cos \phi}, \quad (3.22)$$

kar je enačba za krivuljo II. reda (z ekscentričnostjo e) v polarni obliki. Ekscentričnost določa, kakšna bo tirnica objekta:

- $e = 0$; tirnica je krožnica.
- $0 < e < 1$; tirnica je elipsa.
- $e = 1$; tirnica je parabola.
- $e > 1$; tirnica je hiperbola.

V primeru, da gre za vezan sistem (zvezda, "okoli" katere se giblje planet), sta primerni le prvi dve vrednosti za ekscentričnost, torej se planeti gibljejo okoli skupnega težišča z zvezdo po elipsah ali po krožnicah. Če je masa enega telesa veliko večja kot masa drugega telesa ($m_1 \ll m_2$), potem je reducirana masa približno enaka masi lažjega objekta

$$\mu = \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \cong \frac{m_1m_2}{m_2} \cong m_1.$$

Ker sta \vec{r}_1 in \vec{r}_2 vektorja od koordinatnega izhodišča, lahko vektor težišča (\vec{R}) tega sistema dobimo po formuli

$$\vec{R} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}, \quad (3.23)$$

kar pa je v primeru, da je ena masa dosti večja od druge ($m_1 \ll m_2$), kar enako vektorju do večje mase. Tako smo prišli do I. Keplerjevega zakona: Planeti krožijo okoli Sonca po elipsah, Sonce je v enem od gorišč elipse.

3.3 III. Keplerjev zakon

V primeru elipse dobimo največjo in najmanjšo vrednost polarne koordinate r takrat, ko je polarni kot ϕ enak 0 ali π . Po enačbi (3.22) dobimo tako naslednja izraza za polarno koordinato r :

$$r_{min} = \frac{L^2 / (Gm_1 m_2 \mu)}{1 + e},$$

$$r_{max} = \frac{L^2 / (Gm_1 m_2 \mu)}{1 - e}.$$

Za veliko polos elipse a velja, da je $2a = r_{min} + r_{max}$, torej je velika polos enaka:

$$a = \frac{L^2}{(1 - e^2) Gm_1 m_2 \mu}. \quad (3.24)$$

Iz enačbe (3.15) za II. Keplerjev zakon lahko izrazimo vrtilno količino kot:

$$L = 2\mu \frac{dS}{dt}.$$

Ko ločimo integrirajoče spremenljivke, lahko enačbo integriramo

$$2\mu \int_{orbita} dS = \int_0^T L dt,$$

kjer smo s T označili obhodni čas. Integral na levi je enostavno ploščina elipse, integral na desni pa je najenostavnejši integral, saj je vrtilna količina konstantna. Tako dobimo:

$$2\mu \pi ab = LT,$$

kjer sta a oziroma b velika oziroma mala polos elipse in T obhodni čas, ki ga lahko zapišemo kot:

$$T = \frac{2\mu \pi ab}{L}. \quad (3.25)$$

Ko to enačbo kvadriramo, dobimo:

$$T^2 = \frac{4\pi^2 \mu^2 a^2 b^2}{L^2}.$$

Če iz enačbe za veliko polos (3.24) izrazimo L^2 in vstavimo v zgornjo enačbo, dobimo

$$T^2 = \frac{4\pi^2 \mu^2 a^2 b^2}{\mu G m_1 m_2 a (1 - e^2)}.$$

Ko upoštevamo še povezavo med veliko in malo polosjo ($b = a\sqrt{1 - e^2}$) in kaj je reducirana masa μ (3.4), se enačba preoblikuje v

$$T^2 = \frac{4\pi^2 a^3}{G(m_1 + m_2)}. \quad (3.26)$$

Enačbo lahko še malo preoblikujemo, da dobimo bolj znano obliko

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}. \quad (3.27)$$

V primeru, da je ena masa veliko manjša od druge ($m_1 \ll m_2$), pa lahko maso lažjega telesa zanemarimo in tako dobimo

$$\frac{a^3}{T^2} \cong \frac{Gm_2}{4\pi^2} \cong konst.$$

Zgornja enačba je znani III. Keplerjev zakon.

Seveda se je potrebno zavedati, da je konstanta odvisna od večje mase (m_2).

Metode odkrivanja dvojnih zvezd in eksoplanetov

Dvojne zvezde oziroma eksoplanete lahko odkrijemo na različne načine. Največkrat uporabljena metoda je meritev radialnih hitrosti, ki se opira na Doplerjev premik spektralnih črt. Zelo uporabna je tudi prekrivalna (oz. tranzitna) metoda, pri kateri pride do spremeni- njanja magnitude zaradi prekrivanja enega objekta z drugim. Kadar lahko objekt opazu- jemo vizualno, je uporabna astrometrija, ki meri premikanje objektov glede na zvezde, ki so veliko bolj oddaljene od opazovanih dveh. V zadnjem času se je razvila metoda gravi- tacijskega lečenja oz. mikrolečenja. Metodo je v svojem delu *Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field* [10] predlagal že Albert Einstein, a ker pride do zelo majhnih odstopanj, je mislil, da te metode ni mogoče realizirati. Pri tej metodi je bistvena poravnava zvezde z drugo zvezdo (ki je veliko bolj oddaljena od nas). Če ima prva zvezda spremljevalni objekt, se bo le to poznalo na svetlobni krivulji, ko bo tudi ta objekt prišel v bližino t.i. Einsteinovega obroča.

4.1 Dopplerjeva metoda oz. metoda radialnih hitrosti

Leta 1979 sta Bruce Campbell in Gordon Walker razvila spektrograf, ki je lahko meril radialne hitrosti na 15 m/s natančno [3], [4]. S tem sta omogočila iskanje eksoplanetov s pomočjo metode radialnih hitrosti in leta 1988 odkritje prvega eksoplaneta. Do leta 2010 so s to metodo odkrili okoli 70 % vseh do takrat znanih eksoplanetov, zato si najprej pogledjmo izraz za radialno hitrost in kako jo lahko izmerimo na Zemlji.

Postavimo se sedaj v koordinatni sistem težišča. V tem primeru mora veljati:

$$\frac{m_1 \cdot \vec{r}_1 + m_2 \cdot \vec{r}_2}{m_1 + m_2} = 0, \quad (4.1)$$

kjer smo z \vec{r}_1 oz. \vec{r}_2 označili vektorja do prvega oz. drugega telesa. Iz zgornje enačbe vidimo, da mora za razmerje mas veljati:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{r_2}{r_1}. \quad (4.2)$$

Ko vpeljemo še vektor oddaljenosti med obema telesoma $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, se vektorja \vec{r}_1 in \vec{r}_2 prepiseta v:

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= -\frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{r}, \\ \vec{r}_2 &= \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{r}, \end{aligned} \quad (4.3)$$

oziroma za njuni velikosti kar enaka izraza, le da vektorske količine spremenimo v skalarne.

Če je ekscentričnost elipse zelo majhna ($e \ll 1$), lahko rečemo, da se zvezdi gibljeta kar po krožnicah in se hitrosti gibanja zvezd s časom ne spreminjata. Hitrosti lahko dobimo s pomočjo enačb pri kroženju: $v_1 = \frac{2\pi r_1}{T}$ oz. $v_2 = \frac{2\pi r_2}{T}$, kjer je T obhodni čas zvezd. Ko enačbi za hitrosti obrnemo, izrazimo polmera kroženja in vse skupaj vstavimo v enačbo (4.2) za razmerje mas, dobimo:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2}{v_1}. \quad (4.4)$$

Upoštevamo lahko še, da na Zemlji ne izmerimo dejanske radialne hitrosti, ampak samo projekcijo radialne hitrosti na smer opazovanja. V zgornji enačbi lahko hitrosti zamenjamo z $v_1 = \frac{v_{1Izm}}{\sin i}$ oz. $v_2 = \frac{v_{2Izm}}{\sin i}$ (i je kot med smerjo opazovanja in pravokotnico na orbitalno ravnino obeh opazovanih teles) in tako dobimo

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_{2Izm}}{v_{1Izm}}. \quad (4.5)$$

Če enačbo (3.27) nekoliko preoblikujemo, da bo v njej nastopala kotna hitrost, dobimo (upoštevamo še, da je sedaj $r = a$):

$$\omega^2 = \frac{G(m_1 + m_2)}{r^3}. \quad (4.6)$$

Ob upoštevanju te enačbe za tretji Keplerjev zakon in enačbe $v_{Izm} = \omega r \sin i$ pa lahko napišemo:

$$m_1 + m_2 = \frac{T}{2\pi G} \frac{(v_{1Izm} + v_{2Izm})^3}{\sin^3 i}. \quad (4.7)$$

Enačba (4.5) nam omogoča, da lahko eno od hitrosti razpišemo, če je eden od kandidatov v dvojnem sistemu preslaboten (kar velja v primeru eksoplanetov), in tako dobimo enačbo

$$m_1 + m_2 = \frac{T}{2\pi G} \frac{v_{1Izm}^3}{\sin^3 i} \left(1 + \frac{m_1}{m_2}\right)^3,$$

ki jo še malo preoblikujemo:

$$\frac{m_2^3}{(m_1 + m_2)^2} \sin^3 i = \frac{T}{2\pi G} v_{Izm}^3.$$

Ob upoštevanju, da je masa zvezde veliko večja od mase eksoplaneta, lahko v zgornji enačbi maso eksoplaneta v imenovalcu zanemarimo in tako dobimo enačbo za maso eksoplaneta

$$M_P = \left(\frac{1}{2\pi G} \right)^{1/3} T^{1/3} M_*^{2/3} \frac{v_{Izm}}{\sin i}. \quad (4.8)$$

Če bi upoštevali, da tirnica eksoplaneta ni krožnica, temveč elipsa z ekscentričnostjo e , bi namesto enačbe (4.8) dobili[3]:

$$M_P = \left(\frac{1}{2\pi G} \right)^{1/3} T^{1/3} M_*^{2/3} \frac{v_{Izm} (1 - e^2)^{1/2}}{\sin i}. \quad (4.9)$$

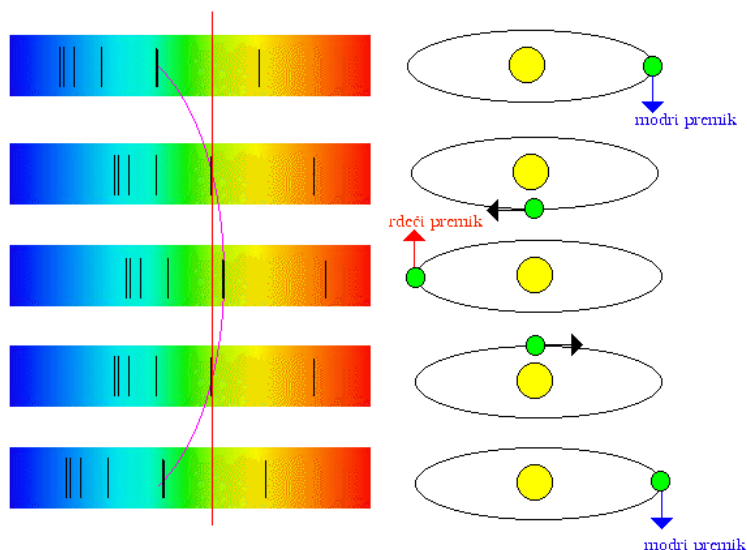
Iz enačbe (4.9) vidimo, da moramo za določitev mase eksoplaneta poznati maso zvezde, obhodni čas, radialno hitrost zvezde in kot, pod katerim se ti dve telesi gibljeta glede na opazovalno smer z Zemlje. Kot je zelo težko ugotoviti, zato ponavadi maso eksoplanetov izražamo kar v $M_P \sin i$ in se zavedamo, da nam ta vrednost predstavlja spodnjo mejo za maso eksoplaneta.

Če enačbo (4.8) malce preoblikujemo, tako da iz nje izrazimo izmerjeno radialno hitrost zvezde, vidimo, da je za detekcijo eksoplanetov najprimernejši sistem, kjer je masa eksoplaneta čim večja, masa zvezde in obhodni čas pa sta čim manjša (torej je najprimernejši sistem za opazovanje takšen, kjer imamo eksoplanet vsaj Jupitrove velikosti, zvezdo, ki ne seva preveč svetlobe - torej rdečo pritlikavko, razdalja med njima pa naj bo čim manjša).

4.1.1 Merjenje radialne hitrosti

Radialno hitrost lahko izmerimo s pomočjo Dopplerjevega pojava. Zvezde oddajajo svetlobo, ki potuje iz notranjosti zvezde navzven. Ker vsebujejo zvezdine zunanje plasti atome plinov, le ti v svetlobnem spektru absorbirajo točno določene valovne dolžine oziroma svetlobo s točno določeno frekvenco (ν_0). Frekvenca absorbirane svetlobe, ki jo izmerimo s spektrometrom (ν_{Izm}), pa je drugačna, če se nam zvezda približuje, če se zvezda ne premika v radiani smeri glede na nas (ν_0) ali če se zvezda od nas oddaljuje. Na sliki (4.1) lahko lepo vidimo, da so črte, ko se zvezda od nas oddaljuje (3. spekter), premaknjene bolj proti rdeči svetlobi; ko se nam zvezda približuje (5. spekter), so črte premaknjene bolj proti modri svetlobi. Nerelativistična enačba za Dopplerjev efekt v primeru, da se izvor valovanja premika, se glasi

$$\frac{\nu_{Izm}}{\nu_0} = \frac{1}{1 \pm \frac{v}{c}}, \quad (4.10)$$



Slika 4.1: Slika prikazuje, kako se premikajo spektralne črte zvezde, ko se nam le ta približuje oziroma ko se od nas oddaljuje [11].

kjer je v hitrost, s katero se premika izvor, in c hitrost razširjanja valovanja. Če se nam izvor približuje, potem v zgornji enačbi uporabimo $-$, če se od nas oddaljuje pa $+$. Za svetlobo in ostala elektromagnetna valovanja moramo upoštevati relativistični princip in zato se enačba (4.10) s pomočjo Lorentzove transformacije spremeni v

$$\frac{\nu_{Izm}}{\nu_0} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 \mp \frac{v}{c}},$$

kar pa lahko še preoblikujemo v

$$\frac{\nu_{Izm}}{\nu_0} = \sqrt{\frac{1 \pm \frac{v}{c}}{1 \mp \frac{v}{c}}}, \quad (4.11)$$

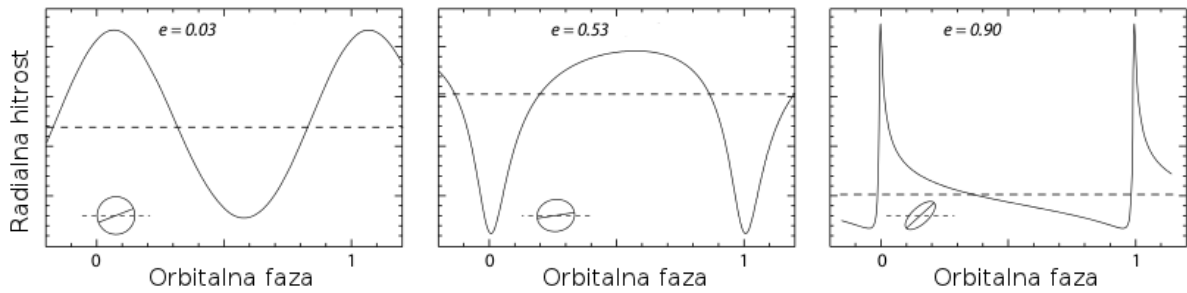
kjer zopet velja, da za zvezdo, ki se nam približuje, vzamemo v imenovalcu $-$, v števcu pa $+$ in obratno za tisto, ki se od nas oddaljuje. Ker se v astronomiji večkrat uporabljajo valovne dolžine namesto frekvenc, prepisimo zgornjo enačbo v enačbo za valovne dolžine

$$\frac{\lambda_{Izm}}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 \mp \frac{v}{c}}{1 \pm \frac{v}{c}}}. \quad (4.12)$$

Iz zgornje enačbe lahko hitro vidimo, da je Dopplerjev premik z enak

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1. \quad (4.13)$$

Če iz zgornje enačbe (4.13) izrazimo razmerje med hitrostjo premikanja zvezde in svetlobno hitrostjo, tako dobimo



Slika 4.2: Primer grafov radialnih hitrosti za tri različne zvezde glede na smer opazovanja in ekscentričnost tirnice (e). Leva slika je primer zvezde HD 73256, sredinska je zvezda HD 142022 in desna slika je zvezda HD 4113. Vodoravna prekinjena črta prikazuje radialno hitrost baricentra. Elipse v skrajnem levem spodnjem kotu pa prikazujejo geometrijo opazovanja. (Orbitalna faza na x osi pomeni $\frac{\text{kot}}{2\pi}$.) [13].

$$\frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}. \quad (4.14)$$

Ko smo enkrat tako dobili hitrost zvezde, lahko narišemo, kako se le ta spreminja s časom. Na sliki (4.2) so primeri takšnih grafov, iz katerih lahko ugotovimo, da se zvezda giblje okoli skupnega težišča z nekim drugim telesom. Če je tirnica zvezde krožnica, dobimo krivuljo radialne hitrosti kot je prikazana na levem delu slike (4.2); če je tirnica eliptična, dobimo sredinski ali pa v primeru izredno eliptične tirnice desni primer na sliki (4.2). Na sliki (4.2) vidimo, da lahko že samo iz oblike krivulje ugotovimo nekaj parametrov opazovanega sistema.

4.2 Prekrivalna / tranzitna metoda

Naslednja metoda, ki nam veliko razkriva o zvezdah, ki se gibljeta okoli skupnega težišča, je prekrivalna metoda. V primeru, da se okoli zvezde giblje eksoplanet, se metoda imenuje tranzitna metoda, saj gre v tem primeru za prehod eksoplaneta preko zvezdine ploskvice. Ta metoda nam lahko da nekaj podatkov tudi o samem eksoplanetu. Metoda je preprosta: ko sta zvezdi oz. zvezda in eksoplanet poravnana s smerjo proti Zemlji, dobimo od sistema manj svetlobe kot v primeru, ko te poravnave ni. Ker se obe telesi gibljeta okoli skupnega težišča, se pojav periodično ponavlja.

Že stari Grki so na nebu opazili zvezdo, ki je vsake toliko časa izgubila nekaj svojega sijaja. Zvezdo so poimenovali Algol, kar v prevodu pomeni hudičeva zvezda. Prava narava te zvezde se je začela razkrivati šele leta 1667, ko je Geminiano Montanari prvi posnel njeno variabilnost, vendar se je periodičnost te variabilnosti razkrila šele stoletje kasneje. Leta 1782 sta John Goodricke in Edward Piggott predlagala, da je razlog periodičnosti spreminjanja sija te zvezde v tem, da imamo svetlo zvezdo, okoli katere kroži

še nek temnejši objekt, ali pa ima zvezda sama temnejša področja [3]. Ker se zvezda vrti, se to področje periodično obrača proti Zemlji oziroma stran od Zemlje. Leta 1881 je astronom Edward Charles Pickering objavil dokaze, da je Algol zares prekrivalna dvojna zvezda, kar je leta 1889 Hermann Carl Vogel potrdil z meritvijo periodičnega Dopplerjevega premika v spektru te zvezde [3].

Primer takšne poravnave je zelo redek, saj mora biti tirnica gibanja zvezd poravnana s smerjo proti Zemlji. Kljub temu je pomembna, saj je to edina direktna metoda, po kateri lahko določimo velikost primarne in sekundarne zvezde oziroma eksoplaneta.

Definirajmo najprej gostoto sevalnega toka (j_*) kot količino energije, ki jo zvezda izseva v eni sekundi skozi vsak kvadratni meter površine. Če privzamemo, da so zvezde črna telesa, potem je gostota sevalnega toka odvisna od površinske temperature zvezde, kot napoveduje Stefan-Boltzmanov zakon

$$j_* = \sigma T^4, \quad (4.15)$$

kjer je $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$ Stefanova konstanta.

Izsev zvezde L_* je energija, ki jo zvezda odda na enoto časa in je odvisen tako od velikosti (polmera) R_* zvezde, kot tudi od njene površinske temperature T

$$L_* = S_* \cdot j_*, \quad (4.16)$$

kjer smo z S_* označili površino zvezde. Če privzamemo, da je zvezda krogla, in upoštevamo še Stefan-Boltzmanov zakon, dobimo

$$L = 4\pi R_*^2 \sigma T^4. \quad (4.17)$$

Na Zemlji lahko merimo gostoto svetlobnega toka (j), ki je s te zvezde prišel do našega planeta. Ta gostota se s pomočjo izseva izraža kot

$$j = \frac{L_*}{4\pi d_Z^2}, \quad (4.18)$$

kjer je d_Z oddaljenost zvezde od Zemlje.

V primeru dvojne zvezde je gostota svetlobnega toka, ki ga na Zemlji izmerimo (kadar ni prekrivanja), vsota posameznih gostot svetlobnega toka:

$$j = j_1 + j_2. \quad (4.19)$$

Skupna gostota med prekrivanjem pa je odvisna od tega, kolikšen del prve oz. druge zvezde je z Zemlje viden (A_1 in A_2 sta tista dela površine zvezde, ki sta vidna na Zemlji)

$$j = \frac{1}{4\pi d_Z^2} \left(\frac{L_1 A_1}{\pi R_1^2} + \frac{L_2 A_2}{\pi R_2^2} \right), \quad (4.20)$$

pri čemer smo privzeli, da svetloba od obeh zvezd prepotuje enako razdaljo.

Vidno površino zvezde lahko določimo s pomočjo geometrijskih podatkov pri mrku. V tabeli (4.1) so zbrane možne stopnje mrka dvojnega sistema. V tabeli smo z ρ označili navidezno razdaljo med zvezdama, kot jo vidimo z Zemlje, R_1 in R_2 pa sta radija zvezd[12].

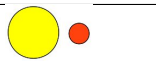
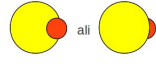
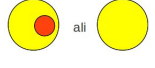
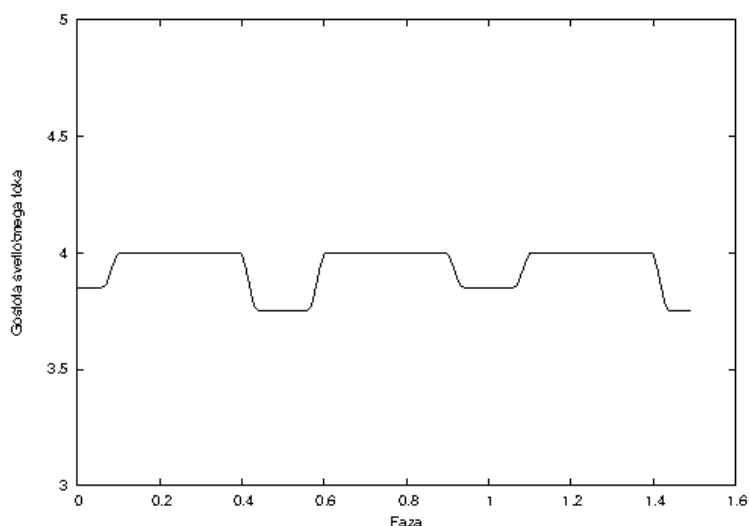
Stopnja	Pogoj	Videz
Brez mrka	$\rho > R_1 + R_2$	
Delni mrk	$(R_1 + R_2) > \rho > (R_1 - R_2)$	
Obročast ali popoln mrk	$(R_1 - R_2) > \rho$	

Tabela 4.1: Definicija stopenj mrka.

Na sliki (4.3) lahko vidimo teoretično napoved svetlobne krivulje v primeru, ko imamo prekrivalno dvojnico. Prva zvezda ima trikratno maso druge zvezde, po velikosti je petkrat večja, izsev pa je petnajstkrat večji kot pri drugi zvezdi. Inklinacija te dvojne zvezde je $89,9^\circ$. Graf sem izrisal s pomočjo programa GnuPlot.

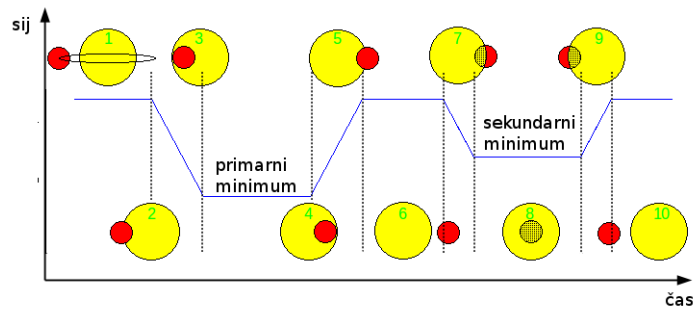


Slika 4.3: Teoretična krivulja, ki jo dobimo, ko imamo dve zvezdi z $m_2/m_1 = 1/3$, $R_2/R_1 = 0,2$, $j_2/j_1 = 1/15$.

4.2.1 Merjenje gostote svetlobnega toka

Na sliki (4.4) vidimo primer svetlobne krivulje za zvezdi, ki se gibljeta okoli skupnega težišča. Zvezdo, katere mrk je močnejši, se ponavadi označi za primarno zvezdo, zvezdo katere mrk je šibkejši, pa imenujemo sekundarna zvezda. V sferičnem modelu je oblika svetlobne krivulje odvisna od polmera primarne in sekundarne zvezde, od oddaljenosti med zvezdama, od izseva posamezne zvezde in od naklonskega kota opazovanja. V

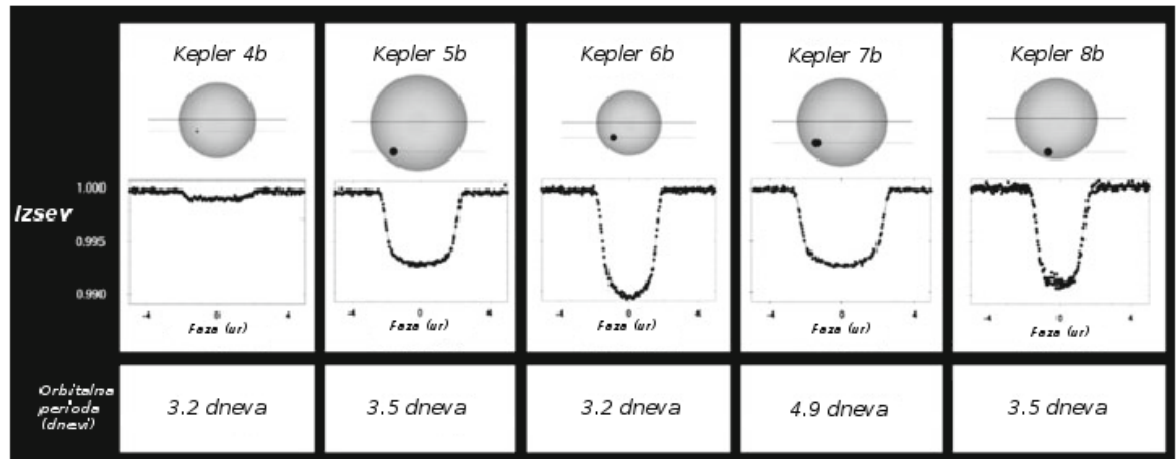
odvisnosti od naklonskega kota opazovanja ločimo pri prekrivalnih dvojnih zvezdah dva osnovna tipa mrka:



Slika 4.4: Slike prikazujejo svetlobno krivuljo dvojne zvezde, ki jo dobimo, ko se zvezdi gibljeta po krožnicah okoli skupnega težišča. Skicirani so tudi položaji zvezd. Slika prikazuje primer, ko je večja zvezda svetlejša in ima višjo površinsko temperaturo kot manjša in hladnejša zvezda. Inklinacija je 90° [11].

1. Pri **delnem mrku** se ploskvi obeh zvezd le delno prekrijeta, zato je oblika svetlobne krivulje ostra in ima obliko črke V .
2. Pri **popolnem mrku** ploskev ene zvezde popolnoma prekrije ploskev druge zvezde. Ker sta ponavadi zvezdi različnih velikosti, pri tej vrsti mrka nadalje ločimo med celovitim in obročastim mrkom. Kadar večja zvezda prekrije manjšo, ima mrk ravno dno, kadar pa manjša prekrije večjo, ima svetlobna krivulja obliko črke U . Mrk ima takšno obliko zaradi robne zatemnitve. Temperatura zvezde proti notranjosti narašča, z naraščujočo temperatura pa po Stefanovem zakonu narašča tudi gostota svetlobnega toka, ki jo telo seva. Ko gledamo prečni preseki zvezde, nam sredinski predeli zvezde svetijo močneje kot predeli na obrobju, saj gledamo globlje v notranjost zvezde (proti višjim temperaturam). Ko torej pride do tranzita eksoplaneta, nam gostota svetlobnega toka pada, ko se eksoplanet navidezno približuje centralnim predelom.

Kot smo videli zgoraj, so dvojne zvezde zelo dobri objekti za astronomska proučevanja, saj nam ob preučevanju tirnic obeh zvezd razkrivajo mase posameznih zvezd. Dvojne zvezde pa razkrivajo še veliko več. Najverjetnejša možnost, da se dve zvezdi gibljeta okoli skupnega težišča, je ta, da sta nastali hkrati. Če je medsebojna razdalja velika, lahko rečemo, da ti zvezdi živita ločeno ena od druge. S proučevanjem takih dvojnih zvezd lahko ugotovimo, kako je življenjska pot zvezde odvisna od njene mase in kemične sestave. Prekrivalnost teh zvezd nam omogoča tudi določitev izseva in polmera posameznih zvezd. Dvojne zvezde pa so tudi eden od načinov za določanje razdalj v Galaksiji.



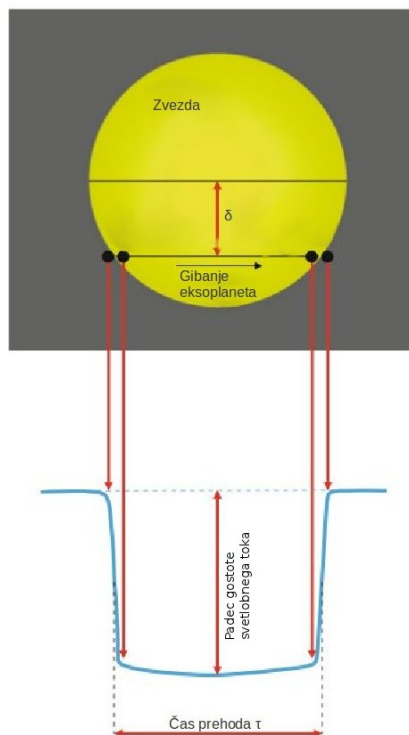
Slika 4.5: Svetlobne krivulje kot jih dobimo, ko gredo preko zvezdine ploskve različno veliki eksoplaneti [3]. Kepler-4 b spada med vroče Neptune, ostali štiri eksoplaneti pa med vroče Jupitre.

Kako si lahko z zgornjo metodo pomagamo pri eksoplanetih? Pri prehodu eksoplaneta preko zvezdine ploskve je padec gostote svetlobnega toka z zvezde občutno manjši kot v primeru dvojne zvezde, ponavadi okoli 1-2%. Na sliki (4.5) lahko opazimo, da je padec svetlobe odvisen od velikosti eksoplaneta in od geometrije tranzita. Padec gostote svetlobnega toka je v prvem redu odvisen kar od razmerja med vidnim površjem eksoplaneta in zvezde:

$$\frac{\Delta j}{j_*} = \left(\frac{R_P}{R_*} \right)^2. \quad (4.21)$$

V primeru Sonca in Jupitra oziroma Zemlje ugotovimo, da je padec gostote svetlobnega toka 1% oz. 0,008%. Vidimo, da je s to metodo eksoplanete najlažje detektirati v okolici šibkejših zvezd (recimo t.i. rdečih pritlikavk), saj bo v primeru eksoplaneta, velikega kot Jupiter ali kot Zemlja, ta efekt padca gostote svetlobnega toka relativno močnejši. Problem, ki se tukaj pojavi pa je ta, da mora biti rdeča pritlikavka dovolj blizu, da jo sploh lahko detektiramo, saj zvezda spektralnega tipa M sveti bistveno manj kot zvezde tipa G, kakršno je Sonce.

Na sliki (4.6) vidimo osnovni model tranzita eksoplaneta in svetlobno krivuljo, ki pripada temu modelu. Na sliki je lepo razvidno, da se ob nastopu tranzita svetlobna krivulja hitro spusti. Ko je celoten eksoplanet pred zvezdino ploskvico, se svetlobna krivulja še vedno spušča, dokler ni eksoplanet na sredini zvezdine ploskve, potem pa so razmere simetrično obrnjene. Če privzamemo, da je tirnica eksoplaneta krožnica, potem se obo-



Slika 4.6: Osnovni model prehoda eksoplaneta preko zvezdine ploskve.

dna hitrost eksoplaneta ohranja, zato je obhodni čas $T = \frac{2\pi a}{v}$. Čas prehoda eksoplaneta τ preko ploskve je v tem primeru (pomagamo si lahko s pomočjo slike (4.6))

$$\tau = \frac{2R_* \cdot \cos \delta + 2R_P}{v}, \quad (4.22)$$

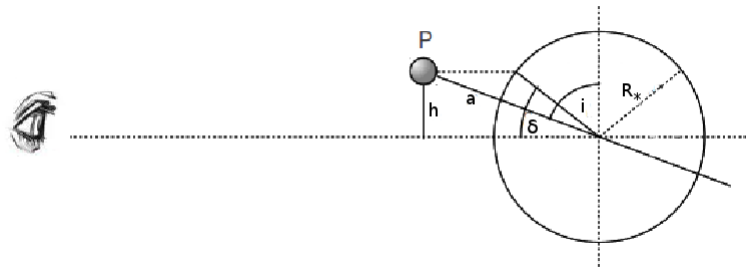
kjer smo z δ označili kot, za katerega je slika eksoplanetove tirnice na zvezdini ploskvi nagnjena glede na smer opazovanja (slika 4.7). Ko v enačbi (4.22) nadomestimo hitrost, dobimo

$$\tau = \frac{T}{\pi} \frac{R_* \cdot \cos \delta + R_P}{a}. \quad (4.23)$$

Ker lahko izmerimo tako čas trajanja mrka, kot tudi periodo mrkov, o velikosti R_* in masi zvezde M_* pa lahko sklepamo na podlagi strukture in spektroskopskih meritev, lahko tako tudi dobimo kot δ , če upoštevamo še tretji Keplerjev zakon (3.27). O velikosti eksoplaneta R_p lahko sklepamo iz enačbe (4.21) - torej iz tega, kolikšen relativni delež zvezde nam eksoplanet prekrije.

Slika (4.7) prikazuje pogled na tranzit s strani. Na sliki lahko vidimo, da je $\sin \delta = \frac{b}{R_*}$ in $\cos i = \frac{h}{a}$. Če iz prve enačbe izpostavimo h in jo nesemo v drugo enačbo, dobimo

$$\cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a}. \quad (4.24)$$



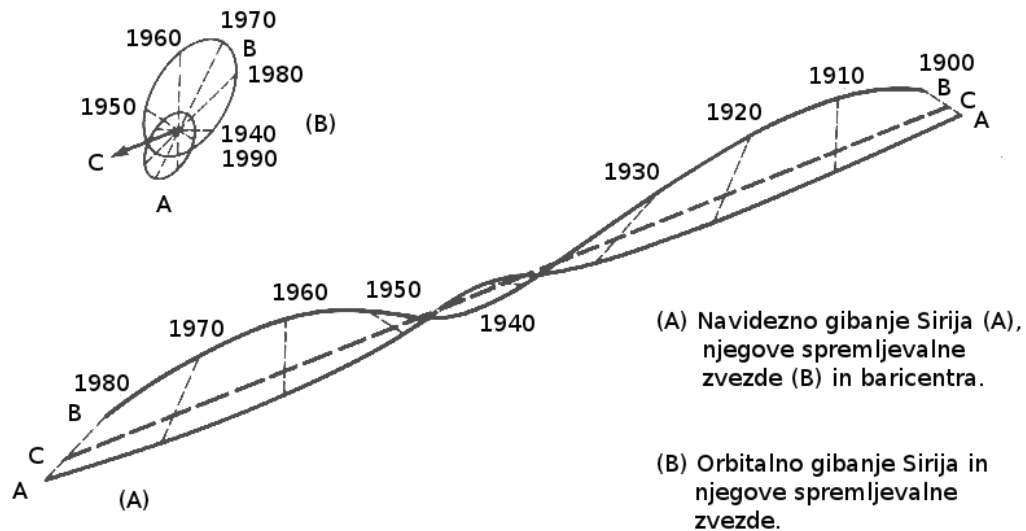
Slika 4.7: Geometrijske razmere pri tranzitu eksoplaneta.

Tako smo dobili tudi kot, za katerega je orbita eksoplaneta nagnjena glede na smer opazovanja z Zemlje.

Prva detekcija spreminjanja zvezdnega sija zaradi eksoplaneta sega v leto 1999. Eksoplanet so odkrili s pomočjo metode radialnih hitrosti, s to metodo pa so ugotovili, da okoli zvezde HD 209458 kroži eksoplanet, ki zvezdo obkroži v 3,5 dneva [3]. Prvo odkritje eksoplaneta s pomočjo te metode sega v leto 2002, ko je Andrzej Udalski odkril OGLE-TR-10-b in OGLE-TR-56-b [4]. Eksoplaneta so potrdili s pomočjo metode radialnih hitrosti. S to metodo je dandanes odkritih okoli 20 % vseh eksoplanetov. Leta 2009 so v Zemljino orbito lansirali teleskop Kepler, katerega namen je iskanje Zemlji podobnih eksoplanetov, ki se nahajajo v območju primernem za razvoj življenja, okoli drugih zvezd. Teleskop ima 95 centimetrski objektiv in na vsakih 30 minut zajame širokokotno sliko 100.000 zvezd. Teleskop je usmerjen vedno v isto področje neba (proti ozvezdju Laboda in Lire). Ker je lahko sprememba gostote svetlobnega toka tudi posledica pulzacije zvezde ali pa prehoda velike temne pege, objavijo odkritje eksoplaneta šele, ko opazijo tri zaporedne mrke v gostoti svetlobnega toka.

4.3 Astrometrija

Veja astronomije, ki se ukvarja s preučevanjem opazovanja položaja nebesnih teles, se imenuje astrometrija. Astrometrija odkriva, kako se v daljšem časovnem obdobju spreminja položaj zvezd na nebu. Slika (4.8) prikazuje astrometrično krivuljo zvezde Sirij skozi daljše časovno obdobje. Na sliki lahko lepo vidimo, da se zvezda ne premika po ravni črti, temveč da nekoliko opletata. Krivec za to opletanje je prisotnost še ene zvezde, ki pa s prostim očesom ni vidna, saj gre za belo pritlikavko. Pri tej metodi je zelo pomembna točnost meritve položaja, saj so premiki zelo majhni in z razdaljo padajo. Največji premiki so okoli ene ločne sekunde, zato nas migetanje zvezd zaradi atmosfere okoli našega planeta zelo moti. Tem nevšečnostim se lahko izognemo, če uporabimo satelit, ki je dvignjen nad našo atmosfero (recimo satelit Hipparcos ali Gaia v bližnji prihodnosti). Pri bližnjih

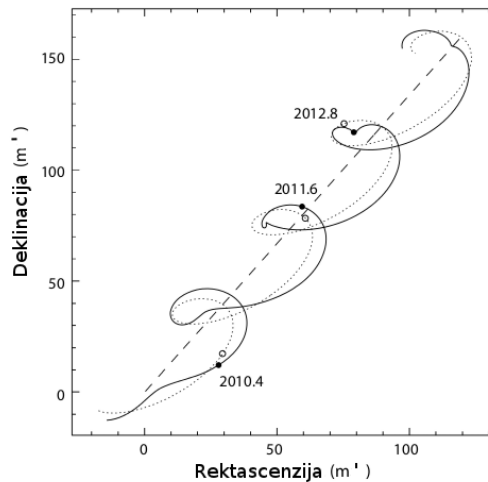


Slika 4.8: Slika prikazuje gibanje zvezde Sirij, ki nekoliko pleše glede na ostale zvezde in se po nebu ne premika v ravni črti [11].

dvojnih zvezdah, ki imajo dolge obhodne čase (kar pomeni, da sta zvezdi relativno daleč vsaka sebi), lahko s pomočjo astrometrije določimo periodično premikanje ene (ali obeh zvezd), projicirano na ravnino neba. Na sliki (4.9) lahko vidimo, kakšna je slika zvezdine poti na nebu (polna črta), če je v bližini zvezde še eno veliko manj masivno telo, kot je zvezda sama. Pri odkrivanju eksoplanetov moramo pri tej metodi biti še bolj natančni, saj povzročajo eksoplaneti še manjše nepravilnosti pri premikanju zvezd (okoli mili ločne sekunde za eksoplanete Jupitrove mase). Ta metoda je najbolj uporabna pri sistemih, kjer imamo manj masivno zvezdo, okoli katere se giblje masivnejši eksoplanet z dolgo periodo. Prednost te metode je, da nam omogoča določitev mase in orbitalne inklinacije eksoplaneta [13].

4.4 Gravitacijsko mikrolečenje

V splošni teoriji relativnosti je znano, da masa oz. energija ukrivlja prostor - čas. Svetlobnemu žarku, ki se giblje v ukrivljenem prostor - času, se spremeni smer (se ukrivi pot), zato se objekti gibljejo nekoliko drugače, ko se približajo drugim objektom. Manj znano je, da se podobno zgodi tudi svetlobnemu žarku. To pomeni, da se svetlobni žarek ukrivi - shematsko zlomi (sliki 4.10). Temu pojavu pravimo gravitacijsko lečenje. Poznamo tri vrste lečenja, ki so odvisne predvsem od tega, kako masiven je objekt, ki povzroča lečenje, in od oddaljenosti izvora svetlobe od objekta lečenja. O močnem lečenju govorimo, ko kot leča nastopa masiven objekt in nastane več slik izvora [14]. Pri šibkem lečenju leča ni dovolj masivna, da bi tvorila večkratno sliko izvora, a je lahko slika še vedno popačena

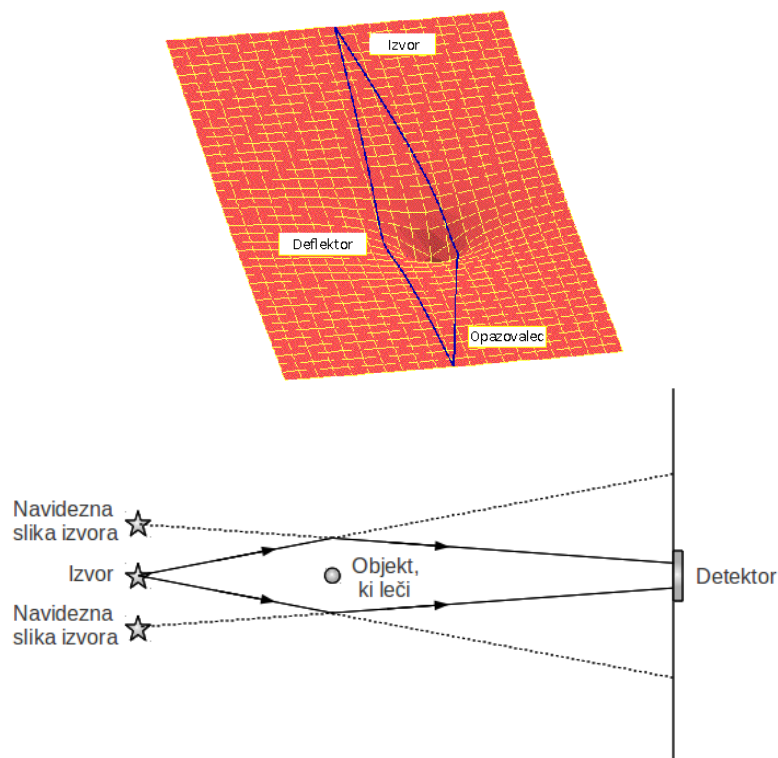


Slika 4.9: Slika prikazuje shemo zvezdine poti na nebu, za zvezdo, ki je oddaljena 50 pc od Osončja in se premika s hitrostjo 50 mili ločnih sekund na leto. Okoli zvezde se na oddaljenosti 0,6 AE giblje eksoplanet 15-krat masivnejši od Jupitra katerega tirnica je elipsa z $e = 0,2$. Ravna črtkasta črta prikazuje gibanje težišča, kot bi ga videli iz težišča Osončja. Pikčasta črta prikazuje efekt paralakse, ker se Zemlja vrti okoli Sonca. Polna črta prikazuje gibanje zvezde, kot se giblje, zaradi eksoplaneta v njeni bližini (efekt je 30-krat povečan, da je sploh kaj vidno) [13].

(tako raztegnjena kot tudi svetlejša kot je bil izvor). O mikrolečenju govorimo, ko nam kot leča deluje kompakten nebesni objekt (normalna zvezda, rjava pritlikavka ali ostanek zvezde kot je bela pritlikavka, nevtronska zvezda oziroma črna luknja). Ko opazujemo izvor, opazimo, da se relativna svetlost objekta spreminja, ko se mu leča navidezno približuje. To spreminjanje relativne svetlosti imenujemo pojav mikrolečenja. V primeru, da sta izvor in leča samostojni zvezdi, opazimo počasno naraščanje relativne svetlosti. V primeru, da se okoli zvezde, ki predstavlja lečo, giblje še eksoplanet, pa se to v svetlobni krivulji izraža kot dodatno kratko povečanje relativnega sija, če so seveda geometrijske razmere ustrezne (eksoplanet mora priti v bližino navidezne slike zvezde, ki je naš predmet proučevanja). Prednost te metode je, da lahko že eksoplaneti, masivni kot Zemlja, povečajo relativni sij vsaj na dvakratno vrednost.

Gravitacijsko lečenje je pojav, ko se svetlobi ukrivi pot, ko pride v bližino dovolj masivnega telesa. Pojav je podoben, kot če bi gledali, kako se asteroidu spremeni pot, ko se dovolj približa Zemlji in zato le ta deluje nanj s svojim gravitacijskim poljem. Seveda je ukrivljenje svetlobnega žarka veliko manjše kot se zakrivi tir asteroidu, a vseeno ta pojav ni nepomemben, kljub temu da pojav pada, ko se oddaljujemo od izvora lečenja. Pojav lečenja je tudi manjši, če je masa leče manjša, a ker so razdalje v astronomiji velike, se na takšnih oddaljenostih odklon svetlobe lahko kar precej pozna.

V limiti šibkega lečenja lahko kot, pod katerim se svetlobi ukrivi pot, izračunamo kot [16]



Slika 4.10: Pot svetlobnega žarka kot ga napoveduje teorija relativnosti [15].

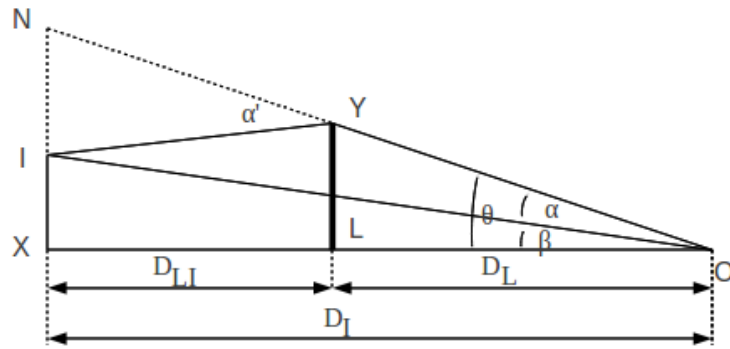
$$\alpha' = \frac{4GM}{c^2 \theta D_L}, \quad (4.25)$$

kjer je M masa objekta, ki leči, D_L razdalja med opazovalcem in lečo ter θ kot, pod katerim vidimo navidezno sliko.

Gravitacijska leča ne naredi prave slike, kot smo tega navajeni iz optike, naredi pa optične efekte, ki se jih da opazovati. Takšen pojav je recimo pojav Einsteinovega obroča okoli zvezde. Ta obroč se pojavi v primeru, ko sta izvor in leča natanko poravnani s smerjo opazovanja proti Zemlji. V tem primeru je leča zakrivila pot svetlobe bolj oddaljene zvezde in le to lahko vidimo v obliki obroča okoli objekta v centru. Če do gravitacijskega lečenja ne bi prišlo, bolj oddaljene zvezde ne bi mogli opazovati. Pri gravitacijskem lečenju lahko opazimo tudi, da ko se izvor in leča približujeta fazi prekrivanja, se izvor preslika v dve zakrivljeni črti, ki nastaneta v bližini, kjer kasneje nastane Einsteinov obroč, ampak le tega ne opazimo, ker so koti premajhni. Lahko pa ga izračunamo.

Slika (4.11) prikazuje geometrijske razmere kot bi jih videl nekdo, ki bi gledal vse skupaj s strani. Na sliki je z O označen opazovalec lečenja, z L leča, z I izvor in z N navidezna slika izvora. Ker so vsi koti (α , β , θ in α') majhni, lahko upoštevamo, da so si nekateri trikotniki podobni in tako lahko izpeljemo naslednje [18]:

$$\beta = \theta - \frac{D_I - D_L}{D_I} \alpha'. \quad (4.26)$$



Slika 4.11: Slika prikazuje geometrijske razmere, ko pride do lečenja [17].

Če ta izraz še malo preoblikujemo, dobimo:

$$\beta = \theta - \frac{4GM}{c^2\theta} \frac{D_I - D_L}{D_I D_L}. \quad (4.27)$$

V primeru popolne poravnave leče in izvora ($\beta = 0$) lahko iz enačbe (4.27) ugotovimo, da nam okoli leče nastane obroč, katerega kot je:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \left(\frac{1}{D_L} - \frac{1}{D_I} \right)}. \quad (4.28)$$

Iz zgornje enačbe (4.28) vidimo, da je kot θ_E odvisen od mase leče ter od razdalje do leče oziroma do izvora. Ker sta razdalji bolj ali manj konstantni, se bo izvor svetlobe preslikal v obroč okoli leče, ki bo večji, če bo masa leče večja. Temu pojavu rečemo Einsteinov obroč (r_E) in kot, ki pripada temu krogu, označimo s θ_E . Sliko Einsteinovega obroča lahko opazimo na sliki (4.12)

Približna vrednost Einsteinovega radija znaša

$$r_E = 4,9 \text{AE} \left(\frac{M}{0,5 M_\odot} \right)^{1/2} \left(\frac{D_L}{6 \text{kpc}} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{D_L}{D_I} \right)^{1/2}, \quad (4.29)$$

kjer smo z M_\odot označili maso Sonca in z kpc kiloparsek (1 parsek je oddaljenost, s katere bi 1 astronomsko enoto dolgo daljico videli pod kotom $1''$).

Ko izraz (4.28) za Einsteinov obroč vnesemo v enačbo leče (4.27), dobimo:

$$\beta = \theta - \frac{\theta_E^2}{\theta}. \quad (4.30)$$

Rešitvi zgornje kvadratne enačbe sta

$$\theta_{\pm} = \frac{1}{2} (\beta \pm \sqrt{\beta^2 + 4\theta_E^2}). \quad (4.31)$$



Slika 4.12: Primer Einsteinovega obroča (v resnici dvojnega Einsteinovega obroča), ki ga je ujel vesoljski teleskop Hubble [19].

Vidimo, da je vsak izvor preslikan dvakrat, kar je prikazano na sliki (4.13). Sliki, ki nastaneta, sta vsaka na svoji strani izvora. Slika, ki jo dobimo, če v zgornji enačbi uporabimo $+$, je nekoliko zunaj Einsteinovega obroča, slika, ki jo dobimo, ko uporabimo $-$, pa znotraj Einsteinovega obroča. Ko se leča navidezno odmika od izvora (torej ko β narašča), se ena slika približuje leči in počasi blede, medtem ko se druga slika približuje pravi poziciji izvora in vse bolj prevzema njegovo svetlost.

Sliko Einsteinovega obroča je zelo težko posneti, saj je le ta zelo majhen, lahko pa zaznamo drugi pojav, ki se zgodi pri gravitacijskem lečenju, in sicer povečanje gostote svetlobnega toka.

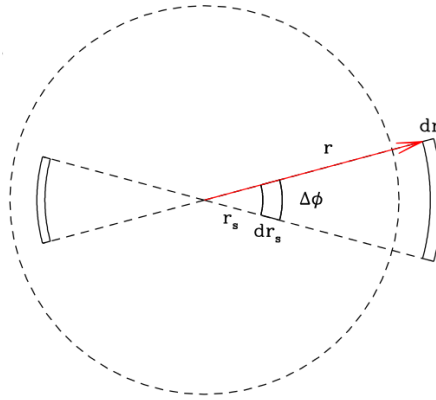
Ker gravitacijsko lečenje ne spremeni sija, spremeni pa površino slike izvora, lahko v primeru točkaste leče ojačitev μ zaradi gravitacijskega lečenja izračunamo kot

$$\mu_{\pm} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}} \right), [20]$$

kjer smo uvedli novo spremenljivko $u = \frac{\beta}{\theta_E}$.

Slika (4.14) prikazuje, kako se svetlobna krivulja pri lečenju spreminja, ko se izvor in leča bližata prekrivanju oz. se od tega dogodka oddaljujeta.

Kot smo že omenili, nastane navidezna slika izvora na oddaljenosti Einsteinovega radija. Iz enačbe (4.29) vidimo, da je navidezna razdalja od leče do slike izvora reda velikosti planetarnega sistema, zato se nam porodi vprašanje, kaj bi se zgodilo, če bi imela zvezda, ki leči, okoli sebe še eksoplanet? Če bi se ta eksoplanet znašel v bližini slike izvora, bi prišlo še enkrat do lečenja. Ker je masa eksoplaneta bistveno manjša od mase



Slika 4.13: Na sliki imamo narisano tanko plast med r_s in $r_s + dr_s$. Ta tanka plast se v primeru točkaste leče preslika v dve plasti (leva in desna plast na sliki). Črtasta krivulja prikazuje Einsteinov obroč.

zvezde, je ta pojav težje opazovati, saj je sekundarna ojačitev bistveno krajša. Kot vidimo na sliki (4.14), se to ojačitev da opaziti kot dodaten vrh v svetlobni krivulji. Ta vrh je veliko ožji kot primarni. V nekaterih primerih je lahko ta sekundarna ojačitev tudi močnejša od primarne ojačitve, a je po širini vedno ožja od primarne ojačitve.

Na ta način so do sedaj odkrili okoli 5 % vseh do sedaj znanih eksoplanetov.

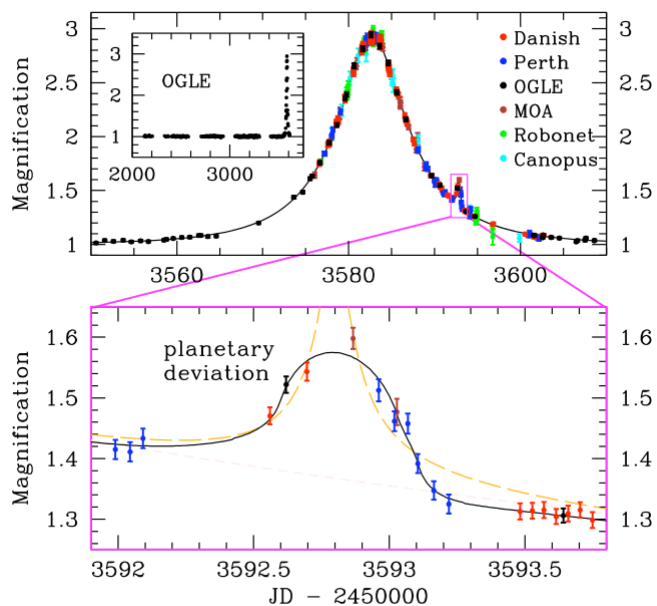
4.5 Direktno slikanje in opazovanje

Planeti ne oddajajo lastne svetlobe, zato jih je težje videti skozi teleskop. Ta metoda poskuša za detekcijo izrabiti zvezdino svetlobo, ki se od eksoplaneta odbije. Ker je svetloba z matične zvezde veliko močnejša od odbite svetlobe z eksoplaneta, je detekcija eksoplanetov s to metodo težka, a ne nemogoča. Možnosti za detekcijo eksoplaneta so večje pri večjih eksoplanetih, ki so dlje od matične zvezde. Funkcijo odbite svetlobe bi lahko zapisali kot [13]

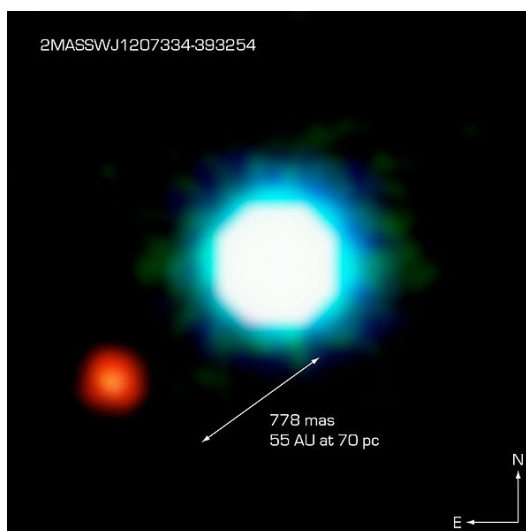
$$\frac{j_P}{j_*} = p(\lambda, \alpha) \left(\frac{R_P}{a} \right)^2,$$

kjer $p(\lambda, \alpha)$ opisuje efekte orbitalne inklinacije, α pa je kot med zvezdo in opazovalcem, kot je viden s planeta.

$\frac{j_P}{j_*}$ je zelo majhen in tudi pri eksoplanetih Jupitrove velikosti ponavadi ne preseže velikostnega reda 10^{-9} , zato je signal eksoplaneta večinoma skrit med šumom meritve, ki nam ga povzroča naša atmosfera s svojimi turbulencami. Leta 2004 je Gaelu Chauvinu na VLT-ju v Čilu uspelo posneti sliko eksoplaneta v bližini rjave pritlikavke 2M1207 - slika (4.15) [13]. Rjava pritlikavka je od nas oddaljena 170 svetlobnih let in oddaja le za okoli 0,2% toliko svetlobe kot Sonce. Predvidevajo, da je eksoplanet nekajkrat masivnejši od Jupitra in na oddaljenosti 40 AE.



Slika 4.14: Na zgornji sliki imamo svetlobno krivuljo OGLE 2005-BLG-390. Kot lahko opazimo, imamo zraven primarnega vrha še eden veliko manjši vrh, ki ga je povzročil eksoplanet mase $5,5 M_Z$ na oddaljenosti $2,6 \text{ AE}$ [20].



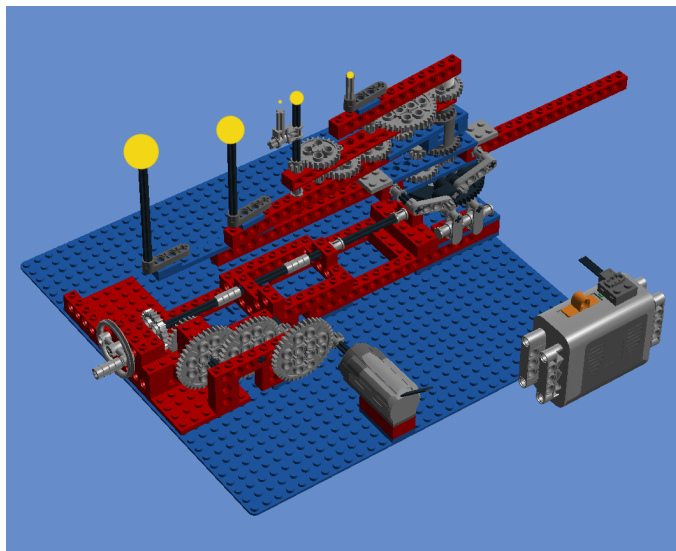
Slika 4.15: Slika rjave pritlikavke 2M1207 (modrikast objekt) in 2M1207b (manjši rdečkast objekt) v infrardečem spektru. Objekta sta na nebu med sabo ločena manj kot 1 ločno sekundo. Sliko so posneli z Zelo velikim teleskopom (Very Large Telescope - VLT) [21].

Tranzitna metoda odkrivanja eksoplanetov in dvojnih zvezd v šoli

O eksoplanetih se vse več govori. Glavni krivec je seveda naše zanimanje, ali smo v veselju sami, ali pa obstajajo še kakšne druge oblike življenja, ki niso vezane na Zemljo. Samo v naši galaksiji je okoli 200 milijard zvezd. Nedolgo nazaj so astronomi mislili, da je okoli 50% zvezd dejansko binarnih sistemov, 50% zvezd pa je tistih, ki so se ob nastanku obdale s protoplanetarnim diskom, iz katerega so se kasneje razvili planeti. Še 10 let nazaj je bilo odkritih samo nekaj eksoplanetov, ta številka pa je do danes močno poskočila (9.1.2013 je bilo odkritih 854 eksoplanetov; 126 eksoplanetov je v sistemu, kjer se okoli zvezde giblje več eksoplanetov [25]). Glavne zasluge za to ima razvoj tehnologije. Znanstvenike je močno presenetilo tudi odkritje eksoplaneta v bližini dvojne zvezde, saj so mislili, da tirnice eksoplanetov v takšnih sistemih ne bi bile obstojne. Devet eksoplanetov, ki so jih do sedaj odkrili, je potencialnih kandidatov za razvoj življenja [26], še 30 eksoplanetov pa čaka na takšno potrditev.

Teleskop Kepler je v Zemljini orbiti od leta 2009 in odkriva dvojne zvezde oziroma zvezde, okoli katerih se gibljejo eksoplaneti, s pomočjo tranzitne metode. S pomočjo tega teleskopa so do danes (9.1.2013) odkrili 108 eksoplanetov, medtem ko jih 2320 še čaka na potrditev [27]. Najbolj zanimivi do sedaj odkriti eksoplaneti so Gliese 581 g, Gliese 667 Cc in Kepler 22 b, saj bi naj bili ti eksoplaneti zelo podobni Zemlji (po velikosti, masi, površinski temperaturi ...).

V zadnjem letu je mogoče v poljudnoznanstvenih revijah (Spika, Presek, Gea, Proteus, National Geographics ...) najti vedno več člankov o eksoplanetih. Pri pregledovanju osnovnošolskih in srednješolskih učbenikov za fiziko, geografijo in naravoslovje pa sem le redko kdaj naletel na besedne zveze, ki so nakazovale, da Osončje ni edini planetarni sistem v Galaksiji (v učbenikih: Helena Verdev: Raziskujem Zemljo 6; Jurij Kunaver: Geografija za srednje šole oz. Marjan Hribar: Električna svetloba, snov, je omenjeno, da se



Slika 5.1: Slika prikazuje model planetarnega sistema, ki ima 4 planete, ki krožijo okoli matične zvezde.

okoli zvezde lahko rodijo tudi planeti). Glede na to, da je beseda eksoplanet novejšega izvora, seveda ni pričakovati, da bi se pojavila v učbenikih, ki so bili napisani že 10 ali več let nazaj, a zaradi aktualnosti teme (in menim, da vrhunec te teme šele prihaja) bi bilo dobro, da bi razmislili, da bi v učne načrte vključili tudi smernice, ki bi profesorje usmerjale, katere aktualne teme bi se lahko izbralo kot izbirno temo v učnem načrtu. Ker samo teoretično znanje o eksoplanetih ne zadostuje, da bi si učenci vse skupaj lahko predstavljali, sem se odločil, da svoje delo in meritve predstavim v obliki navodil za vaje. Menim, da so navodila za vaje, ki so zbrana v tem delu diplomskega dela, zelo potrebna in uporabna.

5.1 Sestava poskusa za planete

5.1.1 Planetarni model

Iz Lego kock naredimo model planetarnega sistema. Na sliki (5.1) vidimo model planetarnega sistema, ki ima 4 planete, ki krožijo okoli središčne zvezde, ki jo predstavlja žarnica. Navodilo za sestavo modela na sliki (5.1) najdemo v prilogi A. Ko imamo model sestavljen, ga lahko poženemo in izmerimo, kolikšni so obhodni časi štirih kroglic. Ko imamo enkrat obhodne čase, lahko preverimo, če so kroglice na takšni oddaljenosti, da bo veljal Keplerjev zakon. Če katera od kroglic ni na pravšnji oddaljenosti, jo prestavimo bližje ali dlje od svetila, da bo enačba $\frac{a^3}{T^2} = konst.$ še vedno veljala. Paziti moramo tudi, da so kroglice na istih višinah, da bomo lahko z enim merilnikom zaznali mrke pri vseh kroglicah.

Kot svetilo uporabimo žarnico, ki ima delno neprozorno steklo (recimo belo steklo), saj



Slika 5.2: Slika prikazuje postavitev modela in žarnice.

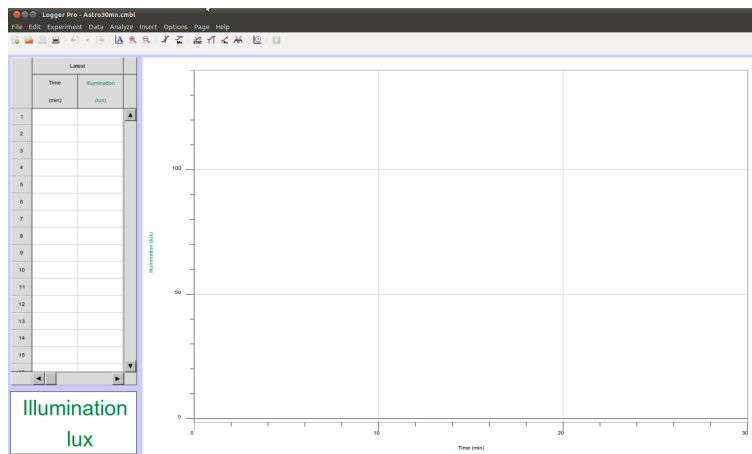


Slika 5.3: Na levi strani je Vernierov senzor svetlobe, na desni pa Vernierov vmesnik za računalnik (LabPro).

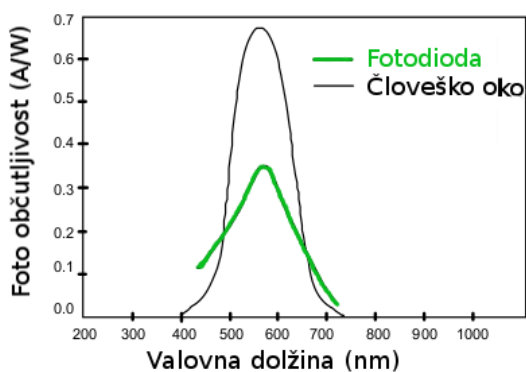
bo ta žarnica nekoliko boljše ponazorila zvezdo kot žarnica, ki ima popolnoma prozorno steklo. Seveda mora biti glava žarnice okrogle oblike. Žarnico privijemo v prikllop za žarnico, ki ga vpneemo v navadno prižemo. Navadno prižemo vpneemo v kotno prižemo in le to v stativno palico, ki smo jo že prej pritrdili v stativ. Žarnico spustimo na isto višino kot so naše kroglice - slika (5.2).

5.1.2 Detekcija svetlobe

Naše eksperimente bomo izvajali s pomočjo Vernierovega senzorja za svetlobo - slika (5.3), ki ga bomo preko Vernierovega vmesnika LabPro - slika (5.3) priključili na računalnik. Na računalniku bomo svetlobno krivuljo opazovali s pomočjo programa Logger Pro - slika (5.4). Vernierov senzor za svetlobo uporablja silicijevo fotodiodo, ki se ji napetost spreminja v odvisnosti od vpadnega svetlobnega toka. Kot je razvidno iz grafa na sliki (5.5), je ta fotodioda za vidno svetlobo manj občutljiva kot človeško oko, a je vrh njene občutljivosti še vedno v rumenem delu svetlobe, podobno kot pri človeškem očesu [23].



Slika 5.4: Slika prikazuje program LoggerPro, ko v Vernierov vmesnik vključimo merilnik svetlobe.



Slika 5.5: Slika prikazuje spektralno občutljivost silicijeve fotodiode, ki je v Vernierovem merilniku za svetlobo.

5.2 Meritve in rezultati

5.2.1 Določanje velikosti eksoplaneta

Naloga A

Iz oblike svetlobne krivulje izračunaj velikost kroglice.

Naloga B

Iz oblike svetlobne krivulje izračunaj velikost zvezde.

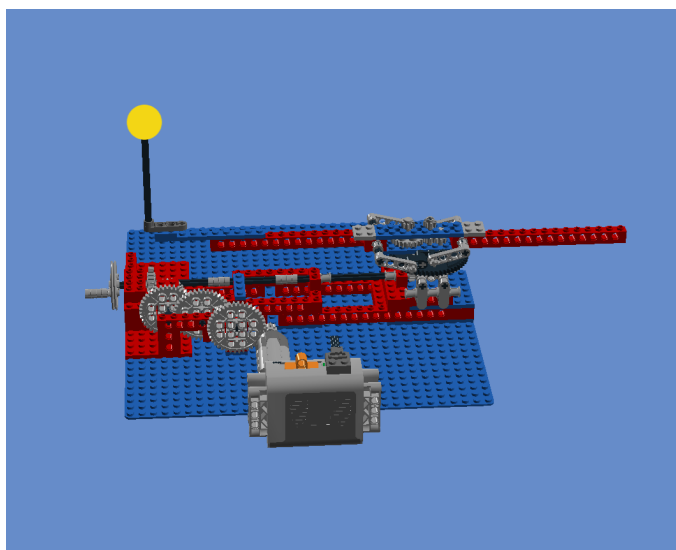
Pripomočki

- Vernierov vmesnik

- Vernierov merilnik svetlobe
- navadna neprozorna žarnica
- priklop za žarnico s podaljškom za vtičnico
- dve stojali
- dve stativni palici
- dve kotni prižemi
- navadna prižema
- Lego kocke (za model 1 kot je prikazan na sliki 5.6)
- stiroporna (lesena, plastična ...) kroglica velikosti 3 cm
- meter

Izvedba vaje

Sestavimo model kot je prikazan na sliki (5.6). Načrt za sestavo modela je v prilogi A. Kot planet uporabimo stiroporno kroglico. Senzor za svetlobo pritrđimo v kotno prižemo, ki jo privijemo v stativno palico. Stativno palico pritrđimo v stojalo. V navadno prižemo pritrđimo priklop za žarnico, v katerega privijemo žarnico, in jo pritrđimo v drugo kotno prižemo ter to prižemo preko stativne palice pritrđimo v stojalo. Žarnico postavimo nad os vrtenja Lego kock.



Slika 5.6: Na sliki vidimo model z enim eksoplanetom.

Preverimo, če so senzor, žarnica in stiroporna kroglica v isti ravnini. Postavimo senzor na neko oddaljenost od žarnice (recimo 50 cm) in poženemo merilnik ter Lego kocke. Meritev opravljamo toliko časa, da se nam na računalniku izriše vsaj en mrk.

Meritev ponovimo na treh različnih oddaljenostih stiroporne žogice od žarnice (recimo 4 cm, 8 cm in 10 cm), pri tem lahko uporabimo na drugih oddaljenostih tudi kro-

glice drugačnih velikosti. Meritev moramo opraviti v temnem prostoru (ali pa vse skupaj zakriti), da nas dnevna svetloba ne moti.

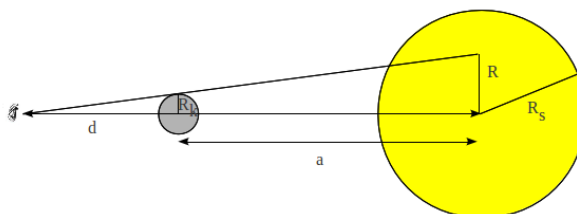
Rezultati

Podrobno si oglejmo obliko mrka, ki smo ga dobili pri meritvi. Iz grafa razberemo, kolikšna je bila osvetljenost pred mrkom (E_0) in kolikšna je bila osvetljenost med mrkom (E_1 - takrat, ko je globina mrka največja). Oba podatka vnesemo v tabelo (5.1).

Privzemimo, da je padec gostote svetlobnega toka odvisen kar od razmerja kvadratov radija, kot imamo zapisano v enačbi (4.21). Iz te enačbe lahko izrazimo velikost kroglice:

$$R = R_s \cdot \sqrt{\frac{E_0 - E_1}{E_0}}, \quad (5.1)$$

kjer smo z R_s označili radij svetila.



Slika 5.7: Slika prikazuje geometrijo, ki jo moramo upoštevati, da lahko izračunamo pravilno velikost kroglice.

V našem primeru ne smemo zanemariti, da je oddaljenost kroglice od žarnice primerljiva z oddaljenostjo merilnika od žarnice. Iz slike (5.7) lahko hitro ugotovimo, da se nam v njej skrivata dva podobna trikotnika, ki imata za kateti R_k oziroma $d - a$ in R oziroma d . Ko upoštevamo še enakost za podobnost trikotnikov, dobimo sledečo enačbo:

$$R_k = R \cdot \frac{d - a}{d}. \quad (5.2)$$

Seveda ne smemo pozabiti izmeriti velikosti svetila in razdaljo med svetilom in merilnikom.

Velikost svetila: $R_s = \underline{\hspace{2cm}}$

Razdalja med svetilom in merilnikom: $d = \underline{\hspace{2cm}}$

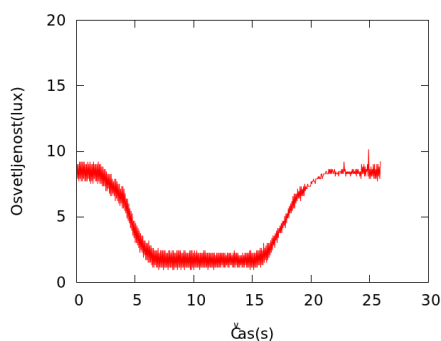
V tabeli (5.1) smo z a označili oddaljenost kroglice od žarnice, E_0 in E_1 nam predstavljata osvetljenost merilnika svetlobe v primeru, ko nimamo mrka oziroma v primeru, ko imamo mrk. R je polmer kroglice, ki bi ga dobili iz enačbe (4.21), R_k pa velikost kroglice, ki jo dobimo, če upoštevamo, da razdalja med svetilom in kroglico ni zanemarljiva v primerjavi z razdaljo med svetilom in merilnikom.

a (cm)	E_0 (lux)	E_1 (lux)	R (cm)	R_k (cm)
4				
8				
10				

Tabela 5.1: Merjenje osvetljenosti pred in med mrkom ter izračun velikosti kroglice, ki se giba okoli žarnice.

Naloga B: Nalogo A lahko tudi nekoliko obrnemo, tako da namesto velikosti kroglice iščemo velikost svetila. Meritve opravimo tako kot pri nalogi A. V tem primeru moramo poznati velikost kroglice, ki kroži okoli svetila. Iz enačbe (5.1) izrazimo velikost svetila (R_s). R nam v tej enačbi predstavlja radij zakritega dela svetila (ker se je med svetilom in merilnikom znašla kroglica). Ta radij ni kar enak radiju kroglice, saj kroglica kroži na neki oddaljenosti od svetila. Radij zakritega dela svetila (R) lahko izrazimo iz enačbe (5.2).

Moje meritve in rezultati



Slika 5.8: Slika prikazuje svetlobno krivuljo, ki jo dobimo, ko pride do obročastega mrka.

Na sliki (5.8) vidimo, kakšna je svetlobna krivulja, ko pride do obročastega mrka. Sliko smo posneli tako, da smo na baterijsko svetilko (flash light) postavili žogico za namizni tenis ($2R_s = 4$ cm). Na oddaljenosti 8,5 cm od žogice je krožila 3 cm velika kroglica. Merilnik svetlobe je bil od žogice oddaljen 53 cm. S slike je razvidno, da ko celotna kroglična ploskev vstopi v ploskev žarnice, se sprejeti svetlobni tok na merilniku ne spreminja, dokler kroglična ploskev spet ne začne uhajati izven ploskve našega svetila.

Če pogledamo rezultate v našem konkretnem primeru, dobimo meritve, ki so zbrane v tabeli (5.2).

Iz zadnje kolone v tabeli (5.2) lahko razberemo, da se naš rezultat ujema z velikostjo kroglice (3 cm). Če sedaj ocenimo še napako naše meritve (napako zaradi nenatančnih meritev osvetljenosti, napako zaradi nenatančnosti merjenja razdalj), ugotovimo, da nam

a (cm)	E_0 (lux)	E_1 (lux)	$2R$ (cm)	$2R_k$ (cm)
4	8,5	1,7	3,6	3

Tabela 5.2: Izračun velikosti kroglice iz svetlobne krivulje. Prvi stolpec je oddaljenost kroglice od svetila, drugi stolpec je osvetljenost pred mrkom, tretji stolpec je osvetljenost med mrkom, četrti stolpec predstavlja radij zakritega dela svetila, v zadnjem stolpcu pa je izračunana velikost kroglice.

meritve osvetljenosti plešejo za okoli 0,7 lux-a, žogico za namizni tenis lahko ocenimo na 1 mm natančno, medtem ko razdalje do kroglice oziroma do merilnika ocenimo na 0,5 cm natančno. Če preračunamo, ugotovimo, da je napaka naše meritve 20%.

Naši pogoji seveda niso enaki pogojem v naravi, saj smo uporabili relativno velike kroglice (v primerjavi z velikostjo svetila). Naš merilnik je tudi bistveno bližje svetilu (glede na oddaljenost kroglice od svetila) kot so merilniki svetlobe, ki merijo svetlobne krivulje zvezd. Če bi recimo predpostavili, da smo na eksoplanetu, ki se giblje okoli zvezde α Centauri in opazujemo tranzit Jupitra preko Sonca, bi v analogiji z našim svetilom in kroglico, ki je 8,5 cm oddaljena od svetila, morali merilnik svetlobe postaviti na oddaljenost 4,2 km. Seveda je tudi naša kroglica bistveno prevelika, saj je Jupitrov radij le okoli desetine Sončevega radija.

5.2.2 Vpliv velikosti kroglice na svetlobno krivuljo

Naloge

Preučite, kako se spremeni oblika krivulje, ko imamo na enaki oddaljenosti od žarnice različno velike kroglice.

Pripomočki

- Vernierov vmesnik
- Vernierov merilnik svetlobe
- navadna neprozorna žarnica
- priklop za žarnico s podaljškom za vtičnico
- dve stojali
- dve stativni palici
- dve kotni prižemi
- navadna prižema
- Lego kocke (za model 1 kot je prikazan na sliki 5.6)
- več različno velikih kroglic (recimo 2 cm, 3 cm, 4 cm ...)

- meter

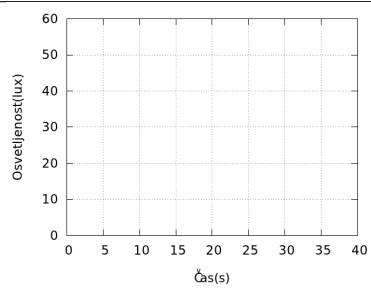
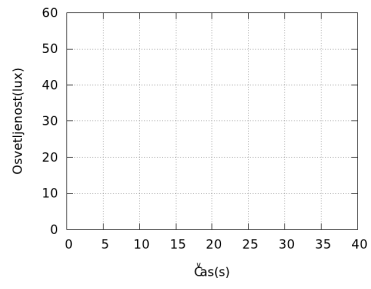
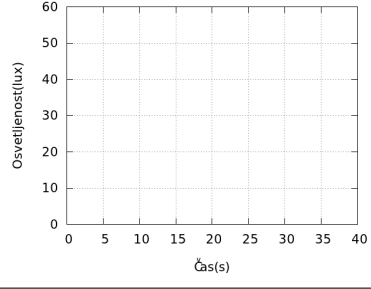
Izvedba vaje

Sestavimo model kot je prikazan na sliki (5.6). Načrt za sestavo modela je v prilogi A. Kot planet uporabimo eno od kroglic (recimo 4 cm). Senzor za svetlobo pritrđimo v kotno prižemo, ki jo privijemo v stativno palico. Stativno palico pritrđimo v stojalo. V navadno prižemo pritrđimo priklop za žarnico, v katerega privijemo žarnico, in jo pritrđimo v drugo kotno prižemo ter to prižemo preko stativne palice pritrđimo v stojalo. Žarnico postavimo nad os vrtenja Lego kock.

Preverimo, če so senzor, žarnica in kroglica v isti ravnini. Postavimo senzor na neko oddaljenost od žarnice (recimo 50 cm) in poženemo merilnik ter Lego kocke. Meritev opravljamo toliko časa, da se nam na računalniku izriše vsaj en mrk.

Meritev ponovimo še z dvema, tremi različno velikimi kroglicami. Meritev moramo opraviti v temnem prostoru (ali pa vse skupaj zakriti), da nas dnevna svetloba ne moti. Vse grafe vrišemo na primerno mesto v tabeli.

Rezultati

Velikost kroglice	Oblika grafa
1 cm	
2 cm	
3 cm	

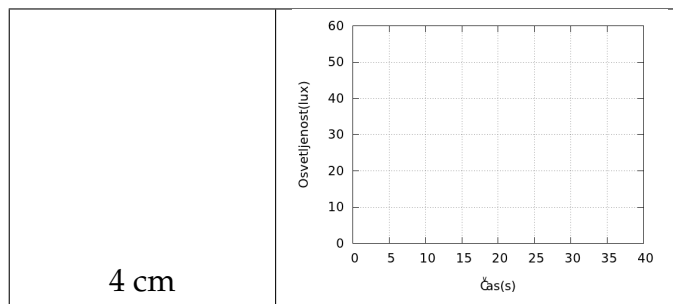


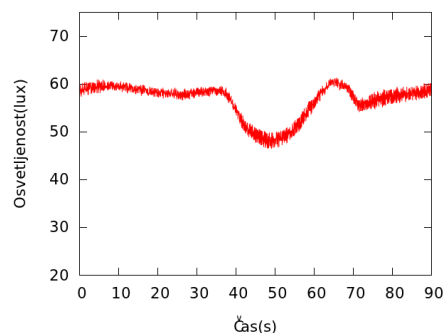
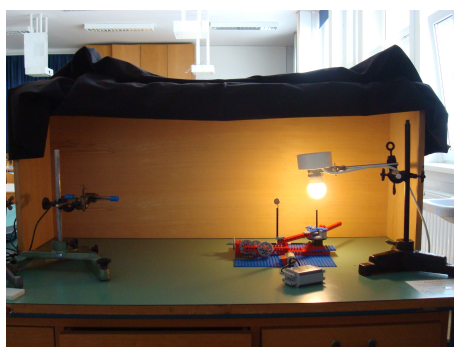
Tabela 5.3: Oblika grafov, ko imamo namesto eksoplaneta različno velike kroglice na isti oddaljenosti.

Dobro si sedaj poglej posamezne grafe in odgovori na naslednja vprašanja:

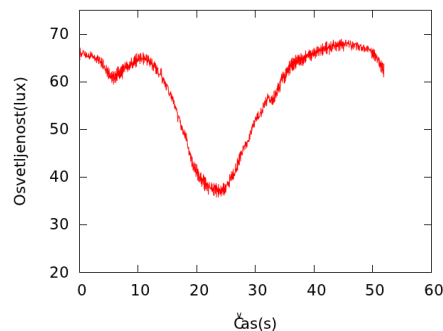
1. Se je oblika grafa kaj spremenila, ko kroglico zamenjamo z večjo kroglico?
2. Če se je oblika spremenila, zakaj meniš, da se je spremenila?
3. Se je spremenila globina mrka? Zakaj?
4. Se je spremenila dolžina mrka? Zakaj?
5. Se je spremenila količina svetlobe, ki jo je senzor detektiral? Kdaj? Zakaj?

Moje meritve in rezultati

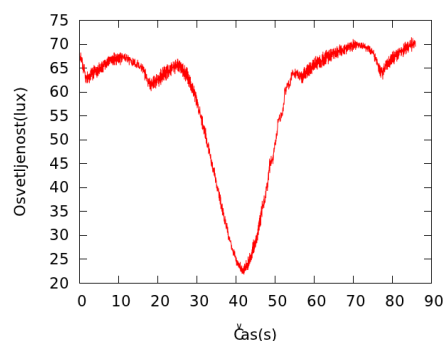
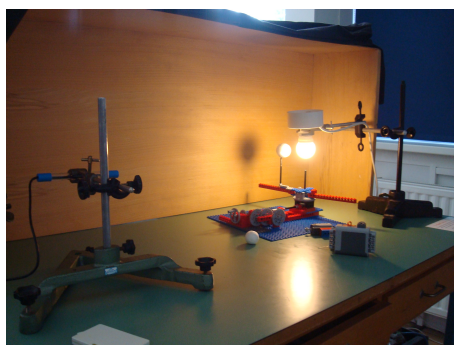
Spodaj so na slikah (5.9), (5.10) in (5.11) prikazani mrki treh različnih kroglic. Kot svetilo smo uporabili 5 cm veliko 7 W varčno žarnico, ki je 17 cm oddaljena od našega merilnika. Kroglica je od žarnice oddaljena 8,5 cm. Slika (5.9) predstavlja mrk, ki ga dobimo, ko imamo 2 cm veliko kroglico, slika (5.10) je primer, ko je kroglica velika 3 cm, slika (5.11) pa primer, ko imamo 4 cm veliko kroglico. Posamezne kroglice nam nadomeščajo naše namišljene eksoplanete, lučka pa zvezdo, okoli katere se gibljejo naši planeti. Z grafov lahko najprej opazimo, da se z večanjem kroglice večja tudi globina mrka. To ni presenetljivo, saj nam večja kroglica zastre večji delež svetila kot kroglica, ki je manjša, zato dobimo od žarnice manj svetlobe.



Slika 5.9: Vpliv velikosti kroglice na mrk: 2 cm velika kroglica.



Slika 5.10: Vpliv velikosti kroglice na mrk: 3 cm velika kroglica.



Slika 5.11: Vpliv velikosti kroglice na mrk: 4 cm velika kroglica.

Ob podrobnem ogledu lahko opazimo tudi, da je pri večjih kroglicah tudi mrk nekoliko daljši. To je seveda posledica tega, da gre preko svetila večja navidezna senca in ker ta senca prepotuje navidezno razdaljo $R_s + R$, medtem, ko detektorju zastira pogled, se čas prehoda nekoliko podaljša.

Kroglica	E_0 (lux)	E_1 (lux)	$2R_k$ (cm)
1.	61	50	1,8
2.	63	36	2,7
3.	70	22	3,5

Tabela 5.4: Izračun velikosti kroglice iz svetlobne krivulje. Prva kolona je oddaljenost kroglice od svetila, druga kolona je osvetljenost pred mrkom, tretja kolona je osvetljenost med mrkom, v četrti koloni so izračunane velikosti kroglice.

V tabeli (5.4) so zbrani podatki, ki smo jih razbrali s slik (5.9),(5.10) in (5.11). Kroglice velikosti 2 cm, 3 cm oziroma 4 cm so krožile na oddaljenosti 8, 5 cm od svetila. Merilnik svetlobe je bil od svetila oddaljen 53 cm. Pri oceni napake, lahko ugotovimo, da so meritve osvetljenosti natančne na 1 lux, meritev žarnice ocenimo z 1 mm veliko napako, medtem ko meritev razdalj ocenimo na 0,5 cm natančno. Ko preračunamo napako, ki smo jo

nauredili z našimi meritvami, ugotovimo, da le ta znaša 15 % v prvem, 10 % v drugem in 8 % v tretjem primeru. Iz zadnje kolone v tabeli (5.4) lahko opazimo, da smo kljub temu, da svetlobna krivulja nima pričakovane oblike za obročasti mrk, dobili pri največji kroglici rezultat, ki je za 13 % manjši od pravilne velikosti, medtem ko ostali meritvi odstopata za 10 %.

Ko pogledamo obliko krivulje, ugotovimo, da večja kot je kroglica, bolj se graf oblike U spremeni v graf oblike V. Takšne grafe bi pričakovali tudi v realnih primerih, le da bi bili tukaj vsi grafi oblike U, saj je recimo Jupiter 10-krat manjši od Sonca.

5.2.3 Vpliv oddaljenosti kroglice na obliko svetlobne krivulje

Naloge

Preučite, kako se spremeni oblika krivulje, ko imamo na različnih oddaljenostih od žarnice enako veliko kroglico?

Pripomočki

- Vernierov vmesnik
- Vernierov merilnik svetlobe
- navadna neprozorna žarnica
- priklop za žarnico s podaljškom za vtičnico
- dve stojali
- dve stativni palici
- dve kotni prižemi
- navadna prižema
- Lego kocke (za model kot je prikazan na sliki 5.6)
- ena stiroporna kroglica, velika 2 cm
- meter

Izvedba vaje

Sestavimo model kot je prikazan na sliki (5.6). Načrt za sestavo modela je v prilogi A. Kot planet uporabimo stiroporno kroglico, ki jo postavimo na oddaljenost 6 cm od osi vrtenja. Senzor za svetlobo pritrdimo v kotno prižemo, ki jo privijemo v stativno palico. Stativno palico pritrdimo v stojalo. V navadno prižemo pritrdimo priklop za žarnico, v katerega privijemo žarnico, in jo pritrdimo v drugo kotno prižemo, ter to prižemo preko stativne palice pritrdimo v stojalo. Žarnico postavimo nad os vrtenja Lego kock.

Preverimo, če so senzor, žarnica in kroglica v isti ravnini. Postavimo senzor na neko oddaljenost od žarnice (recimo 50 cm) in poženemo merilnik ter Lego kocke. Meritev

opravljamo toliko časa, da se nam na računalniku izriše vsaj en mrk.

Meritev ponovimo še na dveh različnih oddaljenostih kroglice od žarnice (recimo 8 cm in 10 cm). Meritev moramo opraviti v temnem prostoru (ali pa vse skupaj zakriti), da nas dnevna svetloba ne moti. Vse grafe vrišemo na primerno mesto v tabeli.

Rezultati

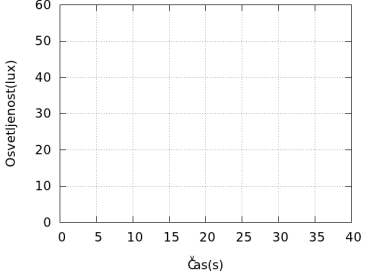
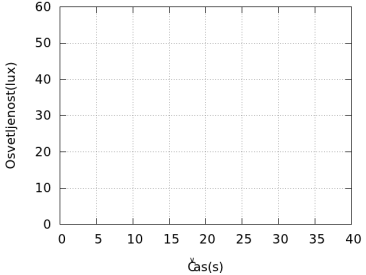
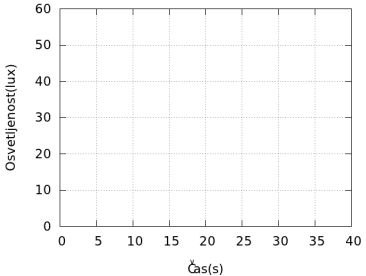
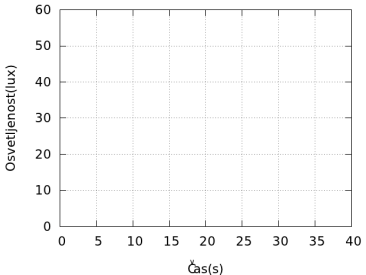
Oddaljenost kroglice	Oblika grafa
6 cm	
8 cm	
10 cm	
15 cm	

Tabela 5.5: Oblika grafov, ko imamo na različnih oddaljenostih od žarnice enako veliko kroglico.

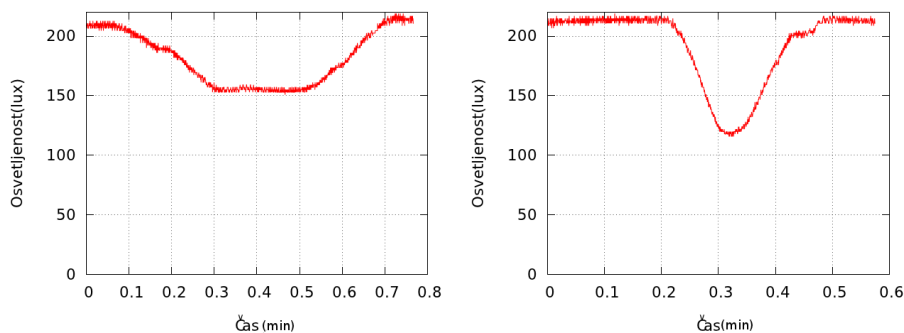
Dobro si sedaj poglej posamezne grafe in odgovori na naslednja vprašanja:

1. Se je oblika grafa kaj spremenila, ko prestavimo kroglico na večjo oddaljenost?
2. Če se je oblika grafa spremenila, zakaj meniš, da se je to zgodilo?

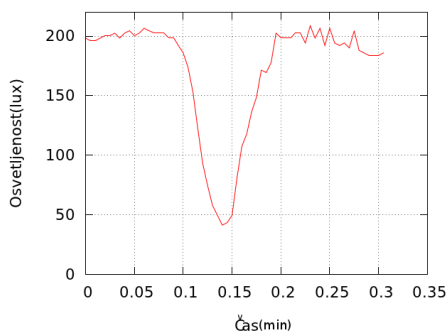
3. Se je spremenila globina mrka? Zakaj?
4. Se je spremenila dolžina mrka? Zakaj?
5. Se je spremenila količina svetlobe, ki jo je senzor detektiral? Kdaj? Zakaj?

Moje meritve in rezultati

Na slikah (5.12) in (5.13) so po vrsti prikazani grafi, ki prikazujejo, kako oddaljenost kroglice od svetila vpliva na svetlobno krivuljo. Prvi graf je za primer, da je 2 cm velika kroglica oddaljena 5 cm, drugi za primer, ko je kroglica oddaljena 10 cm in tretji za primer, ko je kroglica 15 cm od svetila. Pri vseh primerih je razdalja med detektorjem in svetilom 25 cm. Kot svetilo sem uporabil 7 W varčno žarnico s premerom 5 centimetrov ($2R_S = 5$ cm).



Slika 5.12: Vpliv oddaljenosti kroglice na svetlobno krivuljo. Levi graf prikazuje primer, ko je 2 cm velika kroglica oddaljena 5 cm od svetila, desni graf pa primer, ko je kroglica oddaljena 10 cm od svetila.



Slika 5.13: Vpliv oddaljenosti kroglice na svetlobno krivuljo. Slika prikazuje primer, ko okoli svetila kroži 2 cm velika kroglica na oddaljenosti 15 cm.

Z grafov je vidno, da ista kroglica povzroči na večji oddaljenosti (od svetila) globlji mrk. Globlji mrk dobimo zato, ker kroglica zakrije večji zorni kot detektorja in tako tudi

vejši del svetila. Pri opazovanju eksoplanetov se ta razlika v globini mrka praktično ne pozna, saj je razdalja od Zemlje do opazovanega osončja bistveno večja od razdalje med eksoplanetom in zvezdo. Pri zornem kotu je nemerljivo majhna razlika, če je eksoplanet od zvezde oddaljen eno ali deset astronomskih enot.

Ugotovimo lahko tudi, da mrk traja manj časa, če je kroglica dlje od svetila. Zmanjšanje časa mrka je posledica tega, da mora kroglica v primeru večje oddaljenosti prepotovati med mrkom manjši lok od tiste, ki je bližje svetilu. To lahko lepo vidimo na sliki (5.14). V realnosti se to ne bi poznalo bistveno. Razlog je zopet primerjava med razdaljama Zemlja - zvezda in zvezda - eksoplanet. A v realnosti nimamo takih razmer, da bi dva (enako velika) eksoplaneta, ki se gibata okoli iste zvezde (lahko tudi okoli dveh različnih zvezd s podobnima masama), na različnih oddaljenostih imela enako kotno hitrost (veljati mora III. Keplerjev zakon). Planet, ki je bližje zvezdi, potuje z večjo obodno hitrostjo od tistega bolj oddaljenega. Če bi torej želeli uskladiti še časovni potek mrka, bi morali kroglico postaviti na pravilno oddaljenost na tisti Lego kocki, ki ima drugačno kotno hitrost od prvotne kocke.

a (cm)	E_0 (lux)	E_1 (lux)	$2R_k$ (cm)
5	212	158	2
10	217	121	2
15	204	41	1,8

Tabela 5.6: Izračun velikosti kroglice iz svetlobne krivulje. Prva kolona je oddaljenost kroglice od svetila, druga kolona je osvetljenost pred mrkom, tretja kolona je osvetljenost med mrkom, v četrti koloni so izračunane velikosti kroglice.

V tabeli (5.6) so zbrani podatki z grafov na slikah (5.12) in (5.13). Pri oceni napake, lahko privzamemo, da smo meritev osvetljenosti ocenili na 5 lux-ov natančno, medtem ko smo meritve razdalj opravili z 0,5 cm veliko napako. Tako dobimo, da smo pri prvi meritvi naredili 19 %, pri drugi 17 %, pri tretji pa 18 % napako.

Poglejmo si sedaj še teoretično napoved dolžine trajanja mrka (τ). Če privzamemo, da so tirnice gibanja planetov krožnice, potem lahko hitrost gibanja izračunamo kot $v = \frac{2\pi a}{T}$. Ob upoštevanju III. Keplerjevega zakona, se nam obodna hitrost spremeni v $v = 2\pi \sqrt{\frac{\text{konst.}}{a}}$. Na desni strani slike (5.14) lahko opazimo dva kota (θ, ϕ). Lok, ki ga eksoplanet naredi med mrkom, je odvisen od kota ϕ ; $l = a\phi$. Po drugi strani je lok enak tudi $l = v\tau = 2\pi \sqrt{\frac{\text{konst.}}{a}} \tau$. Kot θ je vedno enak, saj je to zorni kot detektorja. Veljati mora $\tan(\theta) \cong \frac{x}{d-a}$. Po drugi strani velja tudi: $\sin(\phi) = \frac{x}{a}$. V primeru majhnih kotov lahko rečemo: $\tan(\phi) = \sin(\phi) = \phi$. Ko izrazimo odvisnost časa trajanja mrka, od oddaljenosti od zvezde, dobimo

sledečo formulo

$$\tau = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{konst.}} = \frac{a\phi}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{konst.}} = \frac{(d-a)\theta}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{konst.}}$$

Dobili smo odvisnost trajanja mrka od oddaljenosti eksoplaneta od zvezde. Ker je zvezda zelo oddaljena od nas, je $(d - a)$ kar enak d . Zorni kot zvezde (θ) je vedno enak, medtem ko se a manjša, če se približujemo zvezdi (bližnji eksoplanet ima manjši a kot bolj oddaljen). Iz enačbe vidimo, da če se prestavimo na tirnico bližje zvezdi, se bo tudi čas trajanja mrka zmanjšal.

Opazimo lahko tudi, da imamo v prvem primeru (levi graf na sliki (5.12)) graf z ravnim dnom, medtem ko imamo v drugem primeru (desni graf na sliki (5.12)) graf oblike U, v tretjem primeru (graf na sliki (5.13)) pa graf oblike V. Če iz geometrijskih podatkov preračunamo kolikšen delež nam med mrkom prekrijejo kroglice (oz. kolikšna je velikost sence, ki jo meče kroglica na sveto), ugotovimo, da je le ta v primeru prve kroglice 25 % (2,5 cm velika senca), v primeru druge 44 % (3,3 cm velika senca) in v primeru tretje kroglice 100 % (5 cm velika senca). V zadnjem primeru nam mrk ne sega do 0 lux-ov, ker detektor še vedno dobi nekaj svetlobe od okolice. Iz teh deležev oz. velikosti senc lahko sklepamo, da je za graf z ravnim dnom najprimernejši prvi primer (preko svetilke potuje najmanjša senca z najmanjšo hitrostjo), medtem ko je v tretjem primeru graf oblike V, saj kroglica v celoti zakrije sveto.

Enačba (4.23) nam govori, da lahko tudi iz trajanja mrka ugotovimo, kolikšna je velikost eksoplaneta. Pri tej enačbi je potrebno biti pazljiv, saj privzema, da je hitrost gibanja eksoplaneta preko zvezdine ploskve konstantna. Ta enačba dokaj dobro velja za eksoplanete, saj se gibajo na velikih tirnicah, in so zato opazovani krožni odseki (del krožnice, ki jo eksoplanet prepotuje, ko povzroči mrk) skoraj ravni.

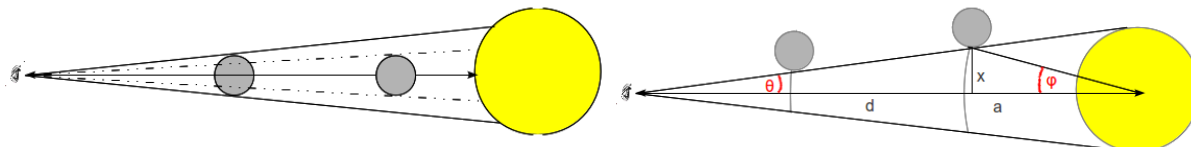
Če predpostavimo, da gre za centralno prekrivanje med svetilom, kroglico in detektorjem, potem je $\delta = 0$ in je torej $\cos(\delta) = 1$. Ob upoštevanju zgornje predpostavke, lahko iz enačbe (4.23) izrazimo polmer kroglice (eksoplaneta) kot:

$$R_k = \frac{\pi\tau a}{T} - R_s.$$

V tabeli 5.7 so zbrani podatki o trajanju mrkov s slik (5.12) in (5.13). Obhodni čas kroglic je bil 2,8 minut. Zadnji stolpec prikazuje izračunane velikosti kroglic. Oddaljenost kroglice od detektorja lahko ocenimo na 0,5 cm natančno, velikost žarnice na 0,1 mm natančno, medtem ko dolžino mrka na 3 s natančno. Torej so izračunane velikosti kroglice nenatančne za 30 %, 70 % oz. na 140 %.

a (cm)	τ (min)	$2R_k$ (cm)
5	0,67	2,5
10	0,27	1,1
15	0,17	0,7

Tabela 5.7: Izračun velikosti kroglice iz dolžine trajanja mrka. Prva kolona je oddaljenost kroglice od svetila, druga kolona je dolžina mrka, v tretji koloni pa so izračunane velikosti kroglice. Kroglica potrebuje 2,8 minute (T), da obkroži svetilo katerega polmer je 2,5 cm (R_S).



Slika 5.14: Leva slika prikazuje, zakaj pride do globjega mrka, ko je kroglica dlje od svetila, desna slika pa prikazuje, zakaj traja mrk dlje časa, če je kroglica bližje svetilu.

5.2.4 III. Keplerjev zakon

Naloge

Postavimo kroglice na pravšnjo oddaljenost od osi vrtenja, da bodo pogoji zadostili III. Keplerjevemu zakonu.

Pripomočki

- Vernierov vmesnik
- Vernierov merilnik svetlobe
- navadna neprozorna žarnica
- priklon za žarnico s podaljškom za vtičnico
- dve stojali
- dve stativni palici
- dve kotni prižemi
- navadna prižema
- Lego kocke (za model kot je prikazan na sliki 5.1)
- štiri različno velike kroglice (lahko sta tudi po dve in dve enako veliki)
- meter

Izvedba vaje

Sestavimo model kot je prikazan na sliki (5.1). Načrt za sestavo modela je v prilogi A. Kroglice, ki bodo nadomeščale eksoplanete, pritrdimo na oddaljenost kot jo prikazuje model (zaradi večje preglednosti lahko opravimo tudi 4 meritve z eno kroglico, ki jo po meritvi prestavimo na tisto Lego kocko, ki se vrti z večjo/manjšo kotno hitrostjo). Senzor za svetlobo pritrdimo v kotno prižemo, ki jo privijemo v stativno palico. Stativno palico pritrdimo v stojalo. V navadno prižemo pritrdimo priklop za žarnico, v katerega privijemo žarnico, in jo pritrdimo v drugo kotno prižemo, ter to prižemo preko stativne palice pritrdimo v stojalo. Žarnico postavimo nad os vrtenja Lego kock.

Preverimo, če so senzor, žarnica in kroglica v isti ravnini. Postavimo senzor na neko oddaljenost od žarnice (recimo 50 cm) in poženemo merilnik ter Lego kocke. Meritev opravljamo toliko časa, da se nam na računalniku izrišeta vsaj dva mrk, ki pripadata isti kroglici.

Iz grafov razberemo, koliko časa mine med posameznima mrkoma (seveda pri isti kroglici) in te čase vnesemo v tabelo pod rubriko t_0 . Ne pozabimo si zapisati tudi oddaljenosti kroglice od osi vrtenja. Meritev moramo opraviti v temnem prostoru (ali pa vse skupaj zakriti), da nas dnevna svetloba ne moti.

Rezultati

	a (cm)	t_0 (s)
1. kroglica		
2. kroglica		
3. kroglica		
4. kroglica		

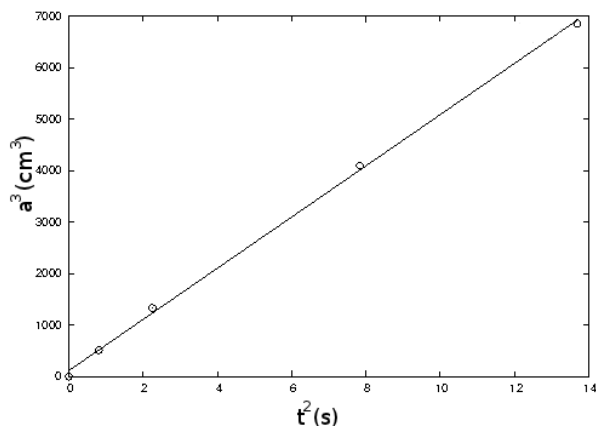
Tabela 5.8: Obhodni časi kroglic.

Preverimo sedaj, če smo naše kroglice postavili na takšno oddaljenost, da velja enačba za III. Keplerjev zakon. To naredimo tako, da narišemo graf $a^3(t^2)$ in skozi izmerke potegnemo premico, ki se najbolj prilagaja vsem izmerkom (če seveda opazimo linearni trend naših meritev). Razmisli, kaj v realnosti predstavlja strmina premice? A bi lahko bila v realnosti strmina premice drugačna? Zakaj?

Moje meritve in rezultati

Ko opravimo meritve, lahko razberemo, da so obhodni časi naših kroglic 3, 7 min, 2, 8 min, 1, 5 min in 0, 9 min. Pri modelu iz Lego kock je najbližja kroglica 8 cm stran od našega

svetila, naslednja je oddaljena 11 cm, tretja 16 cm in četrta 19 cm. Če narišemo odvisnost kuba oddaljenosti kroglice od kvadrata obhodnega časa, dobimo graf, ki je prikazan na sliki (5.15). Z grafa vidimo, da velja linearna odvisnost med tema dvema količinama, torej smo kroglice postavili na ravno pravšnje oddaljenosti, da ustrezajo III. Keplerjevem zakonu.



Slika 5.15: Graf prikazuje kub oddaljenosti od osi vrtenja v odvisnosti od kvadrata obhodnega časa za 4 kroglice, ki krožijo v našem planetarnem modelu.

5.2.5 Vpliv števila kroglic na svetlobno krivuljo

Naloga A

Sestavi model, ki ima več kroglic, ki se gibajo na pravšnjih oddaljenostih, da zadostijo III. Keplerjevemu zakonu.

Pripomočki

- Vernierov vmesnik
- Vernierov merilnik svetlobe
- navadna neprozorna žarnica
- priklop za žarnico s podaljškom za vtičnico
- dve stojali
- dve stativni palici
- dve kotni prižemi
- navadna prižema
- Lego kocke (za model kot je prikazan na sliki 5.1)
- štiri različno velike kroglice (lahko sta tudi po dve in dve enako veliki)
- meter

Izvedba vaje

Sestavimo model kot je prikazan na sliki (5.1). Načrt za sestavo modela je v prilogi A. Na vrh črnih palic namestimo kroglice, ki bodo predstavljale eksoplanete (kroglice lahko pritrdimo s pomočjo bucike in lepilnega traku). Senzor za svetlobo pritrdimo v kotno prižemo, ki jo privijemo v stativno palico. Stativno palico pritrdimo v stojalo. V navadno prižemo pritrdimo priklop za žarnico, v katerega privijemo žarnico, in jo pritrdimo v drugo kotno prižemo, ter to prižemo preko stativne palice pritrdimo v stojalo. Žarnico postavimo nad os vrtenja Lego kock.

Preverimo, če so senzor, žarnica in vse kroglice v isti ravnini. Postavimo senzor na neko oddaljenost od žarnice (recimo 50 cm) in poženemo merilnik ter Lego kocke. Meritev opravljamo toliko časa, da nam vse kroglice pridejo vsaj enkrat okoli. Meritev moramo opraviti v temnem prostoru (ali pa vse skupaj zakriti), da nas dnevna svetloba ne moti. V tabelo vpišemo čase, ko kroglice povzročijo mrke. (Seveda si lahko pomagamo tako, da si označimo kroglice s številkami od 1 do 4 in med meritvijo samo pišemo številke, katera kroglica je povzročila mrk - recimo 1,2,1,3,2,1,2,4..., na koncu pa iz grafa in tabele, ki pripada temu grafu, preberemo ustrezne čase, ki jih zapišemo v spodnjo tabelo in pogledamo kolikšne so razlike med dvema časoma mrkov, ki ju je povzročila ista kroglica.)

Rezultati

	t (s)	Δt (s)
1. kroglica		
2. kroglica		
3. kroglica		
4. kroglica		

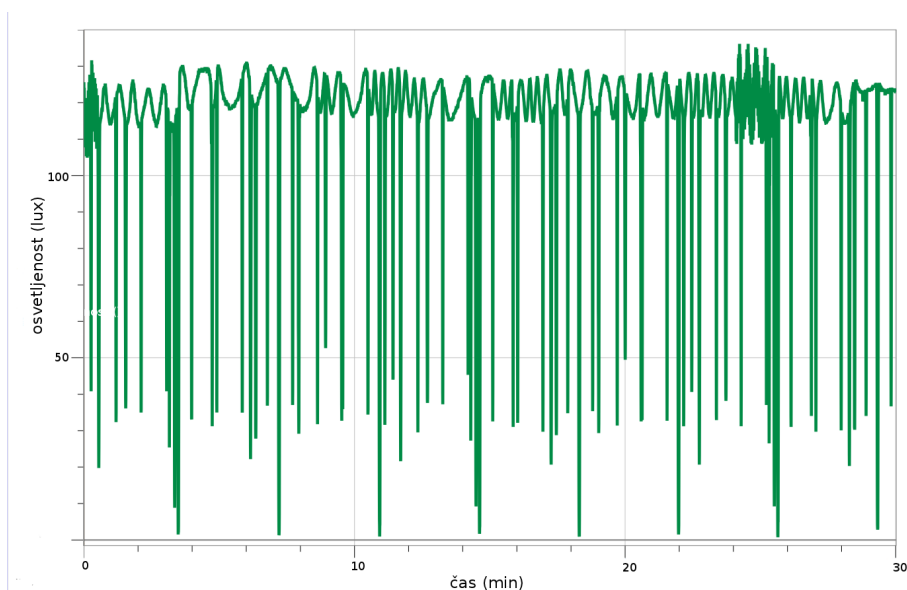
Tabela 5.9: Časi, ko kroglice povzročijo mrk.

Naloga B

Iz grafa ugotovi, koliko kroglic je krožilo okoli žarnice.

Izvedba vaje

Učenec dobi predse že posnet graf kot je na sliki (5.16) in poskuša ugotoviti, koliko kroglic je krožilo okoli žarnice (učencem lahko podamo tudi datoteko s podatki ali pa tabelo, da natančneje prebere zahtevane čase). Iz grafa prebere čase, ko pride do mrka, in poskusi ugotoviti, katere mrke je povzročila ista kroglica in koliko kroglic je krožilo okoli žarnice. Čase vnese v tabelo (5.10).



Slika 5.16: Svetlobno krivuljo, ki jo dobimo, ko okoli svetila kroži več objektov.

Rezultati

Št. kroglice	t (s)	t_0 (s)

Tabela 5.10: Oznaka kroglice, ki krožijo okoli žarnice in časi mrkov, ki tej kroglici pripadajo.

Moje meritve in rezultati

Sestavlil sem model planetarnega sistema s štirimi planeti in posnel svetlobno krivuljo. Da bi bili mrki v tem primeru čim izrazitejši in čim globji, sem uporabil lučko, ki ima pred seboj lečo in to svetlobo usmeril na majhen košček stekla (okoli velikosti 3 cm x 3 cm) ter odbito svetlobo usmeril proti merilniku. Kot kroglice sem uporabil 1 cm, 2 cm in 2,5 cm velike lesene kroglice.

Postavimo se sedaj v vlogo astronoma raziskovalca, ki planetarnega sistema ne pozna in poskuša iz svetlobne krivulje razvozlati njegove lastnosti.

Ko opazujemo levi graf na sliki (5.17), najprej opazimo, da od svetilke ne dobimo vedno enake količine svetlobe. Če pogledamo graf podrobneje, ugotovimo, da se nam del, ki je na sliki (5.17) obarvan z rahlo oranžno barvo, ponovi. Časovna razlika je 11,1 minut, torej vsa telesa, ki krožijo okoli naše svetilke (in jih mi lahko detektiramo), potrebujejo največ toliko časa, da jo obkrožijo. Ko smo določili maksimalen obhodni čas, se lahko osredotočimo samo na ta del grafa, in pogledamo, če lahko še kaj več povemo o vsem skupaj.

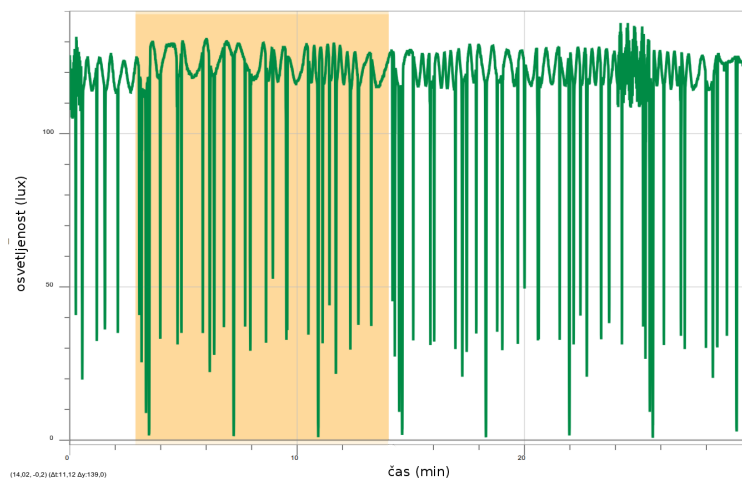
V tabeli (5.11) so zbrani podatki o mrkih v delu grafa, ki je na sliki (5.17) obarvan rahlo oranžno.

Pomračitev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
čas (s)	3,1	3,2	3,4	3,5	4,0	4,7	4,9	5,8	6,2	6,3	6,8	7,2	7,7
Pomračitev	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
čas (s)	7,9	8,6	9,0	9,5	10,5	10,9	11,1	11,4	11,8	12,3	12,7	13,2	

Tabela 5.11: Časi, ko nastopijo pomračitve.

Opazimo lahko, da okoli 3,5 minute po začetku našega snemanja dobimo bistveno manj svetlobe od naše svetilke. Nadaljnje lahko opazimo tudi, da imamo največjo pomračitev tudi pri 7,2 min in 10,9 min. Ko pogledamo časovno razliko med posameznimi pomračitvami, ugotovimo, da se te najgloblje pomračitve ponavljajo na 3,7 min. Iz tega lahko sklepamo, da okoli svetilke kroži neko temnejše telo, ki jo obkroži v 3,7 minutah.

Naprej lahko na desni strani slike (5.18) opazimo, da imamo takoj na začetku štiri različno globoke pomračitve. Zaradi različnih globin pomračitev lahko sklepamo, da imamo opravka z vsaj štirimi telesi, ki krožijo okoli te svetilke. Kot smo že zgoraj zapisali, ima eno telo obhodni čas 3,7 min, torej lahko te pomračitve pobrišemo, da bo slika bolj nazorna, v tabeli (5.12) pa smo te pomračitve obarvali s sivo barvo. Moramo se zavedati, da je možno, da hkrati s temi pomračitvami pobrišemo tudi kakšno, ki se slučajno ujema z eno od teh pomračitev (lahko se zgodi, da se kroglici istočasno poravnata z merilnikom). Paziti moramo torej, da če nam bo v prihodnje kakšen čas manjkal, lahko pogledamo,

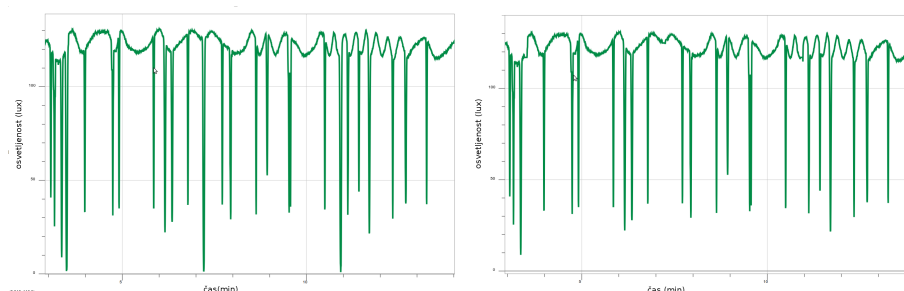


Slika 5.17: Slika prikazuje svetlobno krivuljo, ki jo dobimo po 30 minutah detektiranja z Vernierovim senzorjem svetlobe, z rahlo oranžno barvo je obarvan tisti del, ki ga že na oko lahko opazimo, da se večkrat ponovi v 30 minutah merjenja.

če bi se ta slučajno ujema s katero od že pobrisanih pomračitve. Ko smo pobrisali prve pomračitve, ki se ponavljajo na 3, 7 min, dobimo desno stran slike (5.18).

Pomračitev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
čas (s)	3,1	3,2	3,4	3,5	4,0	4,7	4,9	5,8	6,2	6,3	6,8	7,2	7,7
Pomračitev	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
čas (s)	7,9	8,6	9,0	9,5	10,5	10,9	11,1	11,4	11,8	12,3	12,7	13,2	

Tabela 5.12: Časi, ko nastopijo pomračitve. S sivo barvo so obarvane tiste pomračitve, ki pripadajo prvi kroglici.



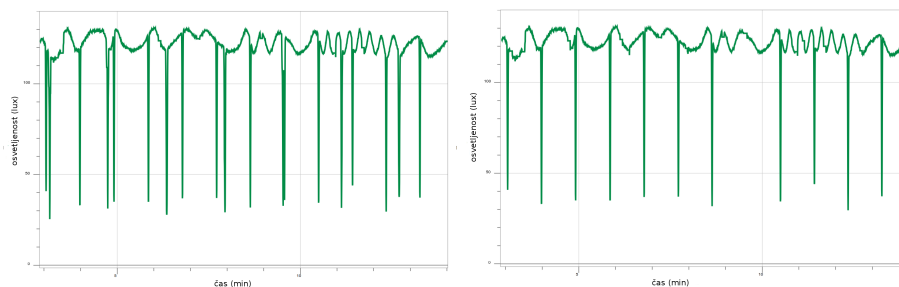
Slika 5.18: Na levi sliki je prikazan samo obarvan del s slike (5.17), na desni strani pa smo s tega obarvanega dela izrezali tiste mrke, ki se periodično ponavljajo na 3, 7 minut.

Na desni strani slike (5.18) vidimo, da sta največji pomračitvi ostali pri 3, 4 min in pri 11, 8 min, torej bi lahko pobrisali ti pomračitvi, ker bi pripadali telesu, ki ima obhodni čas 8, 4 min. Možno je tudi, da je zaradi merske napake prišlo do premajhne pomračitve pri

katerem od vmesnih časov, in bi te pomračitve pripadale ravno telesu, ki je povzročilo pomračitvi pri 3,4 min in 11,8 min. (Pri svetlobnih krivuljah dejanskih eksoplanetov lahko dobimo različno globoke pomračitve istega eksoplaneta zaradi geometrijskih razmer (ne gre vedno na istem predelu preko zvezdine ploskve) ali pa zaradi neenakomerne transparentnosti Zemljine atmosfere, v našem modelu pa se je lahko zgodilo, da se je zaradi navora kroglica malo povescila in tako ni bila na isti višini kot svetilo.) Poglejmo zato najprej, če je slučajno prišlo do pomračitve ravno na sredi med tema dvema časoma - to je pri 7,6 min. V tabeli (5.11) te pomračitve ne opazimo, zato poskusimo še z možnostjo 2 pomračitvev med danima časoma. Ko preračunamo, ugotovimo, da bi pomračitvi morali biti pri 6,2 min in pri 9,0 min. Iz tabele (5.11) preberemo, da sta pri teh časih res pomračitvi. Naslednja možnost s 3 pomračitvami med skrajnima časoma zopet ni možna, ker bi morala biti pomračitev tudi ravno na sredini, zato pogledjmo še možnost s štirimi oziroma petimi pomračitvami. Če so vmes štiri pomračitve, bi morala biti prva vmesna pomračitev pri času 5,0 min, a je tam ne zasledimo. Če je vmes 5 pomračitev, bi pa zopet morala biti pomračitev točno na sredi med skrajnima točkama, zato ta možnost odpade. Torej lahko sklepamo, da sta bili vmes dve pomračitvi in da okoli naše zvezde kroži še en temnejši objekt, ki ima obhodni čas 2,8 min, zato lahko zaradi preglednosti zopet pobrišemo te meritve, kar smo naredili na levem grafu slike (5.19), v tabeli (5.13) pa smo te pomračitve obarvali z rdečo barvo.

Pomračitev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
čas (s)	3,1	3,2	3,4	3,5	4,0	4,7	4,9	5,8	6,2	6,3	6,8	7,2	7,7
Pomračitev	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
čas (s)	7,9	8,6	9,0	9,5	10,5	10,9	11,1	11,4	11,8	12,3	12,7	13,2	

Tabela 5.13: Časi, ko nastopijo pomračitve. S sivo barvo so obarvane tiste pomračitve, ki pripadajo prvi kroglici, z rdečo pa tiste, ki pripadajo drugi kroglici.



Slika 5.19: Na levi sliki smo z zgornje slike odstranili mrke s periodo 2,8 minut, na desni pa tiste s periodo 1,6 minut.

Na levem grafu slike (5.19) opazimo, da so globlje pomračitve ostale še pri 3,2 min,

4,7 min, 6,3 min, 7,9 min, 9,5 min, 11,1 min in pri 12,3 min. Razlika med sosednjima časoma je 1,6 min, razen med zadnjima dvema časoma je razlika le 1,2 min. Da bi bila med zadnjima časoma enaka razlika kot med prejšnjimi, bi morala biti zadnja potemnitev za okoli 0,4 min kasneje - to je pri 12,7 min. Ko pogledamo na levo stran slike (5.19), ugotovimo, da je res pri 12,7 min pomračitev, ki pa je nekoliko šibkejša od tiste pri 12,34 min. Pogledajmo še, če je možno, da bi bil obhodni čas dvakrat ali trikrat manjši. Pri dvakrat krajšem obhodnem času bi morali biti pomračitvi pri 4,0 min in pri 5,5 min. Na prvem mestu res opazimo pomračitev, a le te pri drugem času ni (pobrisali je tudi nismo), torej dvakrat krajši obhodni čas ni možen. Pri trikrat krajšem obhodnem času se nam zatakne že pri prvi pomračitvi, zato je lahko sklepamo, da je možna samo prva rešitev. Tretje telo, ki kroži okoli naše svetilke, tako potrebuje 1,6 min, da jo obkroži.

Pomračitev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
čas (s)	3,1	3,2	3,4	3,5	4,0	4,7	4,9	5,8	6,2	6,3	6,8	7,2	7,7
Pomračitev	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
čas (s)	7,9	8,6	9,0	9,5	10,5	10,9	11,1	11,4	11,8	12,3	12,7	13,2	

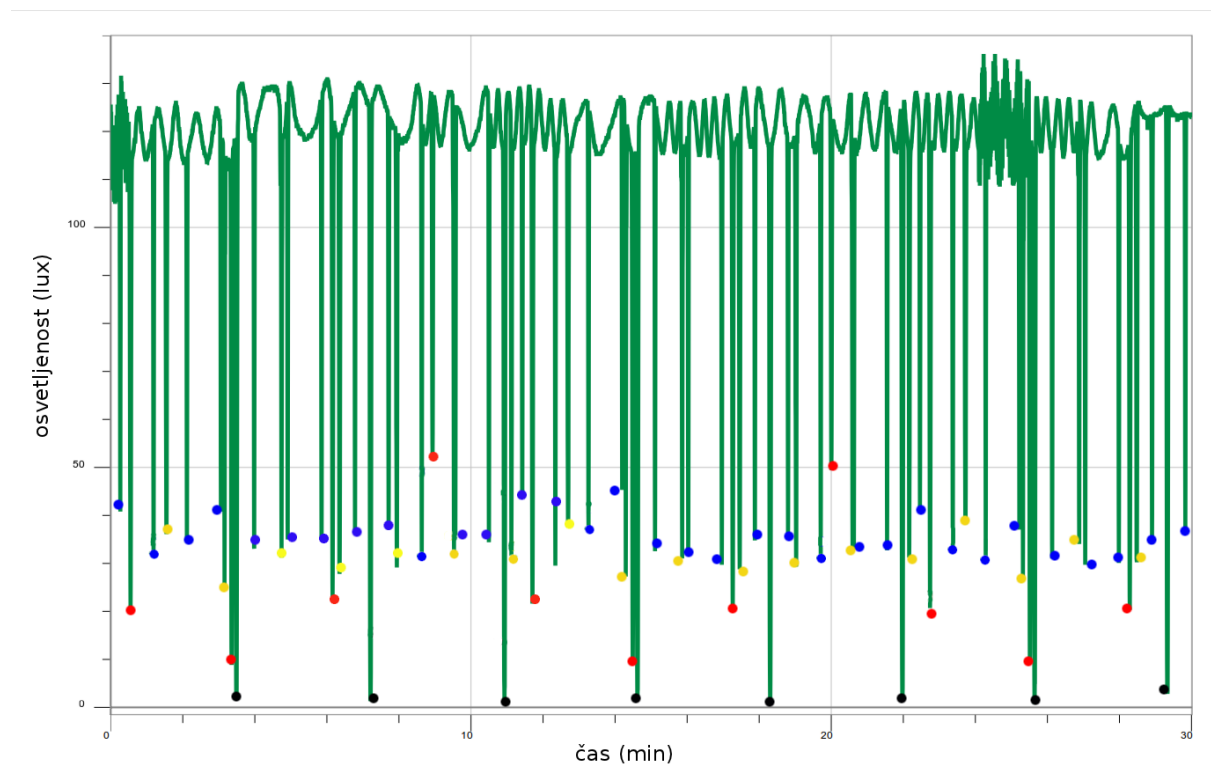
Tabela 5.14: Časi, ko nastopijo pomračitve. S sivo barvo so obarvane tiste pomračitve, ki pripadajo prvi kroglici, z rdečo tiste, ki pripadajo drugi, z rumeno pa tiste, ki pripadajo tretji kroglici.

Ko pobrišemo meritve, ki so narazen za 1,6 min, dobimo desni graf slike (5.19), na katerem vidimo, da so pomračitve ekvidistantno razporejene na 0,9 min (3,1 min, 4 min, 4,9 min, 5,8 min, 6,8 min, 7,7 min, 8,6 min, 10,5 min, 11,4 min, 12,3 min in 13,26 min), razen med sedmo in osmo pomračitvijo je enkrat daljši čas. Vmes bi torej morala biti še ena pomračitev pri 9,5 min, ki pa smo jo pobrisali, ko smo brisali pomračitve, ki so narazen za 1,6 min. V tabeli (5.11) lahko opazimo, da je tam res ena pomračitev, na prejšnji sliki (levi del slike (5.18)) pa lahko lepo opazimo, da je pomračitev pri tem času dvojna. Dobili smo še zadnji temnejši objekt, ki kroži okoli naše lučke. Na sliki 5.20 so preko križulje narisani krogci črne, rdeče, modre in rumene barve. Vsaka barva predstavlja svoj planet, v tabeli (5.15) pa smo prav tako pobarvali zadnji planet z modro barvo.

Sklepamo lahko torej, da okoli naše lučke krožijo 4 temnejši objekti. Ti objekti potrebujejo 3,7 min, 2,8 min, 1,6 min in 0,9 min, da obkrožijo naše svetilo.

Pomračitev	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
čas (s)	3,1	3,2	3,4	3,5	4,0	4,7	4,9	5,8	6,2	6,3	6,8	7,2	7,7
Pomračitev	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
čas (s)	7,9	8,6	9,0	9,5	9,5	10,5	10,9	11,1	11,4	11,8	12,3	12,7	13,2

Tabela 5.15: Časi, ko nastopijo pomračitve. S sivo barvo so obarvane tiste pomračitve, ki pripadajo prvi kroglici, z rdečo barvo tiste, ki pripadajo drugi kroglici, z rumeno tretji in z modro tiste, ki pripadajo četrti kroglici.

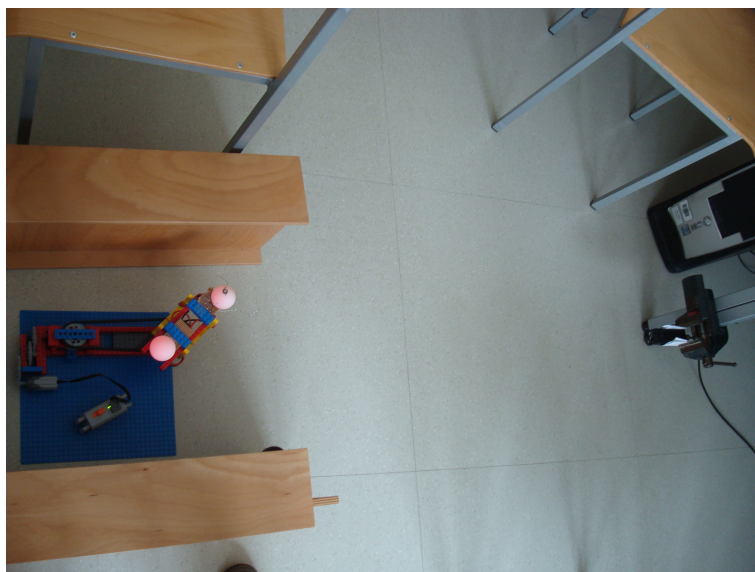


Slika 5.20: Na sliki so mrki, ki so jih povzročile različne kroglice, označeni z različno obarvanim krogcem. Barve (malce drugačni odtenki) se skladajo s tistimi, ki so v tabeli.

5.3 Model dvojne zvezde

Da bi simulirali prekrivalno dvojno zvezdo, sestavimo model z dvema svetiloma, kot je prikazano na sliki (5.21). Navodilo za sestavo tega modela najdemo v prilogi B. Simulacija tega primera je nekoliko težja, saj je pri tem potrebno paziti, da smo od merilnika dovolj oddaljeni, da se nam v svetlobni krivulji ne bo preveč poznalo spreminjanje zaradi približevanja oziroma oddaljevanja naših vrtečih se svetil. Ker morata biti vrteči se svetili dovolj oddaljeni od merilnika, morata biti tudi dovolj močni, da ju na merilniku zaznamo, hkrati pa ne pretežki, da se lahko vrtita na Lego kockah. Prav tako morata biti svetili neprozorni za svetlobo, da lahko opazimo mrke, ko pride do poravnave med

svetiloma s smerjo proti detektorju.



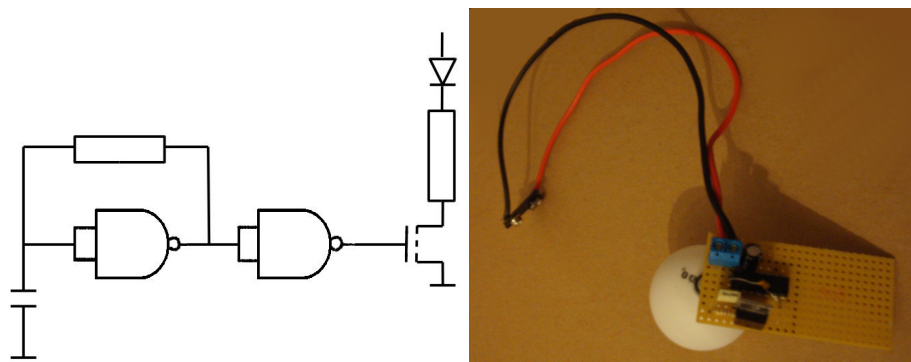
Slika 5.21: Slika modela dveh zvezd, ki se vrtita okoli skupnega težišča.

5.3.1 Meritve z dvema podobno velikima svetiloma

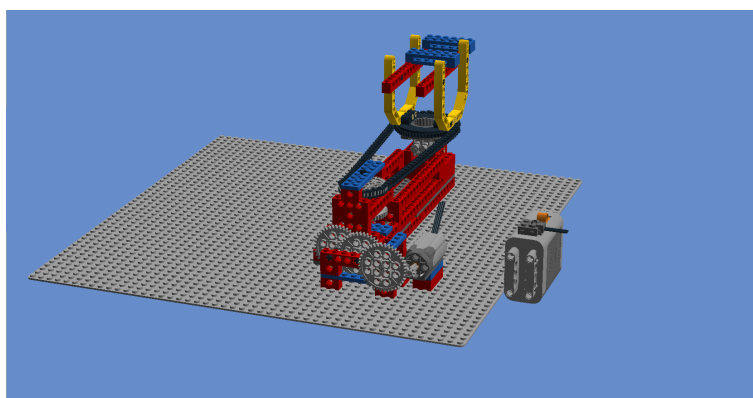
Kot svetili, ki predstavljata zvezdici, sem uporabil dve rdeči močnostni Luxeon led diodi. Uporabil sem še dve žogici za namizni tenis in ju prevrtal, da sem vanju lahko vstavil diodi. Diodi sem v žogici za namizni tenis usmeril od spodaj navzgor (da sem se izognil dodatnim pomračitvam zaradi sestave modela). Seveda je potrebno diodo tudi napajati. Sestavil sem vezje, ki povzroči utripanje diode z znano frekvenco. Utripanje diode nam omogoča, da lahko meritev opravimo tudi pri vidni svetlobi, če izberemo pravšnjo frekvenco utripanja in na merilniku nastavimo pasovno prepustni filter, ki nam bo ravno prepuščal pas frekvenc, v katero spada tudi frekvenca utripanja našega svetila. Ker imajo elektronske komponente nenatančnost (zato tudi potrebujemo, pasovno prepustni filter), se je že na oko opazilo, da obe svetili nista svetili z enako močjo. Tako smo lahko simulirali mrka, kot bi ju dobili, če bi imeli dve enako veliki zvezdi, ki bi imeli različno temperaturo in posledično tudi različen izsev.

Iz Lego kock tokrat sestavimo nekoliko drugačen model - takšen kot je na sliki (5.23) - in nanj postavimo obe vezji s ping-pong žogicama. Vse skupaj priključimo na 9-Voltno baterijo in poženemo motorček.

Na žalost Vernierov merilnik svetlobe v tem primeru ni prikazal mrkov (na sliki (5.5) vidimo, da je detekcija rdečih valovnih dolžin veliko slabša, zato to niti ni tako nenavadno), zato sem kot merilnik uporabil drugačno fotodiodo (BPW34), ki ima vrh bolj v rdečem oziroma IR spektru svetlobe, in jo preko zvočne kartice povezal z računalnikom ter vse skupaj opazoval s pomočjo programa LabView. Postavitev modela in merilnika je



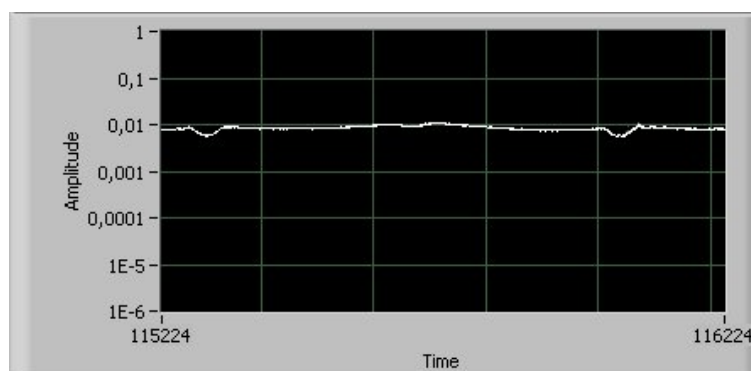
Slika 5.22: Leva slika prikazuje vezje, ki napaja led diodo. S pravilnim izborom kapacitivnosti kondenzatorja oziroma upornosti upornika lahko tudi določimo frekvenco, s katero bo naša dioda utripala. Desna slika prikazuje, kako vse skupaj izgleda v realnosti.



Slika 5.23: Model iz Lego kock, ki nam bo vrtel naši led diodi.

prikazana na sliki (5.21).

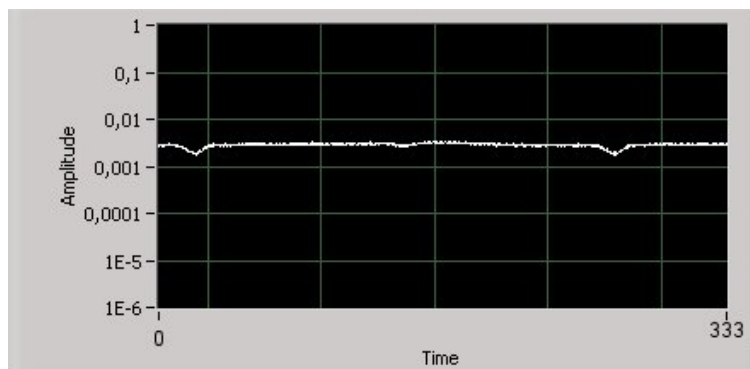
Poglejmo si, kakšni so grafi na treh različnih oddaljenostih svetil od detektorja.



Slika 5.24: Graf svetlobne krivoljke, ki jo dobimo, ko sta "zvezdici" 14 cm narazen in 30 cm stran od detektorja.

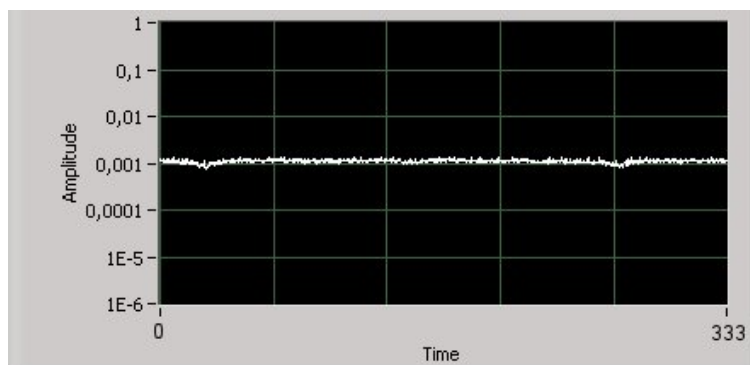
Slika (5.24) prikazuje primer, ko sta svetili 30 cm oddaljeni od našega detektorja. Na sliki lahko lepo vidimo primer dveh močnejših mrkov in enega malo manj izrazitega na

sredini med obema močnejšima mrkoma. Z grafa lahko tudi opazimo, da se svetlobna krivulja od močnejšega mrka proti šibkejšemu mrku počasi dviguje in potem zopet pada, ko gremo proti drugemu močnejšemu mrku. To se zgodi zato, ker je razdalja svetila do detektorja premajhna glede na razdaljo med svetiloma (14 cm) in se zato kar dobro pozna, da je osvetljenost na fotodiodi večja, ko je svetilo bližje fotodiodi, kot takrat, ko je svetilo dlje stran.



Slika 5.25: Graf svetlobne krivulje, ki jo dobimo, ko sta "zvezdici" 14 cm narazen in 53 cm stran od detektorja.

Slika (5.25) prikazuje kakšen je graf, ko sta svetili 53 cm oddaljeni od merilnika svetlobe. Tudi na tem grafu se lepo vidi dva močnejša mrka, ki se zgodita, ko šibkejše svetilo pride pred močnejše svetilo in en šibkejši mrk, ko je močnejše svetilo pred šibkejšim.



Slika 5.26: Graf svetlobne krivulje, ki jo dobimo, ko sta "zvezdici" 14 cm narazen in 100 cm stran od detektorja.

Slika (5.26) prikazuje graf svetlobnega toka v odvisnosti od časa za primer, ko je točka, okoli katere se gibljeta svetili, 1 m oddaljena od fotodiode. Na tem grafu opazimo le dva mrka, ki pripadata močnejšemu svetilu (šibkejše svetilo zakrije močnejše svetilo), medtem ko vmesnega mrka ni mogoče zaznati.

Kot lahko opazimo na slikah (5.24), (5.25) in (5.26), lahko tudi s pomočjo Lego kock in led diode sestavimo model dveh zvezd, ki se gibata okoli skupnega težišča ter posnamemo svetlobno krivuljo, ki nam bo prikazala mrke. Problem pri vsem skupaj je, da

dobimo premalo svetlobe, da bi si lahko svetlobne krivulje pogledali v podrobnosti, saj se velik del svetlobne krivulje skriva v šumu. Težava je, da na Lego kocke ne moremo postaviti pretežkega bremena, da bi nam motorček še vedno vse skupaj pogonjal. Lahko pa bi sestavili mehanski model dvojne zvezde (ne s pomočjo Lego kock, ampak kar s pomočjo dveh navadnih neprozornih žarnic, dveh stojal ...) ter vse skupaj postavili na vrtečo se ploščo ter mrke opazovali s pomočjo Vernierovega merilnika za svetlobo. Na vrtečo ploščo lahko postavimo žarnici na različno oddaljenost od osi vrtenja in s tem ponazorimo različno oddaljenost zvezd od njunega skupnega težišča.

Izkušnje pri predstavitvi modela v šoli

6.1 Raziskovalna množica

Za potrebe diplomskega dela sem raziskal tudi odziv učencev na model. Prav tako sem raziskal odziv učiteljev, ki so poučevali fiziko ali izbirni predmet astronomija v danem razredu. Pri predstavitvi modela sem učencem in učiteljem razdelil tudi kratko anketo, katere namen je bil, da vidim, ali so se učenci že srečali z izrazom eksoplanet in kaj vse bi lahko sklepali na podlagi svetlobne krivulje, ki jo dobimo z zvezde. Anketiranje učiteljev pa je bilo namenjeno ugotavljanju uporabnosti modela pri pouku in izboljšavi učne ure. Model sem predstavil na 7 osnovnih šolah in 2 srednjih šolah (gimnazijah) v Ljubljani in njeni okolici. Vzorec zajema 331 učencev, in sicer 33 učencev osmega in 33 učencev devetega razreda Osnovne šole Kašelj, 22 učencev osmega in 19 učencev devetega razreda Osnovne šole Komenda Moste, 15 učencev Osnovne šole Stranje, ki obiskujejo izbirni predmet astronomija. Izbirni predmet astronomija prav tako obiskuje 8 učencev na Osnovni šoli Šentvid, 9 učencev na Osnovni šoli Simona Jenka, Smlednik, 31 učencev na Osnovni šoli Šmartno pod Šmarno goro in 8 učencev na Osnovni šoli Milana Šuštaršiča, ki so tudi sodelovali v anketiranju. V vzorec je zajetih tudi 28 dijakov tretjega letnika Škofijske gimnazije ter 53 dijakov drugega oziroma 72 dijakov tretjega letnika na Gimnaziji Poljane. Vsi učenci so se tekom svojega izobraževanja že srečali z astronomijo. Nekateri učenci obiskujejo (oziroma so obiskovali) izbirni predmet astronomija, drugi pa so se z astronomskimi temami srečali pri urah fizike oziroma geografije. Od 331 učencev in dijakov, ki so bili zajeti v anketiranju, je bilo 206 deklic, kar predstavlja 62% vseh anketirancev, in 125 dečkov, ki predstavljajo 38% delež anketirancev. V študijo primera je bilo zajetih tudi 9 učiteljev, ki anketirane razrede poučujejo. Sodelovalo je 7 učiteljic / profesorice in 2 učitelja / profesorja.

Glede na razred v osnovni šoli je v študiji sodelovalo 11 učencev sedmega razreda, to je 3% anketiranih učencev, 76 učencev osmega razreda, to je 23% anketiranih učencev,

in 91 učencev devetega razreda, kar predstavlja 28% anketiranih učencev. Na gimnaziji je pri anketiranju sodelovalo 53 dijakov drugega letnika, to je 16% anketiranih učencev, in 100 dijakov tretjega letnika, ki predstavljajo 30% vseh sodelujočih v anketi. Število sodelujočih učencev in njihov delež lahko razberemo v tabeli (6.1).

Razred	število otrok	delež otrok (%)
7. razred	11	3
8. razred	76	23
9. razred	91	28
2. letnik	53	16
3. letnik	100	30
skupaj	331	100

Tabela 6.1: Tabela prikazuje število sodelujočih otrok glede na razred, ki ga obiskujejo.

6.2 Vzorec spremenljivk

Vzorec spremenljivk predstavljata vprašalnika, ki se vsebinsko sicer razlikujeta, oba pa imata namen ugotoviti uporabnost modela v šoli. Vprašalnika sta namenjena učencem oziroma njihovim učiteljem. Anketni vprašalnik za učence (Priloga C) vsebuje 10 vprašanj na temo eksoplanetov. 7 vprašanj je odprtega tipa, 3 vprašanja pa so zaprtega tipa. Vprašalnik za učitelje (Priloga D) vsebuje 11 vprašanj odprtega tipa. Vprašalnika sem sestavil sam. Namen vprašalnika za učence je bil, da bi jih vzpodbudil k lastnemu razmišljanju in ugotovitvi, da lahko iz grafa, ki se nam zdi na prvi pogled zelo zakompliciran, potegnemo marsikatero značilnost opazovanega sistema, če si ga le konkretnije pogledamo. Namen vprašalnika, namenjenega učiteljem pa je bil, da ugotovim, kaj učitelji menijo o primernosti izbrane teme in kje bi jo lahko uporabili. Namen slednjega vprašalnika je bil tudi, da skonstruiram učno uro, ki ne bi bila samo frontalne oblike, ampak bi pripravila otroke k sodelovanju in bi bila zato učencem toliko bolj zanimiva ter bi si zato pridobili veliko novega znanja.

6.3 Način zbiranja podatkov

Podatke sem pridobil v mesecu novembru in decembru leta 2012. Podatke sem zbiral s pomočjo pisne ankete. Vsem sodelujočim je bilo pojasnjeno, da je njihovo sodelovanje anonimno in da bodo pridobljeni podatki uporabljeni samo za namen pisanja diplomske naloge. Ankete so učenci izpolnjevali samostojno med uro fizike (Osnovna

Šola Kašelj, Osnovna šola Komenda Moste, Gimnazija Poljane in Škofijska gimnazija) oziroma med uro izbirnega predmeta astronomija (v Osnovni šoli Stranje, Osnovni šoli Šentvid, Osnovni šoli Simona Jenka, Smlednik, Osnovni šoli Šmartno pod Šmarno goro in Osnovni šoli Milana Šuštaršiča). Za potrebe anketiranja sem učitelje poprosil za 20 minut njihove ure, saj moj namen ni bil samo anketiranje učencev, temveč tudi predstavitev modela in opazovanje odziva tako učencev kakor tudi učiteljev. Učenci so imeli med anketiranjem možnost tudi dodatnega pojasnila, prav tako pa smo skupinsko pojasnili, kaj je eksoplanet (ko so učenci na to vprašanje in še nekaj dodatnih vprašanj že odgovorili), da so lahko odgovorili na vprašanje, če le ta vpliva na svetlobno krivuljo in kako se ta spremeni. Učence sem tudi poprosil, naj ne izpolnjujejo vprašanj za nazaj, ker to ni namen anketiranja, in da to ni test, zato naj zapišejo odgovore, kot se jim zdi, tudi če niso pravilni. Nekajkrat je bilo potrebno učence tudi opozoriti, da je izpolnjevanje ankete samostojno in ne skupinsko delo.

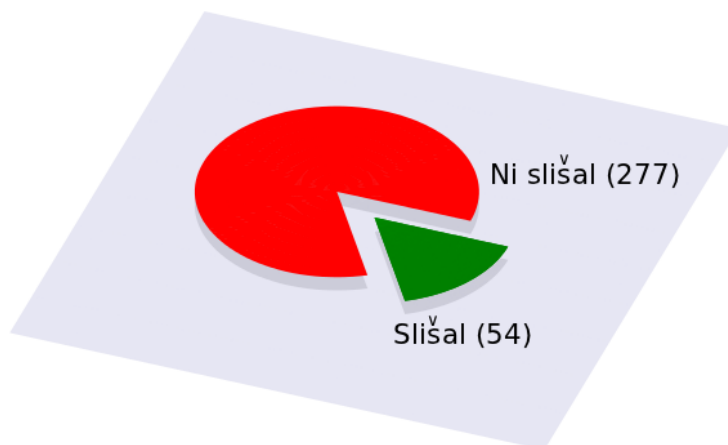
Učiteljem je bil vprašalnik izročen osebno v času odmora, prav tako pa jim je bil izročen vprašalnik za učence, da so lahko ugotovili primernost vprašalnika glede na stopnjo znanja učencev.

6.4 Rezultati

V nadaljevanju so prikazani rezultati vprašalnika, ki smo ga postavili učencem na osnovnih šolah in gimnazijah v Ljubljani in njeni okolici. Vprašalnik zavzema dva različna vsebinska sklopa. Prvi sklop zavzema poizvedovanje o poznavanju pojma eksoplanet in metodah za njihovo odkrivanje, drugi sklop pa razmišljanje otrok o svetlobnih krivuljah, ki jih dobimo, ko se okoli zvezde giba eksoplanet. V slednji sklop spada tudi vprašanje o sklepanju, kaj nam svetlobna krivulja ponazarja in kaj vse bi lahko iz nje razbrali.

6.4.1 Poizvedovanje o eksoplanetih

Iz digrama na sliki (6.1) vidimo, da je 54 otrok, kar predstavlja 16% vseh anketirancev, že slišalo za izraz eksoplanet. Od teh otrok jih je polovica (27 otrok) tudi vedela, kakšna je definicija eksoplaneta. 6 otrok (9%) je iz oblike besede sklepalo, da gre za telo, ki je podobno planetom v našem Osončju. 4 otroci (6%) so mislili, da so to telesa, ki so podobna Zemlji. Prav tako so 4 otroci (6%) mislili, da so to planeti, ki so izven naše galaksije. 4 otroci (6%) mislijo, da beseda eksoplanet predstavlja planet, primeren za življenje, 3 otroci (4%) mislijo, da je to planet brez zvezde, 5 otrok (7%) je odgovorilo, da je to zunanji planet, 4 otroci (6%) pa menijo, da je to na novo odkrit planet. Pri slednjem odgovoru je potrebno biti pazljiv, saj le ta odgovor ni daleč od resnice. Zadnji planet (Neptun) je bil odkrit leta 1846, prvo odkritje eksoplaneta pa sega v leto 1988. Vmes je torej dobrih 100 let (v katerih je sicer bil odkrit Pluton, a ta po najnovejši definiciji o planetu ne spada



Slika 6.1: Delež otrok, ki so že slišali za izraz eksoplanet.

več v to skupino), od prvega odkritega eksoplaneta do danes pa je le dobrih 20 let. Med odgovori na vprašanje, kaj je to eksoplanet, so se znašli tudi: planet, ki ga ne poznamo; ekstremni planet; eksotičen planet; planet, ki oddaja toploto; planet z močno notranjo energijo; majhen planet, ki ga je težko odkriti; planet daleč od Sonca in nepravi planet. Najbolj eksotičen odgovor pa je zagotovo sledeči: "Trditev je pravilna."

Če bi sešteli odstotke, bi ugotovili, da vse skupaj znese več kot 16%. Delež presega navedeno vrednost, ker nekateri, ki so pri prvem vprašanju obkrožili odgovor da, na drugo vprašanje niso odgovorili, so pa na to vprašanje odgovorili tudi nekateri, ki so pod prvim vprašanjem obkrožili odgovor ne. Prav tako so bili nekateri odgovori takšni, da sem jih lahko uvrstil v več podkategorij (recimo: "Novo odkrit planet, ki je podoben Zemlji.").

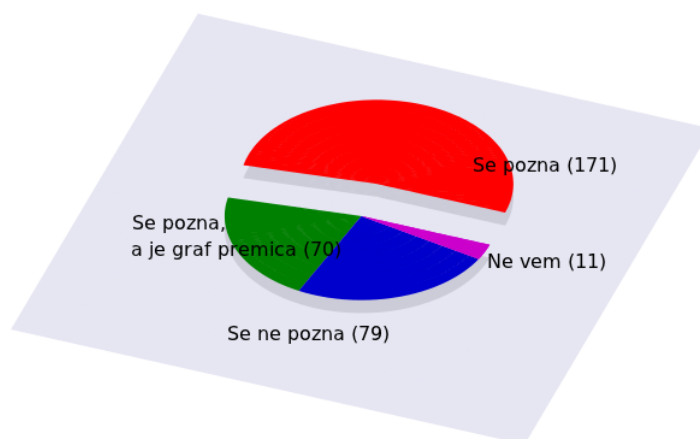
Na tretje vprašanje o metodah odkrivanja eksoplanetov je samo 6 otrok (2%) odgovorili pritrdilno. Od teh 6 otrok je eden opisal tranzitno metodo za odkrivanje eksoplanetov, enkrat se je med odgovori znašlo "odkrivanje s pomočjo radiacije fotonov z zvezde", enkrat, da "iščemo svetle pikice, ki se premikajo glede na ostale zvezde" in enkrat odgovor, da "sistematično pregledujemo nočno nebo". Med tistimi, ki so na tretje vprašanje odgovorili z ne, pa so se tukaj znašli odgovori, da jih "odkrivamo s teleskopom kot je Hubble" (pet odgovorov), "pošljemo satelite / robote v vesolje" (dva odgovora), "gremo v vesolje in raziskujemo" (en odgovor) in "slikamo zvezdo ter opazujemo, če naredi planet senco na njej" (en odgovor).

Iz odgovorov na vprašanje o eksoplanetih lahko razberemo, da je znanje o tej temi zelo podhranjeno. O besedi eksoplanet je do sedaj slišalo le okoli 16% otrok, od katerih jih v najboljšem primeru 65% (11% vseh otrok) ve dejansko definicijo za eksoplanet. Metode odkrivanja eksoplanetov pozna manj kot 2% otrok.

6.4.2 Prepoznavanje grafov

Naslednji sklop vprašanj se nanaša na sklepanje učencev o svetlobni krivulji v primeru, ko imamo zvezdo, okoli katere kroži eksoplanet. Sem spada tudi vprašanje o tem, kaj učenci menijo, kaj vse lahko iz teoretičnega grafa razberemo.

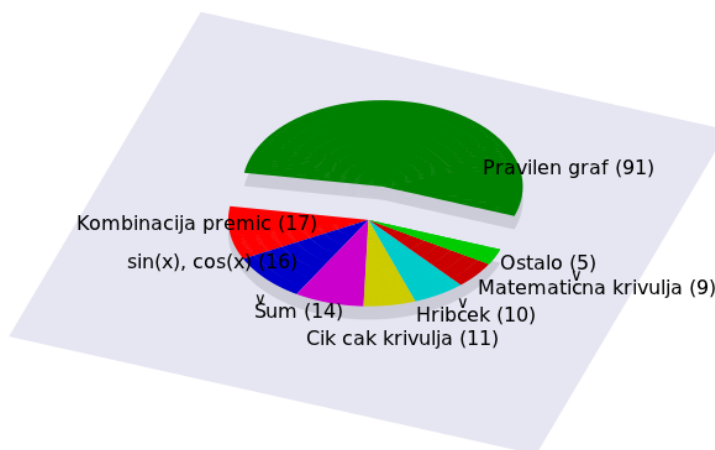
Za naslednji sklop je potrebno, da otroci poznajo definicijo eksoplaneta in kako sveti večina zvezd, zato sem učence na začetku anketiranja prosil, da najprej izpolnijo anketo do šestega vprašanja, potem pa naj počakajo na nadaljna navodila. Tukaj smo si vzeli nekaj minut časa, da smo ugotovili, kaj je eksoplanet, in da smo predvidevali, da večina normalnih zvezd, kot je naše Sonce, seva bolj ali manj enakomerno. Prav tako sem na tablo narisal, kje je zvezda, kje eksoplanet in od kod mi opazujemo ta sistem (nakazano jim je bilo, da lahko pride do prekrivanja). Po teh ugotovitvah sem učence prosil, da narišejo svetlobno krivuljo, za katero mislijo, da bi jo dobili v primeru, ko okoli zvezde kroži eksoplanet. Ko so otroci narisali krivuljo, sem jim pokazal teoretični graf in učenci so odgovorili na vprašanje, kaj lahko iz tega grafa razberejo.



Slika 6.2: Delež otrok, ki mislijo, da eksoplanet vpliva na svetlobno krivuljo, je obarvan rdeče, delež tistih, ki mislijo, da se pozna, je obarvan zeleno, medtem ko je delež otrok, ki na to vprašanje niso odgovorili, obarvan modro.

Z diagrama na sliki (6.2) lahko vidimo, da 79 otrok (24%) meni, da eksoplanet nima vpliva na svetlobno krivuljo. Od tega je 6 otrok odgovorilo, da nima vpliva, ker je zvezda veliko, veliko večja od eksoplaneta. 70 otrok (21%) meni, da se mora prisotnost eksoplaneta nekako odražati na svetlobni krivulji, saj pride eksoplanet pred zvezdo in jo delno zastre, a so vseeno na graf narisali vodoravno premico. 171 otrok (52%) meni, da eksoplanet vpliva na svetlobno krivuljo, medtem ko 3% učencev (11 otrok) na to vprašanje ni odgovorilo.

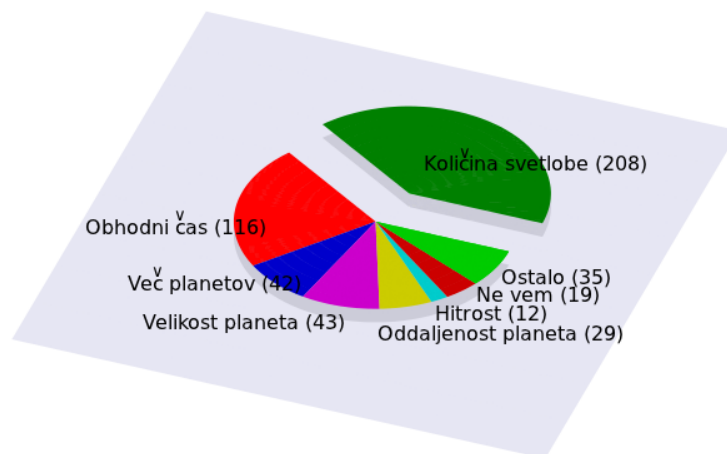
Z diagrama na sliki (6.3) lahko razberemo, da je od 171 otrok, ki menijo, da se gibanje eksoplaneta pozna na svetlobni krivulji, 91 otrok (53%) narisalo pravi graf, ki ima



Slika 6.3: Diagram prikazuje, katere grafe so narisali tisti otroci, ki mislijo, da eksoplanet vpliva na svetlobno krivuljo. Na grafu vidimo, da je 82 otrok (številka v oklepaju) narisalo pravilen graf, to predstavlja 51% otrok (od 161-ih, ki so odgovorili, da se prisotnost eksoplaneta nekako odraža tudi na svetlobni krivulji).

enega ali več minimov v obliki črke U, v obliki črke V ali pa so narisali minimum z ravnim dnem. 17 otrok (10%) je narisalo graf, ki je bil kombinacija večih premic (vodoravna, ki se prelomi v navpičnico; vodoravna, ki se prelomi v naraščujočo premico, ta pa se prelomi zopet v vodoravno premico ...), 16 otrok (9%) je za odgovor narisalo graf sinusne oziroma kosinusne krivulje. 14 otrok (8%) je narisalo krivuljo, ki gre v vodoravni smeri in malo opleta gor oz. dol (nekakšen šum). 11 otrok (6%) je narisalo cik cak krivuljo. Prav tako je 10 otrok (6%) narisalo graf, ki ga lahko opišemo kot hribček. Eden od teh otrok je zapisal, da se takšen graf pojavi zaradi odboja svetlobe na planetu (ko se svetloba odbije v našo smer). 9 otrok (5%) pa je narisalo graf matematične funkcije (bodisi obliko krivulje $1/x$, bodisi logaritemske funkcije, bodisi eksponentne funkcije). Med ostalimi grafi so se znašli še graf srčnega utripa, graf padajoče krivulje in graf, ki bi ga najlažje opisali kot na naraščajočo premico narisano graf sinusne krivulje.

Iz diagrama na sliki (6.4) lahko vidimo, da je 63% učencev (208 učencev) na odgovor o tem, kaj lahko sklepamo iz grafa, ki sem jim ga pokazal (teoretični graf), odgovorilo, nekaj v povezavi s količino svetlobe. (Ker so na grafu (6.4) zbrani vsi možni odgovori, in ker je veliko otrok podalo več kot en možen odgovor, je videti, da je zeleni del manjši kot 50%.) Med te odgovore sem uvrstil odgovore kot so: "moč svetlobe; gostoto svetlobe v odvisnosti od časa; nekaj časa je svetloba konstantna, potem pade, potem pa je zopet konstantna; ko pride planet pred zvezdo, dobimo manj svetlobe..." 35% otrok (116 otrok) je pravilno sklepalo, da lahko iz grafa razberemo obhodni čas eksoplaneta. 13% otrok (42 otrok) je nakazalo, da bi lahko iz grafa sklepali na prisotnost več kot enega planeta. 13% (43 otrok) jih je pravilno sklepalo, da bi iz globine minimuma lahko sklepali tudi nekaj o



Slika 6.4: Diagram prikazuje, kaj vse učenci mislijo, da se da ugotoviti iz teoretičnega grafa svetlobne krivulje zvezde, okoli katere se giba eksoplanet. Številke v oklepaju povedo število otrok, ki je zapisalo dano ugotovitev.

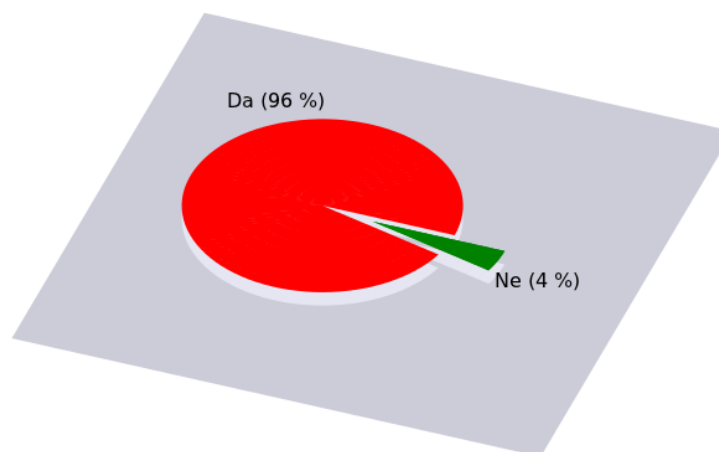
velikosti eksoplaneta. 9% otrok (32 otrok) sklepa, da bi lahko iz grafa razbrali tudi oddaljenost planeta od zvezde (seveda bi morali tukaj poznati še nekaj osnovnih značilnosti zvezde). 12 otrok (4%) je zapisalo, da bi lahko iz grafa dobili tudi hitrost gibanja planeta. Med odgovori, ki so se tudi pojavili so še: "velikost zvezde, maso zvezde, maso planeta, tlak, število obhodov, koliko svetlobe pade na eksoplanet, koliko je eksoplanet odbije, koliko svetlobe odbije zvezda ..." Razveseljivo je tudi to, da na to vprašanje ni odgovorilo le dobrih 5% otrok (19 otrok), vsi ostali pa so zapisali vsaj en sklep.

Zanimivo se mi zdi tudi dejstvo, da kljub temu, da smo govorili o eksoplanetih, je pri osmem vprašanju še vedno le dobra polovica otrok (53%) neposredno ali posredno nakazalo na to, da imamo v bližini zvezde eksoplanet, na mrke oz. prekrivanje pa jih je nakazalo samo 16%.

6.4.3 Primernost metode

Iz diagrama na sliki (6.5) lahko opazimo, da se je 96% učencev zdela metoda nazorno predstavljena in da so jo razumeli, medtem ko so se pri ostalih 4% otrok pri zadnjem vprašanju pojavili odgovori kot sta: "me ne zanima fizika" in "najprej nisem vedela, kaj profesor zahteva od mene."

Na zadnje vprašanje o tem, če bi želeli še kaj deliti s profesorjem fizike, je 41% otrok vsaj nekaj zapisalo (odgovora ne tukaj nisem upošteval) in 39% od vseh otrok se je zdela metoda "nadvse zanimiva, carska, uporabna". Kar nekaj otrok je zapisalo tudi, da so se iz metode naučili veliko novega in da je pritegnila njihovo pozornost. Kot sem že zapisal, sta se tu pojavila tudi odgovora: "me ne zanima fizika"; "najprej nisem vedela, kaj profesor zahteva od mene", dodam pa lahko še odgovor "prezакomplicirano". Teh



Slika 6.5: Delež otrok, ki mislijo, da je bila metoda predstavejna nazorno, je obarvan rdeče, tistim, ki pa mislijo, da metoda ni bila predstavljena nazorno, je namenjen zeleni del diagrama. Številke v oklepaju povedo, kolikšen je procentualni delež posameznih odgovorov.

odgovorov je bilo vse skupaj 2%.

6.5 Vprašalnik za učitelje

Vsi profesorji, ki so sodelovali v anketiranju, poučujejo (so poučevali) fiziko na šoli in imajo od 5 do 20-letno prakso poučevanja. Nekateri od teh učiteljev poučujejo tudi izbirni predmet astronomija in še kakšen predmet, kjer bi se model tudi dalo uporabiti.

Sodelujoči učitelji namenijo v povprečju astronomiji 8 ur v osmem ali devetem razredu osnovne šole in okoli 5 ur v enem od letnikov v gimnaziji. Pri izbirnem predmetu astronomija je seveda astronomiji namenjenih vseh 35 ur.

Vsi profesorji menijo, da je metoda uporabna pri uri astronomije, problem, ki ga vidijo, je v tem, da teme ni v učnem načrtu. A učitelj ima tudi nekaj prostega manevra in lahko v učne vsebine uvrsti tudi nekaj tem po svojem izboru. Model bi lahko uporabili kot zanimivost po obravnavi Sončevega sistema, pri dodatnem pouku fizike, pri predmetu zvezde in vesolje, bi pa bil model zanimiv tudi pri predmetu robotika v tehniki (s tehničnega vidika). Model bi bil uporaben tudi pri vpeljavi Sončevega in Luninega mrka in pri predstavitvi gibanja planetov okoli zvezde.

Profesorji vidijo kot dobro stran modela tudi igranje z Lego kockami, saj si tako hitreje pridobijo pozornost otrok. Učenci si s pomočjo modela tudi veliko bolje predstavljajo, zakaj pride do prekrivanja in sami pridejo do zaključkov o obhodnem času planeta itd. Model jim je zanimiv tudi zato, ker se ga da relativno enostavno razložiti in nazorno prikazati, gre pa za zelo aktualno temo, ki se jo da tudi povezati z učnimi vsebinami iz učnega načrta (obhodni čas planetov, mrki, odčitavanje grafov). Dobra stran je tudi uporaba povezovanja med fizikalnimi količinami.

Pomanjkljivost predstavljenega modela vidijo učitelji predvsem v tem, da so grafi pretežki (za sedme razrede) in da je potrebno pridobiti prave Lego kocke in model znati sestaviti. Problem je tudi v tem, da večina šol nima Vernierove opreme. Smo pa na eni od šol ugotovili, da tudi lux meter zazna upad svetlobe (čtetudi nismo bili v popolni temi), ko kroglica pride pred žarnico. Pomankljivost se jim je zdela tudi ta, da bi bilo potrebno izhajati iz že predstavljenega grafa. Pomanjkljivost ankete pa vidijo v tem, da bi bilo mogoče dobro sestaviti nekoliko lažjo anketo za učence osnovnih šol in nekoliko drugačno anketo za dijake srednjih šol.

Dijakom bi lahko zastavili tudi vprašanje, ali menijo da je ta metoda vedno uporabna oz. kakšni bi morali biti pogoji, da nam ta metoda ne bo dala rezultatov (kako lahko odkrivamo eksoplanete, če krožijo pravokotno na smer opazovalec - zvezda). Dijakom bi lahko postavili tudi vprašanje, katere parametre lahko določimo iz grafa neposredno in katere parametre lahko določimo posredno. Lahko pa bi seveda tudi že v anketni vprašalnik postavili vprašanje o povezavi med gibanjem eksoplaneta in Luninem ter Sončevim mrkom.

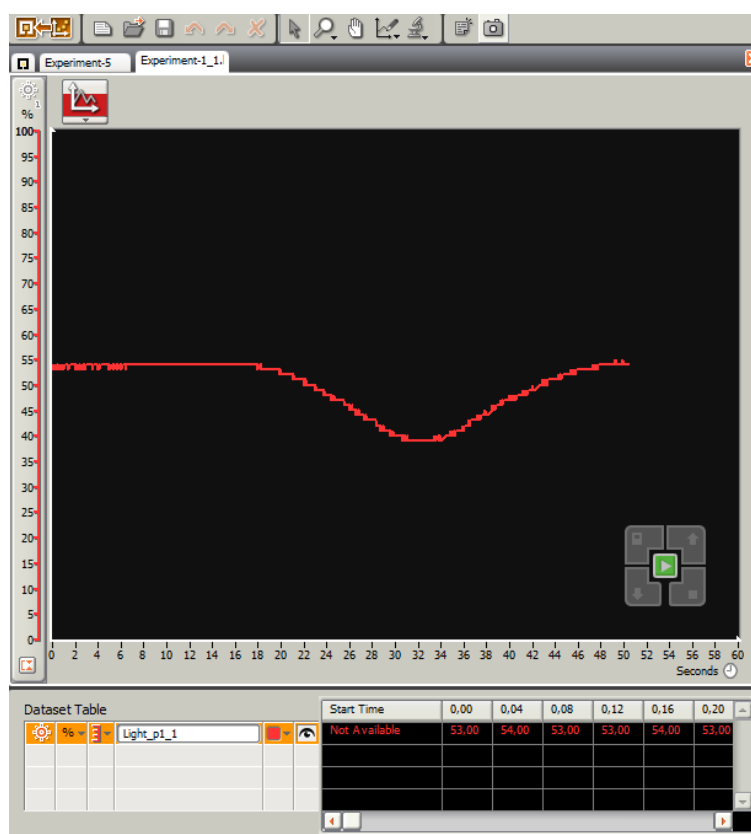
Po komentarjih sodeč pa si profesorji v učnem načrtu želijo tudi več aktualnih tem in ne le "100 let stare prakse". Zanimivo jim je tudi to, da lahko neko metodo, ki je na prvi pogled zelo zakomplicirana, in ki jo astronomi dejansko uporabljajo za odkrivanje eksoplanetov, prilagodimo učenčevim znanjem in jo predstavimo na tako preprost način.

6.6 Vtisi v razredu

Moji vtisi ob predstavitvi modela so zelo dobri. Ocenil bi, da je okoli 90% otrok aktivno sodelovalo pri predstavitvi modela. Pri tem seveda ne mislim na izpolnjenije ankete, ampak na podajanje odgovorov, kaj je eksoplanet, kaj lahko iz grafa razberemo, kako lahko to razberemo, kaj bi se na podlagi razbranih podatkov še dalo ugotoviti ... Aktualnost teme učence napelje tudi na vprašanje števila odkritih eksoplanetov; kakšni so ti eksoplaneti; a se je na katerem razvilo življenje; bi se na katerega lahko preselili ... Zanimanje učencev se kaže tudi v tem, da ko jim rečeš, da lahko pridejo bližje, se vsi kar grebejo, kdo bo prišel bližje, kdo sme vrteti zobnike na modelu ali pa kdo sme vključiti motorček Lego kock. Otroci hitro povežejo prekrivanje zvezde s Sončevim mrkom, iz grafa pa hitro uvidijo, da so enako globoki mrki, ki so v krivulji razporejeni ekvidistantno, pokazatelj na prisotnost istega planeta. Ko v šoli vprašaš, a morajo biti mrki nujno enako globoko, bo kar nekaj otrok začelo razmišljati o tem, da ravnina gibanja eksoplaneta ni nujno poravnana s pogledom proti Zemlji in je tako lahko planet prečkal zvezdo malo višje kot pri prejšnem prehodu in zato dobimo manj globok mrk. Učenci sami ugotovijo, da je edino obhodni čas (ekvidistantnost mrkov) pokazatelj tega, da gre za isti planet. Ko dobimo na koncu krivuljo, ki jo prikazuje desni graf na sliki (5.19), pa učenci hitro ugotovijo, da

smo med brisanjem mrkov pobrisali tudi tisto, kar ne bi smeli (zgodilo se je, da sta se dva planeta poravnala s pogledom proti Zemlji). Zanimivo se mi zdi izpostaviti tudi ne tako osamljen primer učenca, ki je zamudil 5 minut ure in se je že iz odziva učenca in ostalih sošolcev dalo razbrati, da to niti ni tako neobičajen pojav. Z mimike učenca se je dalo tudi razbrati, da mu fizika oziroma astronomija ni zelo priljubljena. Po 40 minutah v razredu, ko sem se jim zahvalil za sodelovanje pri anketiranju in izpeljavi učne ure (v kateri je učenec večkrat tudi sam podal svoje mnenje), pa je isti učenec ves presenečen vprašal, če bomo že končali.

Odziv učiteljev? Lahko rečem, da so bili vsi navdušeni. Tega ne sklepam samo iz odgovorov na anketnem listu, ampak iz njihovega navdušenja med odmorom, ko so mi povedali, da bi (bodo) tudi sami uporabili metodo v razredu, saj imajo tisti, ki imajo na šoli predmet robotika v tehniki, na razpolago dovolj Lego kock, ostali pa bi jih nabavili, če bi vedeli katere nabaviti. Opazil pa sem, da na osnovnih šolah, na katerih sem izvajal anketiranje, praviloma nimajo Vernierove opreme, me je pa ena od učiteljic opozorila, da se da dobiti senzor svetlobe tudi v kompletu z Lego kockami. Kot je razvidno na sliki (6.6), tudi ti senzorji zaznajo mrke v svetlobni krivulji.



Slika 6.6: Svetlobna krivulja, ki jo dobimo s senzorjem svetlobe, ki je vključen v Lego komplet.

Zaključek

V diplomskem delu sem opisal metode odkrivanja eksoplanetov in dvojnih zvezd, ki jih ne moremo ločiti ne s prostim očesom, ne s pomočjo teleskopa. Snov sem poskušal predstaviti na čim preprostejši način, da bodo lahko idejo uporabili tudi tisti, ki se v temo niso poglobljali. V diplomu sta vključena dva eksperimentalna dela. V prvem je prikazano, kako na preprost način učencem oz. tistim, ki niso tako domači v astronomiji, predstaviti prekrivalno metodo in kako na svetlobno krivuljo vpliva velikost, oddaljenost in število eksoplanetov. V tem delu sta predstavljeni tudi meritvi, kako lahko iz svetlobne krivulje določimo velikost in število eksoplanetov. V drugem eksperimentalnem delu je analiza izvedbe poskusa v šolah, ki vključuje tudi mnenja učencev, kaj lahko iz grafa za svetlobno krivuljo zvezde (okoli katere kroži eksoplanet) razberemo.

Ugotovil sem, da profesorji menijo, da je tema eksoplanetov v učnem načrtu podhranjena. S praktičnega vidika učitelji do sedaj niso imeli pripomočka, s katerim bi učencem nazorno pokazali, kaj pomeni planetarni sistem in kako odkrivamo eksoplanete. Dobra stran modela je tudi, da lahko potrebne sestavne dele hitro in relativno poceni kupimo.

Ugotovil sem tudi, da učenci zelo hitro osvojijo prekrivalno metodo za odkrivanje eksoplanetov in jo hitro povežejo z bolj domačimi primeri (Sončev oziroma Lunin mrk).

Za konec še najpomembnejše pri vsem skupaj: dajmo otrokom veselje do astronomije, pri čemer lahko nekaj Lego kock in preprosto navodilo za sestavo modela zelo pomagajo, saj bomo potem tudi sami dosegali večje uspehe.

Literatura

- [1] Milankovič, M.: Zgodovina astronomije
- [2] http://www.iau.org/public_press/news/detail/iau0603/ (24. maj 2012)
- [3] Kitchin, C. 2012: Exoplanets - Finding, Exploring and Understanding Alien Worlds, Springer, New York
- [4] Mayor M.; Frei, P.-Y. 2003: New Worlds in the Cosmo, Cambridge University Press, New York
- [5] Piper, S. 2011: Exoplaneten - Die Suche nach einer zweiten Erde, Springer Berlin Heidelberg, New York
- [6] Ulmschneider, P. 2003: Intelligent Life in the Universe - From Common Origins to the Future of Humanity, Springer - Verlag, Berlin
- [7] Scharf, C. A. 2009: Extrasolar Planets and Astrobiology, University Science Book, Sausalito, California
- [8] Williams, I. P.: Introduction - Solar and Extra-Solar Planetary Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001
- [9] <http://www.solstation.com/habitable.htm> (24. maj 2012)
- [10] Einstein, A. 1936: Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field. Sci, 84, 506-507
- [11] <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast222/lectures/lec05.html> (24. maj 2012)

-
- [12] <http://www.physics.sfasu.edu/astro/ebstar/ebstar.html> (24. maj 2012)
- [13] Perryman, M. 2011: *The Exoplanet Handbook*, Cambridge University Press, New York
- [14] <http://gravitationallensing.pbworks.com/w/page/15553247/FrontPage> (20. maj 2012)
- [15] <http://astro.berkeley.edu/~jcohn/lens.html> (24. maj 2012)
- [16] Scott Gaudi, B.: *Exoplanetary Microlensing*. The Ohio State University, 2010
- [17] <http://gravitationallensing.pbworks.com/w/page/15553248/General%20Lensing> (23. maj 2012)
- [18] http://ned.ipac.caltech.edu/level5/Mellier/Mellier2_1.html (22. maj 2012)
- [19] <http://phys.org/news/2010-12-astronomy-telescope-lens-darkly.html> (24. maj 2012)
- [20] Cassan, A. 2007: *Searching for Extrasolar Planets via the Microlensing Technique: Discoveries and Implications for Planet Abundance*, Heidelberg, Germany
- [21] <http://en.wikipedia.org/wiki/2M1207b> (24. avgust 2012)
- [22] Souchay, J.; Dvorak, R. 2010: *Dynamics of Small Solar System Bodies and Exoplanets*, Springer Berlin Heidelberg, New York
- [23] <http://www.vernier.com/products/sensors/ls-bta/> (24. maj 2012)
- [24] <http://ldd.Lego.com/en-us/Default.aspx?icmp=COUSCreateShareSL100DBM> (24. avgust 2012)
- [25] <http://exoplanet.eu/> (9.1.2013)
- [26] <http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog> (9.1.2013)
- [27] <http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/> (9.1.2013)

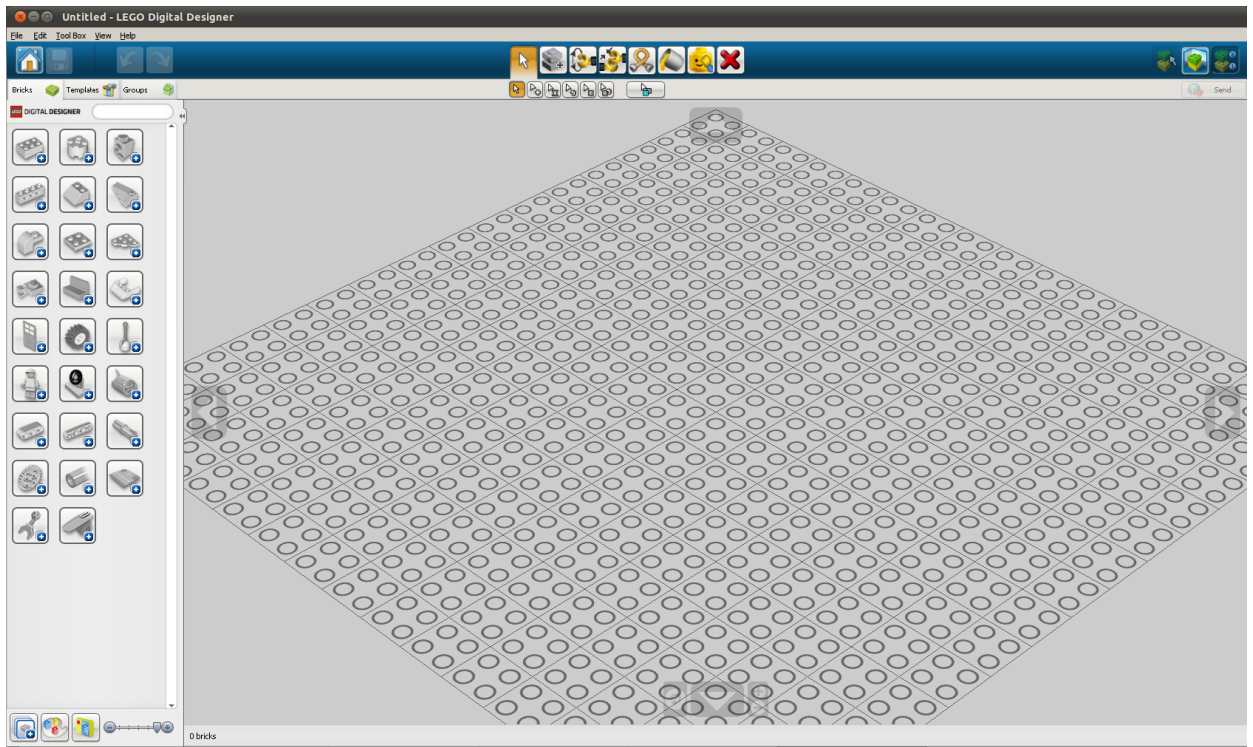
A

Navodila za Lego planetarni model

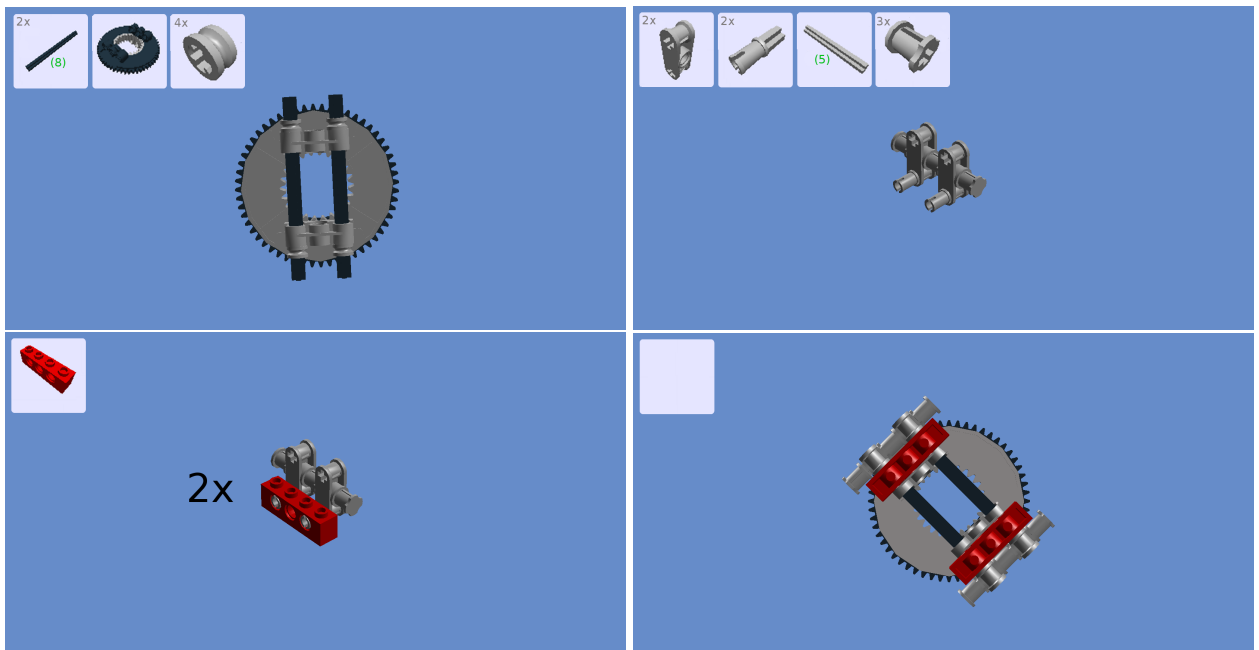
Načrt za Lego model je izdelan s pomočjo programa Lego Digital Designer, ki ga lahko prosto prenesemo s spletne strani podjetja Lego [24]. Različica 4.2 tega Lego programa je prikazana na sliki (A.1). Ko se nam program odpre, lahko na levi strani izbiramo med različnimi sklopi in različnimi velikostmi kock. Zelo uporabna sta tudi filtra, ki sta levo spodaj pod izborom kock. Filter za barvo kock (drugo okence) nam koristi, da lahko hitreje najdemo različne velikosti kock. Če katere od kock ne najdemo med izborom, se prepričajmo, da nimamo vključenega filtra za tovarniško sestavljene modele (tretje okence). Nad mizo za sestavljanje imamo hitre tipke za kloniranje, brisanje ..., velja pa tudi večina standardnih bližnjic (ctrl + c - za kopiraj, ctrl + v - za prilepi ...). Zelo uporabna sta tudi desni gumb na miški (če ga držimo, lahko naš model vrtimo) in kolesček (za približevanje / oddaljevanje modela). Ko enkrat model sestavimo, imamo desno zgoraj okence, s pomočjo katerega program sam naredi navodilo za sestavo modela ter prikaže tudi število in katere kocke potrebujemo. Na žalost pa ta načrt ni zanesljiv (večkrat se zgodi, da bi bilo potrebno za sestavo naslednje stopnje v načrtu modela kaj razdreti, da bi lahko naredili ta korak), zato sem načrt sestavil sam in pri tem vključil še kakšen parameter, ki se mi je zdel pomemben (recimo velikost posameznih kock).

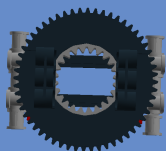



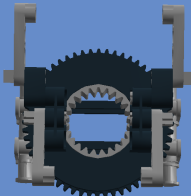




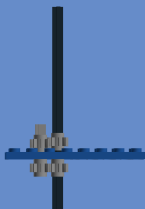




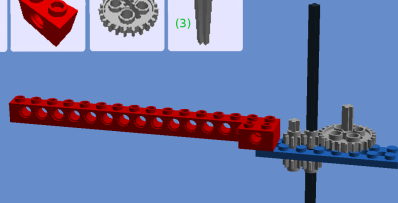


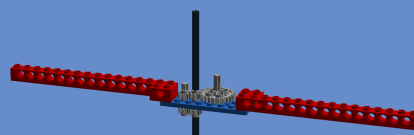




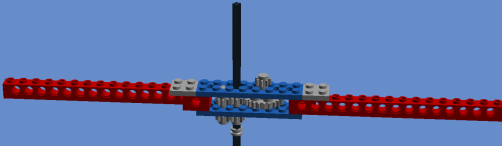



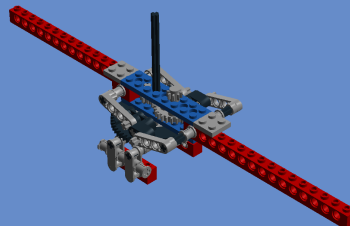
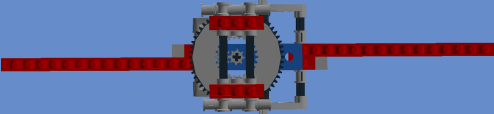

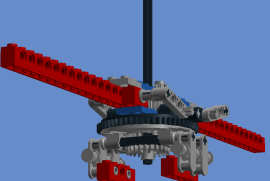





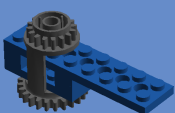
Tabela (A.1) prikazuje, katere Lego kocke potrebujemo, če želimo sestaviti planetarni model, ki je opisan v tem diplomskem delu. Prvi stolpec predstavlja število kock, katerih slika je v drugem stolpcu, serijska številka v tretjem in kratek opis v zadnjem stolpcu.

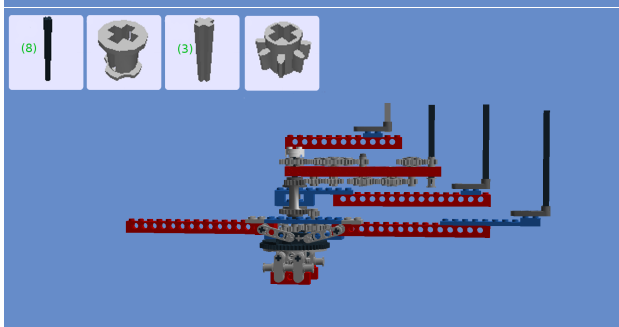
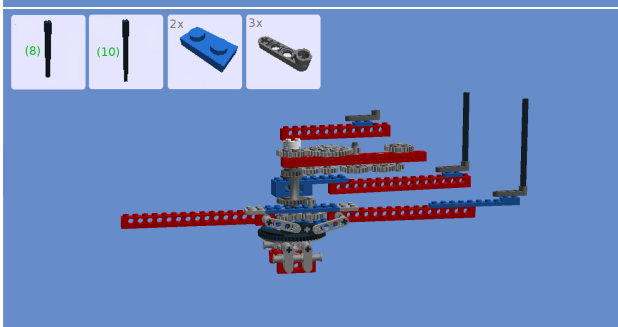
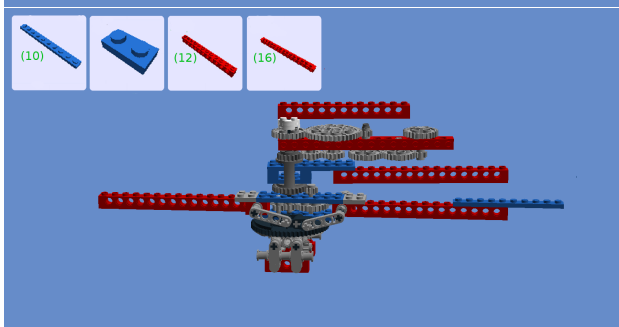
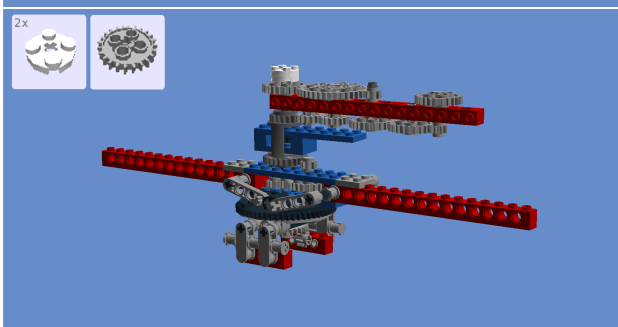
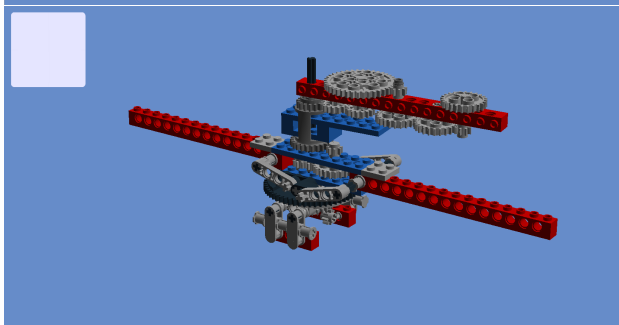
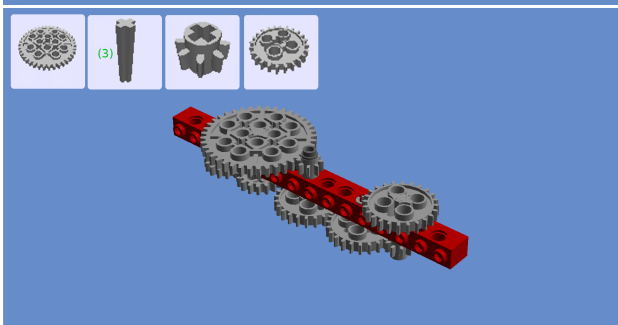
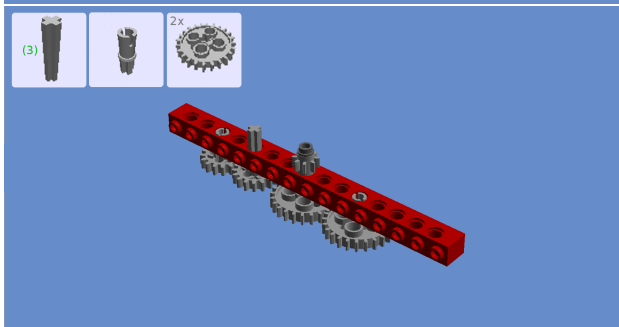
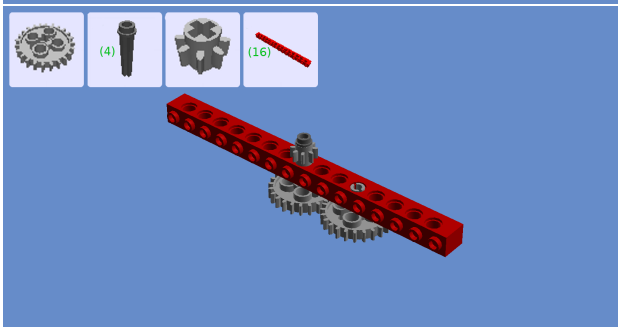
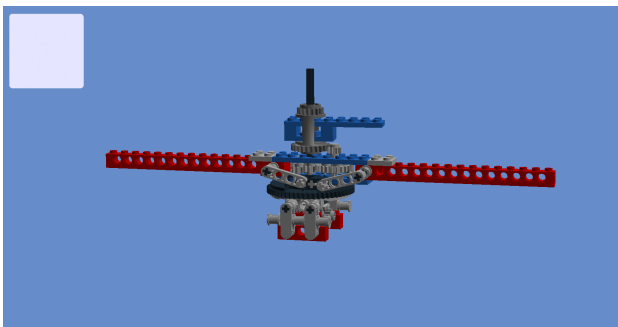
Spodnji niz slik prikazuje načrt, kako sestavimo planetarni model iz Lego kock. Manjše slikice v posameznih slikah prikazujejo potrebne dele, številke v teh slikicah pa koliko katerih delov potrebujemo (siva številka, načeloma v zgornjem levem kotu) oziroma koliko so posamezni deli dolgi (zelena številka v oklepaju).

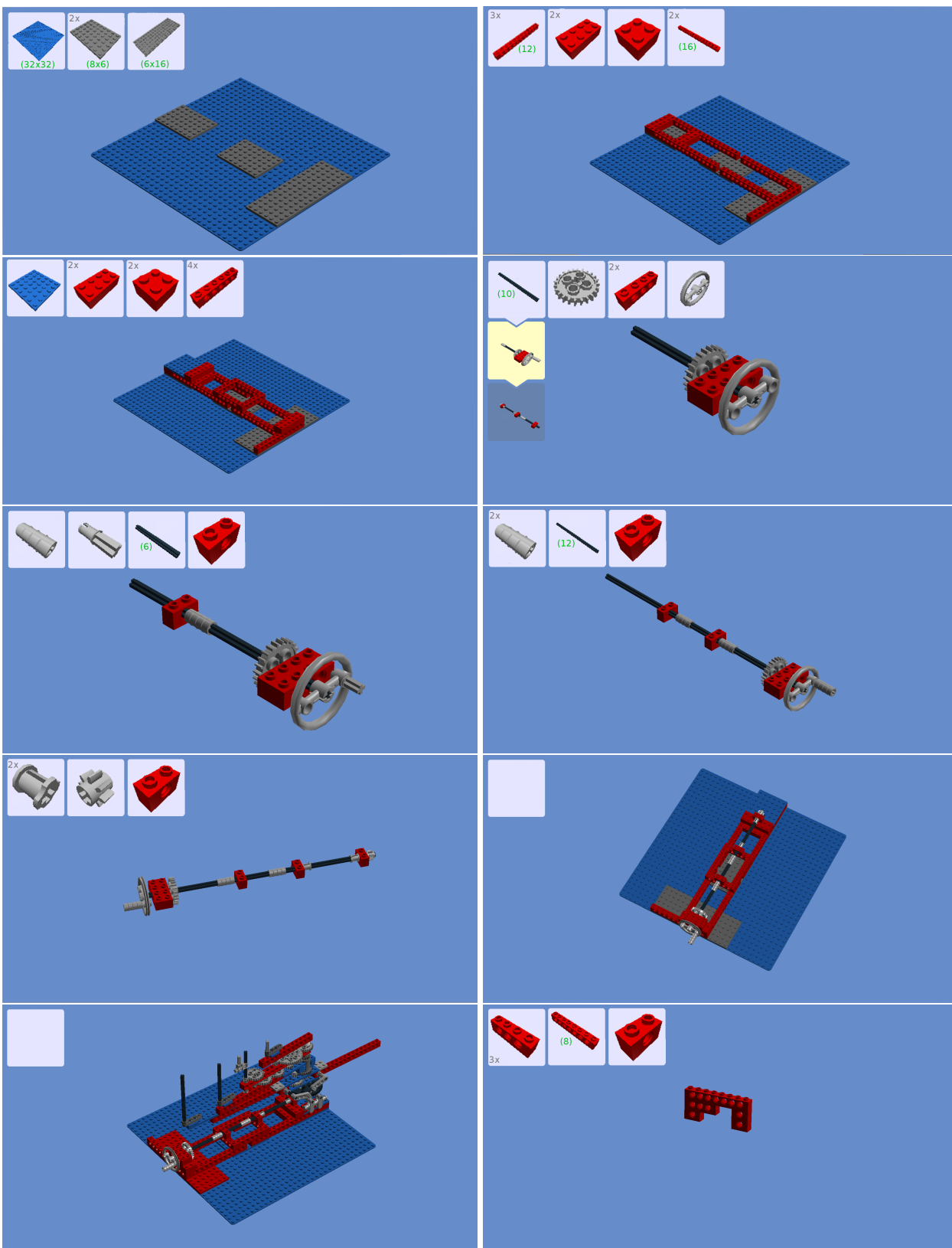


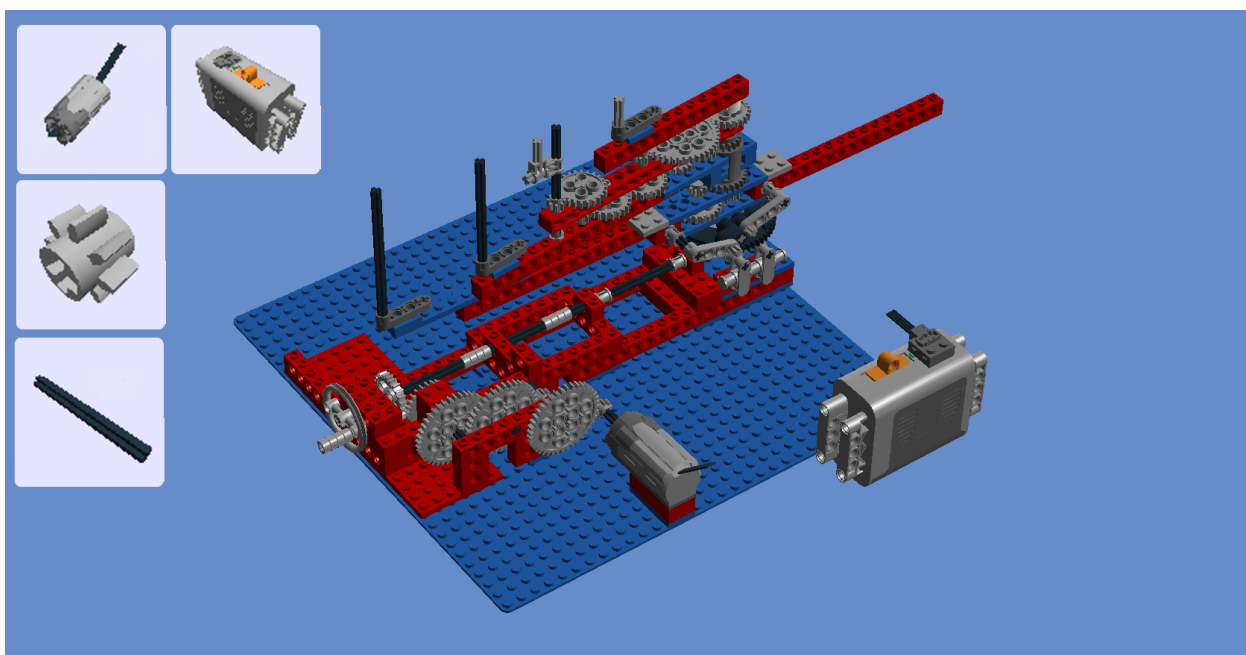
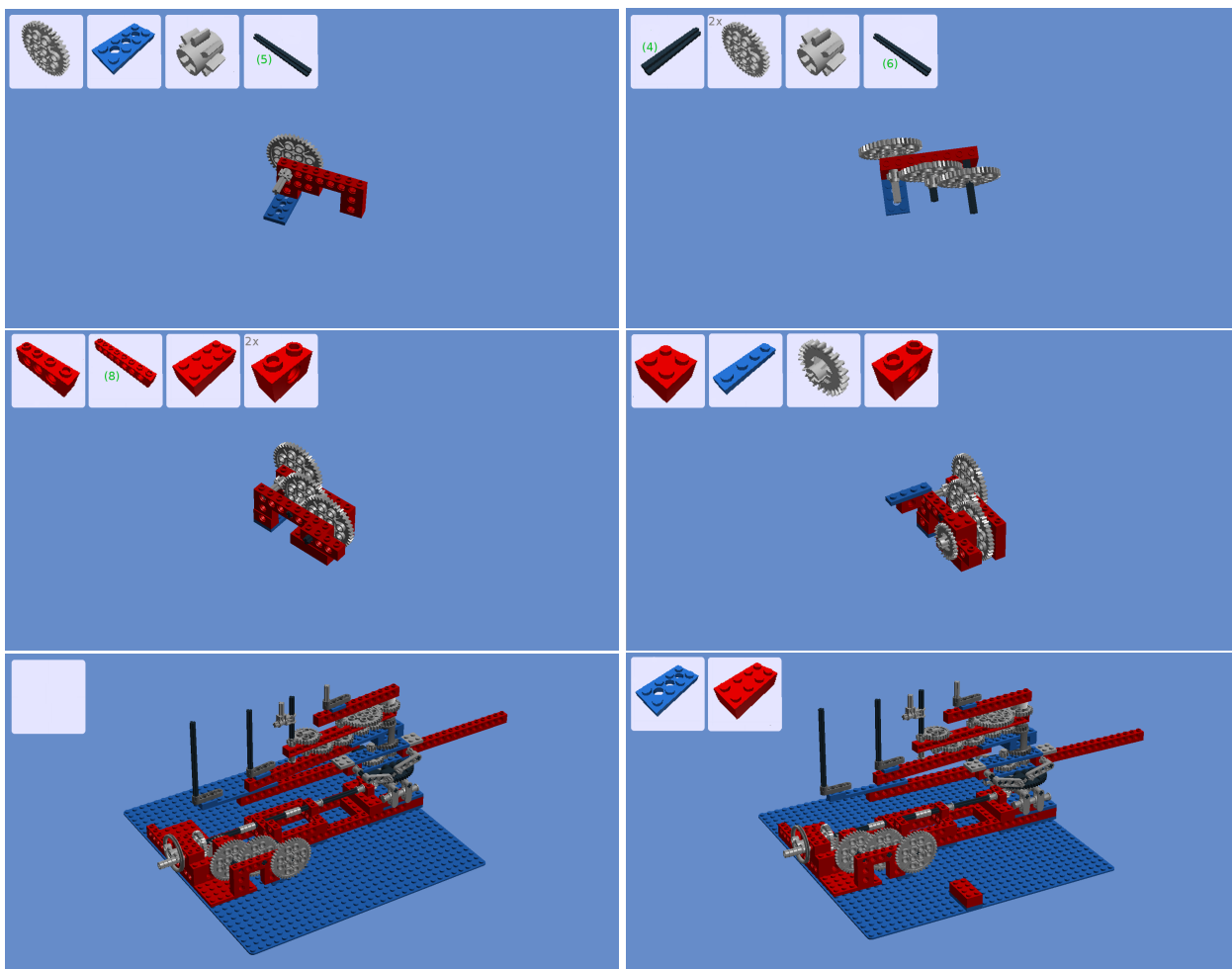
Slika A.1: Namizje programa *LEGO Digital Designer*, različice 4.2, s pomočjo katerega sta bila izdelana oba modela iz Lego kock.






































	<p>2x </p> <p>6x </p> <p>4x </p> 
<p>(12) </p> <p>(8) </p> <p>4x </p> <p>(3) </p> 	<p>(16) </p> <p></p> <p></p> <p>(3) </p> 
<p>(16) </p> <p></p> 	<p></p> <p>(8) </p> <p>2x </p> <p></p> 
<p>(8) </p> <p>(6) </p> <p>4x </p> 	
<p></p> 	<p>(8) </p> <p></p> <p>4x </p> <p></p> <p></p> <p></p>







Število	Slika	Serijska št.	Opis kocke
4		300321	Kocka 2x2 - svetlo rdeča
6		300121	Kocka 2x4 - svetlo rdeča
11		370021	Kocka Technic 1x2, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
6		370121	Kocka Technic 1x4, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
4		389421	Kocka Technic 1x6, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
2		370221	Kocka Technic 1x8, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
4		389521	Kocka Technic 1x12, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
6		370321	Kocka Technic 1x16, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
7		302323	Plošča 1x2 - svetlo modra
2		4211397	Plošča 2x2 - srednje siva
1		371023	Plošča 1x4 - svetlo modra
1		447723	Plošča 1x10 - svetlo modra
1		395823	Plošča 6x6 - svetlo modra
2		303623	Plošča 6x8 - svetlo modra
1		302721	Plošča 6x16 - svetlo rdeča
2		403201	Plošča 2x2 okrogla - bela
3		370923	Plošča 2x4 z luknjami - svetlo modra
3		373823	Plošča 2x8 z luknjami - svetlo modra
1		4506083	Motor 24x6M - črn, srednje siv, temno siv, oranžen
1		4506078	Škatla za baterije 4x11x7 - črn, srednje siv, temno siv
3		4210675	Ročica Technic 4M - temno siva
4		4211561	Ročica Technic 4M - svetlo siva
5		4211573	
5		4211815	Križna os 3M - srednje siva
13		4211808	Konektor luknja / križna os - svetlo siv
13		4211622	
2		370526	Križna os 4M - črna
3		4211543	Razširjevalec krožne osi - srednje siv
1		4211086	Križna os 3M z glavico - temno siva
2		4114740	Križna os 5M - črna
2		4211639	Križna os 5M - Svetlo siva
2		4515185	Nosilec 1x2 W / križni in luknja - črn
2		370626	Križna os 6M - črna
4		4211621	Dvojni križni blok - srednje siv
5		370726	Križna os 8M - črna












Število	Slika	Serijska št.	Opis kocke
2		373726	Križna os 10M - črna
2		370826	Križna os 12M - črna
1		4211448	Krmilno kolo - srednje sivo
12		4211432	Zobnik T8, M1 - svetlo siv
2		4211563	Zobnik Z16, M1 - svetlo siv
2		4211434	Zobnik s krono Z24 - srednje siv
6		4211565	Zobnik Z24 - svetlo siv
4		4211433	Zobnik 40T - svetlo siv
1		4211023	Izravnalno kolo - temno sivo
1		4624645	Vrtljiva plošča 4.85 - temno siva, črna
1		381123	Osnovna Plošča 32x32 - svetlo modra

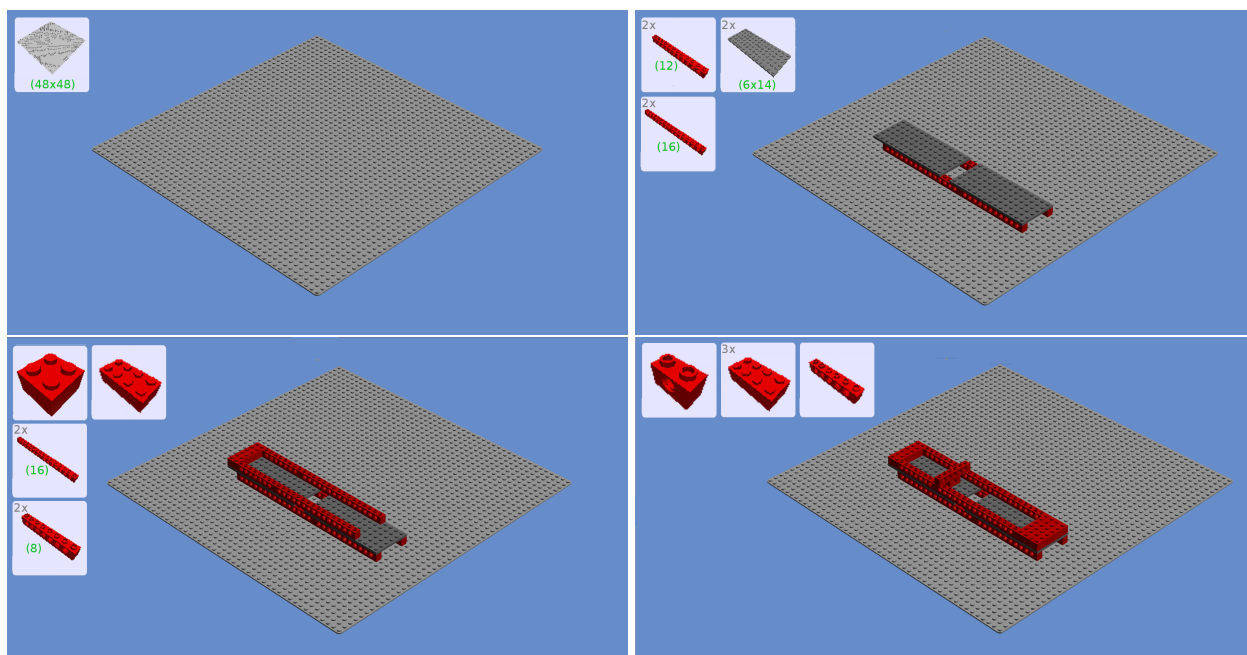
Tabela A.1: Potrebne Lego kocke za sestavo planetarnega modela.

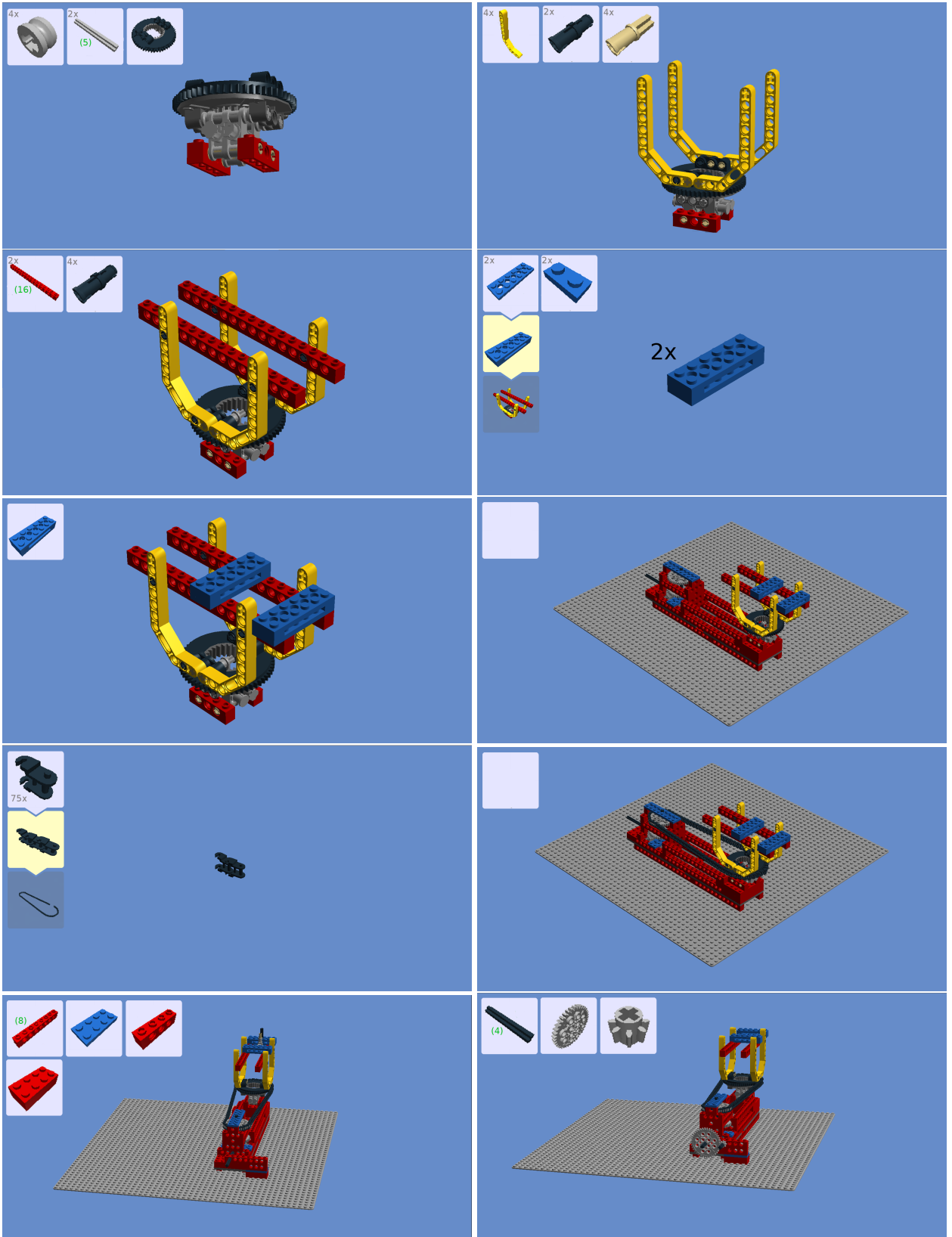
B

Navodila za Lego model dvojne zvezde

Spodaj je prikazan načrt, kako sestavimo model iz Lego kock, na katerega bomo potem postavili dve svetili, ki nam bosta predstavljali dve zvezdi. Manjše slikice v posameznih slikah prikazujejo potrebne dele, številke v teh slikicah pa koliko katerih delov potrebujemo (siva številka, načeloma v zgornjem levem kotu) oziroma koliko so posamezni deli dolgi (zelena številka v oklepaju).

Tabela (B.1) prikazuje, katere Lego kocke potrebujemo, če želimo sestaviti model, na katerega bomo kasneje postavili dve svetili (ki nam bosta predstavljali dve zvezdici) in nam bo le ta služil za vrtenje teh dveh svetil. Prvi stolpec predstavlja število kock, katerih slika je v drugem stolpcu, serijska številka v tretjem in kratek opis v zadnjem stolpcu.







































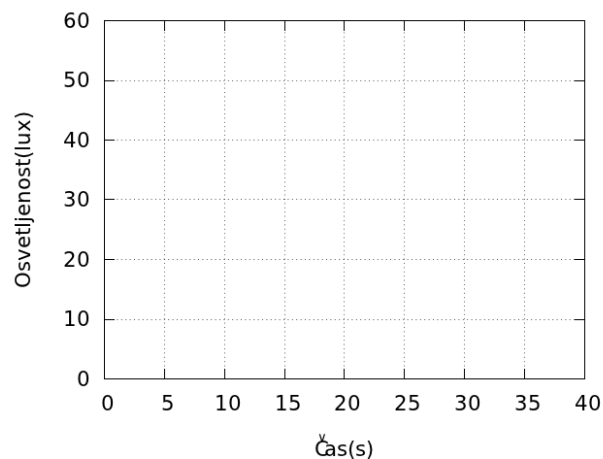
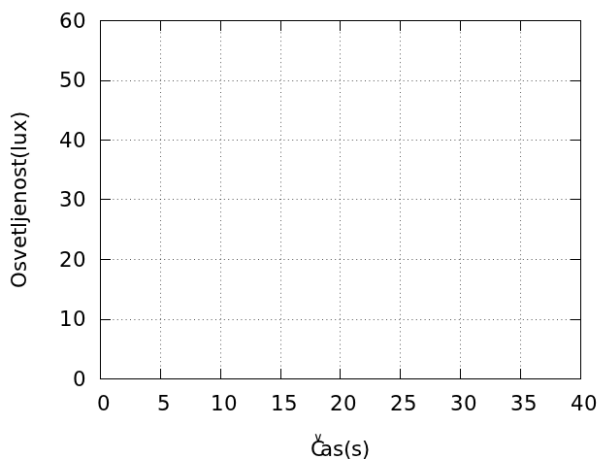
Število	Slika	Serijska št.	Opis kocke
3		300321	Kocka 2x2 - svetlo rdeča
9		300121	Kocka 2x4 - svetlo rdeča
11		370021	Kocka Technic 1x2, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
7		370121	Kocka Technic 1x4, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
2		389421	Kocka Technic 1x6, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
6		370221	Kocka Technic 1x8, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
2		389521	Kocka Technic 1x12, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
8		370321	Kocka Technic 1x16, $\Phi 4,9$ - svetlo rdeča
4		302323	Plošča 1x2 - svetlo modra
1		371023	Plošča 1x4 - svetlo modra
3		302023	Plošča 2x4 - svetlo modra
1		346023	Plošča 1x8 - svetlo modra
2		379523	Plošča 2x6 - svetlo modra
2		4210720	Plošča 6x14 - temno siva
3		3200123	Plošča 2x6 z luknjami - svetlo modra
1		373823	Plošča 2x8 z luknjami - svetlo modra
1		4506083	Motor 24x6M - črn, srednje siv, temno siv, oranžen
1		4506078	Škatla za baterije 4x11x7 - črn, srednje siv, temno siv
4		4107079	Dvojni kotni nosilec 3x7 45° - svetlo rumen
4		4211573	
6		4121715	Dvojni konektor - črn
1		4211815	Križna os 3M - srednje siva
8		4186017	Konektor luknja / križna os - opečnato rumen
8		4211622	
1		370526	Križna os 4M - črna
5		4211639	Križna os 5M - Svetlo siva
4		4211621	Dvojni križni blok - srednje siv
2		370726	Križna os 8M - črna
75		371126	člen verige M1 - črn
4		4211432	Zobnik T8, M1 - svetlo siv
1		4211434	Zobnik s krono Z24 - srednje siv
5		4211433	Zobnik 40T - svetlo siv
1		4624645	Vrtljiva plošča 4.85 - temno siva, črna
1		4278193	Osnovna Plošča 48x48 - svetlo siva

Tabela B.1: Potrebne Lego kocke za sestavo modela dveh vrtečih se teles.



7. V levi graf vrišite količino svetlobe v odvisnosti od časa, kot mislite, da jo dobimo, ko se okoli zvezde giba eksoplanet. V desni graf pa skicirajte graf, ki vam ga bo predavatelj prikazal na tabli.
8. Kaj lahko po vašem sklepamo iz desnega grafa (katere količine bi lahko iz tega grafa razbrali)?
-
-
9. Se vam zdi, da je bila izbrana metoda predstavljena dovolj nazorno? a) Da b) Ne
10. Imate še kakšen komentar na izbrano temo?
-

D

Vprašalnik za učitelje

Pozdravljeni!

Pred Vami so vprašanja na temo »Odkrivanje eksoplanetov«. Prosim Vas, da vprašanja pozorno preberete in odgovorite glede na svoje mnenje.

Vaše sodelovanje je anonimno, zato prosim, če odgovarjate iskreno.

Za sodelovanje se Vam vnaprej zahvaljujem!

Martin Čokl

1. Število let vaše pedagoške prakse: _____
2. Katere predmete poučujete: _____
3. Koliko ur pri posameznem predmetu namenite astronomskim vsebinam?

4. Menite, da bi predstavljeno temo lahko uporabili pri kateri od ur astronomije? _____
5. Kje bi to metodo lahko uporabili oziroma zakaj menite, da te metode ne morete uporabiti?

6. Kaj se vam zdi pri predstavljeni metodi odkrivanja eksoplanetov dobro?

7. Kje vidite pomanjkljivosti predstavljene teme?

8. Kakšna se Vam je zdela predstavitev?

9. Kje vidite minuse pri predstavitvi / anketnem vprašalniku za dijake?

10. Katero vprašanje se Vam zdi, da bi še lahko postavili dijakom / učiteljem?

11. Imate še kakšen komentar na izbrano temo?

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Spodaj podpisani Martin Čokl, sem avtor diplomskega dela z naslovom:

Astronomija z Lego kockami - od dvojnih zvezd do eksoplanetov

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal samostojno pod mentorstvom doc. dr. Andreje Gomboc,
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela.

V Ljubljani, dne 18. februar 2013

Podpis avtorja: