

Aktivnosti malih tijela Sunčevog sustava i suvremene metode određivanja njihovih fizikalnih karakteristika

Cikota, Stefan

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:334817>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Stefan Cikota

**Aktivnosti malih tijela Sunčevog sustava
i suvremene metode određivanja
njihovih fizikalnih karakteristika**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

Stefan Cikota

**Aktivnosti malih tijela Sunčevog sustava
i suvremene metode određivanja
njihovih fizikalnih karakteristika**

DOKTORSKI RAD

Mentori: izv. prof. dr. sc. Ana Babić, dr. sc. Jose Luis Ortiz Moreno

Zagreb, 2022.



University of Zagreb
FACULTY OF SCIENCE

Stefan Cikota

**Activities on small Solar System bodies
and modern methods of determining
their physical characteristics**

DOCTORAL THESIS

Supervisors: Ana Babić, PhD & Jose Luis Ortiz Moreno, PhD

Zagreb, 2022

Doktorski rad izrađen je na Sveučilištu u Zagrebu Fakultetu elektrotehnike i računarstva,
na Zavodu za primijenjenu fiziku.

Mentori: izv. prof. dr. sc. Ana Babić, dr. sc. Jose Luis Ortiz Moreno

Doktorski rad ima: 192 stranice

O mentoru

Izv. prof. dr. sc. Ana Babić (rođena 1975. godine) je svoj znanstveni rad započela na Zavodu za teorijsku fiziku Instituta Ruđer Bošković u Zagrebu. Pod vodstvom dr. sc. Branka Guberine izradila je magistarski rad koji je povezivao kozmologiju i teoriju polja, a istovremeno je radila i u području teorije elementarnih čestica. Nakon završetka magisterija upisuje doktorski studij iz astrofizike na University of Oxford. Pod vodstvom dr. sc. Lance Millera radi na kozmološkoj povijesti rasta supermasivnih crnih rupa. Poslijedoktorski studij nastavlja na SISSA u Trstu, Italija gdje, u suradnji s prof. dr. sc. Paolom Saluccijem, proučava povezanost mase haloa tamne materije i supermasivnih crnih rupa u središtima galaksija. 2011. godine se vraća se u Zagreb i pridružuje grupi koja radi u području visokoenergijske gama-astronomije na Čerenkovljevim teleskopima MAGIC i CTA. Glavno područje interesa su i dalje aktivne jezgre galaksija: razjašnjavanje mehanizama emisije gama zračenja vrlo visokih energija, te razumijevanje opažene varijabilnosti sjaja. Suautor je na preko 90 znanstvenih članaka.

Dr. sc. Jose Luis Ortiz Moreno (rođen 1967. godine) svoju znanstvenu karijeru započeo je 1990. godine na Kanarskom institutu za astrofiziku - IAC. Doktorirao je na Andaluzijskom institutu za astrofiziku - IAA na temi vertikalne strukture atmosfere divovskih planeta. Njegova istraživanja omogućila su mu prvu detekciju udara kometa Shoemaker-Levy 9 u Jupitera, opažanu sa zvjezdarnice Calar Alto, koja je bila globalno popraćena. Za svoj poslijedoktorski studij boravio je u NASA/Jet Propulsion Laboratoryju, gdje se usredotočio na istraživanje Jupitera u kontekstu svemirske misije Galileo. Njegova istraživanja bila su ključna za ispravnu interpretaciju rezultata dobivenih atmosferskom sandom misije Galileo. Vratio se na IAA 1997. godine gdje je danas znanstveni suradnik. Bavi se različitim područjima istraživanja fizike Sunčevog sustava. Publicirao je više od stotinu znanstvenih publikacija, uključujući nekoliko radova u prestižnim časopisima Nature and Science kao prvi i drugi autor. Vodi istraživačku grupu usredotočenu na fizička svojstva malih tijela Sunčevog sustava, transneptunskih objekata i drugih primitivnih tijela u Sunčevog sustava. Bio je direktor zvjezdarnice Sierra Nevada i zamjenik ravnatelja za tehnološke poslove na IAA, kao i voditelj Odjela za Sunčev sustav.

About the Supervisor

Associate professor Dr. Ana Babić (born in 1975) began her scientific career at the Theoretical Physics Department of the Ruder Bošković Institute in Zagreb. Under the guidance of Dr. Branko Guberina, she prepared her master's thesis that connected cosmology and the field theory. At the same time she worked in the field of elementary particle theory. After completing her master's degree, she enrolled in a PhD programme in astrophysics at the University of Oxford. Under supervision of Dr. Lance Miller, she was working on the cosmological history of the growth of supermassive black holes. She continued her postdoctoral studies at SISSA in Trieste, Italy, where, in collaboration with Prof. Dr. Paolo Salucci, she explored the correlation between the mass of halos of dark matter and supermassive black holes in the centres of galaxies. In 2011 she returned to Zagreb and joined a research group working in the field of high-energy gamma-ray astronomy on atmospheric Cherenkov telescopes MAGIC and CTA. Her current research interests are still related to active nuclei of galaxies: explanation of the mechanisms of emission of very high-energy gamma-radiation, and understanding the observed variability in brightness. She is co-author of over 90 scientific publications.

Dr. Jose Luis Ortiz Moreno (born 1967) started his scientific career at the Instituto de Astrofísica de Canarias in 1990. He obtained his doctoral thesis at the Instituto de Astrofísica de Andalucía on the vertical structure of the atmospheres of giant planets. This allowed him to lead the worldwide first detection of the impact of comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter, which was carried out from the Calar Alto Observatory, being a worldwide milestone. He did his postdoc at NASA/Jet Propulsion Laboratory, where he focused on researching Jupiter within the context of the Galileo space mission. His research was essential for the correct interpretation of the results obtained by the atmospheric probe of the Galileo mission. In 1997 he returned to the IAA. Today he is a staff research scientist at IAA, working in different areas of physics of the Solar System. He has published more than a hundred scientific publications, including several in the prestigious journals *Nature* and *Science* as first and second author. He is leading a research group focusing on the physical properties of small Solar System bodies, Trans-Neptunian Objects, and other primitive bodies of the Solar System. He has been director of the Sierra Nevada Observatory and deputy director of technological affairs at the IAA, as well as head of the Solar System department.

Sažetak

U Sunčevom sustavu, osim Sunca i planeta, do danas je otkriveno gotovo milijun malih tijela Sunčevog sustava. Zbog njihovih malih dimenzija, oni spadaju u objekte čije istraživanje često zahtijeva teleskope velikih promjera ili primjenu suvremenih opažačkih metoda. Jedna od suvremenih opažačkih metoda određivanja fizikalnih karakteristika malih tijela Sunčevog sustava, koja dozvoljava razlučivosti veće od bilo koje druge zemaljske metode, jest metoda zvjezdanih okultacija.

Mala tijela po sastavu i orbitalnim parametrima možemo klasificirati u asteroide i komete. Međutim, među asteroidima se pojavljuje malobrojna skupina objekata koji pokazuju aktivnosti slične kometskim.

U doktorskom radu istražena je mikroaktivnost malog tijela 95P/(2060) Chiron. Zbog nedavne indikacije da bi Chiron mogao posjedovati prstenove, njegov mehanizam gubitka mase može biti objašnjen udarima krhotina iz Chironove orbite koje padaju na njegovu površinu. Opažanja su prikupljana na Španjolskoj zvjezdarnici Calar Alto, a za analizu su uglavnom korištene fotometrijske metode. Određivanjem Chironove rotacijske krivulje sjaja i njegove apsolutne zvjezdane veličine, potvrđena je pretpostavka da Chiron posjeduje prstenove.

Kao primjer primjene metode zvjezdanih okultacija u svrhu istraživanja fizičkih karakteristika malih tijela Sunčevog sustava, opisano je određivanje veličine, oblika, albeda i gustoće patuljastog planeta Haumea, gornje granice Haumeine atmosfere, te otkriće i karakterizacija prstenova oko glavnog tijela Haumea.

U svrhu poboljšanja vremenske razlučivosti opažanja zvjezdanih okultacija s malim tijelima, istražena je i opisana mogućnost primjene atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa MAGIC. Njihovi veliki promjeri i osjetljivi fotomultiplikatorski detektori s visokim frekvencijama uzorkovanja, osim za unapređenje razlučivosti u određivanju fizičkih karakteristika malih tijela Sunčevog sustava, mogu biti korišteni za izravna mjerenja promjera zvijezda.

U doktorskom radu opisana je metoda određivanja zvjezdanih promjera pomoću detekcije Fresnelovih difrakcijskih uzoraka, koji se mogu opaziti tijekom zvjezdanih okultacija. Detaljno je modeliran signal kakav bi bio opažen teleskopima MAGIC, uzevši u obzir karakteristike teleskopa i osjetljivost detektora. Kroz opažačke prijedloge ostvareno je teleskopsko vrijeme za opažanje zvjezdanih okultacija s MAGIC teleskopima.

Ključne riječi: kometi; općenito; mala tijela Sunčevog sustava, asteroidi; pojedino: (2060) Chiron, patuljasti planet (136108) Haumea, aktivnosti; planeti i prirodni sateliti: prstenovi; metode: opažačke; zvjezdana astrofizika; instrumentacija i metode u astrofizici

Extended abstract

Besides the Sun and the planets, our Solar System contains nearly 1 million discovered small Solar System bodies. Due to their small size, they belong to objects whose research often requires large-sized telescopes or the application of modern observation methods. One of today's modern observational methods used for determining the physical characteristics of the small Solar System bodies, allowing several orders of magnitude better resolutions than any other Earth-based method, is the stellar occultations method.

By composition and orbital parameters, small Solar System bodies can be classified into asteroids and comets. Nevertheless, there is a group of asteroid-like objects that show comet-like activities.

This doctoral thesis consists of 3 parts. In part one, the observed micro activity of the small Solar System body 95P/(2060) Chiron was investigated. In part two, as an extensive example of the application of the stellar occultation method to investigate the physical characteristics of small Solar System bodies, the determination of the dwarf planet's Haumea size, shape, albedo, and density was described. In part three, in order to improve the temporal resolution of observations of stellar occultations with small bodies, the potential of using the atmospheric Cherenkov telescopes MAGIC for observing stellar occultations was investigated.

Activity of 95P/(2060) Chiron

The minor planet 95P/(2060) Chiron belongs to the asteroid group of centaurs, which according to dynamic parameters belongs to asteroids. Chiron has an orbit far away from the Sun, in which sublimation of water ice is not considered as a possible cause for triggering mass loss mechanisms. The expected rate of collisions among small bodies in the region of centaurs is not expected to be high. Regardless of that, since its discovery, Chiron has repeatedly shown indications of cometary activity (Kowal et al. 1979; Tholen et al. 1988; Meech Belton 1990).

In 2015, Ortiz et al. (2015) found indications that (2060) Chiron possesses rings. Motivated by these findings, additional observations and interpretations of the cause of its activity were made and described in this doctoral thesis (and published in Cikota et al., 2018).

Observations were carried out in three different observation campaigns between 2014 and 2016, using three different instruments located at the Calar Alto Observatory (CAHA) in Almeria, Spain - 3.5 m MOSCA, 1.23 m DLR-MKIII and 2.2 m CAFOS.

From the collected observations, amplitudes of Chiron's rotational light curves and measurements of Chiron's absolute magnitudes were determined. The measured amplitudes are consistent with the model proposed by Ortiz et al. (2015) which is taking into account both, Chiron's triangular ellipsoid-like shape and the light contribution of rings around Chiron.

Although the frequency of collisions among small bodies in the centaur region is very low,

due to the recent indication that Chiron possesses rings, and assuming that there is debris orbiting around Chiron, it is well possible that some of this debris may be continually falling and impacting on its surface, producing outbursts and forming a bound or quasi-bound coma. Consequently, a dust release mechanism triggered by impacts should not be excluded as a possible cause for its activity. To study this hypothesis, the scatter in Chiron's photometric data was compared to the scatter of comparison stars of similar brightnesses as Chiron. The scatter of Chiron's photometric measurements for the observations carried out on July 23 and 24, 2014, with the DLR-MKIII 1.23 m CAHA telescope was found to be 0.027 mag, while the comparison star's scatter is 0.014 mag. During the photometric campaign in 2015, containing data collected with CAFOS 2.2 m CAHA telescope on September 11 and September 13, the scatter of Chiron's photometric measurements was determined to be 0.029 mag, while the comparison star's scatter values were 0.018 mag. The noticeable difference between the comparison star's and Chiron's photometric scatter supports our hypothesis of continuous micro activity on Chiron. That mechanism could also be a plausible explanation for impulsive brightenings on a timescale of hours that have been observed by Luu Jewitt (1990). We hypothesize that some activity outbursts on regular comets could also be triggered by collisions, either with debris orbiting them or with meteoroids.

Additionally, the data collected with the CAFOS 2.2 m CAHA telescope over 3 nights between September 11 and September 14, 2015, was used to search for comet-like activity signs like coma or tail. The data was combined to a false-color image of Chiron that contains 95 integrations of 300 s each, resulting in a total integration time of 28500 s (475 min). The combined image of Chiron shows that the coma itself is not detectable, but a very faint asymmetric shape with a measured position angle of $\sim 87^\circ$ was observed. The feature can be explained by a ~ 5 arcsec long comet-like tail, of a determined surface brightness of 25.3 mag(R)/arcsec².

Determination of the dwarf planet Haumea's physical characteristics

Five dwarf planets are currently known in our Solar system. (1) Ceres is the closest dwarf planet to us, and the only dwarf planet orbiting in the inner part of the Solar system, within the main belt of asteroids. Four dwarf planets - (134340) Pluto, (136199) Eris, (136108) Haumea, and (136472) Makemake, are members of the Kuiper belt, located in the outer part of the Solar system beyond Neptune's orbit.

Due to the large distances of dwarf planets in the outer Solar system, indirect observation methods are necessary to accurately determine their physical characteristics.

Among trans-Neptunian objects, the dwarf planet Haumea stands out in its elongated shape and extremely short rotation period (Brown et al. 2005; Rabinowitz et al. 2006; Brown et al. 2007). Unlike other dwarf planets (Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Stern et al.

2015), Haumea's physical characteristics were not precisely determined. In this doctoral thesis, the determination of Haumea's size, shape, albedo, and density was described, as well as the discovery and characterization of its rings (published in Ortiz et al. 2017).

On January 21, 2017, a stellar occultation of the dwarf planet Haumea was observed. The occulted star URAT1 533-182543 with its apparent brightness of $m_R = 17.6$ mag made it observable already for small- and mid-sized telescopes. Therefore, the occultation event was observed from many locations and resulted in 12 positive detections from 10 different sites across Europe.

From the collected sequences of CCD images, photometric measurements of the synthetic aperture were performed. In the case of data collected from the Črni Vrh Observatory by the drift method, a special procedure of photometric analysis was applied to the stellar trail.

By fitting a square well model to the collected photometric measurements, the times of the star's disappearance and reappearance were determined, and occultation chords were generated for each observation location.

To the chords in the projected plane, an elliptical limb was fitted by minimizing a χ^2 function. By that, the apparent edge of the shape of the ellipse, which represents the outline of Haumea's shadow, was determined. The determined parameters of the major and minor axis of the ellipse are $1\,704 \pm 4$ km and $1\,138 \pm 26$ km respectively. The position angle of the minor axis is $-76.3^\circ \pm 1.2^\circ$.

A search for an atmosphere was performed and the upper value of Haumea's atmospheric pressure was determined by using the best available data set collected by the Asiago Observatory. From Haumea's mass, and assuming that the body is in hydrostatic equilibrium, an average surface gravity of 0.39 ms^{-2} was determined. By comparing a modeled occultation light curve with the observed light curve, the upper value of Haumea's pure isothermal global atmosphere of N_2 in thermal equilibrium can be determined. Assuming a surface temperature of 40 K, we find a 1σ upper limit for $p_{\text{surface}}(N_2) = 3$ nbar, and a 3σ upper limit for $p_{\text{surface}}(N_2) = 15$ nbar.

In addition to the main occultation, there are brief dimmings prior to and after the main event. These dips are consistently explained by a narrow and dense ring around Haumea that absorbed about 50 % of the incoming stellar flux. A distinct cross-sectional profile of the rings collected in an observation with the 1 m telescope of the Konkoly Observatory reveals a radial ring width of $W_{\text{ring}} \approx 74$ km at the occultation ingress and $W_{\text{ring}} \approx 44$ km at the occultation egress, with corresponding apparent transparency of $p' = 0.55$ and $p' = 0.56$. The locations of twelve detected secondary events, projected in the sky plane, allow the retrieval of the full ring orbit, assuming an apparent elliptical shape, and using the same approach as used for fitting Haumea's limb.

The parameters of the elliptical fit to the rings are $a'_{\text{ring}} = 2287^{+75}_{-45}$ km for the apparent semimajor axis, and $b'_{\text{ring}} = 541 \pm 23$ km for a semiminor axis. The position angle of the minor

axis is $P_{\text{ring}} = -74.3^\circ \pm 1.3^\circ$. Assuming the rings are circular, it implies a radius of the ring of $r_{\text{ring}} = 2287^{+75}_{-45}$ km and an inclination angle of $B_{\text{ring}} = 13.8^\circ \pm 0.5^\circ$. The circular ring assumption is supported by the fact that the center of the ring ellipse coincides with the order of uncertainty with the center of the limb of Haumea's main body. The position angle of the ring minor axis $P_{\text{ring}} = -74.3^\circ \pm 1.3^\circ$ coincides with that of the limb minor axis $P_{\text{limb}} = -76.3^\circ \pm 1.2^\circ$, which is another strong argument that we are observing a ring that settled into Haumea's equatorial plane. Furthermore, it was found that the radius of the rings coincides with the area where 3:1 spin-orbit resonances are expected.

From the determined parameters of Haumea's limb, a three-dimensional shape and density of Haumea were determined. The obtained parameters of the triaxial ellipsoid $a \times b \times c$ are $(1\,161 \pm 30) \text{ km} \times (852 \pm 2) \text{ km} \times (513 \pm 16) \text{ km}$. The mean value of the Haumea density, determined through the parameters of the triangular ellipsoid, and the mass determined by the orbital period of the Hi'iake satellite, is $1\,885 \pm 80 \text{ kg m}^{-3}$. The geometric albedo of Haumea determined by our observations is 0.51, which is significantly smaller than the value of 0.804, as available in the most recent literature (Fornasier et al. 2013).

Application of the atmospheric Cherenkov telescopes MAGIC for observing stellar occultations

In order to accurately determine the physical characteristics of small bodies by using the occultation method, a high temporal resolution of the detector is required. In order to improve the observational methods of stellar occultations, the use of the MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) telescopes was considered.

With its sensitive central pixel, the MAGIC-II telescope has shown to be an excellent instrument for detecting millisecond flashes in the visible spectra.

Compared to any other optical telescope used for observing stellar occultations, its central pixel with a temporal resolution of 10 kHz, combined with a large 17 m aperture, the MAGIC-II telescope enables reaching two orders higher resolutions. However, some of its limiting characteristics are the inability to control the sampling frequency, sensitivity only in the visible spectrum between 300 and 400 nm, and a low angular resolution (due to physically large pixels) responsible for a limitation in the apparent brightness of $m = 13.5 \pm 0.6 \text{ mag}$.

In addition to determining the physical characteristics of small bodies, using the stellar occultation method enables us to determine the angular sizes of the occulted stars. Since stars are not point sources (they have a finite angular diameter), during the occultation of a stellar disk, its light curve does not show a sharp brightness drop but describes a Fresnel interference pattern whose details depend on the angular diameter of the occulted star. High sampling rates make it possible to record these interference patterns. Therefore, the high temporal resolution

of the detector is the key for direct measurements of stellar radii.

In this doctoral thesis, the method of determining stellar radii by observing Fresnel diffraction patterns that can be detected during stellar occultations is described. Models of the expected signal were performed, taking into account the characteristics of the MAGIC telescopes and the sensitivity of its detectors. Through observational proposals, telescope time was granted and first observations of stellar occultations with the MAGIC telescopes were acquired.

Additionally, the effects of limb darkening of stellar disks were investigated. It was found that diffraction patterns formed by occultations of large disks with angular diameters of 0.7 mas and high limb darkening factors of $u = 1.0$ deviate in intensity up to approximately 5 % from diffraction patterns of homogeneously illuminated stellar disks ($u = 0.0$). For stellar disks of smaller diameters or smaller limb darkening factors, the intensity deviations are smaller.

These deviations in the intensity of diffraction patterns are reflected in the determination of the angular diameters of stellar disks. It was found that the angular radius of a homogeneously illuminated stellar disk, compared to a disk with a limb darkening factor of $u = 1.0$ taken into account, deviates by approximately 12.4 %. Taking the limb darkening factors into account contributes to the accuracy of measurements of the angular diameters of stellar disks, but to achieve this accuracy, photometric measurements with uncertainties below 5 % are required.

Historically, almost all measurements of the stellar radii smaller than ~ 1 arc millisecond have been performed by interferometric measurements. Measurements of stellar radii by observing occultations with asteroids allow reaching angular resolutions up to 0.1 milliarcseconds, which is at least a factor of two larger than the one available through interferometric measurements, and a factor of 10 larger than what can be achieved by observing lunar occultations. Therefore, the asteroid occultation method is extremely useful for measuring the angular diameters of stars below 1 milliarcsecond.

In the period from December 2017 to February 2020, a total of 6 occultation observations with the MAGIC-II telescope were scheduled. Four observations were not successfully acquired due to bad weather or technical reasons. Two occultation events, those by the small bodies (83) Beatrix and (28) Bellona, were successfully acquired but resulted in a negative detection. Although the occultation events of (83) Beatrix and (28) Bellona occurred over sufficiently bright sources, and their probability of observation was estimated at 99 %, the negative detections can be explained by a too small brightness drops, ~ 1.5 mag for the (83) Beatrix event (2.5σ), and ~ 0.9 mag for the (28) Bellona event (1.5σ). Based on the analysis presented in this thesis, we expect that any event with a brightness drop larger than 1.8-3.0 mag (3 - 5σ above background noise) should be detected. Therefore, the observation campaign of occultations on MAGIC telescopes will be continued in the future.

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Uvod u mala tijela Sunčevog sustava	1
1.1.1. Sunčev sustav danas	2
1.2. Nastanak asteroida i asteroidne obitelji	4
1.2.1. Asteroidne obitelji	4
1.2.2. Spektralne karakteristike	7
1.3. Aktivnosti malih tijela Sunčevog sustava	7
1.4. Mehanizmi gubitka mase	9
1.4.1. Sublimacija vodenog leda	10
1.4.2. Udarne izbačaji	13
1.4.3. Rotacijska nestabilnost	17
1.4.4. Elektrostatske sile	19
1.4.5. Toplinsko lomljenje	21
1.4.6. Toplinska dehidracija	22
1.4.7. Udarne dehidracija	22
1.4.8. Tlak zračenja	23
1.4.9. Seizmičko podrhtavanje	24
2. Metode opažanja malih tijela Sunčevog sustava	25
2.1. Astrometrija	26
2.1.1. Zvezdani katalozi	27
2.1.2. Astrometrijska mjerenja	28
2.2. Fotometrija	30
2.2.1. CCD fotometrija	30
2.2.2. Relativna fotometrija	31
2.2.3. Prividni sjaj	32
2.2.4. Apsolutna fotometrija	33
2.2.5. Poredbena fotometrija	35
2.2.6. Fotometrijska mjerenja CCD detektorom	36

2.3.	Metoda zvjezdanih okultacija	38
2.3.1.	Učestalost okultacijskih događaja	40
2.3.2.	Predviđanja okultacija	43
2.3.3.	Opažanje zvjezdanih okultacija	45
2.3.4.	Određivanje obrisa malog tijela	50
3.	Aktivnost kentaura 95P/(2060) Chiron	53
3.1.	Uvod	53
3.2.	Kentaur 95P/(2060) Chiron	54
3.3.	Prikupljanje i analiza podataka	56
3.4.	Rezultati i diskusija	59
3.4.1.	Chironova rotacijska krivulja sjaja	59
3.4.2.	Chironov apsolutni sjaj	62
3.4.3.	Raspršenje fotometrijskih mjerenja i Chironova mikroaktivnost	63
3.4.4.	Detekcija Chironovog repa	68
3.5.	Zaključak	71
4.	Fizikalne karakteristike patuljastog planeta Haumea i otkriće njegovih prstenova	73
4.1.	Uvod	73
4.2.	Predviđanje zvjezdane okultacije i detekcija prirodnog satelita Hi'iaka	74
4.3.	Opažanje zvjezdane okultacije i analiza podataka	77
4.4.	Prilagodba obrisa Haumea na okultacijske tetive	83
4.5.	Mogućnost postojanja atmosfere i određivanje gornje vrijednosti atmosferskog tlaka	86
4.6.	Prilagodba prstenova na sekundarne okultacijske tetive	88
4.7.	Fotometrijska svojstva prstenova	91
4.8.	Geometrijski albedo Haumea	97
4.9.	Trodimenzijski oblik i gustoća Haumea	98
4.10.	Zaključak	101
5.	Unapređenje opažачkih metoda zvjezdanih okultacija korištenjem Čerenkovljevih teleskopa MAGIC	103
5.1.	Uvod	103
5.2.	Tehničke karakteristike atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa MAGIC	105
5.3.	Središnji piksel teleskopa MAGIC II	108
5.3.1.	Vremensko razlučivanje središnjeg piksela iz periodičnih optičkih pulsa pulsara u maglici Rakovici	108

5.3.2.	Vremensko razlučivanje središnjeg piksela na izoliranim optičkim pulsima tijekom pomicanja teleskopa	110
5.3.3.	Primjena središnjeg piksela za opažanje zvjezdanih okultacija	110
5.4.	Mjerenje zvjezdanih promjera uz pomoć zvjezdanih okultacija	111
5.4.1.	Modeliranje difrakcijskih uzoraka koji nastaju tijekom zvjezdanih okultacija asteroidima	113
5.5.	Utjecaj rubnog zatamnjenja na određivanje kutnih promjera zvijezda	126
5.5.1.	Priprema 1-D konvolucijskog kernela zvjezdanih diskova s učinkom rubnog zatamnjenja	129
5.5.2.	Učinak rubnog zatamnjenja zvjezdanih diskova na izgled difrakcijskih uzoraka	131
5.5.3.	Ovisnost faktora rubnog zatamnjenja o efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji zvijezde	135
5.6.	Opazanja zvjezdanih okultacija s teleskopima MAGIC	136
5.6.1.	Prednosti teleskopa MAGIC	136
5.6.2.	Procjena učestalosti okultacijskih događaja za teleskope MAGIC i opažački prijedlozi za opažačke cikluse C14, C15 i C16	138
5.6.3.	Fokusiranje teleskopa MAGIC-II i prikupljena opažanja	140
5.7.	Zaključak	153
Literatura		157
Životopis		169
Biography		192

Poglavlje 1

Uvod

Poglavlje 1 daje kratki uvod u područje malih tijela Sunčevog sustava. Ono obuhvaća teorijsku podlogu i uvodi glavne pojmove i terminologiju nužnu za razumijevanje ostalih poglavlja ove doktorske disertacije.

1.1 Uvod u mala tijela Sunčevog sustava

Sve do kraja 18. stoljeća, u Sunčevom sustavu bili su poznati samo Sunce i osam planeta (Merkur, Venera, Zemlja, Mars, Jupiter, Saturn, Uran i Neptun). Ručnim katalogiziranjem nebeskog svoda, 1801. godine Guiseppe Piazzi otkrio je (1) Ceres, prvo malo tijelo Sunčevog sustava (npr. McCall et al. 2006).

Sistematskim vizualnim pretragama neba za tijelima koja se gibaju u odnosu na zvjezdanu pozadinu, a kasnije i unapređenjem metode otkrivanja uvođenjem fotografske metode, stopa otkrića znatno je povećana. Znanstvena zajednica ubrzo je shvatila da malih tijela ima daleko više nego što se prije mislilo, a broj otkrivenih tijela do kraja 20. stoljeća porastao je na nekoliko tisuća.

Današnje metode otkrivanja malih tijela metodološki se ne razlikuju od metoda s kojima su otkriveni prvi asteroidi. Za razliku od planeta, malim tijelima zbog njihovih dimenzija sa Zemlje nije moguće razlučiti disk. Stoga se ovi zvjezdoliki objekti mogu jedino otkrivati na osnovu njihovog prividnog gibanja u odnosu na zvjezdanu pozadinu.

Početkom 21. stoljeća, razvojem CCD tehnologije, fotografske ploče i filmove zamijenile su moderne niskošumne kamere s hlađenim CCD detektorima. U Sunčevom sustavu, uz Sunce i 8 planeta, trenutačno (listopad 2020. godine) poznajemo gotovo milijun do sada otkrivenih malih tijela Sunčevog sustava.

1.1.1 Sunčev sustav danas

Prema danas važećoj službenoj definiciji International Astronomical Union (IAU), planeti su nebeska tijela koja (a) se nalaze u orbiti oko Sunca, (b) dovoljno su masivni da ih njihova vlastita gravitacija drži u hidrostatskoj ravnoteži, u približno sfernom obliku, (c) svojim gravitacijskim utjecajem udaljili su objekte iz sebi bliskih orbita (rezolucije 5 i 6, IAU, 2006). Posljedično novoj definiciji pojma „planet“, 76 godina nakon njegovog otkrića, Plutonu je oduzet status planeta i u katalogu malih tijela Centra za mala tijela Sunčevog sustava (eng. Minor Planet Center, MPC) numeriran je pod rednim brojem 134340.

Dodatno, na skupštini je uveden novi pojam „patuljastog planeta“. Prema istom izvoru, patuljasti planeti su nebeska tijela koja (a) se nalaze u orbiti oko Sunca, (b) dovoljno su masivna da ih njihova vlastita gravitacija drži u hidrostatskoj ravnoteži, u približno sfernom obliku, (c) svojim gravitacijskim utjecajem nisu udaljili objekte iz sebi bliskih orbita, i (d) nisu sateliti.

Sva druga tijela koja se kreću oko Sunca, osim satelita, nazivaju se „malim tijelima Sunčevog sustava“.

Prema službenoj definiciji IAU, danas ne razlikujemo mikrometeoroide, meteoroide, asteroide i komete. Ipak, česta je klasifikacija malih tijela Sunčevog sustava po dimenzijama. Iako granice nisu oštro definirane, meteoroidima nazivamo objekte u međuplanetarnom prostoru promjera između $10\ \mu\text{m}$ do 1 m. Podskupinu meteoroida promjera između $10\ \mu\text{m}$ i 2 mm nazivamo mikrometeoroidima (Rubin & Grossman 2010). Objekte promjera većih od 1 m nazivamo asteroidima. Razlika između asteroida i kometa bit će diskutirana u poglavljima u nastavku.

Od poznatih gotovo milijun otkrivenih malih tijela, do sada je numerirano njih 550 000, što znači da su parametri njihovih orbita precizno određeni (tablica 1.1). 96 % svih do sada otkrivenih malih tijela nalazi se u Glavnom asteroidnom pojasu, u orbitama s velikim poluosima između Marsa i Jupitera. Približno 4000 do sada otkrivenih malih tijela nalazi se u vanjskom dijelu Sunčevog sustava. Među njih se ubrajaju svi objekti s poluosima većim od 6 astronomskih jedinica, a uključuju i objekte iza Neptunove orbite, tzv. objekte Kuiperovog pojasa. U Kuiperovom pojasu procjenjuje se da postoji približno 70 000 tijela promjera većih od 100 km. Razlog zašto ih je poznato samo njih približno 4000 jest što se zbog njihovih velikih udaljenosti od Sunca nalaze na granici detekcije današnjih instrumenata. Sunčev sustav trenutačno broji pet patuljastih planeta. Samo se jedan od njih, (1) Ceres, nalazi u unutrašnjem dijelu Sunčevog sustava, s orbitom u Glavnom asteroidnom pojasu. Ostala četiri patuljasta planeta - (134340) Pluton, (136199) Eris, (136108) Haumea i (136472) Makemake, članovi su Kuiperovog pojasa.

Cijeli Sunčev sustav okružen je oblakom materijala preostalog iz nastanka Sunčevog sustava, tzv. Oortovim oblakom (Oort 1950), na kojega je kasnih 1950. godina ukazao nizozemski astronom Jan Hendrik Oort. Danas znamo da se Oortov oblak proteže na udaljenostima od približno 300 do 200 000 astronomskih jedinica, odnosno oko 3,2 svjetlosnih godina (Morbidelli 2005).

Tablica 1.1: Brojke opažanja i otkrića malih tijela Sunčevog sustava. Svi statistički podaci su iz MPC, za 21. listopada 2020. godine.

Ukupna statistika	
Broj ukupnih opažanja	277762135
Ukupan broj otkrivenih malih tijela	998031
Broj numeriranih malih tijela	546846
Broj nenumeriranih malih tijela	447114
Broj kometa	4071
Raspodjela po skupinama	
Atira	45
Aten	1811
Apollo	12145
Amor	10116
Hungaria	24288
Marsu bliski objekti	16625
Asteroidi glavnog asteroidnog pojasa	940018
Hilde	4541
Jupiterovi Trojanaci	8972
Udaljeni objekti	4001
Patuljasti planeti	5
Zemlji bliski objekti	
Ukupan broj Zemlji bliskih objekata	24119
Zemlji bliski objekti > 1 km	905
Potencijalno opasni asteroidi	2158
Zemlji bliski kometi	110

1.2 Nastanak asteroida i asteroidne obitelji

Tijekom nastanka Sunčevog sustava, smatra se da su se planetezimali (prvi kruti objekti u planetarnim diskovima kojima dominira samo-gravitacija, promjera većih od 1 km, u Sunčevom sustavu nastali prije 4,6 milijardi godina) u asteroidnom pojasu razvijali slično kao i ostatak akrecijskog diska, sve do trenutka dok Jupiter prikupljanjem materijala nije povećao masu do približno svoje trenutne mase. Tada je, uslijed orbitalnih rezonancija s Jupiterom, izbačeno preko 99 % svih planetezimala iz asteroidnog pojasa. Simulacije akrecije materijala, opažani diskontinuitet u rotacijskim brzinama, te spektralna svojstva, ukazuju da su svi asteroidi promjera većih od oko 120 km nastali akrecijom tijekom najranijeg razdoblja nastanka Sunčevog sustava, dok su sva manja tijela zapravo fragmenti sudara među asteroidima uzrokovani Jupiterovim perturbacijama (Bottke et al. 2005). Prikupljajući masu, najveći objekti za koje danas znamo da imaju unutrašnju strukturu poput Ceresa i Veste, za vrijeme nastanka Sunčevog sustava bili su rastaljeni i dolazilo je do diferencijacije materijala, kada teški metalni elementi tonu prema jezgri, ostavljajući stjenovite minerale u kori.

1.2.1 Asteroidne obitelji

Asteroide možemo kategorizirati prema dva kriterija: po dinamičkim parametrima njihovih orbita, i po značajkama njihove spektralne refleksije.

Asteroidna obitelj je populacija asteroida koji imaju slične orbitalne parametre, poput velike poluosi, ekscentričnost i inklinaciju. Oko 33–35 % svih poznatih asteroida u glavnom asteroidnom pojasu pripada nekoj od dinamičkih obitelji. Za članove dinamičkih obitelji smatra se da potječu iz zajedničkog matičnog tijela koje je fragmentirano u sudarima među asteroidima. Do sada je otkriveno preko 120 asteroidnih obitelji, od kojih su najbrojnije obitelji Eos, Eunomia, Flora, Hungaria, Hygiea, Koronis, Nysa, Themis i Vesta. Asteroidnim obiteljima se obično daju nazivi po prvom otkrivenom članu, a koji je često i najveći član obitelji.

Velike istaknute asteroidne obitelji sadrže po nekoliko stotina članova, i vjerojatno mnogo više manjih objekata koji još nisu otkriveni ili povezani s matičnim tijelom. Male, kompaktne obitelji mogu imati samo desetak identificiranih članova.

Većina do sada prepoznatih asteroidnih obitelji nalazi se u glavnom asteroidnom pojasu, iako je nekoliko obiteljskih skupina poput obitelji Pallas, obitelji Hungaria i obitelji Phocaea smješteno je na velikoj poluosi i inklinaciji izvan definiranih granica glavnog asteroidnog pojasa. Do sada je identificirana i jedna obitelj povezana s patuljastim planetom Haumea (Brown et al. 2007), a postoje i naznake za postojanjem kolizijskih obitelji unutar Jupiterovih trojanaca (Roig et al. 2008).

Kako je već spomenuto, smatra se da asteroidne obitelji nastaju kao rezultat sudara asteroida. U većini slučajeva matično tijelo se u potpunosti raspadne, no postoje i primjeri nekoliko obitelji

koje proizlaze iz udara koji su kreirali samo velike kratere, te nisu raskomadali matično tijelo (npr. obitelji Vesta, Pallas, Hygiea i Massalia). Takve obitelji obično se sastoje od jednog velikog tijela i skupine asteroida koji su mnogo manjih promjera. Kod nekih obitelji (npr. obitelj Flora), prepoznatljive su složene unutrašnje strukture orbitalnih parametara njihovih članova, s loše definiranim granicama obitelji. Nastanak takvih struktura trenutačno još nije objašnjen, i smatra se da su posljedica nekoliko sudara u istoj regiji u različitim razdobljima (Nesvorný et al. 2015).

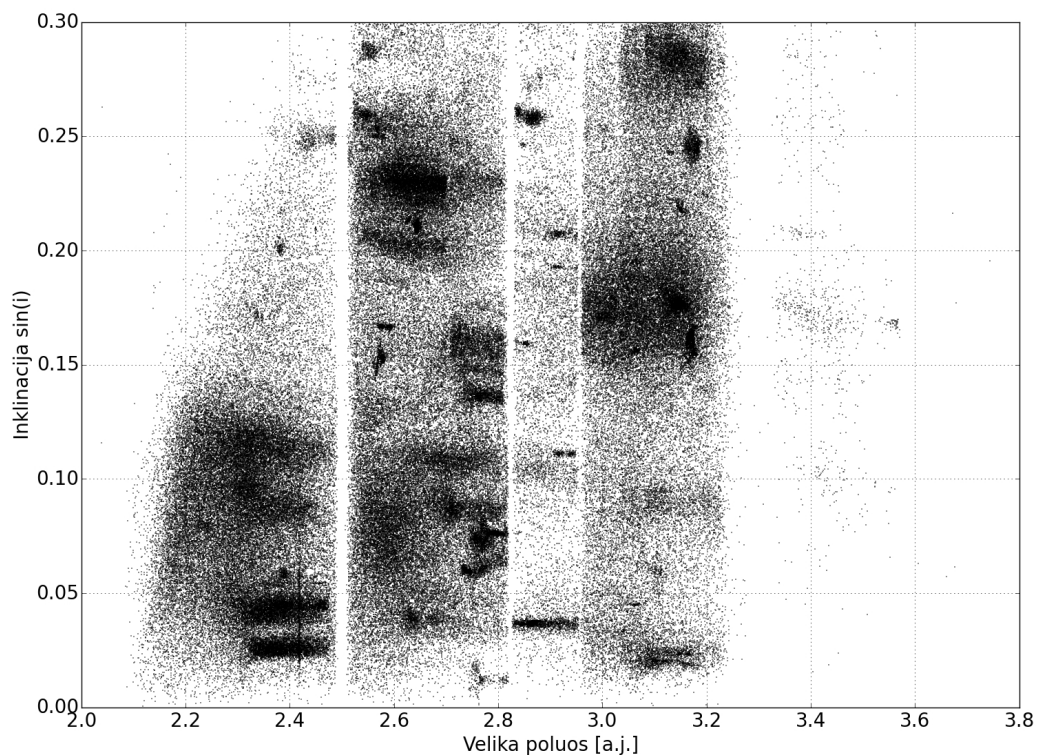
Zbog nastanka usitnjavanjem matičnih tijela posljedicom sudara, većina članova pojedinih asteroidnih obitelji međusobno su sličnog sastava. Ipak, postoje iznimke poput obitelji Vesta, koja je nastala udarom u veliko diferencirano matičnog tijelo (Zappalà et al. 1995).

Asteroidne obitelji imaju životni vijek reda veličine 10^9 godina, što je značajno kraće od starosti Sunčevog sustava. Stoga je vrlo malo obitelji, ako uopće, opstalo iz ranog razdoblja Sunčevog sustava. Propadanje obitelji događa se zbog raspršivanja orbita uslijed Jupiterovih perturbacija, ili perturbacija drugih velikih tijela, kao i zbog učestalih sudara među asteroidima kojima se velika tijela usitnjavaju na manja. Manji asteroidi znatno su osjetljiviji na utjecaj Yarkovsky efekta (Bottke et al. 2006), zbog kojega im se mijenjaju parametri orbite u ovisnosti o vremenu, odguravajući ih prema orbitalnim rezonancijama s Jupiterom. Objekti koji uđu u rezonantne orbite s Jupiterom relativno brzo bivaju izbačeni iz asteroidnog pojasa, stvarajući tzv. Kirkwoodove pukotine u glavnom asteroidnom pojasu (Kirkwood 1884).

Pretpostavlja se da su mnoge starije obitelji na taj način izgubile sve svoje male i srednje članove, ostavljajući netaknute samo najmasivnije članove obitelji. Primjer ostataka jedne takve stare obitelji su asteroidi 9 Metis i 113 Amalthea (Williams 1992). Daljnji dokazi za veliki broj izgubljenih obitelji dolaze iz analize kemijskih omjera u željeznim meteoritima. Oni ukazuju na činjenicu da je u ranoj fazi Sunčevog sustava postojalo između 50 i 100 matičnih tijela dovoljno masivnih da bi došlo do diferencijacije materijala, čijeg su porijekla željezni meteoriti (Kelley & Gaffey 2000).

Slika 1.1 prikazuje parametre orbita 240 000 numeriranih asteroida u glavnom asteroidnom pojasu. Slika je generirana pomoću vremenski neovisnih orbitalnih parametara dostupnih u bazi podataka AstDyS (Asteroids Dynamic Site), određenih analitičkom metodom opisanom u Knežević & Milani (2000). Na slici su jasno prepoznatljive asteroidne obitelji kao skupine točaka sličnih orbitalnih elemenata. Nadalje, jasno su prepoznatljive Kirkwoodove pukotine, koje se nalaze u područjima orbitalnih rezonancija asteroida s Jupiterom.

Drugi način podjele asteroida prema orbitalnim parametrima je u asteroidne skupine. U tom slučaju, asteroidi u skupini imaju slične orbitalne parametre, ali ne moraju biti povezani porijeklom, za razliku od asteroidnih obitelji.



Slika 1.1: Slika prikazuje parametre orbita 240 000 numeriranih asteroida u glavnom asteroidnom pojasu. Na x -osi prikazan je orbitalni parametar velike poluosi. Na y -osi prikazan je sinus orbitalne inklinacije. Graf je generiran pomoću vremenski neovisnih orbitalnih parametara dostupnih u orbitalnoj bazi podataka AstDyS. Na slici su jasno prepoznatljive asteroidne obitelji kao skupine točaka sličnih orbitalnih elemenata. Jasno su prepoznatljive Kirkwoodove pukotine, koje se nalaze u područjima orbitalnih rezonancija asteroida s Jupiterom.

1.2.2 Spektralne karakteristike

Pojedinačni asteroidi mogu se razvrstavati i prema značajkama njihovih spektara, boji i albedu (Chapman et al. 1975), koji nam daju uvid u sastav površinskog materijala asteroida. Izvorna klasifikacija na temelju spektara imala je tri glavne skupine: C-tip za tamne, ugljične objekte (75 % poznatih asteroida), S-tip za kamene (silicijeve) objekte (17 % poznatih asteroida) i U-tip, za one koji se nisu uklapali niti u C- niti u S-tip.

Do danas, ova je klasifikacija proširena i trenutačno se koristi nekoliko različitih taksonomskih shema (Bus et al. 2002). Dvije najčešće korištene taksonomije su Tholenova klasifikacija (Tholen 1989) i SMASS („Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey“) klasifikacija (Bus & Binzel 2002). Tholenova klasifikacija temeljena je na opažanjima asteroida prikupljenih 1980-ih godina kroz projekt „Eight-Color Asteroid Survey, ECAS“ (Tedesco et al. 1982) u 8 spektralnih pojaseva raspona između $0,31 \mu$ i $1,06 \mu\text{m}$ (s, u, b, v, w, x, p, z), i sadrži 14 kategorija asteroida. SMASS klasifikacija temeljena je na spektroskopskim mjerenjima asteroida u glavnom asteroidnom pojasu provedenim 2002. godine, i predstavlja modificiranu verziju Tholenove taksonomije s ukupno 24 različita tipa. Oba sustava imaju tri glavne kategorije: već spomenute C- i S-tipove, te X-tip, koji se sastoji od uglavnom metalnih asteroida.

1.3 Aktivnosti malih tijela Sunčevog sustava

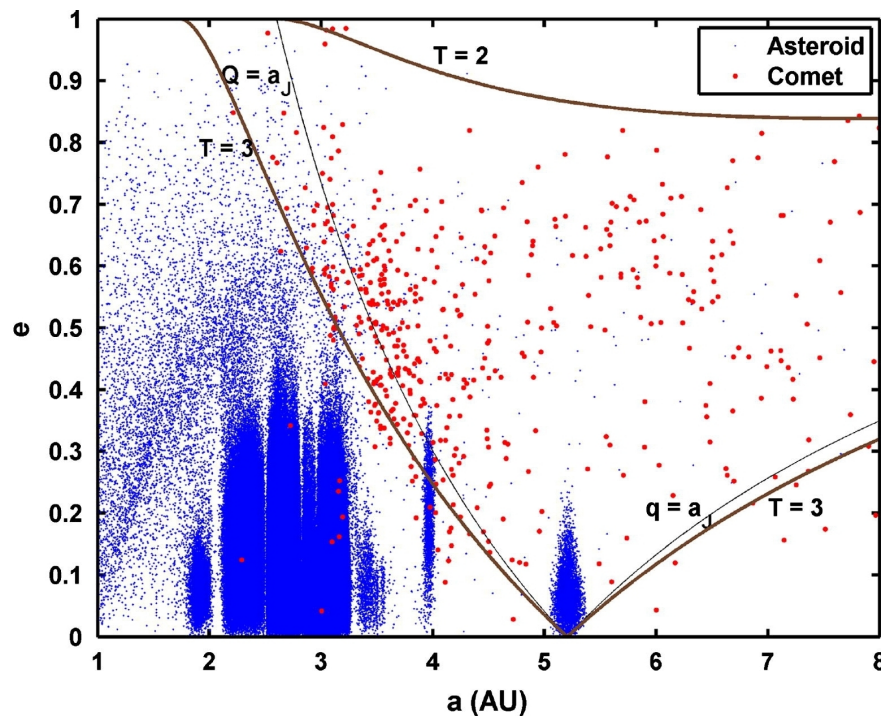
Osim na osnovu porijekla i orbitalnih parametara, mala tijela Sunčevog sustava dijele se i prema opažanoj morfologiji. Klasificiraju se na dvije osnovne skupine - asteroide i komete. Prema morfologiji, kometima se nazivaju tijela sa slobodnom difuznom komom, vidljivom zbog raspršenja Sunčevog svjetla, a asteroidima tijela s konstantnim geometrijskim poprečnim presjekom.

Prema mjestu nastanka, kometi su tijela nastala u hladnim područjima Sunčevog sustava, dok se asteroidima smatraju tijela nastala u područjima Sunčevog sustava s višim srednjim temperaturama. Astrodinamički gledano, asteroide i komete razlikujemo na temelju dinamičkih parametara, najčešće pomoću Tisserandovog parametra mjerenom u odnosu na Jupiter (Kresak 1982; Kosai 1992):

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i) \quad (1.1)$$

gdje je T_J Tisserandov parametar u odnosu na Jupiter, a velika poluos orbite malog tijela, a_J velika poluos Jupiterove orbite, e ekscentricitet orbite malog tijela, a i inklinacija orbite malog tijela.

Asteroidima se smatraju tijela s Tisserandovim parametrom $T_J > 3$, kometima Jupiterove



Slika 1.2: Orbitalni parametri ekscentriciteta (e) na y-osi u ovisnosti o velikoj poluosi (a) na x-osi za ~500 000 malih tijela Sunčevog sustava. Asteroidi su prikazani plavim, a kometi crvenim točkama. Naznačene su krivulje za afel $Q = a_J$ i perihel $q = a_J$ Jupiterove orbite; te krivulje za Tisserandov parametar u odnosu na Jupiter $T_J = 2$ i $T_J = 3$, za inklinaciju $i = 0$. (Izvor: Tancredi 2014)

obitelji $2 < T_J < 3$, dok su dugoperiodični kometi i kometi Halleyjeve obitelji tijela s $T_J < 2$.

Na slici 1.2 prikazani su orbitalni parametri ekscentriciteta e u ovisnosti o velikoj poluosi a za ~500 000 malih tijela Sunčevog sustava. Asteroidi su prikazani plavim, a kometi crvenim točkama. Naznačene su krivulje za afel $Q = a_J$ i perihel $q = a_J$ Jupiterove orbite; te krivulje za Tisserandov parametar u odnosu na Jupiter $T_J = 2$ i $T_J = 3$, za inklinaciju $i = 0$.

Među malim tijelima Sunčevog sustava zanimljiva je podskupina koja dinamički gledano spada u asteroide, ali posjeduje mehanizme gubitka mase koji su tipični za komete. Takva tijela nazivaju se aktivnim asteroidima, ili za one koji se nalaze u glavnom asteroidnom pojasu, kometima glavnog asteroidnog pojasa.

Astrodinamičke simulacije ukazuju na to da kometi glavnog asteroidnog pojasa nisu tijela iz vanjskih dijelova Sunčevog sustava koja su nedavno zarobljena u orbitama bliskim Suncu (Hsieh & Jewitt 2006), nego tijela sa stabilnim orbitama koja se od samog nastanka nalaze u unutrašnjem Sunčevom Sustavu (glavnom asteroidnom pojasu) (Fernández et al. 2002; Levison et al. 2006). Takvi objekti posebno su zanimljivi za razumijevanje procesa koji su doveli do opstanka vodenog leda na asteroidima unatoč grijanju iz čvrstih radioaktivnih jezgara i blizini Sunca, te razumijevanje procesa koji uzrokuju njihove iznenadne aktivnosti (Jewitt 2012).

Kometi glavnog asteroidnog pojasa su novootkrivena skupina malih tijela, prvi put zapažena 1996. godine kroz poznati primjer objekta 133P/(7968) Elst-Pizarro. 133P/(7968) Elst-Pizarro

otkriven je i katalogiziran 1979. godine kao tijelo s konstantnim geometrijskim poprečnim presjekom, zvjezdolikog izgleda. Kada se objekt nalazio u blizini perihela 1996. godine, zapažena su njegova kometska svojstva (Elst et al. 1996). Nakon jednog obilaska oko Sunca, krajem 2001. godine, tijekom idućeg približavanja perihelu, ponovno je opažana aktivnost slična kometskoj (Hsieh et al. 2004). Zbog učestalog pokazivanja aktivnosti sličnih kometima, tijelo je klasificirano kao komet i danas spada u grupu izrazito rijetkih tijela koji imaju dvojni status, katalogiziranih istovremeno i kao asteroid i kao komet.

Zbog mnogih različitih mogućih mehanizama gubitka mase, razlika između neaktivnog i aktivnog malog tijela nije oštro definirana. Na primjer, postoje mehanizmi koji uzrokuju slabe oblike aktivnosti koji proizvode rijetku komu oko malog tijela, te koje su na granici detekcije vizualnim metodama. Takve oblike aktivnosti mogu uzrokovati procesi poput elektrostatske levitacije (Jewitt 2012), ili pak udari manjih meteoroida. U Cikota et al. (2014) prikazana je potraga za kometima glavnog asteroidnog pojasa koja se ne temelji na analizi morfoloških karakteristika malih tijela nego na fotometrijskim naznakama postojanja slabe aktivnosti u obliku odstupanja u opažanom sjaju u odnosu na njihov očekivani sjaj.

Poznati su slučajevi aktivnih asteroida i izvan glavnog asteroidnog pojasa, među kojima su najbrojniji iz skupine kentaura. Dinamičke analize orbita kentaura ukazuju na njihovo porijeklo iz Kuiperovog pojasa. Uslijed gravitacijskog međudjelovanja s plinovitim divovima, njihove orbite su nestabilne, te će im razvoj orbite rezultirati ili približavanjem unutrašnjim dijelovima Sunčevog sustava, ili izbacivanjem van Sunčevog sustava u međuzvjezdani prostor (Jewitt 2009). Specifično, dinamički razvijene kentaure zarobljene u rezonantne orbite s Jupiterom, dovoljno ekscentričnih orbita kako bi se približili Suncu i započeli sublimaciju vodenog leda pod površinom, nazivamo kratkoperiodičnim kometima Jupiterove obitelji.

Pojedina tijela iz skupine kentaura pokazuju kometske aktivnosti bez obzira na to što se nalaze u orbitama daleko iza Jupiterove, ukazujući na postojanje procesa gubitka mase nevezanih za sublimaciju vodenog leda. Jedan od takvih kentaura, čija se kometska aktivnost u različitim navratima opaža još od njegovog otkrića 1977. godine, ali čiji uzrok još nije u potpunosti objašnjen, je 95P/(2060) Chiron.

1.4 Mehanizmi gubitka mase

Od prvog zapažanja aktivnosti na 133P/(7968) Elst-Pizarro do danas (listopad 2020. godine), u glavnom asteroidnom pojasu pronađeno je tek 38 sličnih tijela koji pokazuju naznake kometskih aktivnosti. Smatra se da su iznenadne aktivnosti tijela glavnog asteroidnog pojasa najčešće uzrokovane mehanizmima kao što su sublimacija vodenog leda, udarni izbačaji, rotacijska nestabilnost, utjecaj elektrostatske sile, podizanje prašine uslijed toplinskog lomljenja, toplinska i udarna dehidracija, mehanizmi vezani za tlak zračenja (Jewitt 2012), ili seizmičko podrhtavanje

(Tancredi 2012).

1.4.1 Sublimacija vodenog leda

Sublimacija vodenog leda je glavni mehanizam odgovoran za gubitak mase klasičnih kometa Whipple (1950). Suvremena istraživanja procesa vezanih uz sublimaciju leda uzimaju čimbenike poput poroznosti površine, rotacije tijela, vodljivosti topline u unutrašnjost tijela i oblikovanja plašteva otpornih na visoke temperature (Guilbert-Lepoutre & Jewitt 2011).

Opis aktivnosti asteroida značajno se pojednostavljuje uz pretpostavku da asteroidi ne sadrže amorfni led. Temperature u glavnom asteroidnom pojasu previše su visoke da ne bi došlo do kristalizacije, pa je razmatranje problema moguće svesti na idealizirani slučaj sublimacije s kristalne površine vodenog leda u toplinskoj ravnoteži i izloženog Sunčevom zračenju.

Sublimacijski maseni protok po jedinici površine, dm/dt ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), s dijela površine čija normala površine zatvara kut θ u odnosu na položaj Sunca, određuje se jednadžbom toplinske ravnoteže:

$$\frac{F_{\odot}(1-A)}{R_{\text{AJ}}^2} \cos(\theta) = \epsilon \sigma T^4 + L(T) \frac{dm(T)}{dt} + f_c. \quad (1.2)$$

Ovdje je $F_{\odot} = 1360 \text{ W m}^{-2}$ Sunčeva konstanta, R_{AJ} heliocentrična udaljenost u astronomskim jedinicama, A je Bondov albedo, $\epsilon \sim 0,9$ je emisivnost površine, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-4}$ je Stefan–Boltzmannova konstanta, T je ravnotežna temperatura, a $L(T)$ je latentna toplota sublimacije. Bondov albedo je udio ukupne upadajuće i reflektirane snage elektromagnetskog zračenja, koja pada na astronomsko tijelo. Bondov albedo uzima u obzir cjelokupno zračenje reflektirano od tijela, u svim valnim duljinama i svim faznim kutovima, ali ne i zračenje iz samog tijela. Pomoću Bondovog albeda određuje se količina energije koju tijelo apsorbira, što je neophodno poznavati za određivanje ravnotežne temperature tijela. Za razliku od ostalih definicija albeda, poput geometrijskog albeda čija vrijednost može biti i veća od 1 (ovisno o površinskim i atmosferskim svojstvima tijela), iznos Bondovog albeda je vrijednost koja može biti samo između 0 i 1. Temperaturna ovisnost o dm/dt može se procijeniti iz izravnog mjerenja (Griffiths 1927). Faktor toplinske provodljivosti f_c zahtijeva poznavanje termofizičkih parametara i kutnu brzinu rotacije tijela. Taj faktor je mali i ovdje se može zanemariti. Kut θ ovisi o nagibu rotacijske osi tijela, mijenja se u ovisnosti o položaju na površini tijela i mijenja se u ovisnosti o vremenu dok tijelo rotira.

Ukupna stopa gubitka mase, kao funkcija ovisna o vremenu, može se dobiti integriranjem jednadžbe (1.2) po površini. Za procjenu raspona možemo razmotriti dva granična slučaja za površinsku temperaturu i rezultirajuću stopu sublimacije (Jewitt 2012). Na nerotirajućem tijelu maksimalna temperatura T_{max} dostiže se u subsolarnoj točki, u kojoj je $\cos(\theta) = 1$. Minimalna

efektivna temperatura $T_{\min}$ dostiže se kada je površina izotermalna, odnosno kada su sve točke na površini jednake temperature, što odgovara najvećoj mogućoj površini zračenja. Prosječna vrijednost kutnog člana na kugli iznosi $\overline{\cos(\theta)} = 1/4$. Odabir $\overline{\cos(\theta)} = 1$ i $\overline{\cos(\theta)} = 1/4$ daje procjenu za minimalnu i maksimalnu temperaturu, te odgovarajuće specifične stope sublimacije. Stope sublimacije (maseni protok) iz jednadžbe (1.2) računane su za slučajeve niskih ($A = 0,05$) i visokih ($A = 0,50$) vrijednosti za albedo leda Jewitt (2012).

Čisti led visokog albeda sublimira previše sporo da bi bio odgovoran za mehanizme gubitka mase na udaljenostima glavnog asteroidnog pojasa. Stoga je na slici 1.3 prikazan sublimacijski maseni protok kao funkcija heliocentrične udaljenosti R samo za onečišćeni led, niskog albeda. Krivulje su konvergentne prema malim R , jer je za male heliocentrične udaljenosti sublimacijski član u jednadžbi (1.2) dominantan, ali se razdvajaju na većim R , za koje sublimacijski član eksponencijalno opada.

U rasponu heliocentričnih udaljenosti $2,0 \leq R \leq 3,3$ a.j., koje odgovaraju području glavnog asteroidnog pojasa, određene su stope sublimacijskog masenog protoka od $\sim 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (za sublimaciju pri $T_{\max}$) do $< 10^{-8} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (za sublimaciju pri $T_{\min}$). Sukladno tome stope gubitka mase od 1 kg s^{-1} zahtijevaju površine sublimirajućeg područja od 10^4 m^2 za $T_{\max}$, do 10^8 m^2 za $T_{\min}$. Budući da drugi premašuje cijelu površinu pojedinih tijela, izotermni model sublimacije ($T_{\min}$) može se isključiti kao mehanizam odgovoran za gubitak mase (Jewitt 2012). Glavni zaključak ovog sublimacijskog modela jest da Sunčevom zračenju izloženi vodeni led može sublimirati u cijelom rasponu heliocentričnih udaljenosti koje zauzima glavni asteroidni pojas, pod uvjetom da je led onečišćen, odnosno niskog albeda.

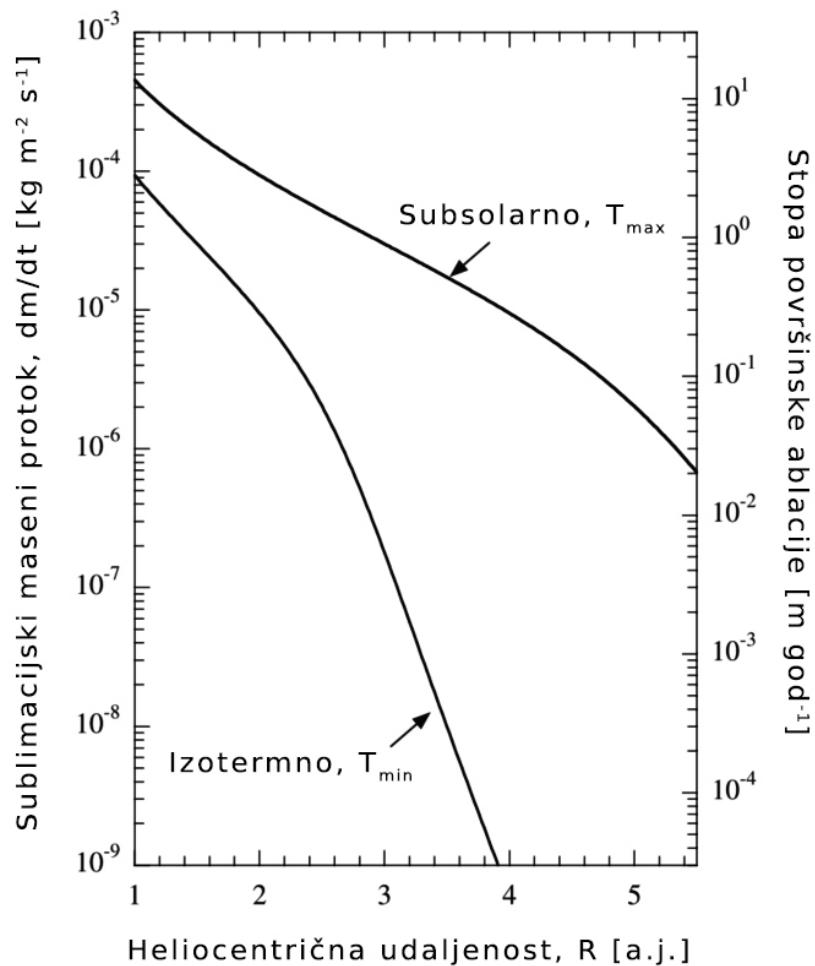
Određivanjem sublimacijskog masenog protoka po jedinici površine, dm/dt , mogu se izravno izračunati još i stopa površinske ablacije, te dimenzije najvećih čestica koje bivaju izbačene.

Stopa površinske ablacije dana je izrazom

$$\frac{dl}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{dm}{dt}, \quad (1.3)$$

i naznačena je na desnoj osi slike 1.3. S pretpostavljenom gustoćom leda $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$, za heliocentrične udaljenosti između 2–4 a.j. (kojima je obuhvaćena većina aktivnih asteroida), pronađen je raspon površinske ablacije od $350 \mu\text{m god}^{-1} \leq dl/dt \leq 3 \text{ m god}^{-1}$.

Dimenzije najvećih čestica koje bivaju izbačene s površine tijela mogu se procijeniti izjednačavanjem otpora sredstva pri gibanju čestica kroz plin i sile gravitacije. Pri tome je pretpostavljeno je da su čestice i tijelo sferičnog oblika i zanemarene su sve ostale sile. Pretpostavljeno je da su gustoće izbačenih čestica tijela jednake (Jewitt 2012).



Slika 1.3: S lijeve prikazan je ravnotežni sublimacijski maseni protok vodenog leda (iz jednadžbe 1.2), s desne strane stopa površinske ablacije (iz jednadžbe 1.3), obje kao funkcije heliocentrične udaljenosti. Krivulje su modelirane za Bondov albedo 0,05, te maksimalne i minimalne ravnotežne temperature, koje odgovaraju subsolarnoj točki na tijelu koje ne rotira, odnosno izotermnoj površini respektivno. (Izvor: Jewitt 2012)

Maksimalni promjeri čestica, izračunati iz

$$a_c = \frac{9}{16\pi} \frac{C_D v_f}{G \rho^2 r} \frac{dm}{dt} \quad (1.4)$$

prikazani su na slici 1.4 kao funkcija heliocentrične udaljenosti, za niski albedo i subsolarni model sublimacije. U jednadžbi (1.4), C_D je koeficijent oblika tijela (bezdimenzionalna veličina), ovdje pretpostavljen da je jednak 1, a v_f je brzina strujanja fluida (plina) na površini tijela (Biver et al. 2002).

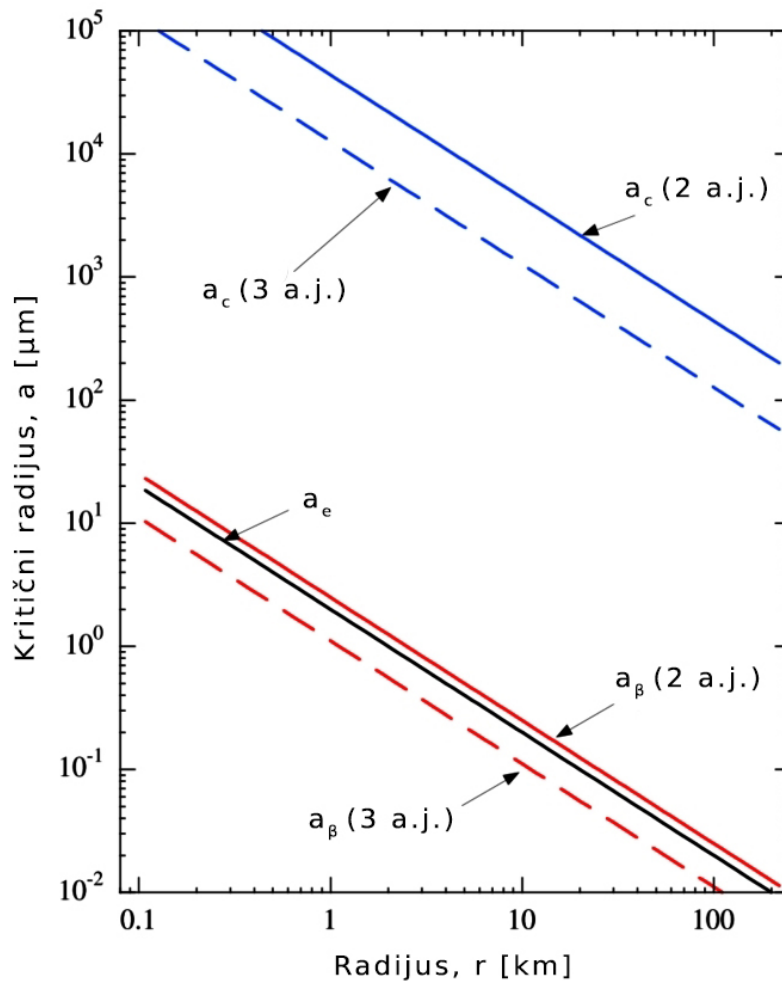
Anizotropno otpuštanje plina iz stvarnih kometskih jezgri može dati veća odstupanja u brzinama i dinamici prašine u odnosu na ovaj pojednostavljeni izotropni model (npr. Crifo et al. 2005). Ipak, slika 1.4 prikazuje da otpor sredstva uzrokovan sublimacijom leda s površine tijela može podizati sitne čestice, i to na rasponu heliocentričnih udaljenosti koje pokrivaju cjelokupni glavni asteroidni pojas. Zrna promjera većih od a_c ostaju vezana za malo tijelo, te mogu pridonijeti oblikovanu plašta otpornog na visoke temperature, koji pak može ograničiti ili u potpunosti suzbiti sublimacijski proces.

Dok led izložen izravnom upadu Sunčevog zračenja brzo sublimira, led zaštićen pokrivačem, ili plaštem regolita otpornim na visoke temperature debljine 1 m, može se ispod površine tijela zadržati $\sim 10^9$ godina (Schorghofer 2008). U tom slučaju, sublimacija može biti izazvana uklanjanjem površinskog plašta, primjerice udarom meteoroida u malo tijelo.

1.4.2 Udarne izbačaji

U dijelovima Sunčevog sustava s gustom raspodjelom asteroida kao što je glavni asteroidni pojas, sudari među malim tijelima predstavljaju vjerodostojno objašnjenje za poticanje mehanizama gubitka mase, i konzistentni su sa statistikom učestalosti sudara (Snodgrass et al. 2010; Bottke et al. 2005). Primjeri aktivnih asteroida P/2010 A2 (LINEAR) (npr. Moreno et al. 2011; Snodgrass et al. 2010) i (596) Scheila (npr. Moreno et al. 2011; Jewitt et al. 2011) pokazali su da udari mogu biti uzroci iznenadnih kometskih aktivnosti kod objekata glavnog asteroidnog pojasa. Promjer impaktora u P/2010 A2 (LINEAR) procijenjen je na između 6-9 m (Jewitt et al. 2010; Snodgrass et al. 2010; Larson 2010). Procijenjena udarna stopa za impaktore ovog reda veličine u matično tijelo promjera 120 m, iznosi oko $1,1 \cdot 10^9$ godina, što odgovara jednom udaru svakih ~ 12 godina negdje u asteroidnom pojasu (Snodgrass et al. 2010; Bottke et al. 2005). Smanjenjem promjera impaktora, udarna stopa eksponencijalno se povećava.

Dosadašna statistika potrage za kometima glavnog asteroidnog pojasa ukazuje na postojanje mnogo više ovih objekata nego što ih je do sada otkriveno. Otkriće jednog aktivnog tijela (176P/LINEAR) među 599 opažanih asteroida sugerira da bi statistički gledano, u svakom trenutku u glavnom asteroidnom pojasu, moglo postojati ~ 100 aktivnih asteroida glavnog



Slika 1.4: Kritični polumjer čestica prašine izbačenih s površine tijela otporom sredstva uzrokovanim sublimacijom leda (a_c , određen iz jednačbe 1.4), elektrostatskim izbacivanjem (a_e , određen iz jednačbe 1.13) i tlakom zračenja (a_β , određen iz jednačbe 1.17), prikazan kao funkcija polumjera tijela. Pune i isprekidane krivulje za a_c i a_β odnose se na $R = 2$ a.j. i 3 a.j., kao označeno. (Izvor: Jewitt 2012)

asteroidnog pojasa (Hsieh 2009).

Sudari među asteroidima događaju se karakterističnim brzinama od nekoliko km s^{-1} (Bottke et al. 1994). Stoga sudari spadaju u visoko erozivne procese. Prinos sudara, definiran kao omjer mase udarom izbačenog materijala m_e , i mase projektila M , je $m_e/M \gg 1$. Jewitt (2012) je istražio povezanost između fizikalnih karakteristika udarnog tijela (projektila) i rezultirajućeg povećanja sjaja uzrokovanog izbačenim materijalom s matičnog tijela (mete).

Tijekom udara izbačeni materijal giba se vrlo niskim brzinama u odnosu na metu. Za projektil i metu jednakih gustoća, i masu izbačaja m_e koja se giba zadanom brzinom iznosa v , može biti postavljena eksponencijalna jednadžba

$$m_e/M = A(v/U)^\alpha, \quad (1.5)$$

gdje su M i U masa i brzina projektila, a $A \sim 0,01$ konstanta određena modelom udarnog izbačaja (Housen & Holsapple 2011). Potencija α blago ovisi o svojstvima mete, no dobro je aproksimiran za niz materijala s iznosom $\alpha = -1,5$. Isključivo čestice izbačaja s brzinama većim od druge kozmičke brzine, $v \geq v_e$, će biti oslobođene s mete, te raspršenjem svjetlosti doprinositi povećanju poprečnog presjeka mete. Sve ostale čestice izbačaja past će na površinu mete u okolici udarnog mjesta. Uz brzinu oslobađanja (drugu kozmičku brzinu) definiranu kao

$$v_e = \left(\frac{8\pi G \rho}{3} \right)^{1/2} r, \quad (1.6)$$

jednadžba (1.5), uz zadanu gustoću mete ρ i brzinu projektila U , daje poveznicu prinosa sudara i polumjera r pogođenog tijela (Jewitt 2012).

Nadalje, moguće je napraviti poveznicu između mase izbačenog materijala m_e i poprečnog presjeka mete, odnosno rezultirajućeg povećanja sjaja uzrokovanog raspršenjem svjetlosti na izbačenom materijalu s matičnog tijela.

Parametari modela izbačaja određeni su na temelju podataka prikupljenih opažanjem umjetno izazvanog izbačaja u sklopu NASA-ine misije „Deep Impact“, ispucavanjem kinetičkog projektila u komet 9P/Tempel 1 2005. godine (Kadono et al. 2010; Lisse et al. 2006) i modela izbačaja s aktivnog asteroida P/2010 A2 (Jewitt et al. 2010), te modela koji je proizašao iz laboratorijskih eksperimenata hiperbrzih sudara na mikrometarskim skalama (Takasawa et al. 2011).

Pronađena je relacija između poprečnog presjeka C_e i mase izbačaja čestica s polumjerima u rasponu $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}$ (Jewitt et al. 2010):

$$m_e = \frac{4}{3} \rho \bar{a} C_e, \quad (1.7)$$

gdje je $\bar{a} = (a_{\min}a_{\max})^{1/2}$. Npr., za $a_{\min} = 0,1 \mu\text{m}$, i $a_{\max} = 0,1 \text{ m}$, srednja vrijednost polumjera čestica iznosi $\bar{a} = 10^{-4} \text{ m}$.

Kombiniranjem jednažbi (1.5)-(1.7), dobiven je odnos poprečnog presjeka izbačenog materijala s mete (Jewitt et al. 2010)

$$\frac{C_e}{\pi r^2} = \frac{A}{\bar{a}U^\alpha} \left(\frac{8\pi G\rho}{3} \right)^{\alpha/2} r_p^3 r^{\alpha-2}, \quad (1.8)$$

gdje je pretpostavljeno da je projektil sfera polumjera r_p , i jednake gustoće kao i meta.

Uvrštavanjem konstanti s vrijednostima $A = 0,01$, $\bar{a} = 0,1 \text{ mm}$, $U = 5 \text{ km s}^{-1}$, $\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$, i $\alpha = -3/2$, slijedi

$$\frac{C_e}{\pi r^2} \sim 30 \left(\frac{r_p}{1 \text{ m}} \right)^3 \left(\frac{r}{1 \text{ km}} \right)^{-7/2}. \quad (1.9)$$

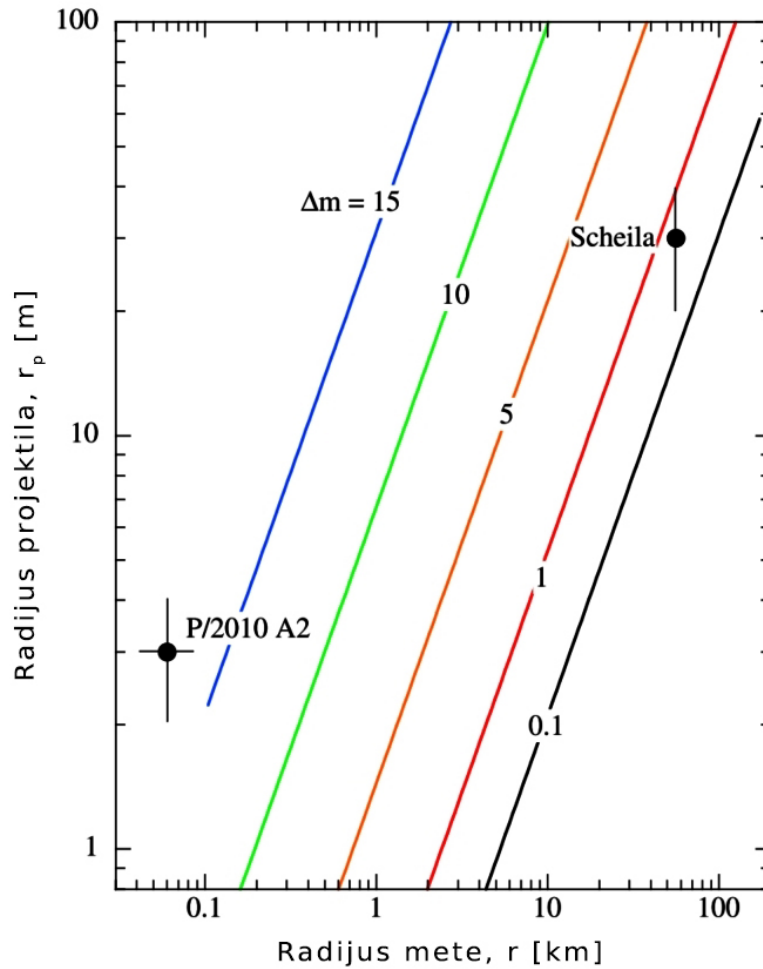
Sukladno modelu, projektil polumjera 1 m , u sudaru s metom polumjera 1 km proizvest će izbačaj materijala 30 puta većeg geometrijskog poprečnog presjeka od poprečnog presjeka mete.

Iz procjene povećanja geometrijskog poprečnog presjeka, može se odrediti povećanje sjaja mete:

$$\Delta m = 2,5 \log_{10} \left(1 + \frac{C_e}{\pi r^2} \right). \quad (1.10)$$

Slika 1.5 prikazuje povećanje sjaja mete kao funkciju polumjera mete i projektila. Model je prikazan samo za raspon polumjera projektila i mete, u kojemu je masa izbačenog materijala (određena jednažbom 1.5) manja od mase mete. Na slici je vidljivo da bi, primjerice udar projektila polumjera 1 m u metu polumjera 1 km rezultirao povećanjem sjaja za $\Delta m \sim 3,5 \text{ mag}$, dok bi udar istog projektila u metu polumjera 10 km , s povećanjem sjaja za red veličine 10^{-2} mag bio na granici mogućnosti opažanja. Na slici su prikazane i vrijednosti opažane za aktivne asteroide P/2010 A2 i (596) Scheilu, interpretirane za ovaj model udarnog izbačaja. Pokazano je da je povećanje sjaja od približno $\Delta m = 1 \text{ mag}$ konzistentno s opažanjima (596) Scheile (Jewitt 2012). P/2010 A2 otkriven je gotovo godinu dana nakon udara. Njegovo početno povećanje sjaja stoga nije poznato, no sukladno modelu na slici 1.5, procijenjeno je da je povećanje sjaja moglo iznositi $\Delta m = 15 \text{ mag}$.

Ovaj model vrlo je osjetljiv na ulazne vrijednosti. Parametri vezani za fizikalne karakteristike projektila i mete mogu zauzeti široki raspon vrijednosti i često se temelje na procjenama. Na



Slika 1.5: Model povećanja sjaja u udarnom procesu uzrokovan povećanjem geometrijskog poprečnog presjeka mete uslijed izbačenog materijala, kao funkcija polumjera projektila i mete. U modelu korištena brzina sudara iznosi $U = 5000 \text{ ms}^{-1}$. U modelu korišteni polumjeri čestica izbačenog materijala iznose $a_{\min} = 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, $a_{\max} = 0,1 \text{ m}$, odnosno, $\bar{a} = 10^{-4} \text{ m}$. Točkama su prikazani polumjeri P/2010 A2 i (596) Scheila, s pretpostavljenim polumjerima njihovih udarnih tijela i trakama pogrešaka. (Izvor: Jewitt 2012)

primjer, povećanjem brzine sudara U za faktor dva, prema jednadžbi (1.8) masa izbačaja i geometrijski poprečni presjek povećat će se za faktor ~ 2.8 , i sukladno tome sjaj za ~ 1 mag.

1.4.3 Rotacijska nestabilnost

Jedan od mogućih mehanizama gubitka mase malih tijela Sunčevog sustava je rotacijska nestabilnost (Jewitt 2012).

Primjerice anizotropno zračenje fotona može dovesti do promjene kutne količine gibanja, kroz tzv. Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP) efekt (Bottke et al. 2006; Jacobson & Scheeres 2011; Marzari et al. 2011). Bliski susreti s planetima (de León et al. 2013; Scheeres et al. 2004) ili masivnim asteroidima mogu mijenjati brzinu rotacije asteroida. Približavanjem kritičnoj frekvenciji rotacije, povećanje centrifugalne sile može dovesti do izbacivanja prašine s

površine malih tijela, njihove deformacije, ili pak rotacijskog fragmentiranja malih tijela (Comito et al. 2011; Rossi et al. 2012).

Centripetalna akceleracija rotirajućeg tijela gustoće ρ (kg m^{-3}) bit će jednaka ubrzanju sile teže za kritični period rotacije P_c , zadan s

$$P_c = k \left(\frac{3\pi}{G\rho} \right)^{1/2}. \quad (1.11)$$

Ovdje je k bezdimenzionalna konstanta koja ovisi o obliku tijela. Za kuglu je $k = 1$, a za izduženo tijelo s osima $a \geq b$, koje rotira oko svoje kraće osi, $k \sim a/b$.

Kritični period rotacije iz jednadžbe (1.11) izražen u satima iznosi

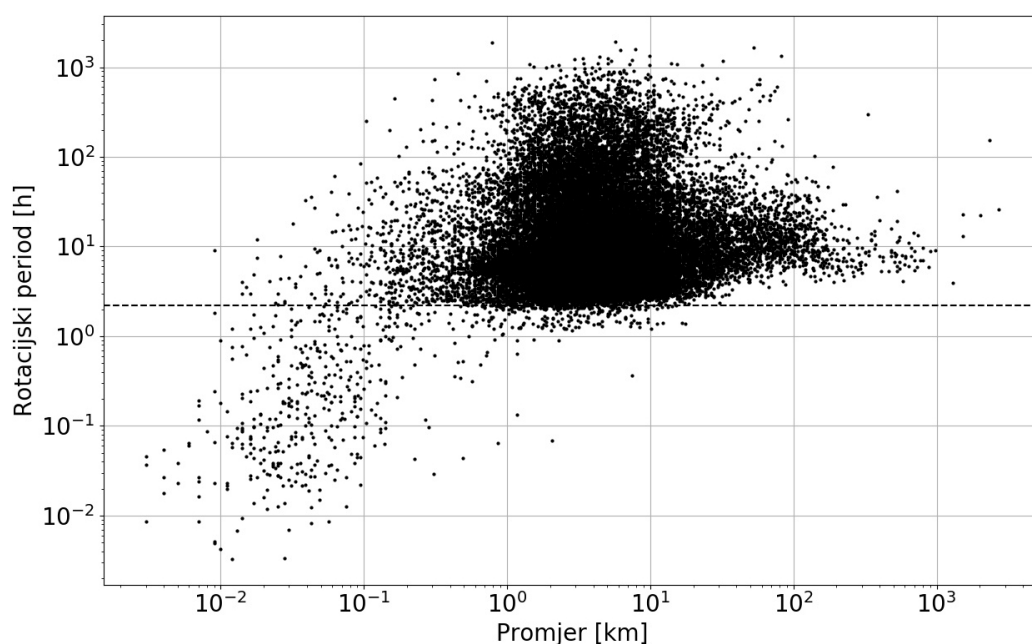
$$P_c[h] \sim 3,3k \left(\frac{1000}{\rho} \right)^{1/2}. \quad (1.12)$$

Na primjer, kritični period rotacije kugle gustoće $\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$, prema jednadžbi (1.12), iznosit će $P_c = 2,3 \text{ h}$, dok će kritični period izduženog tijela iste gustoće, s omjerom osi $a/b = 2$, iznositi $P_c = 4,7 \text{ h}$.

Iako je kritični period P_c prema jednadžbi (1.12) neovisan o promjeru, brojna opažanja malih tijela pokazuju da samo objekti manji od $\sim 0,1\text{--}0,3 \text{ km}$ posjeduju periode rotacije $< 2 \text{ h}$ (Pravec et al. 2002). Najvjerojatniji razlog takvom ponašanju jest što mala tijela promjera ispod kilometra imaju znatno veću rasteznu čvrstoću, te mogu odoljeti rotacijskom raspadanju, dok su veća tijela strukturalno slabija. Takva krhka, strukturalno slaba tijela (po rasteznoj čvrstoći), mogu nastati lomljenjem uslijed sudara, ili u slučaju kometskih jezgara, nježnim prijanjanjem ledenih, neovisno nastalih, planetezimala.

Slika 1.6 prikazuje raspodjelu perioda rotacije za $\sim 30\,000$ malih tijela u ovisnosti o njihovom promjeru. Horizontalna iscrtkana linija označava vrijednost kritičnog perioda rotacije malih tijela, pri kojemu uslijed centrifugalnih sila dolazi do njihovih raspada. Za mala tijela promjera većih od $\sim 250 \text{ m}$, kritični period rotacije iznosi $\sim 2,2$ sata. Graf je generiran iz podataka dostupnih u bazi rotacijskih krivulja sjaja malih tijela, „Asteroid Lightcurve Database“ (Warner et al. 2009).

S obzirom na to da postoje naznake u raspodjeli rotacijskih perioda malih tijela, razumno je pretpostaviti da bi rotacijska nestabilnost mogla biti jedan od uzročnika mehanizama gubitka mase malih tijela u glavnom asteroidnom pojasu.



Slika 1.6: Raspodjela perioda rotacije za ~30 000 malih tijela dostupnih u bazi rotacijskih krivulja sjaja malih tijela, „Asteroid Lightcurve Database“ (Warner et al. 2009), u ovisnosti o njihovom promjeru. Horizontalna iscrtkana linija naznačuje vrijednost kritičnog perioda rotacije malih tijela, pri kojemu uslijed centrifugalnih sila dolazi do njihovih raspada. Za mala tijela promjera većih od ~250 m, kritični period rotacije iznosi ~2,2 sata.

1.4.4 Elektrostatske sile

Djelovanje elektrostatskih sila na čestice prašine planetarnih površina, do sada je najbolje istraženo na primjeru Mjesečeve površine. Snimke prikupljene Mjesečevom letjelicom „Surveyor“ pokazale su neočekivani sjaj nad horizontom, uzrokovan raspršenjem svjetlosti na česticama prašine promjera $\sim 10 \mu\text{m}$, koje lebde $\sim 1 \text{ m}$ nad Mjesečevom površinom (Rennilson & Criswell 1974). Kasnije su eksperimentom LEAM (eng. „Lunar Ejecta and Meteorites“), provedenim u sklopu misije Apollo 17 s ciljem istraživanja prašine, opažani udari čestica prašine malih brzina ($\leq 100 \text{ m s}^{-1}$) u Mjesečevo tlo. U sklopu eksperimenta zapažani su posebno intenzivni tokovi čestica u blizini lokalnih izlazaka i zalazaka Sunca (Berg et al. 1976). No, izmjerene gustoće detektiranih čestica prašine bile su za ~ 7 redova veličine više od onih koje bi mogle biti uzrokovane udarima mikrometeoroida.

Kao moguće objašnjenje opažane pojave, predložena je elektrostatska levitacija čestica prašine. Naime, na dnevnoj strani, pod djelovanjem UV- i X-zračenja dolazi do izbijanja elektrona iz čestica prašine (fotoelektrični efekt), i one dobivaju pozitivan električki naboj. Bez uzemljenja, njihov potencijal može postići energije jednake najenergičnijim fotonima, od 10^3 V ili više (De & Criswell 1977), ali u praksi, potencijal između nabijene čestice prašine i tla dostiže iznose do oko $+10 \text{ V}$ (Colwell et al. 2007). Na neosvijetljenoj strani, ili u sjeni, kao posljedica većeg toka elektrona Sunčevog vjetera, površina postaje negativno nabijena (Sunčev vjetar je

električki neutralan, ali elektroni Sunčevog vjetra zbog male mase putuju brže od protona, što rezultira tokom elektrona na površini). Uobičajena energija elektrona Sunčevog vjetra je ~ 10 eV, koja dovodi do negativnog potencijala reda veličine 10 V. U blizini terminatora, isti proces dovodi do pozitivnog i negativnog električnog nabijanja površine, ali na mnogo manjim prostornim okvirima (na skali lokalne topografije), što rezultira visokim gradijentima lokalnog električnog polja. U blizini ruba sjene, fotoelektroni proizvedeni u osunčanim dijelovima površine mogu se gibati i zadržavati u neosvijetljenim dijelovima, uzrokujući lokalne gradijente električnog polja u iznosima $E \sim 10$ do 100 V m^{-1} (Colwell et al. 2007; Farrell et al. 2007). Sunčevom svjetlošću obasjani, pozitivno nabijeni dijelovi površine, privlače oblake elektrona neutralizirajući gradijente na skalama reda veličine $l \gtrsim 1 \text{ m}$.

Elektrostatski procesi koji podižu čestice prašine na Mjesecu vjerojatno se događaju i na malim tijelima. Vremena električnog punjenja čestica na Mjesecu iznose $\sim 10^2$ – 10^3 s (De & Criswell 1977). U glavnom asteroidnom pojasu, na udaljenosti ~ 3 a.j. od Sunca, struja punjenja bit će devet puta manja nego na Mjesecu. Sukladno tome, vrijeme električnog punjenja bit će devet puta duže, no postignuti električni potencijali za zadanu dielektričnu konstantu, ostat će jednaki. Osnovna razlika između Mjeseca i malih tijela u glavnom asteroidnom pojasu jest što prašina na Mjesecu levitira (zadržana uslijed jače gravitacijske sile), dok čestice prašine na malim tijelima lako dostižu brzine oslobađanja v_e . Stoga elektrostatski procesi potencijalno mogu uzrokovati gubitak mase malih tijela.

Naboj q na sfernoj čestici polumjera a ovisi o potencijalu čestice V kao $q = 4\pi\epsilon_0 Va$, gdje je $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ dielektrična permitivnost vakuuma. Sila na električki nabijenu česticu izloženu električnom polju E (V m^{-1}) dana je s $F_e = qE$. Za izbacivanje čestice prašine s površine malog tijela, nužan je uvjet $v > v_e$, gdje je v brzina čestice postignuta ubrzavanjem čestice po duljini l , a v_e brzina oslobađanja s površine malog tijela. Pod pretpostavkom da su čestica prašine i malo tijelo sfernog oblika, polumjera a i r respektivno, te da su njihove gustoće jednake i zadane s ρ , kritični polumjer pod kojim čestica može biti elektrostatski izbačena s površine malog tijela zadan je s (Jewitt 2012)

$$a_e = \left(\frac{18\epsilon_0 V E l}{4\pi G \rho^2 r^2} \right)^{1/2}. \quad (1.13)$$

Uvrštavanjem vrijednosti uobičajenih za Mjesečevu površinu, $V = 10 \text{ V}$, $l = 1 \text{ m}$, $E = 10$ – 100 V m^{-1} , te korištenjem prosječne gustoće od $\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$, jednadžba (1.13) za mala tijela polumjera za $r = 1 \text{ km}$ daje kritične polumjere čestica u iznosu $a_e = 1,5$ – $5 \text{ }\mu\text{m}$. Te su veličine nešto manje od polumjera čestica od $\sim 10 \text{ }\mu\text{m}$, određenih opažanjima aktivnih asteroida (npr. 133P/Elst-Pizarro, Hsieh et al. 2004). Osim toga, jednadžbom (1.13) određeno je da s Mjeseca ($r = 1600 \text{ km}$) mogu biti izbačene isključivo čestice prašine nanometarskih veličina, što ovu pojavu

čini zanemarivom za Mjesec. Čak i za malo tijelo (596) Scheila ($r = 56$ km i $a_e = 0,04-0,1$ μ m), čestice izbačene elektrostatskom silom bile bi manje od valne duljine vidljivog spektra, i stoga neefikasni raspršivači vidljive svjetlosti. Na slici 1.4 prikazano je da je za zadani polumjer malog tijela, odnos kritičnih polumjera izbačenih čestica elektrostatskim mehanizmom u odnosu na sublimacijski mehanizam omjera $a_e \sim 10^{-4} a_c$. Stoga je elektrostatski mehanizam izbacivanja čestica dovoljno velikih polumjera da rasprše optičke fotone moguć mehanizam gubitka mase samo za asteroide manjih polumjera, do reda veličine ~ 1 km.

Svi asteroidi glavnog asteroidnog pojasa koji su klasificirani kao kometi, detektirani su na osnovu njihovih morfoloških karakteristika, pokazavši difuzne poprečne presjeke nalik kometima, umjesto zvjezdolikih (konstantnih) poprečnih presjeka. Otkrivanje ovih objekata potragom za tipičnim kometskim značajkama poput repa ili kome zahtijeva mnogo teleskopskog vremena na teleskopima srednje i velike klase, a zbog instrumentalnih ograničenja njihova detekcija svejedno nije zajamčena. Na primjer, potraga za novim kandidatima kometa glavnog asteroidnog pojasa na temelju snimki prikupljenih u sklopu projekta „Thousand Asteroid Light Curve Survey. TALCS“ (Masiero et al. 2009) nije rezultirala novootkrivenim kandidatima. Ipak, pronađene su naznake da je $\sim 5\%$ asteroida glavnog asteroidnog pojasa aktivno na niskoj razini, u obliku slabašnih repova koji se ne mogu detektirati pojedinačno, nego statistički na temelju ukupnog skupa podataka TALCS (Sonnott et al. 2011). Mehanizam gubitka mase elektrostatskim silama mogao bi ponuditi objašnjenje slabih oblika aktivnosti na malim tijelima.

1.4.5 Toplinsko lomljenje

Toplinsko lomljenje materijala može nastati kada naprezanja u materijalu, pod utjecajem temperaturnih razlika, nadmaše rasteznu čvrstoću materijala. Toplinsko istezanje zadano je sa $S \sim \alpha Y \delta T$, gdje su α (K^{-1}) koeficijent toplinskog istezanja, Y ($N m^{-2}$) Youngov modul elastičnosti, a δT (K) odgovarajuća promjena temperature. Koeficijenti toplinskog istezanja uobičajeni za stijene su reda veličine $\alpha \sim 10^{-5} K^{-1}$ (Lauriello 1974; Richter & Simmons 1974), a Youngovi moduli elastičnosti kreću se u rasponu $Y = (10-100) \cdot 10^9 N m^{-2}$ (Pariseau 2006, str. 474). Ako uzmemo da je ukupna energija toplinskog istezanja na raspolaganju za kinetičku energiju lomljenja, uz uvođenje faktora učinkovitosti η , slijedi brzina lomljenja materijala (Jewitt & Li 2010)

$$v \sim \alpha \delta T \sqrt{\frac{\eta Y}{\rho}}. \quad (1.14)$$

Uvrštavanjem faktora učinkovitosti $\eta = 1$, pri $\delta T = 1000$ K, dobiva se gornja granica brzine izbacivanja materijala toplinskim lomljenjem $v \sim 20 m s^{-1}$. Ta brzina je dovoljna za oslobađanje čestica s malih tijela polumjera do $r \sim 20$ km. Stoga se toplinsko lomljenje stijena smatra

potencijalnim izvorom malih čestica, i mogućim objašnjenjem izbacivanja čestica s površine onih malih tijela s orbitama vrlo bliskim Suncu (Jewitt 2012).

1.4.6 Toplinska dehidracija

10 % – 20 % mase pojedinih skupina ugljičnih hondrita, s vjerojatnim porijeklom iz vanjskih dijelova glavnog asteroidnog pojasa, sastoji se od vode vezane u hidratizirane minerale (Jarrowich 1990). Kad bi ova voda mogla biti oslobođena iz kristalne strukture, mogla bi uzrokovati vidljivi mehanizam gubitka mase, povlačeći za sobom (u plinovitom stanju u obliku izbačaja vodene pare) sitne čestice s površine malog tijela.

Laboratorijska ispitivanja pokazala su da karakteristične energije aktivacije toplinske dehidracije hidratnih filosilikata uobičajenih za planetarne minerale (npr. serpentin, brucit, muskovit, talk), iznose 325–400 kJ mol⁻¹ (Bose & Ganguly 1995). Toplinska dehidracija praćena je promjenom volumena, zbog koje dehidrirajući materijal može ispucati, stvarajući izvor malih čestica. Međutim, gore navedene energije aktivacije odgovaraju mnogo višim temperaturama (~1000 K) od onih koje su uobičajene za glavni asteroidni pojas. Iz tog razloga, mehanizam gubitka mase toplinskom dehidracijom, ima značajnu ulogu samo kod tijela s perihelima manjim od 2 a.j.

1.4.7 Udarne dehidracije

Dehidraciju materijala mogu uzrokovati udarni valovi tlaka uzrokovani sudarima malih tijela. Na primjer, udarna dehidracija brucita (Mg(OH)₂) odvija se u rasponu tlaka od ~12 GPa do 56 GPa (50 % zarobljene vode oslobađa se pod tlakom od 17 GPa; Duffy et al. 1991).

Međutim, visoki tlakovi gore navedenih redova veličine ograničeni su isključivo na područja usporediva s promjerom udarnog tijela. Stoga je volumen dehidriranog materijala, u usporedbi s volumenom nastalog udarnog kratera, mali. Ipak, udarnom dehidracijom oslobođena voda može za red veličine produljiti vrijeme trajanja potaknutog mehanizma gubitka mase od onog uzrokovanog samim udarnim izbačajem.

Na primjer, projektil polumjera 10 m dehidrirao bi ~10⁷ kg materijala s malog tijela. S masenim udjelom vode od 10 %, udarnom dehidracijom može biti oslobođeno 10⁶ kg vode s mjesta udara - dovoljno da održi protok plina i prašine sa stopom 0,1 kg s⁻¹ u trajanju od ~100 dana.

Zbog malih ukupnih masa oslobođenog materijala ovim mehanizmom, udarna dehidracija spada u mehanizme sporedne važnosti. Ipak, ovaj mehanizam treba uzeti u obzir pri interpretaciji plinovitih izbačaja koji se detektiraju nakon sudara, kako ne bi bio pogrešno interpretiran i zamijenjen s mehanizmom sublimirajućeg leda.

1.4.8 Tlak zračenja

Čestice prašine s površine malog tijela mogu biti izbačene pod djelovanjem tlaka zračenja. Promotrimo česticu prašine smještenu odmah iznad površine malog tijela, uzmimo u obzir silu gravitacije koja djeluje na zrno prašine prema središtu malog tijela, i silu tlaka zračenja u smjeru suprotnom od Sunca, izraženu kao $\beta g_{\odot}$, gdje je $g_{\odot}$ gravitacijsko ubrzanje prema Suncu.

Čestica prašine može biti izbačena s malog tijela pod utjecajem tlaka zračenja ako vrijedi

$$\beta \frac{GM_{\odot}}{R^2} > \frac{4}{3} \pi G \rho r. \quad (1.15)$$

Ovdje je pretpostavljeno da se malo tijelo sfernog oblika polumjera r i gustoće ρ nalazi na heliocentričnoj udaljenosti R , te da ne rotira oko vlastite osi. G je gravitacijska konstanta, a $M_{\odot}$ je masa Sunca. Bezdimenzionalna veličina β ovisi o obliku čestice prašine, njezinom sastavu i poroznosti, no u načelu je funkcija polumjera a . Za prvu aproksimaciju, može se koristiti $\beta \sim 1/a_{\mu}$, gdje je a_{μ} polumjer čestice izražen u mikrometrima (Bohren & Huffman 1983). Tada se uvjet za izbacivanje čestice s malog tijela pod utjecajem tlaka zračenja može opisati kao

$$a_{\beta} < \frac{3M_{\odot}}{4\pi\rho r R^2}. \quad (1.16)$$

Uvrštavanjem gustoće $\rho = 2000 \text{ kg m}^{-3}$, te izražavanjem polumjera r malog tijela u km i heliocentrične udaljenosti R u a.j., slijedi kritični polumjer čestice koja može biti izbačena s površine malog tijela

$$a_{\beta} = 10 \left(\frac{1 \text{ km}}{r} \right) \left(\frac{1 \text{ a.j.}}{R} \right)^2. \quad (1.17)$$

Jednadžba (1.17) (također prikazana na slici 1.4) pokazuje da bi, na primjer, s tijela polumjera $r = 1 \text{ km}$ na heliocentričnoj udaljenosti $R = 3 \text{ a.j.}$, pod djelovanjem tlaka zračenja bile izbačene čestice prašine polumjera manjeg od $a \sim 1 \mu\text{m}$. Za tijela manjih polumjera od 10 km , na svim heliocentričnim udaljenostima obuhvaćenim u glavnom asteroidnom pojasu mogu biti izbacivane čestice $a \geq 0,1 \mu\text{m}$. Izbacivanje većih čestica moguće je u slučaju da malo tijelo rotira oko vlastite osi i/ili ima asferični oblik.

U gore opisanom pojednostavljenom modelu, uzeti su u obzir samo iznosi a ne i smjerovi sila tlaka zračenja u odnosu na središte malog tijela. Na primjer, tlak zračenja će na čestice na dnevnoj strani vršiti silu okomito prema površini, odnosno, središtu tijela, dok će na čestice u blizini terminatora djelovati rezultantna sila u smjeru određenim vektorskim zbrojem lokalnog gravitacijskog ubrzanja i sile tlaka zračenja. Dodatno ograničenje djelovanja mehanizma gubitka

mase uslijed tlaka zračenja, kao i kod djelovanje elektrostatskih sila, jest prijanjanje za površinu malog tijela. Uz prevladavanje ovog ograničenja mehanizam gubitka mase uslijed tlaka zračenja u glavnom asteroidnom pojasu može biti značajan za tijela polumjera manjih od ~ 10 km (Jewitt 2012).

1.4.9 Seizmičko podrhtavanje

Uzrok mehanizma gubitka mase koji bi mogao ponuditi objašnjenje slabih aktivnosti na malim tijelima poput onih koje je detektirao Sonnett et al. (2011) (već diskutiranih u poglavlju 1.4.4), može biti i seizmičko podrhtavanje.

Tancredi (2012) je predlagao da seizmičko podrhtavanje može biti izazvano oslobađanjem unutrašnjih naprezanja, izmještanjem materijala kod krhkih tijela, ili oslobađanjem energije u procesima poput toplinskog lomljenja. Udari malih impaktora također mogu stvoriti udarne valove koji se šire kroz unutrašnjost tijela, uzrokujući globalna podrhtavanja (Yamada et al. 2016). Simulacije površinskog podrhtavanja pod utjecajem slabe gravitacije, poput one na malim tijela Sunčevog sustava, pokazale su da se čestice mogu izbacivati s površine uz vrlo niske relativne brzine (Tancredi et al. 2012).

Iako seizmička podrhtavanja izazvana udarima još nisu izravno opažana na malim tijelima, kako bi bila istražena erozija kratera na Erosovoj površini razvijeni su modeli globalnog seizmičkog podrhtavanja asteroida (433) Eros. Pri tome su određene dominantne seizmičke frekvencije kojima mala tijela mogu globalno podrhtavati s rasponom frekvencija $f = 10\text{--}20$ Hz (Richardson et al. 2004, 2005; Garcia et al. 2015).

Poglavlje 2

Metode opažanja malih tijela Sunčevog sustava

Poglavlje 2 daje pregled osnovnih opažачkih metoda malih tijela Sunčevog sustava korištenih u 3. i 4. poglavlju ove disertacije.

Zbog velikih udaljenosti i malih dimenzija malih tijela Sunčevog sustava, posebice onih u vanjskim dijelovima Sunčevog sustava, kutne promjere malih tijela ne možemo razlučiti sa zemaljskim instrumentima.

Precizno poznavanje dimenzija i raspodjele dimenzija malih tijela Sunčevog sustava nužan su preduvjet za istraživanje njihovog porijekla i razvoja, uključujući njihov nastanak i raznolikost dinamičkih obitelji malih tijela. Ono također ima važne implikacije na razumijevanje mehanizama koji su doveli do nastanka stjenovitih planeta (Merkura, Venere, Zemlje i Marsa) našeg Sunčevog sustava. Poznavanje preciznih dimenzija malih tijela kojima je poznata masa (primjerice iz orbitalnih perioda njihovih prirodnih satelita), omogućava određivanje njihovih gustoća. Podaci o gustoćama malih tijela daju informacije o njihovoj unutrašnjosti i doprinose razumijevanju udarnih procesa zaslužnih za nastanak i razvoj različitih populacija manjih tijela (npr. Britt et al. 2002). Štoviše, ako su poznate dimenzije malih tijela, albedo tijela se može odrediti pomoću jednadžbe (2.1) (npr. Bowell et al. 1989), gdje je D promjer malog tijela, p_V geometrijski albedo u vidljivom dijelu spektra, a H apsolutni sjaj malog tijela.

$$D(\text{km}) = \frac{1329}{\sqrt{p_V}} \cdot 10^{-H/5} \quad (2.1)$$

Apsolutni sjaj malog tijela jednak je iznosu prividnog sjaja kojega bi opažач izmjerio kada bi se

tijelo nalazilo na udaljenosti od jedne astronomske jedinice i od opažača i od Sunca, pri faznom kutu od nula stupnjeva (kut između opažača i izvora svjetlosti u odnosu na opažano tijelo, što je fizički nemoguće jer bi se opažatelj morao nalaziti u središtu Sunca). Može se odrediti iz mjerenja prividnog sjaja malog tijela, primjerice fotometrijskim opažanjima u vidljivom dijelu spektra.

Raspodjela albeda i njihova korelacija s taksonomskim tipovima i orbitalnim elementima malih tijela, pomažu u razumijevanju prirode nastanka i razvoja malih tijela, kao i za mineralošku klasifikaciju sastava njihovih površina. Poznavanje albeda malih tijela doprinosi razvoju i poboljšanju modela asteroidnih populacija (npr. Tedesco et al. 2005).

Direktna opažanja površine malih tijela u vidljivom dijelu spektra moguća su isključivo korištenjem svemirskih letjelica, najvećih svjetskih teleskopa ili svemirskih teleskopa, gdje je natjecanje za opažачko vrijeme vrlo kompetitivno. Stoga se današnje metode opažanja malih tijela, i određivanja njihovih fizikalnih karakteristika, najčešće temelje na indirektnim opažачkim metodama - astrometriji i fotometriji.

Uslijed brzog razvoja tehnologije posljednjih godina, postali su dostupni brzi i osjetljivi CCD detektori koji su omogućili rasprostranjeno korištenje metode zvjezdanih okultacija - metoda koja omogućuje određivanje promjera i oblika malih tijela, te otkrivanje atmosfera i drugih pojava poput prstenova, s razlučivanjima nekoliko redova veličine boljim od bilo koje druge opažачke metode sa Zemlje.

S ciljem fizikalne karakterizacije malih tijela Sunčevog sustava, za postizanje rezultata opisanih u ovoj doktorskoj disertaciji prvenstveno su korištene opažачke metode astrometrije, fotometrije i metoda zvjezdanih okultacija.

2.1 Astrometrija

Astrometrija je grana astronomije koja obuhvaća precizno određivanje položaja i gibanja zvijezda i drugih nebeskih tijela. Podaci prikupljeni astrometrijskim mjerenjima vrijedan su izvor informacija o kinematici Sunčevog sustava i naše galaksije. U modernoj astronomiji, astrometrija je posebno bitna za preklapanje podataka prikupljenih u različitim spektralnim pojasevima i unakrsnu identifikaciju objekata. Primjenu pronalazi i u mjerenjima gibanja zvijezda u svrhu istraživanja dinamike naše galaksije, te istraživanju ekstragalaktičkih objekata u kozmologiji (Walter & Sovers 2000).

Astrometrija daje kataloge referentnih položaja nebeskih tijela, na osnovu kojih se definira koordinatni sustav, s koordinatnim osima i točkom ishodišta. O preciznosti mjerenja položaja referentnih nebeskih tijela s kojima je definiran koordinatni sustav ovisi preciznost svih astrometrijskih mjerenja.

S ciljem definiranja idealnog referentnog sustava, pretpostavljeno je da svemir ne rotira. U tu svrhu IAU je usvojila međunarodni nebeski referentni okvir (eng. International Celestial

Reference Frame, ICRF), koji se temelji na 212 kompaktnih radio izvora čiji su položaji određeni opažanjima dugobazičnom radio interferometrijom (eng. Very Long Baseline Interferometriy, VLBI). Zbog izrazito velikih udaljenosti ovih referentnih radio izvora, njihova kutna gibanja na godišnjoj razini iznose manje od nekoliko lučnih mikrosekundi. Pomoću ICRF-a definiran je Međunarodni nebeski referentni sustav (eng. International Celestial Reference System, ICRS), čija nepouzdanost položaja referentnih točaka za epohu J2000 iznosi oko 20 lučnih mikrosekundi (Johnston & de Vegt 1999).

U vidljivom spektralnom području, ICRS je do nedavno bio u primjeni kroz nebeski referentni okvir Hipparcos (eng. Hipparcos Celestial Reference Frame, HCRF), kojega sačinjava podskup od ~100 000 zvijezda iz zvjezdanog kataloga Hipparcos (Kovalevsky et al. 1997). Preciznije izdanje ICRS-a u vidljivom području, Gaia nebeski referentni okvir Gaia-CRF2 (eng. Gaia Celestial Reference Frame), temeljen na opažanjima svemirske misije Gaia s preko 550 000 ekstragalaktičkih objekata za koje se vjeruje da su kvazari, ušao je u primjenu krajem 2018. godine (Gaia Collaboration et al. 2018; Lindegren et al. 2018). HCRF i Gaia-CRF2 temeljni su referentni okviri svih zvjezdanih kataloga koji se koriste u vidljivom području spektra.

2.1.1 Zvezdani katalogi

Svrha astrometrije je odrediti preciznu transformaciju između pikselnih koordinata opažачkih snimki prikupljenih teleskopom i CCD detektorom i odgovarajućih koordinata u ekvatorijalnom nebeskom sustavu. Ovaj proces započinje identifikacijom skupa referentnih zvijezda na slici za koje su poznate njezine nebeske koordinate, rektascenzija (*RA*) i deklinacija (*DEC*). Određivanjem položaja ovih referentnih zvijezda na snimci, izraženim u koordinatama piksela x i y , računa se transformacija između pikselnih koordinata i nebeskih koordinata zvijezda. Budući da je nebeska sfera zakrivljena, a CCD detektor ravna ploha, nije dovoljno koristiti linearnu transformaciju, nego se za određivanje parametara snimke najčešće koriste polinomi 3. reda.

Za preciznu transformaciju između pikselnih koordinata i odgovarajućih koordinata u ekvatorijalnom nebeskom sustavu nužan je pristup preciznim zvjezdanim katalogima. Od početka katalogiziranja zvijezda, 150-te godine pr. kr. do danas, astrometrijska preciznost je poboljšana za 4 reda veličine (Johnston & de Vegt 1999). Trenutačno najprecizniji i najpotpuniji postojeći katalog zvijezda, koji je još uvijek u izradi, s predviđenim kompletiranjem najranije 2022. godine, je Gaia-DR3 (Gaia Data Release 3) katalog (Gaia Collaboration et al. 2018). Trenutačno sadrži 1,7 milijardi zvijezda u vidljivom području spektra, graničnog prividnog sjaja $m = 21$ mag. Za oko 1,3 milijardi zvijezda, dostupni su podaci o vlastitom gibanju i paralaksi. Za preostale zvijezde trenutačno je dostupan samo položaj. Nepouzdanosti izmjerenih položaja zvijezda u katalogu Gaia prividnog sjaja do $m = 20$ mag su oko 2 lučne milisekunde (mas). Očekuje se da će nepouzdanosti u vlastitim gibanjima biti manje od 0,1 mas/godišnje za sve zvijezde sjajnije od oko $m = 15$ mag i oko 1,2 mas/godišnje za sve zvijezde slabijeg prividnog

sjaja, do $m = 20$ mag. Katalog Gaia uključuje i spektrofotometrijske podatke u tri spektralna pojasa (široki pojas vidljivog spektra nazvan G -pojas, te crveni G_{RP} - i plavi G_{BP} -pojas). Fotometrijske nepouzdanosti iznose između 0,001 mag za sjajnije zvijezde u G -pojasu, do oko 0,02 mag za zvijezde prividnog sjaja do $m = 20$ mag u crvenom i plavom pojasu (Jordi et al. 2010).

U ovoj doktorskoj disertaciji obuhvaćena su istraživanja u kojima su osim Gaia-DR2 kataloga korišteni još i njezin prethodnik, Gaia-DR1, te katalogi UCAC4, URAT-1, i NOMAD.

Opažanja za USNO CCD astronomski katalog, ili UCAC, prikupljana su u razdoblju od 1998. do 2004. godine (Zacharias et al. 2004). UCAC je prvi moderni katalog zvijezda cijelog neba koji se ne temelji na fotografskim, nego na digitalnim CCD snimkama neba. Nakon dva privremena izdanja koja nisu pokrivala cijelo nebo, prvi cjeloviti katalog, UCAC 3, objavljen je 2009. godine, a 2012. godine uslijedilo je i konačno izdanje UCAC 4. UCAC 4 obuhvaća položaje, vlastita gibanja i sjaj za preko 113 milijuna zvijezda (Zacharias et al. 2013). Nepouzdanosti položaja referentnih zvijezda u UCAC 4 katalogu iznose oko 0,02" za zvijezde prividnog sjaja od $m = 10$ -14 mag, te $<0,1$ " za zvijezde graničnog sjaja $m = 16$ mag. Sjaj zvijezda u UCAC katalogu mjereno je u nestandardnom spektralnom području, no u katalogu su sadržani fotometrijski podaci iz APASS-a (AAVSO Photometric All-Sky Survey) u pet spektralnih područja (B , V , g , r , i) za preko 50 milijuna zvijezda.

Katalog URAT-1 (USNO Robotic Astrometric Catalogue) je novo poboljšano izdanje UCAC 4 kataloga, objavljen samo 3 godine nakon UCAC 4 (Zacharias et al. 2015). Proizašao je iz prikupljenih podataka s USNO Astrografom s poboljšanim i većim CCD detektorom. URAT-1 sadrži položaje, vlastita gibanja i sjaj 228 milijuna zvijezda u rasponu sjaja između $m = 3,0$ -18,5 mag, u crvenom spektralnom R -pojasu, te obuhvaća većinu sjevernog neba. Nepouzdanosti položaja referentnih zvijezda u URAT-1 kataloga su između 0,005" i 0,04", ovisno o povijesti opažanja i sjaju zvijezda.

Katalog NOMAD je objedinjeni katalog od USNO (U.S. Naval Observatory), s položajima i sjajem za 1,1 milijardu zvijezda, sastavljen iz nekoliko izvornih kataloga uključujući Hipparcos, Tycho-2, UCAC 2 i USNO-B 1.0. Za svaku zvijezdu odabrani su najbolji astrometrijski i fotometrijski podaci iz izvornih kataloga.

2.1.2 Astrometrijska mjerenja

U području malih tijela, astrometrija ima značajnu ulogu u određivanju orbitalnih parametara i katalogiziranju malih tijela Sunčevog sustava. U istraživanjima koje pokriva ova doktorska disertacija, astrometrijska mjerenja su provedena u svrhu predviđanja zvjezdanih okultacija, te za detekciju prirodnih satelita oko udaljenih objekata bilježenjem odstupanja fotocentra od putanje objekata.

Apsolutna astrometrija provodi se određivanjem parametara najboljeg polinoma trećeg reda (parametara snimke), pomoću kojih transformiramo pikselne koordinate s CCD snimki u nebeske

koordinate. Za određivanje parametara snimke, u teoriji je potrebno najmanje tri referentne zvijezde kako bismo dobili tri jednadžbe s tri nepoznanice. S ciljem smanjenja nepouzdanosti parametara snimke, za rješavanje jednadžbi u praksi se koristi puno više referentnih zvijezda (ovisno o vidom polju i graničnoj magnitudi instrumenta). U sustavu jednadžbi s nekoliko stotina referentnih zvijezda parametri snimke određuju se metodom najmanjih kvadrata.

Položaji pojedinih zvjezdolikih izvora na snimkama određivani su pomoću alata za ekstrakciju izvora SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). U tom postupku potrebno je optimalno odabrati postavku za širinu linije na polovici visine funkcije (eng. Full Width Half Maximum, FWHM) funkcije razmazivanja točke (eng. Point Spread Function, PSF), koja se u postupku ekstrakcije prilagođava na svaki pojedini izvor.

U praksi je potrebno birati FWHM takav da alati za ekstrakciju zvijezda u potpunosti obuhvate izvore, čak i u najlošijim uvjetima atmosferske stabilnosti (seeing). Uobičajene širine PSF funkcija kreću se s FWHM između $\sim 0,4''$ za opservatorije s najboljim atmosferskim uvjetima vidljivosti, pa do $\sim 3,0''$ za lošu atmosfersku vidljivost. Stoga je uobičajena vrijednost FWHM koja se preporučuje za astrometrijsku ekstrakciju izvora $3,0'' - 3,5''$.

U rezultirajućem astrometrijskom rješenju snimke, uobičajene astrometrijske nepouzdanosti su reda veličine desetinu piksela za individualna mjerenja na pojedinim snimkama. Korištenjem velikog broja snimki i statističkom obradom podataka, nepouzdanosti se mogu smanjiti i ispod desetine piksela, što može doprinijeti primjerice u preciznom određivanju položaja okultiranih zvijezda.

Osim apsolutne astrometrije, u specifičnim slučajevima moguće je provesti i relativna astrometrijska mjerenja. Primjerice, s ciljem smanjenja nepouzdanosti astrometrijskih mjerenja gibajućih tijela Ortiz & Cikota et al. (2011) razvili su metodu pomoću koje je detektirano gibanje fotocentra transneptunskog objekta (90482) Orcus, uzrokovano gibanjem njegovog prirodnog satelita Vanth. Ista metoda primijenjena je i u detekciji i određivanju položaj prirodnog satelita Hi'iaka u orbiti oko patuljastog planeta Haumea, opisana u poglavlju 4.2 ove disertacije.

Metoda je pogodna za opažanja koja se prikupljaju instrumentima većih vidnih polja dijagonale 1-2 stupnja, kroz koja se opažani objekt prividno giba u razdoblju od najmanje nekoliko dana. Ovakva se opažanja planiraju tako da teleskop tijekom cijelog opažачkog perioda ima identičan centar vidnog polja, kako bi se kroz cijeli opažачki period koristile jednake referentne zvijezde. Stoga, za razliku od visokopreciznih apsolutnih astrometrijskih mjerenja koja se najčešće provode teleskopima velikih apertura, ova metoda omogućuje prikupljanje visokopreciznih relativnih astrometrijskih (i fotometrijskih) mjerenja teleskopima srednje i male klase.

2.2 Fotometrija

Astronomska fotometrija je grana koja se bavi mjerenjem toka zračenja svjetlosti, zračene ili reflektirane od nebeskih tijela. Tok zračenja se mjeri pomoću fotometara, koje možemo podijeliti na CCD fotometre i fotoelektrične fotometre, koji jakost zračenja mjere fotoelektričnim učinkom. Kada se kalibriraju pomoću standardnih zvijezda (ili drugih izvora svjetlosti) poznatog intenziteta zračenja i spektralnih karakteristika (boje), fotometri mogu mjeriti prividni sjaj nebeskih tijela.

Fotometrija svoju primjenu u astronomiji pronalazi primjerice u istraživanju promjena u sjaju objekata poput promjenjivih zvijezda, malih tijela Sunčevog sustava, aktivnih galaktičkih jezgri, supernova, ili za otkrivanje i istraživanje ekstrasolarnih planeta. Astronomska fotometrija može se provoditi u nekoliko različitih tehnika. Glavne fotometrijske tehnike su: (i) poredbena (diferencijalna) fotometrija, kojom se sjaj ciljanog objekta u istovremenim opažanjima uspoređuje sa sjajem obližnjih zvijezda u vidnom polju instrumenta, (ii) apsolutna fotometrija, u kojoj se vrši relativna fotometrija u višepojasnom spektralnom području, uz korištenje standardnih fotometrijskih filtera i određivanje fotometrijske nulte točke, (iii) relativna fotometrija, u kojoj se mjeri relativni odnos sjaja ciljanog objekta u odnosu na sjaj referentnog nepromjenjivog izvora, (iv) površinska fotometrija, u kojoj se vrše mjerenja prividnog sjaja netočkastih izvora poput planeta, kometa, maglica ili galaksija.

U istraživanjima obuhvaćenim u ovoj doktorskoj disertaciji, fotometrijska mjerenja su korištena prilikom određivanja perioda rotacije opažanih malih tijela Sunčevog sustava, određivanja njihovih apsolutnih sjajeva pomoću kojih se uz pretpostavku albeda može odrediti promjer, istraživanju njihovih aktivnosti, te određivanju svojstava prstenova. Sva fotometrijska mjerenja izvedena su CCD detektorima, a u analizi podataka korištene su tehnike apsolutne fotometrije i poredbene fotometrije.

2.2.1 CCD fotometrija

CCD detektor je u osnovi mreža fotoosjetljivih dioda koji istovremeno detektiraju i bilježe fotone koji dolaze iz izvora u vidnom polju optičkog instrumenta. CCD detektor se sastoji od poluvodičke ploče načinjene od silicija. Poluvodička ploča podijeljena je u veliki broj električno izoliranih kvadrata koje nazivamo pikselima. Kada se detektor izloži svjetlu, fotoni koji padaju na piksele oslobađaju elektrone uslijed fotoelektričnog efekta. Svakom pikselu pridružen je električni vodič koji djeluje poput malog kondenzatora, skupljajući te elektrone iz silicijevih piksela dok svjetlost udara u njih. Svaki je piksel spojen na središnji procesor, a naboj koji sakuplja u svakom pikselu akumulira se sve dok elektronika kamere ne očita detektor. Tijekom čitanja detektora, središnji procesor pojačava i mjeri prikupljeni naboj na svakom pikselu, te se iz analognog signala pretvara u digitalni broj pomoću analogno-digitalnog pretvarača. Analogno-

digitalni pretvarač svakom pikselu dodjeljuje digitalnu oznaku razine osvjetljenja, pomoću koje nastaje digitalni prikaz količine napunjenosti piksela u trenutku čitanja detektora, odnosno slika. Bitna karakteristika svakog CCD detektora, neophodna za pravilnu fotometrijsku kalibraciju, jest linearna korelacija vremena osvjetljavanja detektora i broja analogno-digitalnih jedinica (eng. Analog-to-Digital Unit, ADU). Konačno, fotometrijska mjerenja vrše se pretvaranjem digitalnog signala količine svjetlosti zabilježene na detektoru u fizičku mjeru sjaja usporedbom s poznatim izvorima, odnosno kalibracijom snimki.

2.2.2 Relativna fotometrija

Monokromatski tok zračenja definiran je kao

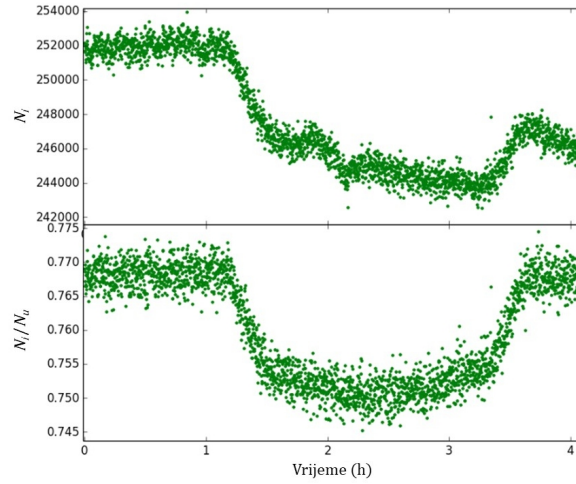
$$F_{\lambda} = \frac{\Delta E}{\Delta A \Delta t \Delta \lambda}, \quad (2.2)$$

gdje je ΔE upadajuća energija elektromagnetskog zračenja u teleskop, ΔA površina otvora objektiva na koju upada zračenje (npr. površina teleskopskog zrcala), Δt vrijeme osvjetljavanja, i $\Delta \lambda$ raspon valnih duljina elektromagnetskog spektra upadajućeg zračenja. Za ograničenje propusnosti elektromagnetskog spektra često se koriste fotometrijski filteri. Spektralni raspon kroz koji filter propušta zračenje naziva se pojasni opseg, a središnja valna duljina pojasnog opsega filtera naziva se efektivna valna duljina (Warner 2016).

Neka broj analogno-digitalnih jedinica izvora zabilježenih na detektoru bude označen s N_i . Ovaj broj je proporcionalan broju fotona koji dolazi iz izvora. Uz ograničenje propusnosti zračenja filterima, svi upadajući fotoni bit će sličnih valnih duljina, a time i energija. Stoga je broj zabilježenih ADU proporcionalan energiji zračenja iz izvora, $N_i \propto \Delta E$.

Prilikom izrade krivulje svjetlosti, čak i ako je intrinzični sjaj izvora konstantan, izmjereni broj analogno-digitalnih jedinica N_i može se mijenjati u ovisnosti o promjenama vidljivosti ili prozirnosti atmosfere. Ovi učinci korigiraju se pomoću usporednih zvijezda u blizini opažanog izvora, najčešće u istom vidnom polju instrumenta. Za usporednu zvijezdu se pretpostavlja (ili je poznato) da je nepromjenjivog sjaja. Neka broj analogno-digitalnih jedinica usporedne zvijezde zabilježenih na detektoru bude N_u . Zbog male kutne udaljenosti usporedne zvijezde i opažanog izvora, pretpostavlja se da oba dva objekta podliježu jednakim atmosferskim uvjetima (promjenama vidljivosti i prozirnosti).

Ako promjena prozirnosti ili vidljivosti u atmosferi uzrokuje prepolavljanje analogno-digitalnih jedinica opažanog izvora N_i , ADU na usporednoj zvijezdi N_u također će se prepoloviti. Stoga je odnos N_i/N_u korigiran na učinke atmosferske vidljivosti i prozirnosti. Provođenje ovakvih korekcija nad zabilježenim mjerenjima ADU izvora naziva se relativnom fotometrijom. Primjer relativne fotometrije koji prikazuje učinke atmosferske vidljivosti i prozirnosti prikazan



Slika 2.1: Relativna fotometrija zvijezde domaćina ekstrasolarnog planeta TrES-1 za vrijeme tranzita. Na gornjoj krivulji svjetlosti prikazane su izmjerene analogno-digitalne jedinice N_i zvijezde domaćina TrES-1 u ovisnosti o vremenu. U razdoblju od preko četiri sata, zvijezda je bila na zalaznoj putanji i vidljivo je postupno smanjenje izmjerenih analogno-digitalnih jedinica N_i , uzrokovano smanjenjem atmosferske prozirnosti. Nakon približno 1,5 sati opažanja, na krivulji svjetlosti vidljiv je učinak kratkotrajnog pogoršanja atmosferske vidljivosti. Na donjoj krivulji svjetlosti prikazan je omjer izmjerenih analogno-digitalnih jedinica zvijezde domaćina TrES-1 i usporedne zvijezde, N_i/N_u , u kojemu su uklonjeni učinci atmosferske prozirnosti i vidljivosti. (Izvor: Littlefair 2014)

je na slici 2.1.

2.2.3 Prividni sjaj

Relativna fotometrija pruža omjer izmjerenih analogno-digitalnih jedinica izvora i usporedne zvijezde, N_i/N_u .

Budući da je broj izmjerenih ADU izvora proporcionalan energiji izvora, te da su izvor i usporedna zvijezda opažani pod jednakim uvjetima (instrumentom otvora objektiva površine ΔA , pojasnog opsega $\Delta\lambda$ i vremenom osvjetljavanja Δt), vrijedi

$$\frac{N_i}{N_u} = \frac{F_i}{F_u}, \quad (2.3)$$

gdje je F_i/F_u omjer toka zračenja opažanog izvora, i toka zračenja usporedne zvijezde.

Sjaj nebeskog objekta, kao fizikalna veličina gustoće toka zračenja, definiran je kao

$$m = -2,5 \log_{10} F + c, \quad (2.4)$$

gdje je c proizvoljna konstanta. Za konstantu c najčešće odabiremo „nultu točku“ (eng. zero-point), odnosno određujemo konstantu za zvijezdu čiji je sjaj jednak $m = 0$ mag. Tada se može

odrediti sjaj svih ostalih zvijezda u odnosu na nju. Stoga postavljanje nulte točke predstavlja relaciju između izmjerenog toka zračenja i standardnog fotometrijskog sustava.

Fizikalna jedinica sjaja je magnituda. Razlika između dva izvora sjaja m_i i m_u iznosi

$$m_i - m_u = -2,5 \log_{10} \left(\frac{F_i}{F_u} \right) = -2,5 \log_{10} \left(\frac{N_i}{N_u} \right). \quad (2.5)$$

Stoga, ako je poznat sjaj usporedne zvijezde, gornjim relacijama može se izračunati sjaj opažanog izvora.

Tradicionalno je zvijezda Vega bila odabrana kao referentna zvijezda za određivanje nulte točke u fotometrijskom sustavu UBV . Za njezin sjaj u spektralnim pojasevima U , B i V definiran je iznos $m = 0$ mag. Taj iznos je odabran proizvoljno, i iz njega ne slijedi da bi Vega opažana kroz fotometrijske filtere U , B i V izgledala jednako svijetla (Carroll & Ostlie 2006). Tijekom godina, ispitivanjem definicije korištenjem niza drugih referentnih zvijezda identične spektralne klase, korigiran je prividni sjaj Vege u vidljivom području spektra, te danas koristimo iznos $V = 0,03$ mag. U praksi nije bilo zgodno ograničiti se samo na jednu zvijezdu za kalibraciju instrumenata. Vega nije uvijek vidljiva na noćnom nebu, i previše je sjajna za današnje osjetljive instrumente. Stoga su izrađeni dodatni katalozi sekundarnih standardnih zvijezda manjeg sjaja, homogeno raspoređenih po nebeskom svodu. Jedan od najčešće korištenih kataloga standardnih fotometrijskih zvijezda za spektralne pojaseve U , B , V , R , i I je sustav Landoltovih zvijezda (Landolt 1992), zasnovan na zvijezdama tipa A0.

2.2.4 Apsolutna fotometrija

U gornjim poglavljima opisano je mjerenje sjaja opažanih izvora izraženih u relativnim vrijednostima analogno-digitalnih jedinica detektora. Pod pojmom apsolutna fotometrija ne misli se na određivanje apsolutnog sjaja izvora, nego na postupak kalibracije fotometrijske veličine izvora sa standardnom fotometrijskom skalom.

U prvom koraku kalibracije fotometrijske skale, za izmjereni sjaj izvora N_i izražen u ADU potrebno je izračunati instrumentalni sjaj izvora m_{inst} pomoću relacije

$$m_{\text{inst}} = -2,5 \log_{10} \left(\frac{N_i}{t_{\text{exp}}} \right), \quad (2.6)$$

gdje je t_{exp} vrijeme osvjetljavanja snimke izraženo u sekundama.

Instrumentalni sjaj je mjera ADU po sekundi, no i dalje ovisi o karakteristikama instrumenta, filtera i detektora koji se koriste u prikupljanju podataka. Vezu između instrumentalnog sjaja i kalibrirane fotometrijske ljestvice dobivamo kroz proporcionalnost ADU po sekundi N_i/t_{exp} i

Tablica 2.1: Vrijednosti koeficijenata atmosferske prozirnosti k za standardne fotometrijske filtere *UBVRI* efektivnih valnih duljina λ_{eff} .

Filter	λ_{eff} (nm)	k
U	360	0,55
B	430	0,25
V	550	0,15
R	650	0,09
I	820	0,06

toka zračenja F_λ . Vrijedi

$$m_{\text{inst}} = -2,5 \log_{10}(\kappa F_\lambda) = -2,5 \log_{10} F_\lambda + c', \quad (2.7)$$

gdje je κ konstanta proporcionalnosti, a c' proizvoljna konstanta za koju najčešće odabiremo vrijednost za nultu točku. Stoga slijedi da instrumentalni sjaj od kalibriranog sjaja m_{calib} odstupa za konstantu:

$$m_{\text{calib}} = m_{\text{inst}} + m_{\text{nt}}, \quad (2.8)$$

gdje je konstanta m_{nt} nulta točka. Nulta točka je definirana kao sjaj izvora potrebnog da u jednoj sekundi detektor proizvede odziv jedne analogno-digitalne jedinice. Stoga je nulta točka ovisna o korištenom instrumentu i filteru.

Zemljina atmosfera apsorbira dio svjetlosti s izvora, a količina apsorbirane svjetlosti (atmosferska prozirnost) ovisi o kutu visine izvora nad horizontom, i to kao

$$m = m_0 + k \sec(z), \quad (2.9)$$

gdje su m_0 sjaj izvora opažan bez učinka atmosferske prozirnosti (izvan atmosfere), a m sjaj izvora opažan na površini Zemlje na zenitnoj udaljenosti z .

Dominantni izvor gubitka fotona koji stižu iz smjera izvora je Rayleighovo raspršenje na molekulama zraka. Ovaj mehanizam proporcionalan je s λ^{-4} , što znači da je smanjenje atmosferske prozirnosti više primjetno u plavoj nego u crvenoj svjetlosti. U tablici 2.1 navedene su uobičajene vrijednosti koeficijenta atmosferske prozirnosti k za standardne fotometrijske filtere skale *UBVRI*.

Standardni sjaj jednak je instrumentalnom sjaju izvora opažanog izvan Zemljine atmosfere. Posljednji korak je određivanje nulte točke i preračunavanje instrumentalnog sjaja izvora određenog na površini Zemlje, u standardni sjaj kalibriran na standardnu fotometrijsku skalu. Nulta točka m_{nt} određuje se pomoću standardne (usporedne) zvijezde poznatog standardnog sjaja. Ako je instrumentalni sjaj opažane standardne zvijezde za potpunu prozirnost ($k = 0$) atmosfere označen s $m_{std,0,i}$, tada vrijedi:

$$m_{nt} = m_{std} + m_{std,0,i}, \quad (2.10)$$

gdje je m_{std} standardni sjaj usporedne zvijezde preuzet iz kataloga standardnih fotometrijskih zvijezda. S određenom nultom točkom, standardni sjaj opažanog izvora iznosi

$$m = m_{nt} + m_{0,i}, \quad (2.11)$$

gdje je $m_{0,i}$ vrijednost instrumentalnog sjaja opažanog izvora za atmosfersku prozirnost $k=0$.

Za svaki fotometrijski filter potrebno je posebno odrediti nultu točku. Jednom određena nulta točka za pojedinu kombinaciju instrumenta, filtera i detektora, ona bi trebala ostati nepromijenjena. No na duljim vremenskim skalama, nulta točka može se mijenjati uslijed nakupljanja prljavštine (npr. sloja prašine na optici) ili degradacije premaznih slojeva na optici.

Prilikom izvođenja relativne fotometrije nije potrebno koristiti koeficijent atmosferske prozirnosti jer se opažani izvor i usporedne zvijezde uvijek opažaju pri jednakim atmosferskim uvjetima. Zbog toga se apsolutna fotometrija izvodi u slučajevima kada se u vidnom polju instrumenta ne nalazi dovoljno referentnih zvijezda, ili kada se izvor ne opaža istovremeno kada i usporedna zvijezda.

2.2.5 Poredbena fotometrija

Poredbena fotometrija je najčešće korištena fotometrijska metoda, posebno pogodna za opažanje vremenski ovisnih promjena u sjaju. Poredbena fotometrija je metoda kojom se sjaj ciljanog objekta u istovremenim opažanjima uspoređuje sa sjajem obližnjih (u sjaju nepromjenjivih) zvijezda u vidnom polju instrumenta. Pri tome se određuje poredbeni sjaj ciljanog objekta, kojega čini razlika između instrumentalnog sjaja ciljanog objekta i instrumentalnog sjaja referentnog objekta.

Instrumentalni sjaj definiran je u jednadžbi (2.7). Tok zračenja izvora može biti izražen u proizvoljnoj fizikalnoj veličini. Kod CCD fotometrije, ta veličina najčešće je zbroj izmjerenih analogno-digitalnih jedinica grupe piksela koji obuhvaćaju opažani izvor.

Poredbeni sjaj definiran je kao:

$$\Delta m = m_i - m_u \quad (2.12)$$

gdje je Δm poredbeni sjaj, m_i instrumentalni sjaj opažanog izvora, a m_u instrumentalni sjaj usporedne zvijezde.

S ciljem povećanja fotometrijske preciznosti, današnji alati i bogati fotometrijski zvjezdani katalozi, umjesto korištenja jedne usporedne zvijezde, omogućuju istovremeno korištenje skupa usporednih zvijezda u vidnom polju. U tom slučaju, konačna vrijednost poredbenog sjaja Δm opažanog izvora dobiva se iz srednje vrijednosti usporednih sjajeva određenih za opažani izvor sa svakom od korištenih usporednih zvijezda:

$$\Delta m = \left[\sum_{j=1}^n (m_i - m_{uj}) \right] n^{-1}, \quad (2.13)$$

gdje je n broj usporednih zvijezda. Primjer krivulje svjetlosti izveden poredbenom fotometrijom prikazan je na slici 2.2. Poredbena fotometrijska metoda pogodna je za mjerenje promjena sjaja u ovisnosti o vremenu do reda veličine 0,01 mag. Korištenjem ove fotometrijske metode izvedena su sva mjerenja rotacijskih krivulja sjaja opisana u ovoj doktorskoj disertaciji.

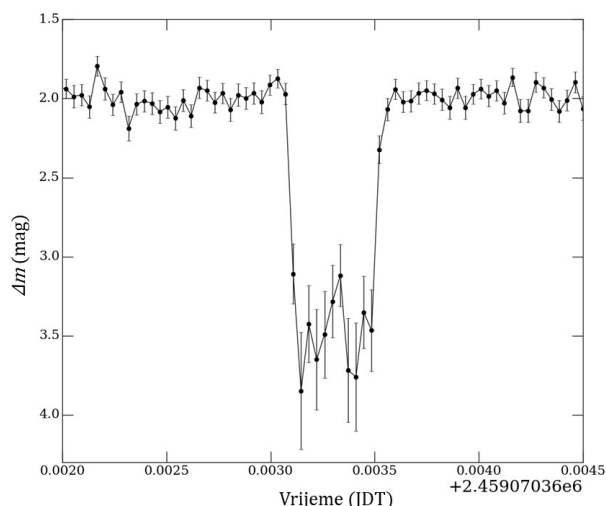
2.2.6 Fotometrijska mjerenja CCD detektorom

Astronomska fotometrija svodi se na mjerenje količine fotona s nebeskih objekata primljene po jedinici vremena. Najčešće korištene fotometrijske metode koje se provode CCD detektorom su: (i) aperturna fotometrija, i (ii) PSF fotometrija.

U aperturnoj fotometriji mjeri se ukupni tok zračenja unutar (najčešće kružne) aperture, od kojega se oduzima pozadinski tok zračenja neba. PSF fotometrija provodi se u slučaju kada je vidno polje prenapučeno zvijezdama, poput kuglastih skupova ili Mliječne staze, u kojima se PSF funkcije pojedinih zvijezda mogu preklapati. U tom slučaju ne koristi se apertura, nego se sjaj određuje iz PSF funkcija prilagođenih na pojedine izvore.

U fotometrijskoj analizi astronomskih izvora opisanih u ovoj disertaciji korišteni su IRAF-ov programski paket DAOPHOT (Stetson et al. 1990), te Astropy paket Photutils (Bradley et al. 2019). Sva fotometrijska opažanja u ovoj disertaciji analizirana su metodom aperturne fotometrije.

Na slici 2.3 lijevo gore prikazani su dijelovi fotometrijske aperture. Apertura se sastoji od tri dijela: unutrašnja apertura, koja okružuje nebeski objekt nad kojim se vrši fotometrijsko mjerenje, naziva se „apertura zvijezde“ ili „mjerni otvor“. Oko aperture zvijezde nalazi se prsten



Slika 2.2: Primjer krivulje svjetlosti izveden metodom poredbene fotometrije. Krivulja sjaja prikazuje okultacijski događaj transneptunskog objekta 2002 MS4, opažan 8. kolovoza 2020. godine oko 20:42:40 UT, s 1,06 m f/15 teleskopom Opservatorija Hvar i ASI294MC Pro kamerom. Na y-osi prikazana je srednja vrijednost usporednih sjajeva određenih za opažani izvor sa svakom od korištenih usporednih zvijezda (Δm), određena po jednadžbi (2.13). Korišteno vrijeme osvjetljavanja snimki je 3 s. Zbog malog vidnog polja od $2,8' \times 4,1'$, korištene su samo 2 usporedne zvijezde. Na x-osi prikazano je vrijeme izraženo u julijanskim danima. Računalni sat je kalibriran pomoću vremenskog NTP servera korištenjem softvera Dimension 4. (Zasluga: Cikota S., Cikota A. Ruždjak D., 2020.)

kojega nazivamo „međuprstor“. Međuprstor je razmak između aperture zvijezde i vanjskog prstena kojega nazivamo „prsten neba“. Prsten neba vanjski je prsten fotometrijske aperture unutar kojeg se nalazi signal pozadinskog toka zračenja neba.

Zvjezdanom aperturom bilježe se analogno-digitalne jedinice za sve piksele unutar odabranog polumjera. Prilikom opažanja sjajnih objekata vrijeme osvjetljavanja i/ili fokus moraju biti prilagođeni tako da maksimalna razina zasićenja piksela ne prelazi oko $\sim 80\%$. Opažanja izvora u kojima su pikseli saturirani nisu iskoristiva za provođenje fotometrijskih mjerenja.

Odabir polumjera zvjezdane aperture utječe na razinu pozadinskog šuma. Odabirom previše malog polumjera zvjezdane aperture izostavlja se dio ukupnog toka zračenja s nebeskog objekta kojega želimo izmjeriti, dok odabirom velikog polumjera, kojim je obuhvaćeno previše pozadinskog neba, slabi izmjereni tok zračenja. Na slici 2.3 desno gore prikazan je primjer pravilno postavljene fotometrijske aperture prilikom vršenja fotometrijskih mjerenja.

Optimalni polumjer zvjezdane aperture može se odrediti se eksperimentalnim putem, kao najmanji polumjer aperture pri kojemu se može postići maksimalni tok zračenja; ili analizom poprečnog profila izvora kao prikazanog na slici 2.3 dolje, i odabirom polumjera koji obuhvaća područje u kojemu se profil izvora stapa s pozadinskim šumom neba. Nakon što se odredi polumjer aperture, ista apertura se koristi za mjerenje sjaja svih izvora na snimci. U praksi, promjer zvjezdane aperture trebao bi biti 3 do 4 puta veći od prosječnih FWHM vrijednosti PSF funkcija svih izvora nad kojima se provode mjerenja. Pri tome je dobro birati referentne izvore

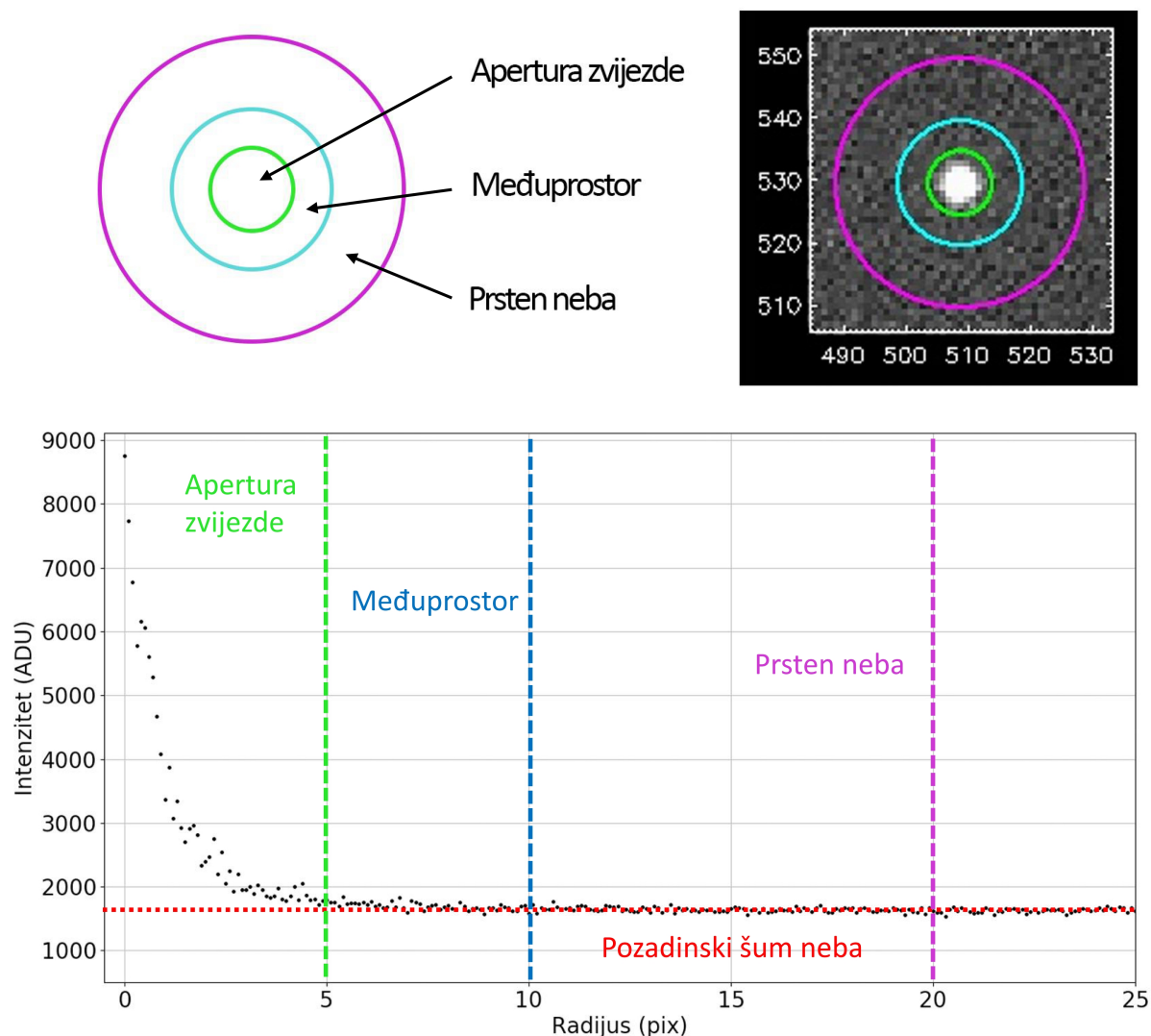
koji su sličnog sjaja ciljnom izvoru nad kojim se provodi fotometrijsko mjerenje.

Svaki piksel unutar zvjezdane aperture sadrži doprinos toka zračenja nebeskog izvora i pozadinskog neba. Kako bi vjerodostojno bio određen tok zračenja izvora, potrebno je odrediti koliki je doprinos pozadinskog neba i oduzeti ga. U kalibriranim snimkama, s oduzetim šumom iščitavanja (eng. „bias“) i tamnog polja (eng. „dark field“), te primijenjenim ravnim poljem (eng. „flat field“), i pod pretpostavkom da je nebo unutar vidnog polja homogenog intenziteta zračenja, pozadinski šum moguće je precizno odrediti kao srednju vrijednost svih piksela pozadinskog neba na snimci. Zbog nehomogenosti koje mogu postojati na snimkama, često se tok zračenja neba određuje u izravnoj blizini svakog od fotometrijskih izvora korištenjem prstena neba. Polumjer i debljinu prstena neba treba odabrati tako da sadrži isključivo nebo bez doprinosa drugih izvora. Određivanjem srednje vrijednosti analogno-digitalne jedinice svakog piksela unutar prstena neba definira se tok zračenja pozadinskog neba (pozadinski šum neba) koji se u fotometrijskoj analizi oduzima od svakog piksela unutar aperture zvijezde. Zbroj analogno-digitalnih jedinica svih piksela unutar zvjezdane aperture u konačnici čini najbolju procjenu toka zračenja izvora. S ciljem dobivanja većeg omjera signala i šuma (SNR), dobro je birati što veće debljine prstena neba. Obuhvaćanjem što više piksela prstenom neba, srednja vrijednost pozadine neba bit će preciznije određena.

2.3 Metoda zvjezdanih okultacija

Do sada najprecizniji podaci o fizikalnim karakteristikama malih tijela, uključujući informacije o njihovim dimenzijama, oblicima, i površinskim svojstvima, prikupljeni su direktnim opažajkim metodama međuplanetarnih svemirskih letjelica. Nedostatak ovakvih opažanja, osim što su izrazito skupa, jest što su izvediva za statistički vrlo ograničen uzorak malih tijela. Za prikupljanje statistički značajnog uzorka opažanja malih tijela, još uvijek smo ograničeni na metode opažanja s velikih udaljenosti.

Značajan uzorak promjera asteroida i njihovih albeda prikupljen je primjerice fotometrijskim opažanjima u termalnom infracrvenom dijelu spektra ($\sim 12 - 100 \mu\text{m}$) pomoću Infracrvenog astronomskeg satelita IRAS (Tedesco 1995; Tedesco et al. 2002). Međutim, poznato je da promjeri malih tijela određeni iz podataka IRAS-a pomoću standardnog toplinskog modela (Lebofsky & Spencer 1989), čiji rezultati ovise o vrijednostima parametara modela, zbog nepreciznih procjena apsorpcije i refleksija, površinskih efekata i toplinske inercije, podliježu sustavnim pogreškama koje nisu zanemarive. Stoga je za kalibraciju parametara toplinskog modela (Morrison & Lebofsky 1979) nužno prikupiti statistički relevantan uzorak pouzdanih asteroidnih promjera. U posljednjih pola stoljeća, zahvaljujući razvoju metode određivanja fizikalnih karakteristika malih tijela opažanjem zvjezdanih okultacija, omogućena je kalibracija radiometrijskih promjera asteroida (određivanje promjera asteroida mjerenjem termalne emisije).



Slika 2.3: Na slici lijevo gore prikazani su dijelovi fotometrijske aperture koja se sastoji od aperture zvijezde koja okružuje nebeski objekt nad kojim se vrši fotometrijsko mjerenje, međuprostora koji čini razmak između aperture zvijezde i prstena neba kojim se prikupljaju mjerenja pozadinskog toka zračenja neba. Na slici desno gore prikazan je primjer fotometrijske aperture nacrtan iznad snimke izvora prilikom provođenja fotometrijskih mjerenja. Na donjem dijagramu prikazan je poprečni profil nebeskog izvora sa slike gore desno, s označenom aperturom zvijezde polumjera 5 piksela, međuprostorom debljine 5 piksela i prstenom neba debljine 10 piksela. Isprekidanom vodoravnom crvenom linijom označen je pozadinski šum neba, koji se određuje pomoću prstena neba.

Zvezdana okultacija je pojava pri kojoj nebesko tijelo, primjerice malo tijelo Sunčevog sustava, kratkotrajno prekrije zvijezdu. Unaprijed planiranim rasporedom opažača uzduž sjene tijela na Zemljinoj površini, te njihovim istovremenim opažanjem okultacije u kojemu se precizno mjere vremena pomračenja zvijezde, odnosno trajanja okultacije, moguće je određivanje promjera i oblika tijela, te otkrivanje atmosfere i drugih pojava poput prstenova ili prirodnih satelita. Razlučivanje ove metode je za nekoliko redova veličine bolje od bilo koje druge opažачke metode izvedive s površine Zemlje (npr. Sicardy et al. 2011).

Prvo uspješno opažanje zvezdane okultacije s ciljem istraživanja fizikalnih karakteristika malih tijela provedeno je 24. siječnja 1975. godine, kada je tim od 9 opažača iz Nove Engleske, SAD, uspješno odredio poprečni presjek (obris) asteroida (433) Eros, koji je okultirao zvijezdu κ Geminorum ($m = 3,6$ mag). Iz opažanja je određen izduljeni oblik Erosa dimenzija 14.8 km x 6.9 km (O’Leary et al. 1976). U tom trenutku opažanje zvezdanih okultacija bilo je u samim začetcima, a o fizikalnim karakteristikama malih tijela Sunčevog sustava, kojima čak niti najveći zemaljski teleskopi nisu mogli razlučiti prividne promjere, nije se znalo mnogo.

Prva organizirana ekspedicija opažanja zvezdane okultacije provedena je 29. svibnja 1983. godine, kada je asteroid (2) Pallas putanjom preko juga Sjedinjenih Američkih Država, sjevernog Meksika i sjevernih dijelova Kariba okultirao spektroskopski dvojni zvijezdu 1 Vulpeculae (Dunham et al. 1990).

Razvojem CCD tehnologije i sve većom tržišnom pristupačnosti osjetljivih astronomskih kamera, u kombinaciji s pristupačnosti informacija, bitnu ulogu u opažanju zvezdanih okultacija malim tijelima, uz profesionalne astronome danas imaju i astronomi amateri. U svrhu okupljanja međunarodne astronomske profesionalne i amaterske zajednice s ciljem promicanja i sustavnog prikupljanja okultacijskih opažanja, 1983. godine osnovana je volonterska znanstvena i istraživačka organizacija okultacijskih opažanja International Occultation Timing Association - IOTA (<https://occultations.org/>).

Dok je IOTA usmjerena na informiranje i educiranje najšire astronomske zajednice, aktivne prvenstveno u opažanjima okultacija uzrokovanih asteroidima glavnog asteroidnog pojasa, iz akademske zajednice proizlaze programi „RECON“ (<http://tnorecon.net/>) Southwest Research Instituta (SAD), te europski projekt „Lucky Star“ (<https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>) pod vodstvom Opservatorija u Parizu s članovima kolaboracije iz Meudona (Francuska), Granade (Španjolska) i Rio de Janeira (Brazil); koji su fokusirani na istraživanje fizikalnih karakteristika dalekih objekata - kentaura i transneptunskih objekta.

2.3.1 Učestalost okultacijskih događaja

Zbog izrazito malih kutnih promjera malih tijela Sunčevog sustava, manjih od 0,1 lučne sekunde (posebice kentaura i transneptunskih objekata u vanjskim dijelovima Sunčevog sustava), zvezdane okultacije malim tijelima rijetka su pojava.

Tanga & Delbo (2007) izveli su numerički model pomoću kojega je procijenjena teorijska učestalost zvjezdanih okultacija za jedinstveni geografski položaj, uzimajući u obzir prividne sjajeve okultiranih zvijezda i promjere malih tijela.

Za reprodukciju učestalosti okultacijskih događaja za asteroide različitih veličina, potrebno je procijeniti koliko često se zvijezda okultira svakim asteroidom u određenoj jedinici vremena (npr. jedan dan). Ta brojka ekvivalentna je broju zvijezda sadržanih u području neba prekrivenog obrisima svih asteroida u određenom vremenskom intervalu, vidljivo za generičkog opažača na Zemlji. To područje neba može se izračunati uzimajući umnožak prividnog kutnog promjera asteroida, 2θ i prijedene kutne udaljenosti na nebu u određenom vremenskom razdoblju (npr. jedan dan). Gustoće zvijezda koje se nalaze na području neba prekrivenom obrisima asteroida u intervalu od jednog dana, preuzete su iz realnog galaktičkog modela korištenog u Crosta & Mignard (2006).

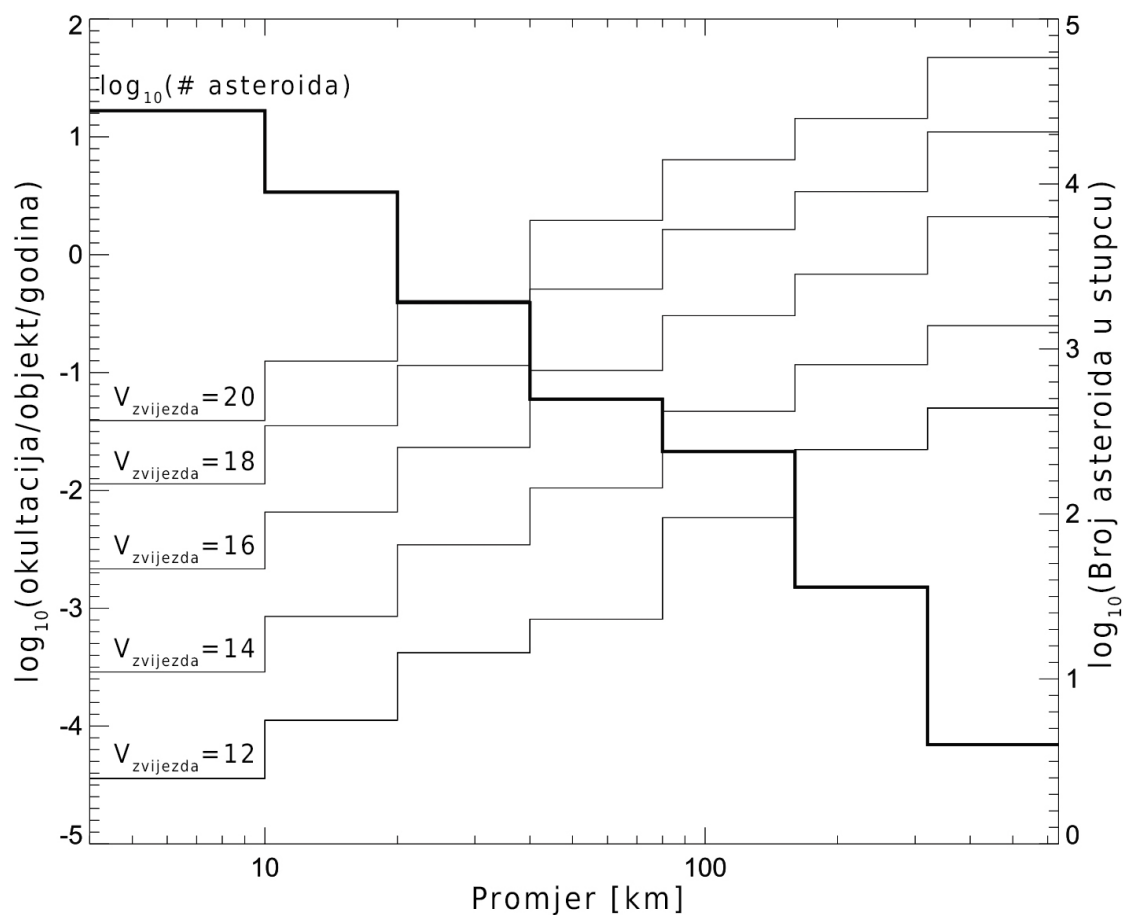
Tanga & Delbo (2007) pretpostavili su da je opažatelj smješten u geocentru. Ova pretpostavka vrijedi bez smanjenja općenitosti jer statistika vrijedi za bilo koju lokaciju na površini Zemlje. Broj modelom dobivenih okultacija podijeljen je s faktorom 2 kako bi bila uzeta u obzir polovica nebeske sfere, vidljive u slučaju teorijskog, geometrijski ravnog horizonta. Zbog poteškoća u opažanju nebeskih objekata na nebeskim visinama nisko nad horizontom, ovaj faktor je u praksi nešto veći.

Prividne polumjere asteroida θ , Tanga & Delbo (2007) određivali su pomoću podataka Infracrvenog Astronomskog Satelita (eng. Infrared Astronomical Satellite) IRAS, sadržanih u bazi podataka SIMPS (Supplemental IRAS Minor Planet Survey).

Baza SIMPS sadrži izmjerene promjere za približno samo 2200 asteroida Tedesco et al. (2002), stoga su promjeri za većinu tijela u ovom modelu izračunati pomoću relacije (2.1) iz apsolutnih sjajeva asteroida H (dostupnih u katalozima orbitalnih parametara malih tijela, poput MPCORB ili AstOrb), uz pretpostavljeni geometrijski albedo u vidljivom dijelu spektra. Budući da je raspon albeda malih tijela Sunčevog sustava vrlo širok (0,03-0,50), a poznato je da je u prosjeku albedo malih tijela obrnuto proporcionalan njihovim heliocentričnim udaljenostima, s ciljem dodjeljivanja stvarnih albeda, mala tijela podijeljena su u 3 kategorije u ovisnosti o njihovim udaljenostima, kao što je opisano u Tedesco et al. (2005).

Za svaki od simuliranih događaja, uz korištenje kutnog promjera tijela i prividnog gibanja u epohi okultacije, izračunato je maksimalno trajanje okultacije τ_0 , prividni sjaj asteroida m_a , i pad sjaja tijekom okultacije.

Dobiveni rezultati modela iz Tanga & Delbo (2007) prikazani su na slici 2.4. Prikazan je prosječni broj zvjezdanih okultacija koji se dogodi za jedan objekt, na jednoj lokaciji, u razdoblju od jedne godine. Jasno je da uzimanje u obzir manje sjajnih zvijezda snažno povećava vjerojatnost događaja okultacije. Model predviđa da bilo koje malo tijelo veće od 20–30 km najmanje jednom godišnje okultira zvijezdu sjaja 20. prividne magnitude.



Slika 2.4: Statistika okultacijskih događaja opažanih s jedne lokacije, prikazana za različite granične vrijednosti prividne magnituda. Tanka linija prikazuje broj okultacija po objektu tijekom jedne godine kao funkciju promjera asteroida. Granične vrijednosti prividnih magnituda naznačene su za svaku pojedinu tanku liniju. Debela linija i njoj pripadajuća ljestvica na desnoj y-osi prikazuje broj asteroida za svaki stupac u simuliranoj populaciji. (Izvor: Tanga & Delbo 2007)

U nastavku će biti diskutirane metode opažanja zvjezdanih okultacija, gdje će biti posebno analizirana mogućnost postizanja visokih omjera signala i šuma. U praksi nije moguće opažati okultacije zvijezda prividnog sjaja $m > 18$ mag. Uz korištenje danas pristupačnih teleskopa promjera objektiva između 0,2 m i 1,0 m, granične vrijednosti prividnih sjajeva su reda veličine $m = 14-16$ mag, što po objektu rezultira s $\sim 5 \cdot 10^{-4}$ do 0,02 okultacijskih događaja godišnje. Stoga učestalost okultacijskih događaja koji se mogu detektirati s jedne lokacije ovisi i o karakteristikama instrumenata koji se koriste. Uspješnost opažanja ovisi i o vanjskim faktorima, poput atmosferske vidljivosti i meteoroloških prilika.

2.3.2 Predviđanja okultacija

Predviđanja okultacijskih događaja zahtijevaju precizna mjerenja položaja zvijezda, kao i precizne efemeride malih tijela. Opažanje okultacija zbog velikih nepouzdanosti zvjezdanih kataloga, u prošlosti je obilježeno lošom preciznosti u predviđanju putanje sjene asteroida na površini Zemlje. Dostupnošću preciznih kataloga zvijezda u posljednjih 20 godina poboljšana je stopa uspjeha u detektiranju multi-tetivnih okultacijskih događaja (npr. Dunham et al. 2002; Zacharias et al. 2013), no tek za tijela s promjerima većim od oko 100 km.

Tek u posljednjih nekoliko godina, astrometrijska preciznost efemerida malih tijela, kao i napredak u preciznosti kataloga zvijezda kroz misiju Gaia, doveo je do brzog povećanja broja uspješnih detekcija okultacijskih događaja, otvarajući mogućnost upotpunjavanja baze dimenzija i albeda malih tijela Sunčevog sustava, i to već za objekte promjera iznad ~ 10 km. Današnja nepouzdanost astrometrijskih podataka u katalogu zvijezda Gaia, koji sadrži zvjezdane položaje, smjerove i iznose njihovih vlastitih gibanja i podatke o paralaksama, doseže 0,1-0,2 lučnih milisekundi (Gaia Collaboration et al. 2016, 2018).

Za razliku od kataloga zvijezda, efemeride malih tijela manje su precizne jer ovise o kvaliteti astrometrijskih mjerenja koja se koriste za određivanje njihove orbite. Za udaljene objekte Sunčevog sustava, trenutačna preciznost efemerida je reda veličine nekoliko desetaka lučnih milisekundi. Stoga su neprecizne efemeride malih tijela trenutačno glavni izvor nepouzdanosti u predviđanjima okultacijskih događanja. Odstupanje od npr. 10 lučnih milisekundi objekta na udaljenosti Jupitera (5,2 a.j.) odgovara nepouzdanosti od 35 km na površini Zemlje. Isto odstupanje na udaljenosti kentaura Chariklo (15 a.j.) odgovara nepouzdanosti od 100 km, na udaljenosti Neptuna (30 a.j.) 200 km, te na udaljenosti patuljastog planeta Eris (97 a.j.) 700 km.

Za poboljšanje efemerida malih tijela u svrhu predviđanja okultacijskih događaja, organiziraju se koordinirane kampanje astrometrijskih mjerenja malih tijela izravno prije okultacije. Ograničavanje područja na Zemlji nad kojim prolazi sjena asteroida, doprinosi učinkovitosti organizacije mreže opažачa uzduž sjene. Osim apsolutne astrometrije, u ekstrapolaciji položaja dalekih objekata sporijeg prividnog gibanja, mogu se koristiti i tehnike relativne astrometrije (Ortiz & Cikota et al. 2011).

Desmars et al. (2019) opisali su moguće metode poboljšanja preciznosti efemerida malih tijela korištenjem Gaia kataloga. Posebno je zanimljivo provođenje astrometrijskih mjerenja iz prethodnih okultacijskih opažanja. Naime, kroz prethodna okultacijska opažanja precizno su bilježena vremena pojedinih okultacijskih događaja. Uz pomoć kataloga zvijezda misije Gaia, poznavajući precizne položaje i vlastita gibanja zvijezda, moguće je odrediti položaj malog tijela u trenutku okultacije do na nepouzdanost zvjezdanog položaja, odnosno 0,1-0,2 lučne milisekunde.

Osim metode korištenja prethodnih okultacijskih opažanja, orbite malih tijela mogu se poboljšati i ponavljanjem astrometrijskih mjerenja malih tijela na pohranjenim snimkama u bazama podataka, ali ovaj puta uz korištenje referentnih kataloga zvijezda misije Gaia za rješavanje snimki (pogledati poglavlje 2.1.2). Nedostatak ove metode jest nužna ponovna obrada izvornih snimki pohranjenih u bazama podataka pojedinih opservatorija, koje nisu uvijek dostupne ili se ne čuvaju dugoročno.

Direktna opažanja malih tijela svemirskom letjelicom Gaia također mogu dovesti do poboljšanja njihovih orbitalnih parametara, no ti podaci bit će dostupni tek u četvrtom izdanju kataloga zvijezda, Gaia-DR4, koje će biti objavljeno u drugoj polovici 2022. godine.

Trenutna nepouzdanost efemerida za sva katalogizirana mala tijela dostupna je u bazi orbitalnih parametara AstOrb (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>). Nepouzdanost efemerida malih tijela u ovom izvoru izračunava se postupkom opisanim u Muinonen & Howell (1993), a izražava se parametrima „Current Ephemeris Uncertainty“ (CEU) i „Peak Ephemeris Uncertainty“ (PEU). CEU predstavlja trenutnu nepouzdanost efemerida, koja označava apsolutnu vrijednost trenutne 1σ nepouzdanosti efemerida u lučnim sekundama. PEU označava vrijednost idućeg maksimuma nepouzdanosti efemerida, uz naznačen datum pojavljivanja. Efemeride malih tijela dostižu maksimalne nepouzdanosti dok se tijelo nalazi u blizini opozicije ili konjunkcije (zbog izrazito brzih, odnosno sporih kutnih gibanja u blizini opozicije ili konjunkcije). Stoga datum pojavljivanja maksimalne nepouzdanosti istovremeno ukazuje na najbolji trenutak za provođenje novih astrometrijskih mjerenja tijela. Uz idući maksimum nepouzdanosti PEU, u AstOrb bazi navodi se i maksimalna vrijednost PEU tijekom perioda od sljedećih 10 godina, s datumom pojavljivanja.

Sve ove vrijednosti se konstantno ažuriraju epohom orbitalnih elemenata. Metoda računanja trenutne nepouzdanosti efemerida CEU daje pouzdane procjene nepouzdanosti za objekte s duljim opažачkim lukovima, primjerice multi-opozicijske asteroide glavnog asteroidnog pojasa, a manje je pouzdana za Zemlji bliske objekte i tijela koja imaju slabo utvrđene orbite.

Vrijednost trenutne nepouzdanosti efemerida CEU odnosi se na duljinu velike osi elipse nepouzdanosti. Elipsa nepouzdanosti na nebu predstavlja područje nepouzdanosti položaja 1σ , u kojemu se objekt može naći. Ova os često leži na krivulji prividnog gibanja, ili pod malim kutom u odnosu na nju. Stoga će orijentacija elipse nepouzdanosti imati glavni učinak na

nepouzdanost epohe događaja, a ne na put sjene u smjeru okomitom na kretanje sjene malog tijela. Iako nepouzdanost u epohi prevladava u opažanju okultacijskog događaja, u praksi, pomak predviđene epohe nadoknađuje se produljenim trajanjem opažanja.

Dodatni ograničavajući faktor u predviđanju zvjezdanih okultacija su prividni kutni promjeri malih tijela. Okultacijske događaje malih tijela čija je nepouzdanost efemerida veća od njihovih prividnih kutnih veličina, zbog male vjerojatnosti događaja teško je predviđati. Kao statistički pokazatelj trenutne predvidivosti okultacijskih događaja koristi se omjer trenutne nepouzdanosti efemerida CEU i prividnog kutnog polumjera malih tijela θ . Prividni kutni promjeri malih tijela računaju se iz procjene njihovog apsolutnog sjaja, kao opisano u poglavlju 2.3.1, te poznavanjem njihovih udaljenosti.

2.3.3 Opažanje zvjezdanih okultacija

Opažanje okultacijskih događaja temelji se na mjerenju promjene toka zračenja u vremenu, odnosno, brzim fotometrijskim mjerenjima jednog nerazlučenog svjetlosnog izvora sastavljenog od slike zvijezde i malog tijela. Tijekom okultacije, pad toka zračenja dogodi se dok malo tijelo prekriva zvijezdu. Trajanje okultacijskog događaja obično je raspona od nekoliko sekundi, do nekoliko desetaka sekundi, ovisno o dimenzijama malog tijela i geometriji događaja.

Pad sjaja

Najpovoljniji okultacijski događaji uključuju sjajnu zvijezdu i tamni asteroid. U tom slučaju pad toka zračenja može iznositi i nekoliko magnituda. Kako bismo označili sjaj malog tijela (asteroida), okultirane zvijezde, te sjaj nerazlučene slike zvijezde i malog tijela neposredno prije i nakon okultacijskog događaja, koristit ćemo oznake m_a , m_z , i m_{az} . Za njima odgovarajuće izmjerene signale izražene u analogno-digitalnim jedinicama, koristit ćemo oznake F_a , F_z , i F_{az} respektivno.

Za opažanje okultacijskih događaja koriste se detektori koji imaju mogućnost uzorkovanja s vremenima osvjetljavanja znatno kraćim od maksimalnog trajanja okultacijskog događaja, te koji su dovoljno osjetljivi za provođenje preciznih fotometrijskih mjerenja pada toka zračenja tijekom okultacije.

Jedno opažanje okultacijskog događaja neće dati izravno mjerenje veličine malog tijela jer izmjerena okultacijska tetiva (jedno opažanje uzduž putanje sjene) ne mora nužno odgovarati najvećoj projiciranoj veličini malog tijela. Stoga se unaprijed planira mreža opažača postavljena okomito na smjer gibanja sjene, kako bi iz opažanja različitih okultacijskih tetiva mogla biti stvorena slika o trodimenzionalnom obliku i orijentaciji malog tijela.

Za fotometrijska mjerenja okultacijskog događaja možemo definirati omjer signala i šuma SNR kao odnos pada u signalu ($F_{az} - F_a$), i fotometrijske nepouzdanosti signala za vrijeme

okultacijskog događaja $\sigma_{F(a)}$, te neposredno prije i nakon okultacijskog događaja $\sigma_{F(az)}$:

$$SNR = \frac{F_{az} - F_a}{\sqrt{\sigma_{F(a)}^2 + \sigma_{F(az)}^2}}. \quad (2.14)$$

Za vrijeme opažanja okultacijskog događaja, tijekom prikupljanja podataka uobičajeno je odabrati vrijeme osvjetljavanja (ekspoziciju) t_m , takvo da SNR bude najmanje $\sim 3-5$.

Pod pretpostavkom da je nepouzdanost u postavljenom vremenu osvjetljavanja CCD detektora zanemarivo mala, t_m možemo koristiti kao procjenu vremenske nepouzdanosti okultacijskog događaja, tj. $\sigma_\tau = t_m$. Budući da je maksimalno trajanje okultacijskog događaja proporcionalno promjeru malog tijela D , omjer $\sigma_D = \sigma_\tau / \tau_0$ (gdje τ_0 predstavlja maksimalno trajanje okultacijskog događaja na središnjoj liniji), predstavlja relativnu pogrešku, očekivanu u procjeni promjera malog tijela.

Primijetimo da je, sukladno definiciji za SNR u izrazu (2.14), uvijek moguće pronaći odgovarajuće vrijeme osvjetljavanja takvo da SNR bude najmanje $\sim 3-5$, no to vrijeme u nekim slučajevima bit će usporedivo, ili značajno dulje, od maksimalnog trajanja okultacijskog događaja. U slučajevima kada je $t_m \geq \tau_0$, okultacijski događaj nije moguće opaziti. Upravo ovo ograničenje razlog je zašto opažanje okultacija često zahtijeva teleskope većih promjera, ili nas ograničava na opažanje okultacijskih događaja sa sjajnim okultacijskim zvijezdama.

Statistika svih do sada prikupljenih opažanja okultacija pokazuje da je većina opažanja provedeno sa zvijezdama granične vrijednosti prividnog sjaja između $V = 12-13$ mag. S ovim ograničenjem u sjaju, učestalost okultacijskih događaja svodi se na 0,1 događaj/objektu u godini. Uzevši dodatno u obzir uvjet minimalnog trajanja okultacijskog događaja, i minimalan pad toka zračenja tijekom okultacije, dobri kandidati za opažanje malim teleskopima su tek nešto više od 1000 malih tijela većih od oko 40 km.

Granične vrijednosti prividnog sjaja okultiranih zvijezda, kao i vremenskog razlučivanja opažanja okultacijskih događaja, moguće je poboljšati korištenjem teleskopa većih promjera, visoko osjetljivih CCD detektora, ili fotomultiplikatora s visokim frekvencijama uzorkovanja. U svrhu unapređenja opažačkih metoda zvjezdanih okultacija, kao i dodatnog korištenja okultacija u svrhu određivanja fizikalnih karakteristika okultiranih zvijezda, u poglavlju 5 diskutirano je moguće korištenje atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa kolaboracije MAGIC, s promjerima zrcala od 17 m i kamerom načinjenom od sačasto poslaganih fotomultiplikatora s visokim frekvencijama uzorkovanja.

Ciklus i vrijeme osvjetljavanja

CCD detektori između dvije uzastopne snimke osvjetljavanja, dio vremena moraju utrošiti na iščitavanje detektora i pohranjivanje pojedinih snimki, tzv. prazan hod. Kada se provode

opažanja s visokim frekvencijama uzorkovanja, odnos utrošenog vremena na prazan hod, u odnosu na efektivno vrijeme osvjetljavanja postaje značajan.

Stoga uz pojam „ekspozicije“, pod kojim podrazumijevamo efektivno vrijeme osvjetljavanja, definiramo i pojam „ciklusa“, pod kojim podrazumijevamo zbroj ekspozicije i praznog hoda. U slučaju korištenja CCD detektora s dugotrajnim praznim hodom, obično se odabire ekspozicija takva da ona iznosi najmanje ~80 % ukupnog trajanja ciklusa. Na primjer, za CCD detektor s praznim hodom od 1 sekunde, preporučljivo je koristiti ekspoziciju od 5 sekundi.

Prazan hod može se smanjiti korištenjem usrednjenog grupiranja (eng. binning) piksela 2×2 ili 3×3 , ili iščitavanjem samo jednog manjeg odabranog područja detektora (područja interesa). Odabrano područje interesa detektora, osim okultirane zvijezde, treba obuhvaćati još najmanje jednu ili dvije referentne zvijezde koje se mogu koristiti za provođenje fotometrijskih mjerenja.

Priprema opažanja

Priprema opažanja okultacijskog događaja uključuje snimanje zvjezdanog polja nekoliko noći prije okultacije u svrhu identifikacije okultirane zvijezde, optimizaciju odnosa šuma i signala na različitim vremenima osvjetljavanja, te odabir najbolje konfiguracije usrednjenog grupiranja piksela i drugih postavki CCD kamere.

Dodatno, tijekom opažanja okultacijskih događaja potrebno je sinkronizirati vrijeme svih opažaca. Vrijeme na računalima moguće je sinkronizirati putem interneta preko javno dostupnih vremenskih servera, korištenjem softverskih rješenja poput Dimension 4 (poznat i pod nazivom „D4“). Također postoji mogućnost ispisa univerzalnog vremena u zaglavlje snimki ili u obliku vremenskog žiga na pojedine snimke putem GPS uređaja.

Metoda gibanja (drift metoda)

U slučaju da primjenom usrednjenog grupiranja piksela, ili iščitavanjem manjeg područja interesa CCD detektora nije moguće dobiti zadovoljavajuće vrijednosti praznog hoda, za prikupljanje podataka preostaje mogućnost primjene metode gibanja (drift metode). Metoda gibanja podrazumijeva osvjetljavanje snimki za vrijeme dok se teleskop giba određenom kutnom brzinom, dodanom na brzinu sideričkog praćenja nebeskog svoda.

Opažanja metodom gibanja rezultiraju snimkama na kojima su svi izvori prikazani u tragovima. Brzina gibanja teleskopa definira vremensko razlučivanje po pikselu. Što je veća brzina gibanja teleskopa, to je vremensko razlučivanje po pikselu veće, ali intenzitet zvjezdanog traga po pikselu proporcionalno opada. Optimalna brzina gibanja teleskopa određuje se računski, ili izravnim mjerenjem odnosa signala i šuma u pripremnim opažanjima prije same okultacije. Tom prilikom se biraju brzine gibanja takve da odnos signala i šuma traga najmanje 5-10.

Duljina traga L u pikselima, koji će opažani izvor ostaviti na snimci za vrijeme prikupljanja

podataka metodom gibanja, bit će jednaka

$$L = \frac{t_{\text{exp}} v}{ps}, \quad (2.15)$$

gdje je t_{exp} vrijeme osvjetljavanja snimke, v kutna brzina gibanja teleskopa dodana na brzinu sideričkog praćenja nebeskog svoda, a ps kutna razlučivost detektora po pikselu.

Alternativa gibanju teleskopa brzinom dodanom na brzinu sideričkog praćenja nebeskog svoda, koja ne zahtijeva korištenje sofisticiranih i skupocjenih teleskopskih montaža, jest gašenje sideričkog praćenja montaže i puštanje da se nebeski svod giba kroz vidno polje teleskopa brzinom sideričke rotacije Zemlje. U tom slučaju, ako siderički period rotacije Zemlje traje 23 h 56 min 4,1 s (86164,1 s), kutna brzina gibanja nebeskog svoda iznosi

$$v = 15,041 \cos(DEC), \quad (2.16)$$

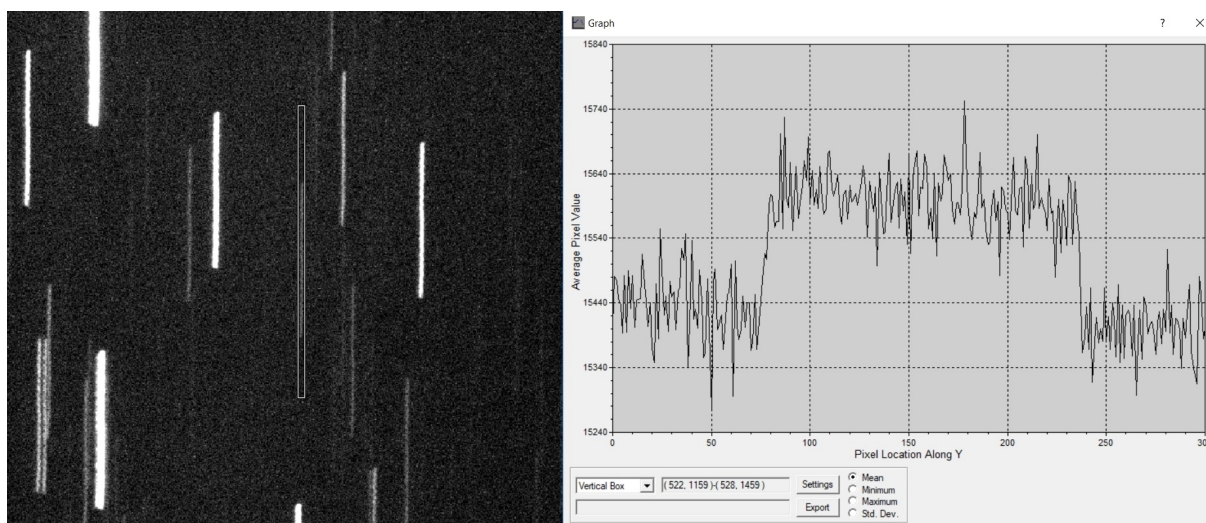
gdje je DEC deklinacijska koordinata položaja opažanog izvora.

U analizi podataka, s namjerom ostvarivanja najvišeg odnosa signala i šuma, prikupljene snimke najprije se obrađuju primjenom uobičajenih procedura oduzimanja elektroničkog šuma i tamnog polja, te primjenom ravnog polja.

Trag izvora koji je obuhvaćen matricom piksela prikazuje se u obliku krivulje svjetlosti. U krivulji svjetlosti, duljina traga nanosi se na x -os. Za sjaj traga koji se nanosi na y -os, uzima se srednja vrijednost analogno-digitalnih jedinica piksela po širini traga. U praksi, izradu ovakve krivulje sjaja dobro je izvršiti pomoću softverskih paketa. Na primjer, paket za obradu astronomskih CCD snimki „Maxim DL“ obuhvaća alate za odabir i prikaz odabranih područja snimki, te primjenu jednostavnih matematičkih operacija nad njima.

Primjer snimke prikupljene metodom gibanja i izrade krivulje svjetlosti traga proizvoljnog izvora prikazan je na slici 2.5. Na lijevoj strani slike prikazan je isječak snimke prikupljen metodom gibanja prilikom pripreme opažanja okultacije patuljastog planeta Haumea, koja se dogodila 21. siječnja 2017. godine. Tijekom prikupljanja snimke, rektascenzijska os teleskopa pratila je nebeski svod brzinom sideričke rotacije, a tragovi zvijezda proizvedeni su dodavanjem brzine gibanja od 40"/min na deklinacijsku os teleskopa. Na desnoj strani slike 2.5 prikazana je krivulja sjaja za proizvoljno odabranu zvijezdu. U krivulji sjaja prepoznaje se sjaj traga koji se uzdiže u odnosu na pozadinski šum snimke.

Rubne točke tragova, kao i točke prekida traga tijekom okultacijskog događaja, utvrđuju se određivanjem vrijednosti na kojoj krivulja sjaja prelazi odabranu razinu sjaja. U poglavlju 5 pokazat ćemo da je tijekom okultacijskih događaja intenzitet izvora svjetlosti na rubu geometrijske sjene malog tijela uvijek jednak točno 1/4 ukupnog intenziteta opažanog izvora svjetlosti.



Slika 2.5: Primjer snimke prikupljene metodom gibanja i izrade krivulje svjetlosti traga proizvoljne zvijezde. Na lijevoj strani prikazan je isječak snimke prikupljen metodom gibanja prilikom pripreme opažanja okultacije Haumee, čiji su rezultati opisani u poglavlju 4.3. Snimka je prikupljena s Opservatorija Črni Vrh u Sloveniji 21. siječnja 2017. godine. Tijekom prikupljanja snimke, rektascenzijska os teleskopa pratila je nebeski svod brzinom sideričke rotacije, a tragovi zvijezda proizvedeni su dodavanjem brzine gibanja od $40''/\text{min}$ na deklinacijsku os teleskopa. Pomoću alata u softverskom paketu Maxim DL, odabran je trag proizvoljne zvijezde za koji je izrađena krivulja sjaja. Na lijevoj strani vidljiva je odabrana matrica duljine 300 i širene 6 piksela, za koji izrađena krivulja sjaja. U krivulji sjaja prikazanoj na desnoj strani, na x -osi navedena je koordinata duljine odabrane matrice piksela, a na y -osi srednja vrijednost analogno-digitalnih jedinica piksela po širini odabrane matrice. Vidljiv je sjaj traga koji se uzdiže u odnosu na pozadinski šum snimke.

Stoga ćemo za razinu sjaja koji će definirati rubne točke tragova i njihovih prekida tijekom okultacijskog događaja, nakon što se oduzme pozadinski šum, koristiti vrijednost 1/4 sjaja traga.

2.3.4 Određivanje obrisa malog tijela

Tijekom okultacije zvijezde malim tijelom, sjena tijela giba se preko površine Zemlje. Opažači koji se nalaze na putanji sjene izmjerit će vremena nestajanja (početka okultacije) i ponovnog pojavljivanja okultirane zvijezde (završetka okultacije). Negativne detekcije opažača koji se nalaze izvan putanje sjene postavljanju granične vrijednosti na dimenzije obrisa malog tijela.

Svako opažano vrijeme početka i završetka okultacije definira točku na obrisu malog tijela. Kako bi iz izmjerenih točaka (prikazanim kroz geografske položaje opažača i zabilježene vremenske trenutke) bio određen obris tijela, potrebno je točke projicirati na osnovnu ravninu (Đurech et al. 2011).

Osnovna ravnina definirana je kao ravnina koja prolazi kroz središte Zemlje i okomita je na pravac poveznicu okultirane zvijezde (i središta malog tijela pod pretpostavkom da je u blizini). Tada je koordinatni sustav (ξ, η) na osnovnoj ravnini definiran jediničnim vektorima

$$\begin{aligned}\widehat{s}_\xi &= (-\sin \delta \cos \alpha, -\sin \delta \sin \alpha, \cos \delta), \\ \widehat{s}_\eta &= (\sin \alpha, -\cos \alpha, 0),\end{aligned}\tag{2.17}$$

gdje su α i δ rektascenzija i deklinacija okultirane zvijezde. U svrhu predviđanja zvjezdanih okultacija treba koristiti prividni položaj zvijezda (u odnosu na promatrača), međutim, razlika između prividnog i srednjeg položaja zvijezda često je zanemariva (manja od razlučne moći instrumenta), pa se često koriste kataloške koordinate za epohu J2000.0.

Geocentrične koordinate opažača projiciraju se na osnovnu ravninu pomoću linearnog izraza

$$(\xi, \eta) = [\widehat{s}_\xi \cdot (\vec{x} + \Delta \vec{v} \Delta t), \widehat{s}_\eta \cdot (\vec{x} + \Delta \vec{v} \Delta t)],\tag{2.18}$$

gdje je $\vec{x}$ položaj opažača na Zemlji u sideričkom ekvatorijalnom referentnom sustavu, $\vec{x} = (R \cos \phi \cos \theta, R \cos \phi \sin \theta, R \sin \phi)$, gdje je R udaljenost opažača od središta Zemlje, ϕ geocentrična širina, i θ lokalno sideričko vrijeme. Razlika brzine u gibanju Zemlje i malog tijela, definirana u ekvatorijalnom referentnom sustavu, je $\Delta \vec{v} = \vec{v}_{\text{Zemlja}} - \vec{v}_{\text{asteroid}}$, gdje se pretpostavlja da je $\Delta \vec{v}$ tijekom okultacije konstantna. Δt su vremena početka i kraja okultacije, izmjerena u određenoj epohi. Pod pretpostavkom da je period rotacije malog tijela puno duži od pojedinačnih opažanja Δt , točke (ξ, η) se mogu smatrati „snimkom“ projekcije malog tijela u trenutku Δt .

Pretpostavka o konstantnoj brzini gibanja sjene malog tijela preko Zemljine površine tijekom

okultacije, $\Delta\vec{v}$, zadanoj u jednadžbi (2.18), prikladna je ako je (i) referentno vrijeme (vrijeme u kojem bi se trebala dogoditi okultacija) odabrano tako da je $\Delta x \lesssim 10$ min, te (ii) ako su sva opažanja prikupljena iz istog dijela svijeta, odnosno, ako se pojedinačna izmjerena vremena ne razlikuju za više od ~ 10 min.

U slučaju da su vremenske razlike Δx veće od ~ 10 min, zakrivljenost Zemljine površine i nejednolika brzina gibanja sjene moraju biti uzete u obzir, pa je za projekciju geocentričnih koordinata opažača na osnovnu ravninu potrebno koristiti izraz koji sadrži kvadratne članove (Žurech et al. 2011):

$$(\xi, \eta) = \left[\widehat{s}_{\xi} \cdot \left(\vec{x} + \Delta\vec{v}\Delta t + \frac{1}{2}\Delta\dot{\vec{v}}(\Delta t)^2 \right), \widehat{s}_{\eta} \cdot \left(\vec{x} + \Delta\vec{v}\Delta t + \frac{1}{2}\Delta\dot{\vec{v}}(\Delta t)^2 \right) \right]. \quad (2.19)$$

Na izmjerene točke (ξ, η) projiciranog obrisa malog tijela potrebno je prilagoditi model malog tijela, ili elipse. Time se određuje veličina obrisa malog tijela, i položaja njegovog središta. Prilagodba elipse na opažane okultacijske tetive uključuje slobodne parametre koordinata središta elipse ξ_0, η_0 , veliku i malu poluos elipse, i njezin pozicijski kut.

U nekim slučajevima dostupni su modeli malih tijela izvedeni iz opažanja rotacijskih krivulja sjaja metodom inverzije rotacijskih krivulja (Kaasalainen & Torppa 2001; Kaasalainen et al. 2001) koji mogu biti korišteni za prilagodbu na izmjerene točke okultacijskih tetiva. Na primjer, od 2008. do početka 2021. godine, u bazi DAMIT (eng. „Database of Asteroid Models from Inversion Techniques“) arhivirano je više od 3300 trodimenzionalnih modela oblika malih tijela (Durech et al. 2010).

Modeli malih tijela u bazi DAMIT prikazani su poliedrima omeđenim s trokutastim plohama, i vrhovima zadanim vektorima položaja $\vec{r}$. Uz poznavanje orijentacije rotacijskih osi malih tijela i njihovih sideričkih perioda rotacije (poznatih iz rotacijskih krivulja sjaja), za bilo koji vremenski trenutak Δt , modeli iz baze DAMIT mogu se projicirati na osnovnu ravninu. Tada se vektori položaja $\vec{r}$ transformiraju u ekvatorijalni koordinatni sustav $\vec{r}_{eq}$, pa za projicirane koordinate vrhova poliedara $(\xi_{\text{mod}}, \eta_{\text{mod}})$ slijedi:

$$(\xi_{\text{mod}}, \eta_{\text{mod}}) = (\widehat{s}_{\xi} \cdot \vec{r}_{eq}, \widehat{s}_{\eta} \cdot \vec{r}_{eq}) + (\xi_0, \eta_0), \quad (2.20)$$

gdje su (ξ_0, η_0) koordinate odstupanja od središta malog tijela, ovisne o kutnoj udaljenosti između okultirane zvijezde i malog tijela.

Osim slobodnih parametara koordinata središta malog tijela ξ_0 i η_0 , na izmjerene točke tetiva okultacijskog opažanja, model malog tijela prilagođava se i primjenom konstante c pomnožene s u modelu zadanim vektorima položaja vrhova poliedra, $c \cdot \vec{r}$. Stoga, za razliku od prilagodbe elipse koja ima četiri slobodna parametra, prilagodba modela malih tijela iz baze DAMIT sadrži

tri slobodna parametra.

Prilagodba modela obrisa malog tijela (ili elipse) vrši se metodom najmanjih kvadrata, odnosno odabirom slobodnih parametara za koje je χ^2 raspodjela minimalna:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{[(\xi_i, \eta_i)_{\text{occ}} - (\xi_i, \eta_i)_{\text{model}}]^2}{\sigma_i^2}, \quad (2.21)$$

gdje su $(\xi_i, \eta_i)_{\text{occ}}$ okultacijom izmjerene točke obrisa malog tijela projicirane na osnovnu ravninu, $(\xi_i, \eta_i)_{\text{model}}$ točke presjeka projiciranog modela malog tijela (ili elipse) i pravca sa smjerom $\hat{s}_v$ (ili $-\hat{s}_v$), koji leži na okultacijskim tetivama i sadrži točke $(\xi_i, \eta_i)_{\text{occ}}$, a σ_i je nepouzdanost točaka $(\xi_i, \eta_i)_{\text{occ}}$. Sa $\hat{s}_v$ zadan je jedinični vektor u smjeru kretanja sjene na osnovnoj ravnini. Jedinični vektor $\hat{s}_v$ se za svakog pojedinačnog opažača može odrediti pomoću sustava za generiranje efemerida JPL Horizons (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>).

Glavni uzrok nepreciznosti točaka $(\xi_i, \eta_i)_{\text{occ}}$ je pogreška u određivanju vremena početka i završetka okultacije. Pogreške u mjerenju vremena utječu na određivanje položaja na osnovnoj ravnini u smjeru $\hat{s}_v$. Upravo to je razlog zašto u jednadžbi (2.21) minimiziramo udaljenost između okultacijskih točaka obrisa malog tijela i modela u smjeru $\hat{s}_v$. Posebno kod asteroida manjih promjera, nepouzdanost u određivanju promjera dominirana je pogreškama mjerenja vremena.

U pojedinim slučajevima, duljine okultacijskih tetiva su precizno izmjerene no sa značajnim vremenskim pomacima u odnosu na tetive drugih opažača. Do ovakvih izvora pogrešaka dolazi kada nedostaje apsolutna kalibracija vremena na instrumentu, npr. u slučaju kada opažatelj ne posjeduje GPS sat, ili nema pristup internetu za sinkronizaciju računalnog sata putem javno dostupnih vremenskih servera. U takvim slučajevima duž vektora gibanja sjene $\hat{s}_v$ preko osnovne ravnine uvodi se pomak $\Delta\tau$.

Pomicanjem pojedinih tetiva po osnovnoj ravnini s vremenskim pomakom $\Delta\tau$, jednadžba (2.18) postaje

$$(\xi, \eta) = [\hat{s}_\xi \cdot (\vec{x} + \Delta\vec{v}(\Delta t + \Delta\tau)), \hat{s}_\eta \cdot (\vec{x} + \Delta\vec{v}(\Delta t + \Delta\tau))], \quad (2.22)$$

gdje je $\Delta\tau$ slobodan parametar odabran minimizacijom raspodjele χ^2 . Uobičajene vrijednosti vremenskih korekcija $\Delta\tau$ su od nekoliko desetinki sekunde.

Poglavlje 3

Aktivnost kentaura 95P/(2060) Chiron

Rezultati istraživanja opisanih u ovom poglavlju objavljeni su u Cikota et al. (2018), na prijedlog i pod vodstvom autora ove doktorske disertacije. Doprinos autora ove disertacije u objavi znanstvenog rada uključuje cjelokupnu analizu prikupljenih podataka, izradu Chironovih rotacijskih krivulja sjaja, mjerenje Chironovog apsolutnog sjaja, detekciju povećanog raspršenja u fotometrijskim mjerenjima Chirona, prijedlog mogućeg objašnjenja Chironove mikroaktivnosti uzrokovane udarima, detekciju Chironovog repa, kao i pisanje i slanje znanstvenog rada, te korespondenciju s recenzentom.

Istraživanja opisana u ovom poglavlju vezana za potragu za fotometrijskim naznakama mehanizama gubitka mase na malim tijelima Sunčevog sustava, povezani su sa znanstvenim radom Cikota et al. (2014), također objavljenim pod vodstvom autora ove disertacije. U tom radu prvi put se istražuju fotometrijske naznake aktivnosti malih tijela pomoću baze podataka Minor Planet Center, te postavlja hipoteza o učestalim sudarima kao jednom od glavnih uzroka njihovih aktivnosti.

3.1 Uvod

95P/(2060) Chiron je tijelo iz asteroidne skupine kentaura, koje po dinamičkim parametrima pripada asteroidima. Bez obzira na to što se nalazi u orbiti daleko od Sunca, u kojoj sublimacija vodenog leda kao mogući uzrok aktivnosti slične kometima ne dolazi u obzir, niti je očekivana stopa sudara među malim tijelima Sunčevog sustava u skupini kentaura visoka, od samog otkrića tijelo u navratima pokazuje naznake kometske aktivnosti. Indikacija da (2060) Chiron posjeduje prstenove (Ortiz et al. 2015) bila je motivacija za vršenje dodatnih opažanja i interpretaciju uzroka njegove aktivnosti.

U ovom poglavlju opisano je prikupljanje opažanja kentaura (2060) Chiron sa španjolske zvjezdarnice Calar Alto (CAHA) u razdoblju između 2014. i 2016. godine s tri različita instrumenta (3,5 m MOSCA, 1,23 m DLR-MKIII i 2,2 m CAFOS).

Tablica 3.1: Parametri orbite kentaura 95P/(2060) Chiron za epohu JDT 2459000,5 (31. svibanj 2020. godine)

Velika poluos (a)	13,686 a.j.
Ekscentricitet orbite (e)	0,3788
Inklinacija (i)	6,940°
Udaljenost perihela (q)	8,5018 a.j.
Datum prolaska kroz perihel	08.02.1996.
Udaljenost afela (Q)	18,8695 a.j.
Srednja anomalija (M)	172,83696°
Duljina uzlaznog čvora (Node)	209,24246°
Argument perihela (Peri.)	339,81022°
Srednje gibanje (n)	0,01957°/dan
Period ophoda oko Sunca	50,6 godina
Srednja orbitalna brzina	7,75 km/s

Fotometrijskom analizom podataka pokazano je da je raspršenje fotometrijskih mjerenja (2060) Chirona veće od raspršenja opažanih kontrolnih zvijezda, ukazujući na mogućnost učestale mikroaktivnosti. Diskutiran je mogući uzrok podizanja malih oblaka materijala i poticanja mikroaktivnosti kroz mehanizam gubitka mase izazvanog sudarima. Iz fotometrijskih mjerenja također je opažana rotacijska krivulja sjaja i izvršena su mjerenja Chironovog apsolutnog sjaja koja su konzistentna s indikacijom da Chiron posjeduje prstenove. Nadalje, prikazani su rezultati sabranih snimki snimljenih s 2,2 m CAFOS instrumentom, na kojima je detektiran rep koji nalikuje kometskim repovima, dužine oko 5 lučnih sekundi.

3.2 Kentaur 95P/(2060) Chiron

Chiron (1977 UB) spada u skupinu tijela koja imaju dvojni status. Službeno se katalogizira kao malo tijela Sunčevog sustava (2060) Chiron, te kao komet 96P/Chiron. Otkrio ga je 1. studenog 1977. astronom Charles T. Kowal. Određeno je da je Chiron objekt taksonomske klase C (Hartmann et al. 1990), promjera procijenjenog na $215,6 \pm 9,9$ km (Fornasier et al. 2013). Chiron je prvo otkriveno tijelo iz novootkrivene klase objekata u našem Sunčevom sustavu, takozvanih "kentaura". U tablici 3.1 navedeni su parametri orbite kentaura 95P/(2060) Chiron.

Kentauri su objekti koji se gibaju oko Sunca u orbitama između Jupitera i Neptuna. Vjerojatno su porijeklom iz Kuiperovog pojasa, iz kojega su raštrkani u novijoj povijesti Sunčevog

sustava (npr. Sarid & Prialnik 2009). Oikawa & Everhart (1979) utvrdili su da Chironova orbita nije stabilna, što sugerira kratke dinamičke životne vjekove ovakvih tijela. Numeričke simulacije orbita poput Chironovih sugeriraju da je Chiron u prošlosti možda bio kratkoperiodični komet, te da će u budućnosti vjerojatno postati isti (Hahn & Bailey 1990).

Izravno nakon Chironovog otkrića postojale su naznake da objekt posjeduje aktivnost sličnu kometskoj (Kowal et al. 1979). Te su naznake potvrđene VRIJHK fotometrijskim mjerenjima 1988. godine (Tholen et al. 1988), te CCD snimkama koje su jasno prikazivale komu sličnu kometskoj 1989. godine (Meech & Belton 1990). Nadalje, opažane su nagle promjene u Chironovom sjaju na vremenskim skalama u trajanju po nekoliko sati (Luu & Jewitt 1990), kao i dugotrajne promjene na vremenskim skalama od po nekoliko godina (Bus et al. 1991).

Fotometrijska mjerenja (2060) Chirona provedena pomoću arhivskih snimki (fotografskih ploča) snimljenih između 1969. i 1977. godine, prikazuju dugotrajne intervale porasta Chironovog sjaja za vrijeme dok se nalazio u blizini afela (Bus et al. 2001). Ove anomalije u promjeni Chironovog sjaja promatrane su i u razdoblju od 1980-1983 (Hartmann et al. 1990), te krajem 1980-ih godina, kada se Chiron nalazio u blizini svog perihela (Bus et al. 2001). Čak i u razdoblju kada se Chiron nalazio blizu svog povijesnog minimuma u sjaju, u promatranjima nastalim između 1996. i 1998. godine nakon prolaska kroz njegov perihel, oko Chirona bila je jasno uočljiva koma (Silva & Cellone 2001).

U opažanjima metodom zvjezdanih okultacija izvršenih 1993., 1994. i 2011. godine detektirane su prisutnost prašine u Chironovoj unutrašnjoj komi, uključujući mlazne izbačaje prašine koji nalikuju onima iz kometskih jezgri (Elliot et al. 1995; Bus et al. 1996), te odlike slične simetričnim mlaznim izbačajima prašine (Ruprecht et al. 2015).

Mehanizmi gubitka mase aktivnih asteroida često ostaju neistraženi. Sublimacija vodenog leda i toplinski procesi često se smatraju mogućim uzrocima za izbacivanje materijala s površine asteroida (Jewitt 2012). Spektroskopske indikacije za prisustvo vodenog leda na Chironu već su otkrivene u bliskom infracrvenom spektru (Luu et al. 2000; Romon-Martin et al. 2003). Kratkim osvrtom na povijest Chironove aktivnosti, uočljivo je da aktivnost nije korelirana s heliocentričnom udaljenosti Chirona, što ukazuje da gubitak mase vjerojatno nije uzrokovan mehanizmima sublimacije leda.

Jedan od daljnjih mogućih uzroka gubitka mase su sudari. Među malim tijelima Sunčevog sustava u Glavnom asteroidnom pojasu često dolazi do udarnih procesa. Osim udarnog porijekla asteroidnih obitelji u Glavnom asteroidnom pojasu (npr. Tedesco 1979; Zappalà et al. 2002), nedavni primjeri sudara među malim tijelima rezultirali su naglim porastima sjaja objekata P/2010 A2 (LINEAR) (npr. Moreno et al. 2011; Snodgrass et al. 2010) i (596) Scheila (npr. Moreno et al. 2011; Jewitt et al. 2011), te pokazali da sudari oko svojih matičnih tijela mogu proizvesti oblake krhotina submilimetarskih do centimetarskih promjera. Za razliku od sudara u Glavnom asteroidnom pojasu, očekivane stope sudara među objektima Edgeworth-Kuiperovog

pojasa i kentaura znatno su niže. Durda & Stern (2000) procijenili su da se sudari kometa polumjera 1 km s objektima polumjera sličnih Chironu događaju približno svakih $60 \cdot 10^9$ godina. Stoga se smatralo da mehanizam gubitka mase kod Chirona ne može biti uzrokovan sudarima.

Povodom nedavno otkrivenih prstenova oko kentaura (10199) Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014), promatrani sekundarni događaji u Chironovim okultacijskim krivuljama sjaja ranije interpretirani kao kometski mlazni izbačaji prašine (Ruprecht et al. 2015), Ortiz et al. (2015) interpretirali su kao naznaku za postojanjem prstenova sličnih svojstava kao otkrivenih kod Charikla.

Pod pretpostavkom da oko Chirona postoje prstenovi načinjeni od krhotina, nije isključeno da neke od tih krhotina neprekidno padaju i udaraju u Chironovu površinu. Stoga, iako su procjene očekivanih stopa sudara u području kentaura vrlo niske, mehanizam gubitka mase kroz udare ne bi trebao biti isključen kao mogući uzrok Chironove aktivnosti.

U ovom poglavlju opisana su fotometrijska mjerenja Chirona, opažane su njegove krivulje sjaja, i pretražene su naznake za postojanjem aktivnosti sličnih onih kod kometa. Pomoću mjerenja raspršenja Chironovih fotometrijskih opažanja, i usporedbe s raspršenjem fotometrijskih opažanja zvijezda Chironu sličnog sjaja, razmotrena je mogućnost detekcije postojanja neprekidne mikroaktivnosti uzrokovane podizanjem malih oblaka materijala uslijed padajućih krhotina na Chironovu površinu.

3.3 Prikupljanje i analiza podataka

U razdoblju od 2014. do 2016. godine provedene su tri kampanje prikupljanja podataka (tablica 3.2). Tom prilikom korištena su tri različita teleskopa na Zvezdarnici Calar Alto (Centro Astronómico Hispano en Andalucía - CAHA), smještenoj na 2168 metara visokoj planini Sierra de Los Filabres u Španjolskoj provinciji Almería.

Prva opažačka kampanja izvršena je s ciljem određivanja Chironove rotacijske krivulje sjaja. Ova opažačka kampanja sastojala se od tri sekvence. Prva sekvenca izvršena je 18. i 19. srpnja 2014. godine pomoću reduktora žarišne duljine MOSCA, montiranog u žarištu 3,5-metarskog Richey-Chretien teleskopa. Ovaj instrument ima vidno polje (FoV) od $11' \times 11'$ i pikselno razlučivanje od $0,33''$ piksela⁻¹ (nebinnano). Snimke su prikupljane u spektralnom pojasu *R* standardnih Besselovih filtera i u modusu usrednjenog grupiranja piksela 2×2 . Druga i treća opažačka sekvenca izvedene su 23. i 24. srpnja 2014. godine, te 27. i 28. listopada 2014. godine pomoću CCD kamere DLR-MKIII na 1,23 m teleskopu. Vidno polje instrumenta bilo je $21,5' \times 21,5'$, pikselnog razlučivanja $0,314''$ piksela⁻¹. Snimke su prikupljene u modusu usrednjenog grupiranja piksela 2×2 , te bez optičkih filtera, s ciljem maksimiziranja omjera signala i šuma (SNR). Tijekom cjelokupne prve kampanje prikupljeno je 136 snimki.

Tablica 3.2: Dnevnik promatranja Chirona na zvjezdarnici Calar Alto. Korišteni optički filteri temelje se na Bessellovom fotometrijskom sustavu. Kratice su definirane na sljedeći način: ekspozicija (vrijeme osvjetljenja, t_{exp}), heliocentrična udaljenost (R), geocentrična udaljenost (Δ) i broj prikupljenih snimki (N).

Datum	Teleskop	Instrument	Filter	t_{exp} (s)	R (a.j.)	Δ (a.j.)	N
2014 07 18	3,5 m	MOSCA	R	300	17,878	17,238	19
2014 07 19	3,5 m	MOSCA	R	300	17,878	17,225	14
2014 07 23	1,23 m	DLR-MKIII	Clear	300	17,881	17,178	8
2014 07 24	1,23 m	DLR-MKIII	Clear	300	17,882	17,167	27
2014 10 27	1,23 m	DLR-MKIII	Clear	240	17,956	17,303	28
2014 10 28	1,23 m	DLR-MKIII	Clear	240	17,956	17,310	40
2015 09 11	2,2 m	CAFOS	R	300	18,181	17,178	46
2015 09 13	2,2 m	CAFOS	R	300	18,182	17,179	70
2015 09 14	2,2 m	CAFOS	R	300	18,184	17,182	8
2016 09 02	2,2 m	CAFOS	R, V	300	18,396	17,416	6

Druga opažačka kampanja izvršena je od 11. do 14. rujna 2015. godine s ciljem opažanja Chironove rotacijske krivulje sjaja, te utvrđivanja Chironovog apsolutnog sjaja i potrage za naznakama aktivnosti sličnih kometskim. Tom prilikom korišten je reduktor žarišne duljine i instrument CAFOS (Calar Alto Faint Object Spectrograph). Ovaj instrument opremljen CCD detektorom montiran je na teleskopu od 2,2 metra, i posjeduje vidno polje (FoV) od $16' \times 16'$, te pikselno razlučivanje od $0,53''$ piksela⁻¹. Snimke su prikupljane u modusu usrednjenog grupiranja piksela 2×2 , uz korištenje Bessellovog filtra u spektralnom pojasu R . U ovoj kampanji ukupno je analizirano 124 snimke. Snimke prikupljene 14. rujna 2015. godine nisu korištene u fotometrijskoj analizi i izradi rotacijske krivulje sjaja jer je Chironov tok zračenja bio kontaminiran tokom zračenja drugih bliskih objekata na snimci.

Treća opažačka kampanja izvršena je 2. rujna 2016. godine s ciljem dodatnih mjerenja Chironovog apsolutnog sjaja. Tom prilikom korišteni su identični instrumenti kao u drugoj kampanji. Snimke su prikupljane pomoću Bessellovog fotometrijskog sustava filtera u spektralnim pojasima R i V , te u modusu usrednjenog grupiranja piksela 2×2 . Tijekom posljednje opažačke kampanje prikupljeno je ukupno 6 snimki Chirona.

Praćenje teleskopa za vrijeme prikupljanja podataka uvijek je bilo postavljeno na sideričku brzinu. Pomak objekta uslijed njegovog gibanja tijekom eksponiranja (osvjetljenja snimke) bio je zanemariv, odnosno, ispod razlučne moći instrumenta. Za vrijeme planiranja kampanji prikupljanja podataka, s ciljem fiksiranja vidnog polja na isto zvjezdano polje, teleskop je svake

Tablica 3.3: Parametri korišteni u fotometrijskoj analizi. Kratice su definirane na sljedeći način: sintetički fotometrijski polumjer aperture (aper.), polumjer unutrašnjeg prstena za oduzimanje pozadine neba (an.), debljina oduzimajućeg prstena ($d_{\text{an.}}$), i broj referentneih zvijezda ($N_{\star}$).

Datum	aper. (pikseli)	an. (pikseli)	$d_{\text{an.}}$ (pikseli)	$N_{\star}$
2014 07 18	4	12	5	11
2014 07 19	4	12	5	11
2014 07 23	4	12	5	12
2014 07 24	4	12	5	12
2014 10 27	2	9	4	6
2014 10 28	2	9	4	6
2015 09 11	3	10	3	6
2015 09 13	3	10	3	6
2015 09 14	6	9	5	19 [†]
2016 09 02	6	9	5	1 [‡]

[†]Standardne Landoltove zvijezde: PG2213_006, PG2213_006A, SA110_229, SA110_230, SA110_232, SA110_233, SA92_245, SA92_248, SA92_249, SA92_250, SA92_425, SA92_426, SA92_355, SA92_430, PG2349+002, PG2336_004A, PG2336_004B, SA95_275 i SA95_276.

[‡]Standardna Landoltova zvijezda: PG2213_006.

večeri usmjeravan prema istom području neba. Drugim riječima, snimke nisu bile centrirane na Chiron, što je omogućilo korištenje jednakih referentnih zvijezda za sve noći tijekom pojedinih opažачkih kampanji, doprinoseći minimiziranju sustavnih pogrešaka u fotometrijskim mjerenjima. Na taj način prikupljena su mjerenja relativne fotometrije visoke preciznosti. Nad svim prikupljenim snimkama oduzet je šum iščitavanja (bias), i izvršene su korekcije ravnog polja. Snimke ravnog polja prikupljane su u sumraku na početku svake opažачke noći. Fotometrijska analiza podataka izvršena je korištenjem poredbene fotometrije aperture s vlastitim alatima razvijenim u IDL-u (Interactive Data Language) i Pythonu. Prilikom određivanja Chironovih krivulja sjaja, korištene su referentne zvijezde u vidnom polju koje su sličnog sjaja Chironu. Optimalni sintetički fotometrijski polumjer aperture biran je u ovisnosti o raspršenju fotometrijskih mjerenja. Sintetički fotometrijski polumjeri aperture korišteni u izradi krivulja sjaja, a čiji je odabir rezultirao fotometrijom s najmanjim raspršenjem, navedeni su u tablici 3.3.

S ciljem određivanja Chironovog apsolutnog sjaja, izvedena je apsolutna kalibracija snimki uz pomoć Landoltovih standardnih fotometrijskih zvijezda (Landolt 1992). U svrhu apsolutne fotometrijske kalibracije podataka iz 2015. godine, nulta točka (eng. zero point) u spektralnom području R -pojasa i koeficijent atmosfarske ekstinkcije određeni su istovremeno iz promatranja

standardnih Landoltovih zvijezda (vidi fusnotu u tablici 3.3) za nekoliko različitih zračnih masa. S druge strane, u svrhu apsolutne fotometrijske kalibracije podataka iz 2016. godine, s ciljem nadgledanja fotometrijske kvalitete noći, promatrano je standardno Landoltovo polje PG2213 za nekoliko različitih zračnih masa. Po tri snimke Chirona snimljene kroz dva različita fotometrijska filtra (u *R*- i *V*- pojasu), izravno su kalibrirane pomoću opažanja Landoltove standardne zvijezde PG2213_006. Landoltova standardna zvijezda PG2213_006 bila je snimana pod jednakom zračnom masom kao i Chiron, te stoga korekcije atmosferske ekstinkcije nisu bile potrebne.

Dodatno, prikupljeni podaci metodom zbrajanja snimki upotrijebljeni su za vizualnu potragu naznaka aktivnosti koje nalikuju kometskim, poput kome ili repa. Fotometrijski rezultati u obliku rotacijske krivulje sjaja, mjerenja apsolutnog sjaja Chirona, kao i zbroj prikupljenih snimki prikazani su i diskutirani u sljedećem poglavlju.

3.4 Rezultati i diskusija

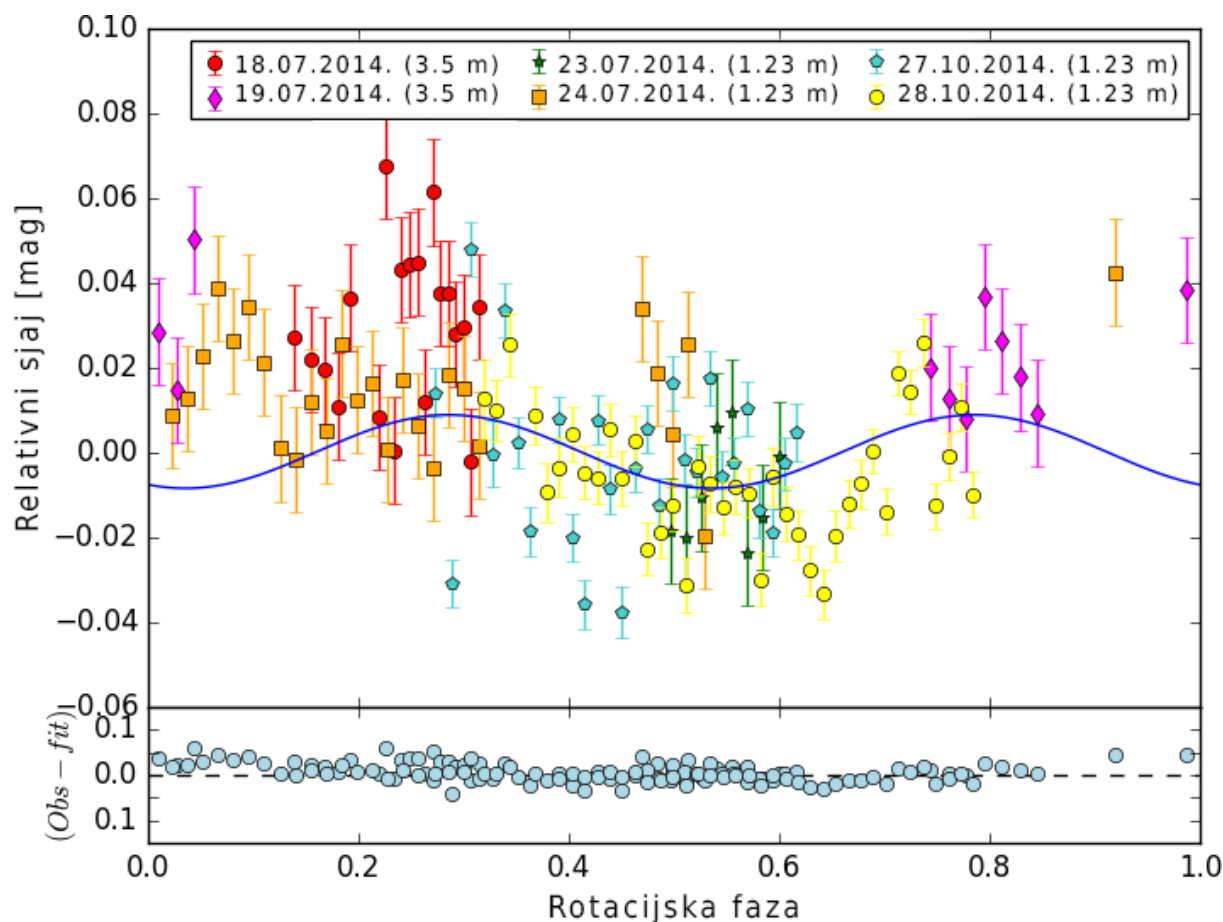
3.4.1 Chironova rotacijska krivulja sjaja

Iz prikupljenih snimki, metodom poredbene fotometrije određena je rotacijska krivulja sjaja Chirona. Prikupljena fotometrijska mjerenja grafički su prikazana u faznom dijagramu s visokopreciznim Chironovom sinodičkom periodom rotacije od $5,917813 \pm 0,000007$ h, koji su odredili Marcialis & Buratti (1993).

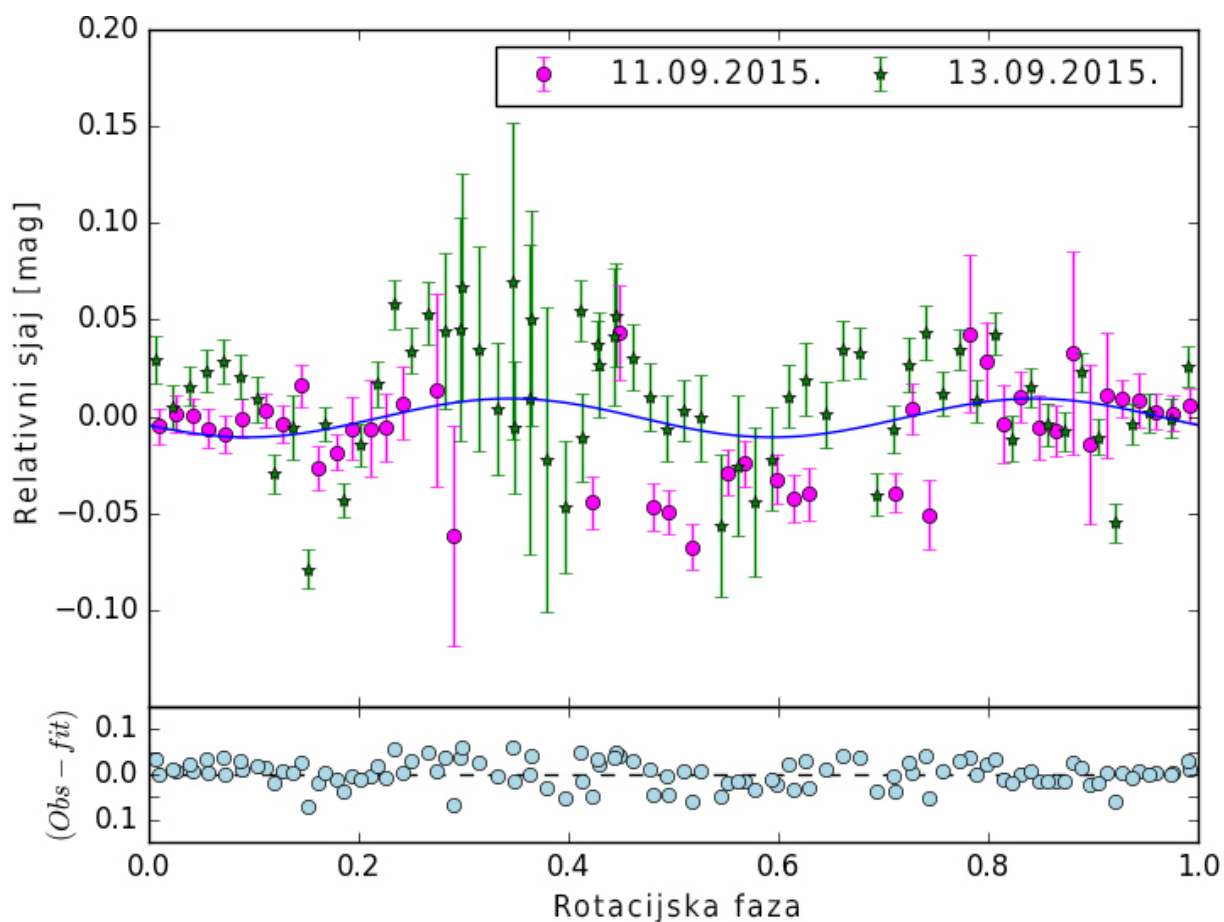
Budući da znamo da je Chironova krivulja sjaja dvostrukog maksimuma (Bus et al. 1989; Marcialis & Buratti 1993), na podatke krivulje sjaja prilagođen je dvočlani Fourierov red, pri čemu su za fotometrijske podatke prikupljene u opažачkim kampanjama 2014. i 2015. godine određene amplitude krivulja sjaja u iznosu od $0,016 \pm 0,004$ mag, odnosno $0,020 \pm 0,005$ mag. Postupci koji su korišteni za analizu, detaljno su opisani u Fernández-Valenzuela et al. (2016).

Krivulje sjaja koje proizlaze iz relativne fotometrije dobivene u prvoj i drugoj kampanji prikazane su na slikama 3.1 i 3.2. Gornji grafički prikazi na slikama prikazuju Chironovu rotacijsku krivulju sjaja, s dvočlanim Fourierovim redom prilagođenim na podatkovne točke. Donji grafički prikazi prikazuju odstupanja od prilagodbe dvočlanog Fourierovog reda.

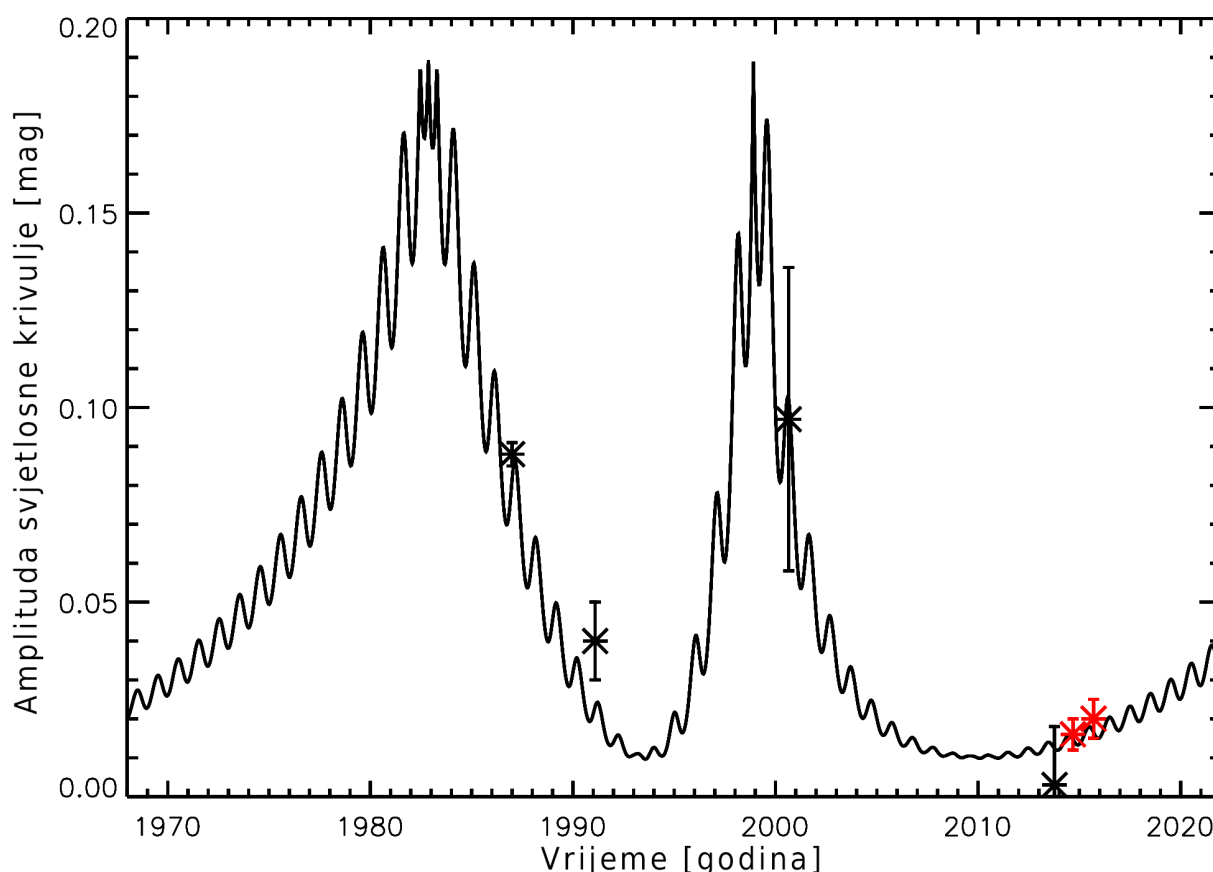
Pomoću opažanih zvjezdanih okultacija, Ortiz et al. (2015) odredili su smjer Chironovog pola, i modelirali oblik glavnog tijela kao troosni elipsoid. Koristeći aksijalne omjere *a/c* i *b/c* od 1,43 i 1,2, te dodajući svjetlosni doprinos (tok zračenja) Chironovih prstenova, izračunali su opadanje amplitude njegove rotacijske krivulje sjaja kao funkciju vremena. Slika 3.3 prikazuje modeliranu amplitudu Chironove rotacijske krivulje sjaja kao funkciju vremena, uzimajući u obzir Chironov troosni oblik, kao i svjetlosni doprinos njegovih prstenova, koji su izračunali Ortiz et al. (2015). Crne oznake predstavljaju vrijednosti amplituda krivulja sjaja prikupljene od strane Bus et al. (1989), Groussin et al. (2004) i Ortiz et al. (2015). Crvene oznake prikazuju



Slika 3.1: Gornji grafički prikaz sadrži ukupno 136 mjerenja i prikazuje Chironovu rotacijsku krivulju sjaja koja je rezultat poredbene fotometrije izvedene iz podataka prikupljenih 2014. godine s MOSCA instrumentom na 3,5 m teleskopu (18. i 19. srpnja), te DLR-MKIII CCD instrumentom na 1,23 m teleskopu (23. i 24. srpnja, i 27. i 28. listopada) na zvjezdarnici Calar Alto. Relativni sjaj (y-os) prikazan je u odnosu na fazni dijagram s Chironovim sinodičkim periodom rotacije od 5,917813 h (x-os). Na podatkovne točke prilagođen je dvočlani Fourierov red koji prikazuje amplitudu od vrha do vrha u iznosu $0,016 \pm 0,004$ mag. Julijanski dan za nultu točku faznog dijagrama iznosi 2456857,0 dana. Donji grafički prikaz prikazuje odstupanja od prilagodbe dvočlanog Fourierovog reda, sa srednjom vrijednosti od 0,021 mag. (Izvor: Cikota et al. 2018)



Slika 3.2: Gornji grafički prikaz sadrži ukupno 116 mjerenja i prikazuje Chironovu rotacijsku krivulju sjaja koja je rezultat poredbene fotometrije izvedene iz podataka prikupljenih 11. i 13. rujna 2015. godine s CAFOS instrumentom na 2,2 m teleskopu na zvjezdarnici Calar Alto. Relativni sjaj (y-os) prikazan je u odnosu na fazni dijagram s Chironovim sinodičkim periodom rotacije od 5.917813 h (x-os). Na podatkovne točke prilagođen je dvočlani Fourierov red koji prikazuje amplitudu od vrha do vrha u iznosu $0,02 \pm 0,005$ mag. Julijanski dan za nultu točku faznog dijagrama iznosi 2456857,0 dana. Donji grafički prikaz prikazuje odstupanja od prilagodbe dvočlanog Fourierovog reda, sa srednjom vrijednosti u iznosu 0,029 mag. (Izvor: Cikota et al. 2018)



Slika 3.3: Model amplitude Chironove rotacijske krivulje sjaja (y-os) u ovisnosti o vremenu (x-os) izrađen od Ortiz et al. (2015). Model uzima u obzir Chironov troosni oblik, kao i svjetlosni doprinos Chironovih prstenova. Crne oznake predstavljaju opažane vrijednosti amplitude krivulja sjaja različitih opažача. Crvene oznake prikazuju amplitude rotacijskih krivulja sjaja određenih iz vlastitih fotometrijskih opažanja prikupljenih u rujnu 2014. i rujnu 2015. godine. (Izvor: Cikota et al. 2018)

amplitude rotacijskih krivulja sjaja u iznosima $0,016 \pm 0,004$ mag i $0,020 \pm 0,005$ mag, određenih iz vlastitih fotometrijskih opažanja prikupljenih u rujnu 2014. i rujnu 2015. godine. Amplitude krivulja sjaja dobro se podudaraju očekivanim vrijednostima određenim u modelu opisanom u Ortiz et al. (2015).

3.4.2 Chironov apsolutni sjaj

S ciljem određivanja Chironovog apsolutnog sjaja, Ortiz et al. (2015) pokazali su da su zadavanjem specifične orijentacije Chironovog pola, Chironove dugoročne promjene sjaja kompatibilne s pojednostavljenim modelom koji uključuje u vremenu promjenjiv sjaj prstenova, ovisan o nagibu prstenova u odnosu na Zemlju.

Kako bi iz prikupljenog skupa podataka bio određen Chironov apsolutni sjaj, izvršena je apsolutna kalibracija snimki pomoću Landoltovih fotometrijskih standardnih zvijezda. Za apsolutnu fotometrijsku kalibraciju prikupljenih podataka u 2015. godini nulta točka u spektralnom pojasu Besselovog R-filtra i koeficijent atmosferske ekstinkcije određeni su istovremeno, opa-

žanjem Landoltovih zvijezda za nekoliko različitih zračnih masa. Korištenjem određene nulte točke i koeficijenta atmosferske ekstinkcije, iz skupa Chironovih snimki određen je prividni sjaj Chirona s prosječnom vrijednosti $m_R = 17,64 \pm 0,05$ mag, što daje apsolutni sjaj u iznosu $H_R = 5,17 \pm 0,05$ mag. Dobivena nepouzdanost mjerenja apsolutnog sjaja rezultat je nepouzdanosti apsolutne kalibracije korištenjem Landoltovih zvijezda, i nepouzdanosti izmjerenog Chironovog sjaja poredbenom fotometrijom, iz podataka prikupljenih u noći 14. rujna 2015. godine.

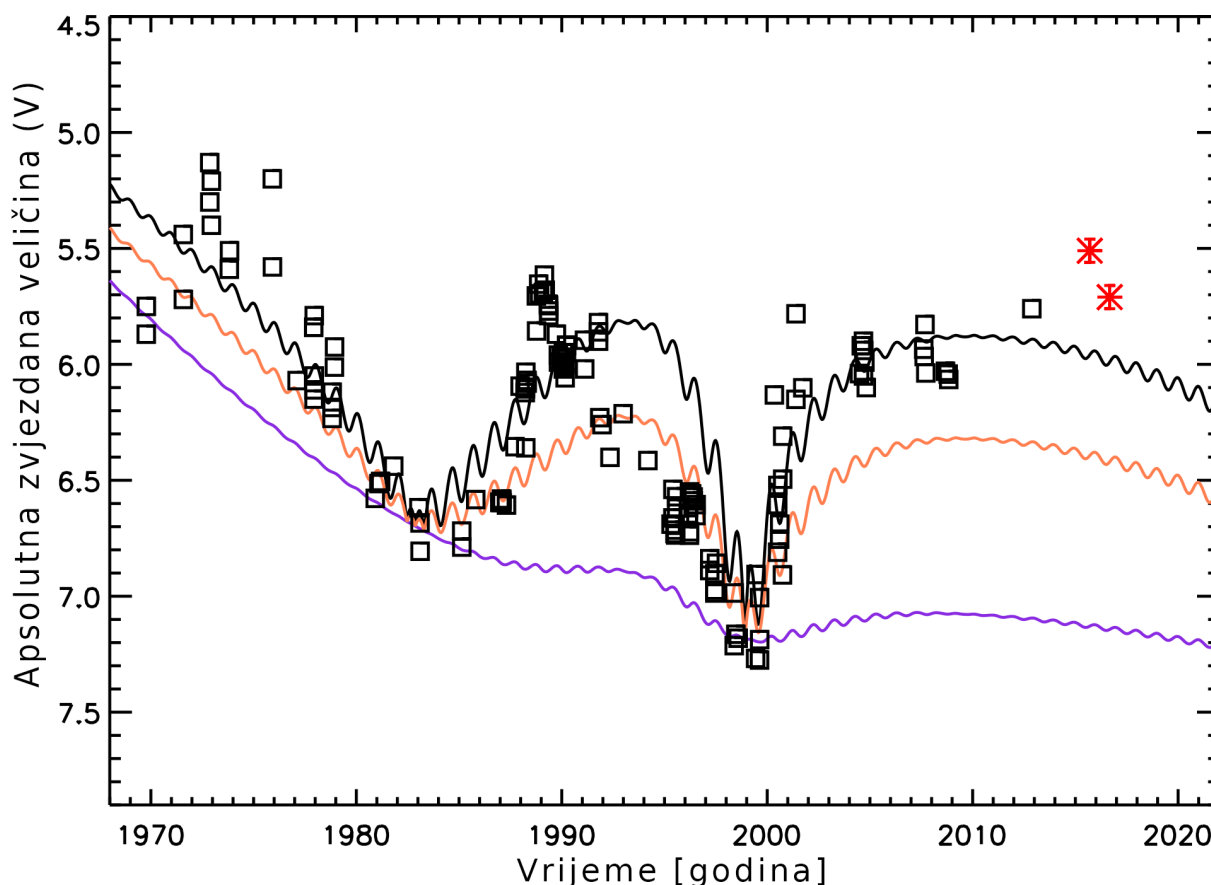
Određena apsolutna magnituda je približno 0,4 mag sjajnija od očekivanja na temelju modela, što može biti objašnjeno činjenicom da je pronađen kratki rep (diskutiran u poglavlju 3.4.4). Kako bi bilo utvrđeno je li se Chironov sjaj vratio na očekivanu vrijednost, 02. rujna 2016. godine izvršeno je dodatno opažanje, koje je pokazalo još uvijek povećane vrijednosti apsolutnog sjaja u iznosima $H_R = 5,38$ mag i $H_V = 5,71$ mag.

Slika 3.4 prikazuje model koji su izradili Ortiz et al. (2015), a kojim je opisan promjenjivi sjaj Chironovog sustava ovisan o kutu nagiba Chirona u odnosu na Zemlju, i koji uključuje doprinos eksponencijalno opadajućeg sjaja kome. Dodatno, zbog velike relativne nepouzdanosti geometrijskog albeda Chironovih prstenova, prikazane su krivulje za skup različitih izbora vrijednosti albeda Chironovih prstenova. Model s nominalnom vrijednošću geometrijskog albeda prstenova od 0,17 najbolje se podudara s prikupljenim opažanjima, i prikazan je crnom (gornjom) krivuljom. Narančasta (srednja) krivulja odgovara modelu s albedom prstenova od 0,1, dok ljubičasta (donja) krivulja odgovara modelu bez ikakvog doprinosa Chironovih prstenova. Kvadratne oznake predstavljaju opažanja koja su prikupili Belskaya et al. (2010). Crvene oznake prikazuju vlastita mjerenja iz podataka prikupljenih u rujnu 2015. i rujnu 2016. godine. Sjaj za vidljivo (V) spektralno područje za 2015. godinu izračunat je pomoću indeksa boje V-R, dobivenog iz podataka prikupljenih 2016. godine, i primijenjenog na mjerenja iz 2015. godine izvršena u crvenom (R) spektralnom području, te je određen apsolutni sjaj u iznosu $H_V = 5,51 \pm 0,05$ mag.

Iako su izmjerene vrijednosti apsolutnog sjaja Chirona nešto više od očekivanih, dobro se podudaraju s predviđenim vrijednostima koje su odredili Ortiz et al. (2015). Stoga prikupljena opažanja podupiru pretpostavku da Chiron posjeduje prstenove.

3.4.3 Raspršenje fotometrijskih mjerenja i Chironova mikroaktivnost

Chiron je od trenutka otkrića pobuđivao sumnju da posjeduje aktivnost koja nalikuje kometskim aktivnostima, s mehanizmom gubitka mase neobjašnjenog uzroka. Jedna od glavnih motivacija ovoga istraživanja bila je provjeriti posjeduje li Chiron neprekidne mikro-promjene u sjaju koje su, prema našoj hipotezi, moguće uzrokovane udarnim mehanizmima padajućih krhotina iz orbite oko Chirona na njegovu površinu. Iz tog razloga, tijekom fotometrijskih opažanja na kojima su zasnovane Chironove rotacijske krivulje sjaja, u opažачkim kampanjama 2014. i 2015. godine, fotometrijsko raspršenje Chironovih opažanja uspoređeno je s fotometrijskim



Slika 3.4: Model koji su izradili Ortiz et al. (2015), kojim je opisan promjenjivi sjaj Chironovog sustava koji ovisi o Chironovom kutu nagiba u odnosu na Zemlju i uključuje doprinos eksponencijalno opadajućeg sjaja kome. Model s nominalnom vrijednošću geometrijskog albeda prstenova od 0,17 najbolje se podudara s prikupljenim opažanjima, i prikazan je crnom (gornjom) krivuljom. Narančasta (srednja) krivulja odgovara modelu s albedom prstenova od 0,1, dok ljubičasta (donja) krivulja odgovara modelu bez ikakvog doprinosa Chironovih prstenova. Kvadratne oznake predstavljaju opažanja koja su prikupili Belskaya et al. (2010). Crvene oznake prikazuju vlastita mjerenja iz podataka prikupljenih u rujnu 2015. i rujnu 2016. godine. (Izvor: Cikota et al. 2018)

raspršenjem opažanih usporednih zvijezda, sjaja sličnog Chironu.

Primjeri fotometrijskih krivulja usporednih zvijezda iz opažачkih kampanja 2014. i 2015. godine prikazane su na slikama 3.5 i 3.6. Budući da su fotometrijske krivulje Chirona prikazane kao fazni dijagrami prema Chironovom rotacijskom periodu, fotometrijska mjerenja krivulja sjaja usporednih zvijezda također su prikazane faznim dijagramima, s mjerenjima nanesenim fazno prema Chironovom periodu rotacije.

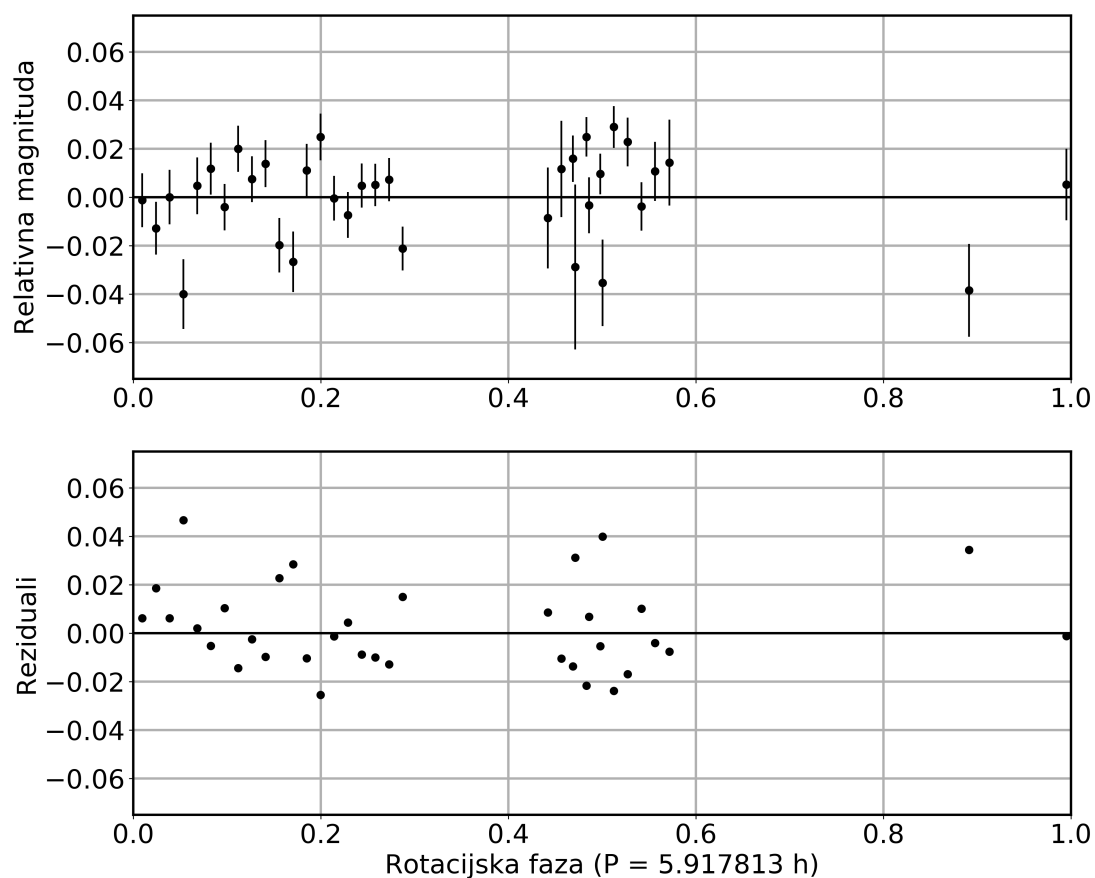
Opažачka kampanja u 2014. godini sadrži tri sekvence. Za proučavanje raspršenja fotometrijskih mjerenja odabrana je usporedna zvijezda iz sekvence izvedene 23. i 24. srpnja 2014. godine s instrumentom DLR-MKIII na 1,23 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto. Izmjereno raspršenje fotometrijskih mjerenja Chirona za tu sekvencu iznosi 0,027 mag, dok je izmjereno raspršenje fotometrijskih mjerenja usporedne zvijezde 0,014 mag. Tijekom fotometrijske kampanje izvedene 11. rujna i 13. rujna 2015. godine, koja sadrži podatke prikupljene instrumentom CAFOS na 2,2 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto, izmjereno je raspršenje Chironovih fotometrijskih mjerenja u iznosu 0,029 mag, dok raspršenje fotometrijskih mjerenja usporedne zvijezde iznosi 0,018 mag. Primjetna razlika između raspršenja fotometrijskih mjerenja usporednih zvijezda i Chirona podupiru hipotezu o neprekidnoj mikroaktivnosti na Chironu.

Do sada nije bio objašnjen mehanizam gubitka mase koji potiče aktivnosti na Chironu. U našoj hipotezi mikroaktivnosti na Chironu u obliku malih izbačaja, predlažemo mogućnost da krhotine iz orbite oko Chirona, posebice materijal od kojega su načinjeni prstenovi, padaju i udaraju u Chironovu površinu, proizvodeći izbačaje materijala i tvoreći vezanu ili kvazi-vezanu komu. Ovaj mehanizam također bi mogao biti objašnjenje za nagle promjene u sjaju, na vremenskim skalama od nekoliko sati, koje su u prošlosti opazili npr. Luu & Jewitt (1990). Za razliku od obične kometske kome koja nije gravitacijski vezana za kometsku jezgru, i čije čestice neprestano napuštaju matično tijelo, Chironova kvazi-vezana koma eksponencijalno bi se prorjeđivala s vremenom trajanja od nekoliko godina.

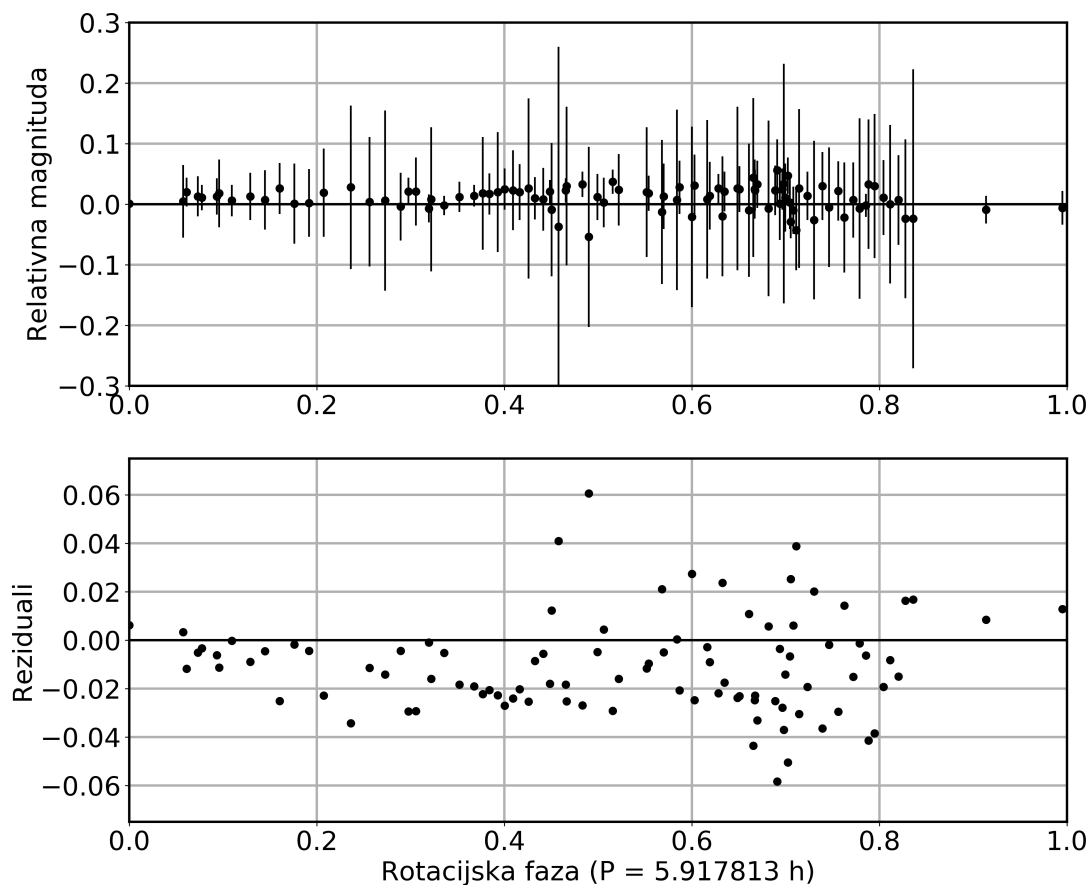
Prvobitno porijeklo Chironove kome doista bi moglo biti povezano s udarnim procesima. Ortiz et al. (2015) predložili su model eksponencijalnog prorjeđivanja Chironove kome. Takvo ponašanje prorjeđivanja kome zapravo su prvi opisali Meech & Belton (1990) i Duffard et al. (2002), no Ortiz et al. (2015) sugeriraju da se apsolutni maksimum u Chironovom sjaju dogodio oko 1973. godine, postavljajući taj trenutak za početak prorjeđivanja kome. Budući da apsolutni fotometrijski podaci iz 1970. godine pokazuju niže vrijednosti od maksimuma iz 1973. godine, smatraju da je Chiron pretrpio veći udar između 1970. i 1973. godine.

Mjerenja površinskog sjaja Chironove kome u prosincu 1989. godine procijenjena na $m_R = 24,8 \text{ mag/arcsec}^2$ (Meech & Belton 1990), a u travnju 1998. godine na $m_R = 26,0 \text{ mag/arcsec}^2$ ($m_V = 26,2 \text{ mag/arcsec}^2$) (Silva & Cellone 2001), nagovještavaju da je sjaj Chironove kome polako padao.

Do sada se smatralo da su nagle promjene u sjaju izazvane aktivnostima gubitka mase



Slika 3.5: Gornji grafički prikaz predstavlja krivulju sjaja usporedne zvijezde koja je rezultat poredbene fotometrije s instrumentom DLR-MKIII na 1,23 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto, opažanom 23. i 24. srpnja 2014. godine. Relativni sjaj (y-os) u odnosu na vrijeme (x-os) prikazan je u faznom dijagramu, nanesen prema periodu rotacije Chirona. Donji grafički prikaz predstavlja odstupanja od srednje vrijednosti mjerenja, u iznosu 0,014 mag. (Izvor: Cikota et al. 2018)



Slika 3.6: Gornji grafički prikaz predstavlja krivulju sjaja usporedne zvijezde koja je rezultat poredbene fotometrije s instrumentom CAFOS na 2,2 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto, opažane u noćima od 11. do 14. rujna 2015. godine. Relativni sjaj (y-os) u odnosu na vrijeme (x-os) prikazan je u faznom dijagramu, nanesen prema periodu rotacije Chirona. Donji grafički prikaz predstavlja odstupanja od srednje vrijednosti mjerenja, u iznosu 0,018 mag. (Izvor: Cikota et al. 2018)

sličnim onima kod kometa, poput sublimacije vodenog leda i toplinskih procesa. U ovom istraživanju, zbog jasnih naznaka za postojanjem prstenova oko Chirona, prikazujemo naznake da je Chironova aktivnost izazvana udarnim procesima, bilo padanjem krhotina iz Chironove orbite, ili neovisnim udarima meteoroida.

Zanimljivo je istaknuti da je ovakav mehanizam gubitka mase, izazvan udarima meteoroida, nedavno prvi put direktno opažan NASA-inom svemirskom letjelicom OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer) u orbiti oko Zemlji bliskog objekta (101955) Bennu. Naime, samo nekoliko dana nakon što je svemirska letjelica OSIRIS-REx ušla u orbitu oko asteroida (101955) Bennu, početkom siječnja 2019. godine, opažano je stotine čestica milimetarskih i centimetarskih dimenzija koje izviru s površine asteroida (Lauretta et al. 2019).

Neprekidnim opažanjem ove pojave tijekom desetomjesečnog razdoblja, koje je uključivalo prolazak Bennu kroz njegov perihel i afel, otkriveno je da je asteroid (101955) Bennu aktivan, odnosno da tijelo doživljava neprekidni gubitak mase u obliku izbačajnih događaja koji emitiraju stotine krhotina (Hergenrother et al. 2020).

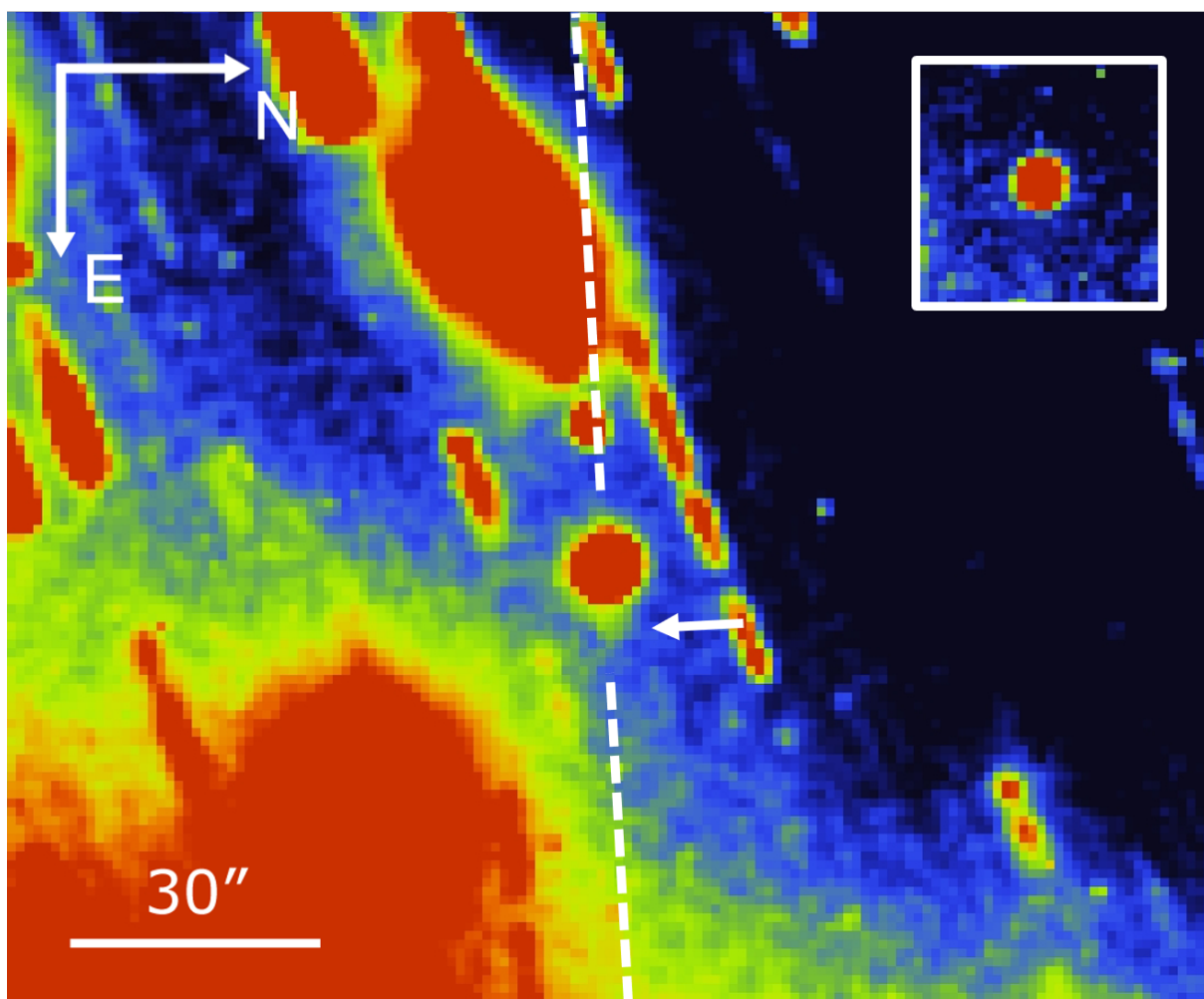
Određivanjem orbitalnih parametara izbačenih čestica, ustanovljeno je da otprilike njih 30 % biva izbačeno u heliocentričnu orbitu, dok većina čestica unutar nekoliko dana nakon izbacivanja padne natrag na površinu (101955) Bennu (najdugovječnija opažana čestica provela je 6 dana u privremenoj orbiti oko matičnog tijela).

Od potencijalnih mehanizama koji uzrokuju ovu aktivnost, istraženih u ciljanim studijama, Hergenrother et al. (2020) navode udare meteoroida, termičko lomljenje i rikošet, no ne i sublimaciju vodenog leda.

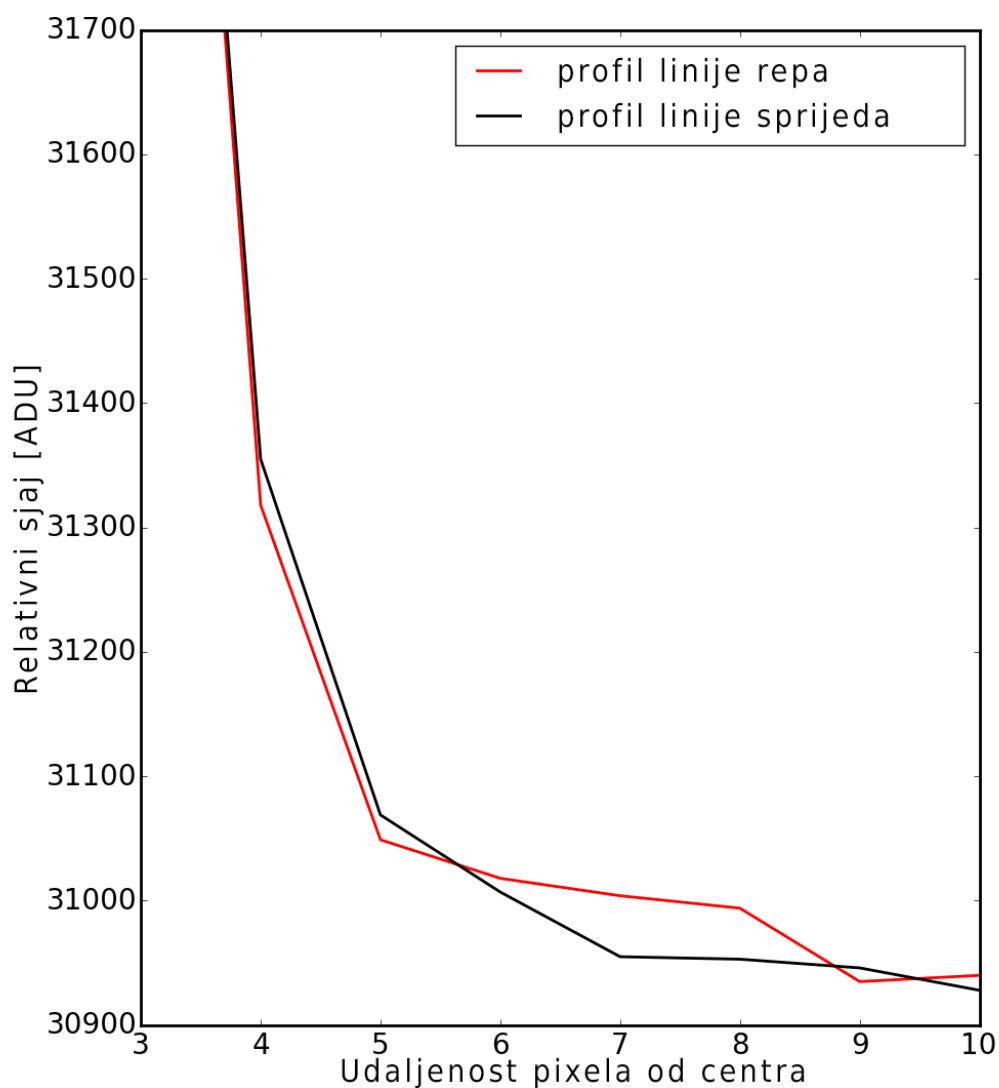
3.4.4 Detekcija Chironovog repa

Podaci prikupljeni u opažačkoj kampanji 2015. godine upotrijebljeni su za potragu za vizualnim znakovima aktivnosti sličnih onim kometskim, poput kome ili repa. Slika 3.7 prikazuje snimku Chirona u lažnim bojama, sastavljenu od 95 pojedinih integracija po 300 sekundi. Snimljena je instrumentom CAFOS postavljenog na 2,2 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto tijekom 3 noći, između 11. i 14. rujna 2015. godine. Slika sadrži snimke ukupnog zbroja vremena integracije od 28500 sec (475 min). Julijanski dan sredine integracije zbroja snimki je 2457278,62984 dana (13. rujna 2015. godine, 03:06:58 UT).

Pozadinske zvijezde na snimci su u obliku tragova jer su snimke tijekom zbrajanja centrirane na Chiron. Zbrojena snimka prikazuje da koma oko Chirona nije prepoznatljiva, no prepoznatljiv je asimetrični oblik (na slici označen strelicom) s izmjerenim kutom položaja od P.A. $\approx 87^\circ$ (prikazan isprekidanom linijom), kojeg možemo objasniti repom duljine ~ 5 lučnih sekundi, utvrđenog površinskog sjaja $m_R = 25,3 \text{ mag/arcsec}^2$ i izmjerenog odnosa signala i šuma SNR $\sim 4,9$. Kvaliteta svake pojedine snimke prije zbrajanja pažljivo je pregledana s ciljem eliminacije



Slika 3.7: Snimka Chirona u lažnim bojama (u sredini) prepoznatljivog asimetričnog oblika kojega možemo objasniti repom duljine ~ 5 lučnih sekundi (označen strelicom) s izmjerenim kutom položaja od P.A. $\approx 87^\circ$ prikazanog isprekidanom linijom. Snimka je snimljena instrumentom CAFOS postavljenog na 2,2 m teleskopu zvjezdarnice Calar Alto tijekom 3 noći između, 11. i 14. rujna 2015. godine. Ukupno vrijeme integracije iznosi 28500 sec (475 min). Julijanski dan sredine integracije zbroja snimki je 2457278,62984 dana (13. rujna 2015. godine, 03:06:58 UT). Podslika u gornjem desnom kutu prikazuje izoliranu zvijezdu sjaja sličnog Chironu, prikazanu u lažnim bojama pod jednakim uvjetima kao i Chiron, i zbrojenu s identičnim skupom podataka koji je korišten za snimku Chirona. (Izvor: Cikota et al. 2018)



Slika 3.8: Profilna linija Chirona prikazuje asimetriju Chironovog radijalnog presjeka u smjeru kutnog položaja u kojemu se nalazi mogući rep. Crvena linija prikazuje relativni sjaj (y -os) u odnosu na udaljenosti u pikselima (x -os) od Chironovog središta u smjeru u kojemu se nalazi repa. Za usporedbu, crna linija prikazuje relativni sjaj u odnosu na udaljenost u pikselima od Chironovog središta u suprotnom smjeru od smjera u kojemu se nalazi rep. Relativna razlika sjaja ovih dviju profilnih linija je oko 50 ADU. (Izvor: Cikota et al. 2018)

neočekivanih artefakata u blizini Chirona, ili snimki s lošim sideričkim praćenjem teleskopa. Također, putanja gibanja Chirona za vrijeme integracije pregledana je pomoću Pan-STARRS zvjezdanog kataloga s ciljem uvjeravanja da Chironov trag nije artefakt uzrokovan zvjezdanim izvorom u pozadini. Zbog izrazito niskog površinskog sjaja, onečišćenje iz slabog zvjezdanog izvora u pozadini ne može se u potpunosti odbaciti, no eksplicitni izvor moguće kontaminacije nije pronađen.

Podslika sadržana u gornjem desnom kutu slike 3.7 prikazuje primjer snimke izolirane zvijezde sjaja sličnog Chironu, prikazane u lažnim bojama pod jednakim uvjetima kao i Chiron, i zbrojene s identičnim skupom podataka koji je korišten i za snimku Chirona, no centrirane na zvijezdanu pozadinu. Možemo primijetiti da su konture zvijezde oštre, i da ne prikazuju asimetrije slične onima vidljivim na Chironu, što dodatno isključuje mogućnost da je rep nastao zbog problema s praćenjem, ili zbog nekonzistentnosti u kvaliteti snimki.

Profilna linija na slici 3.8 prikazuje asimetriju Chironovog radijalnog presjeka u smjeru kutnog položaja u kojemu se nalazi mogući rep. Crvena linija prikazuje relativni sjaj u odnosu na udaljenosti u pikselima od Chironovog središta u smjeru u kojemu se nalazi rep. Crna linija prikazuje relativni sjaj u odnosu na udaljenost u pikselima od Chironovog središta u suprotnom smjeru od smjera u kojemu se nalazi rep. Izmjereni relativni sjaj Chironovog repa (relativna razlika u sjaju dviju profilnih linija) je ~ 50 ADU.

3.5 Zaključak

Amplitude Chironovih rotacijskih krivulja sjaja određene iz opažanja prikupljenih u opažачkim kampanjama 2014. i 2015. godine vrlo se dobro podudaraju s modelom kojega su predložili Ortiz et al. (2015). Ova mjerenja potvrđuju pretpostavku da je Chiron troosni elipsoid i uzimaju u obzir svjetlosni doprinos prstenova oko Chirona. Iako je očekivana učestalost sudara među objektima u regiji kentaura vrlo niska, i do sada se smatralo da udari ne mogu biti odgovorni za pokretanje mehanizma gubitka mase kod objekata u ovim dijelovima Sunčevog sustava, zbog nedavne indikacije da Chiron posjeduje prstenove (Ortiz et al. 2015), ne treba isključiti mogućnost uzdizanja prašine izazvanu sudarima. Pod pretpostavkom da se u orbiti oko Chirona nalaze krhotine iz kojih su načinjeni prstenovi, postoji vjerojatnost da neke od tih krhotina padaju na i udaraju u Chironovu površinu.

Iz opažanja prikupljenih u kampanjama 2014. i 2015. godine, utvrđeno je da je raspršenje Chironovih fotometrijskih mjerenja veće od raspršenja fotometrijskih mjerenja kontrolnih zvijezda, što ukazuje na postojanje mikroaktivnosti na Chironu, vjerojatno uzrokovanu krhotinama materijala iz Chironove orbite i njegovih prstenova koje padaju na njegovu površinu, proizvodeći izbačaje prašine i stvarajući vezanu ili kvazi-vezanu komu oko Chirona. Ovakav mehanizam gubitka mase, izazvan udarima meteoroida iz orbite oko matičnog tijela, u siječnju 2019. godine

prvi je put direktno opažan NASA-inom svemirskom letjelicom OSIRIS-REx (Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer) u orbiti oko Zemlji bliskog objekta (101955) Bennu.

U vizualnom pregledu snimke Chirona koja sadrži zbroj od 95 pojedinih integracija svake od 300 sekundi, prikazane u lažnim bojama, koma nije prepoznatljiva, ali vidljiva je asimetrična tvorevina koja izgleda poput repa izmjerene duljine od ~ 5 lučnih sekundi i površinskog sjaja $m_R = 25,3 \text{ mag/arcsec}^2$.

Mjerenja apsolutnog sjaja Chirona u opažачkim kampanjama 2015. i 2016. godine konzistentna su s modelom opisanim u Ortiz et al. (2015), a koji uključuje promjenu sjaja Chironovih prstenova u ovisnosti o njihovom kutu nagiba prema Zemlji. Drugim riječima, opažanja prikupljena i analizirana u ovom istraživanju podupiru indicaciju da Chiron posjeduje prstenove.

Porijeklo prvobitne Chironove kome, i sve indicacije za postojanjem Chironove aktivnosti opažane kroz povijest, također bi moglo biti vezano za udarne procese. Model eksponencijalnog prorjeđivanja kome s maksimumom u sjaju između 1970. i 1973. godine (Ortiz et al. 2015), ukazuje na mogućnost da se u tom razdoblju mogao dogoditi veći udar u Chironovu površinu.

Postavljamo hipotezu da nagli porasti aktivnosti i izbačaji na običnim kometima, za koje se do sada smatralo da su uglavnom uzrokovani isparavanjem vodenog leda, također mogu biti izazvani i sudarima, bilo s krhotinama u orbiti oko matičnih tijela, ili meteoroidima iz neovisnih orbita.

Poglavlje 4

Fizikalne karakteristike patuljastog planeta Haumea i otkriće njegovih prstenova

Rezultati istraživanja opisanih u ovom poglavlju objavljeni su u Ortiz et al. (2017), pod vodstvom mentora autora ove doktorske disertacije. Doprinos autora ove doktorske disertacije u objavi znanstvenog rada uključuje sudjelovanje u planiranju opažачke kampanje, prikupljanju opažачa u regiji, interpretaciji rezultata i doprinosu s komentarima u reviziji znanstvenog rada.

Autor ove disertacije odgovoran je za podatke prikupljene u suradnji s Hermanom Mikužom s Opservatorija Črni Vrh u Sloveniji. Zbog sporog očitavanja snimki s CCD kamere Opservatorija Črni Vrh, autor ove disertacije predložio je metodu gibanja za prikupljanje podataka. Sudjelovao je u pripremi opažanja Opservatorija Črni Vrh, određivanju optimalne brzine gibanja teleskopa, te samostalno analizirao prikupljene snimke.

Vezano za metodologiju predviđanja okultacije Haumeom, autor ove doktorske disertacije imao je istaknutu ulogu u Ortiz & Cikota et al. (2011), gdje je razvio metodu pomoću koje je detektirano gibanje fotocentra transneptunskog objekta (90482) Orcus, uzrokovano gibanjem njegovog prirodnog satelit Vanth. Ista metoda primijenjena je u detekciji i određivanju položaja prirodnog satelita Hi'iaka u orbiti oko patuljastog planeta Haumea.

4.1 Uvod

U Sunčevom sustavu trenutačno je poznato pet patuljastih planeta. (1) Ceres je nama najbliži patuljasti planet, i jedini patuljasti planet u unutrašnjem dijelu Sunčevog sustava, s orbitom u Glavnom asteroidnom pojasu. Ostala četiri patuljasta planeta - (134340) Pluton, (136199) Eris, (136108) Haumea i (136472) Makemake, članovi su Kuiperovog pojasa koji se nalazi u vanjskom dijelu Sunčevog sustava, iza Neptunove orbite. Nije isključeno da će se patuljastim

planetima u budućnosti pribrojiti daljnji objekti. Definirajući različite kriterije za oblik, dimenzije i minimalnu masu malih tijela, znanstvena zajednica predlaže dodatne kandidate patuljastih planeta (npr. Tancredi & Favre 2008).

Zbog izrazito velikih udaljenosti patuljastih planeta u vanjskom dijelu Sunčevog sustava, za precizno određivanje njihovih fizikalnih karakteristika danas se koriste uglavnom indirektne metode opažanja, među kojima zbog dostizanja visokih razlučivanja valja istaknuti metodu zvjezdanih okultacija.

Patuljasti planet Haumea se među transteptunskim objektima ističe po svom izduljenom obliku i po izrazito kratkom rotacijskom periodu (Brown et al. 2005; Rabinowitz et al. 2006; Brown et al. 2007). Za razliku od ostalih patuljastih planeta (Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Stern et al. 2015), Haumeine dimenzije, oblik, albedo i gustoća nisu bili precizno određeni.

U ovom poglavlju predstavljeni su rezultati opažanja zvjezdane okultacije s detekcijom sekundarnih događaja oko matičnog tijela Haumea. Nakon što su oko kentaura Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014), i Chirona otkriveni sustavi prstenova oko matičnih tijela (Ortiz et al. 2015; Ruprecht et al. 2015; Cikota et al. 2018), opažanja zvjezdane okultacije Haumeom prikupljena s različitih Zemaljskih opservatorija indiciraju postojanje prstenova i oko ovog patuljastog planeta. Osim otkrića prstenova oko Haumea, u nastavku ovog poglavlja diskutirane su metode određivanja osnovnih fizikalnih karakteristika patuljastog planeta Haumea.

4.2 Predviđanje zvjezdane okultacije i detekcija prirodnog satelita Hi'iaka

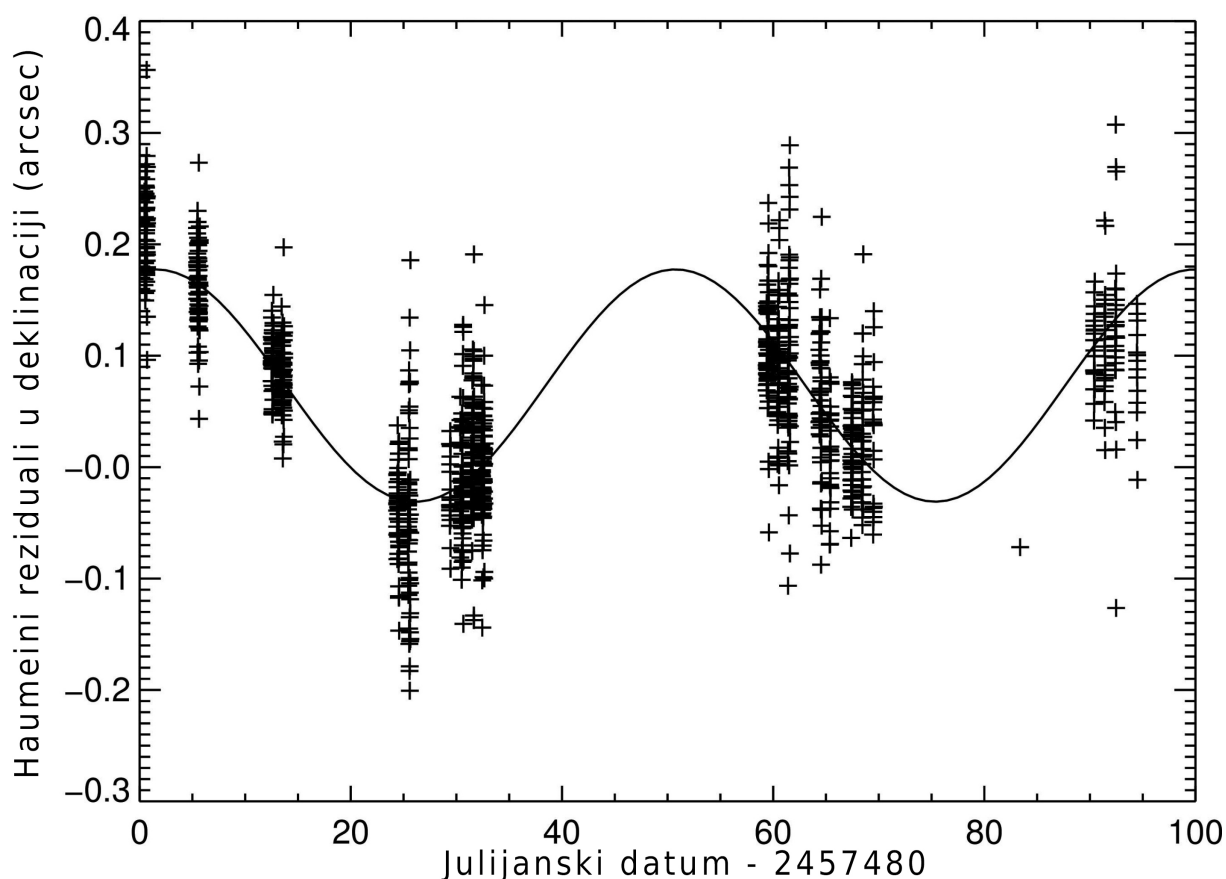
Zvjezdana okultacija patuljastim planetom Haumea prvi put je predviđena krajem 2015. godine uz pomoć kataloga zvijezda URAT1 i nekoliko različitih izvora efemerida za Haumeu. Zvijezda za koju je predviđena okultacija, URAT1 533-182543, relativno visokog sjaja $m_R = 17,6$ mag činila je nezahtjevan objekt za detekciju. Ispočetka je bilo jasno da će se događaj moći opažati s mnogih lokacija, teleskopima manje i srednje klase i instrumentima dostupnim na različitim zvjezdarnicama. Prva predviđanja okultacije temeljena na proračunima orbite za Haumeu generiranim na JPL (Jet Propulsion Laboratory), dostupnim na web sadržajima JPL Horizons, predviđala su putanju Haumeine sjene izvan Zemljinog poprečnog presjeka. Drugi izvori efemerida poput baze orbita AstOrb (<ftp://ftp.lowell.edu/pub/elgb/astorb.html>), i orbite određivane procedurom numeričke integracije NIMA - Numerical Integration of the Motion of an Asteroid (Desmars et al. 2015), projicirale su putanju Haumeine sjene unutar Zemljinog diska. Odstupanja u predviđanjima putanje Haumeine sjene, kao posljedica nepouzdanosti u Haumeinoj orbiti, bila su reda veličine 300 mas (lučnih milisekundi). S obzirom na to da je očekivani kutni promjer Haumea mnogo manji od toga, kako bi se osigurala detekcija okultacije, bila su potrebna preciznija predviđanja. Osim toga, prisustvo velikog prirodnog satelita

Hi'iaka koji kruži oko Haumee moglo bi izazvati astrometrijsku oscilaciju, sličnu onoj koja je detektirana u sustavu Orcusa i njegovog prirodnog satelita Vanth (Ortiz et al. 2011), uzrokovanu oscilacijom fotocentra oko baricentra sustava.

S ciljem poboljšanja preciznosti predviđanja okultacije, izvršeno je detaljno astrometrijsko opažanje Haumee. U razdoblju između 1. travnja i 4. srpnja 2016. godine, s teleskopom 0,77 m f/3 u kombinaciji s $4,096 \times 4,069$ CCD kamerom na Zvezdarnici La Hita (provincija Toledo, Španjolska), prikupljeno je više od 1000 astrometrijskih mjerenja Haumee. Nefiltrirane snimke prikupljane su na dnevnoj bazi (koliko god su dozvoljavali meteorološki uvjeti i mjesečina), i to u najvećoj mogućoj mjeri u trenutcima dok je Haumea bila blizu kulminacije, s ciljem minimizacije mogućih utjecaja poredbene kromatske refrakcije (DCR). Analizom podataka pronađene su efemeride koje su dale predviđanje putanje Haumeine sjene povoljne za opažanje s različitih lokacija širom Zemljinog diska. Nakon objave kataloga zvijezda Gaia-DR1, predviđanje je bilo poboljšano s novim koordinatama okultirane zvijezde kombinirajući položaj iz epohe 2015,0, s podacima o položaju i vlastitom gibanju zvijezde kataloga URAT1 iz njegove epohe 2013,669.

Konačne koordinate okultirane zvijezde (J2000) korištene u predviđanju, određene za epohu okultacije (2017,058), bile su rektascenzije $\alpha = 14 \text{ h } 12 \text{ min } 03,2034 \text{ s}$ i deklinacije $\delta = +16^\circ 33' 58,642''$. Nakon okultacije postao je dostupan HSOY („Hot Stuff for One Year“) katalog zvijezda (Altmann et al. 2017), koji sadrži koordinate i vlastita gibanja za 583 milijuna zvijezda iz Gaia-DR1 kataloga, usklađene s PPMXL katalogom zvijezda. Iz HSOY kataloga, J2000 koordinate za okultiranu zvijezdu za epohu 2017,058 dane su sa $\alpha = 14 \text{ h } 12 \text{ min } 03,2034 \text{ s}$, i $\delta = +16^\circ 33' 58,647''$, što se u potpunosti podudara u rektascenziji, i razlikuje za samo 4 mas u deklinaciji od u predviđanju korištenih koordinata.

U rujnu 2016. godine, naknadno je preispitana astrometrija Haumee za cjelokupan skup podataka prikupljen na zvezdarnici La Hita s 0,77 m teleskopom, uz korištenje Gaia-DR1 kataloga zvijezda. Zbog veće preciznosti Gaia-DR1 u odnosu na prethodne kataloge sličnog dometa u graničnom sjaju, rezultirajuća astrometrija pokazala je jasne oscilacije u odstupanjima u mjerenjima od generirane JPL orbite (razlika promatrano – izračunato), uzrokovan prisutnosti prirodnog satelita Hi'iake. Lombov periodogram (Lomb 1976) s izmjerenim odstupanjima u položaju deklinacije prikazao je najviši maksimum sa značajnom periodičnosti od $49,5 \pm 0,9$ dana, što se poklapa s prethodno određenim orbitalnim periodom prirodnog satelita Hi'iaka, u iznosu od $49,462 \pm 0,083$ dana (Ragozzine & Brown 2009). Sinusoidna prilagodba na odstupanja u položaju (slika 4.1) s orbitalnim periodom prirodnog satelita Hi'iaka ima maksimum kada je teorijski položaj Hi'iake bio na najsjevernijem položaju u odnosu na Haumeu, dok minimum sinusoidne prilagodbe odgovara vremenskom trenutku kada se satelit Hi'iaka nalazio u najjužnijem položaju. Ovom provjerom pokazano je da su oscilacije u astrometrijskim mjerenjima korelirane s teorijskim položajem prirodnog satelita Hi'iake. Za teorijske proračune orbite prirodnog satelita Hi'iake korišteni su alati generatora efemerida



Slika 4.1: Izmjerena astrometrijska odstupanja u položaju Haumea u deklinaciji prikazana su plus oznakama. Odstupanja su posljedica položaja fotocentra Haumeinog sustava u odnosu na teorijski položaj u deklinaciji, iz generiranih efemerida JPL#81. Odstupanja su prikazana u ovisnosti o datumu promatranja. Sva opažanja prikupljena su na zvjezdarnici La Hita, 0,77 m teleskopom. Krivulja predstavlja sinusoidnu prilagodbu na odstupanja, s periodom koji se podudara s orbitalnim periodom Haumeinog prirodnog satelita Hi'iaka, određenim u analizi Lomb-periodograma. U rektascenziji nisu detektirana odstupanja jer se orbita Hi'iake oko Haumea opažana sa Zemlje, u rektascenziji ne proteže toliko koliko i u deklinaciji. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

Miriade (<http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/>).

Sve ove informacije rezultirale su predviđanjem zvjezdane okultacije za 21. siječanj 2017. godine, koje je ukazivalo na put Haumeine sjene preko središnje Europe. Preciznost predviđanja u odnosu na orbitu JPL#81 (s verzijom DE431 planetarnih efemerida) bila je 174 mas u $\alpha\cos(\delta)$, i 73 mas u deklinaciji (δ). Ovo odstupanje predstavlja pomak baricentra Haumeinog sustava u odnosu na JPL#81 generirane efemeride. Početkom prosinca 2016. godine Haumea je ponovno opažana i izmjeren je njezin astrometrijski položaj pomoću kataloga referentnih zvijezda Gaia-DR1. Tijekom ovog opažanja prikupljane su snimke u optičkom filteru spektralnog pojasa R, a korišteni su različiti teleskopi s nekoliko zvjezdarnica (1,5 m teleskop opservatorija Sierra Nevada, 1,2 m CAHA teleskop opservatorija Calar Alto, 1 m teleskop opservatorija Pic du Midi, te 2 m Liverpool teleskop i 2,5 m Nordic Optical Telescope opservatorija Roque de los Muchachos). Pomoću prikupljenih podataka izmjerena su odstupanja u astrometrijskim mjerenjima u

odnosu na efemeride generirane iz orbitalnih parametara JPL-a (opažano – izračunato). Zatim je napravljena korelacijska analiza odstupanja u odnosu na izračunati teorijski položaj satelita Hi'iaka i utvrđena su odstupanja u rektascenziji i deklinaciji za položaj baricentra Haumeinog sustava u odnosu na teorijske efemeride. Ova odstupanja određena su iz linearne prilagodbe, i iznosila su 176 ± 6 mas u $\alpha \cos(\delta)$ i 73 ± 11 mas u δ u odnosu na orbitu JPL#81. Pogreške su određene iz nepouzdanosti u parametrima linearne prilagodbe. Ova odstupanja u potpunosti su se podudarala s odstupanjima određenim iz velikog astrometrijskog skupa podataka prikupljenih na zvjezdarnici La Hita. Spearmanovi koeficijenti korelacije iznosili su 0,91 za odstupanja u rektascenziji, i 0,88 u deklinaciji.

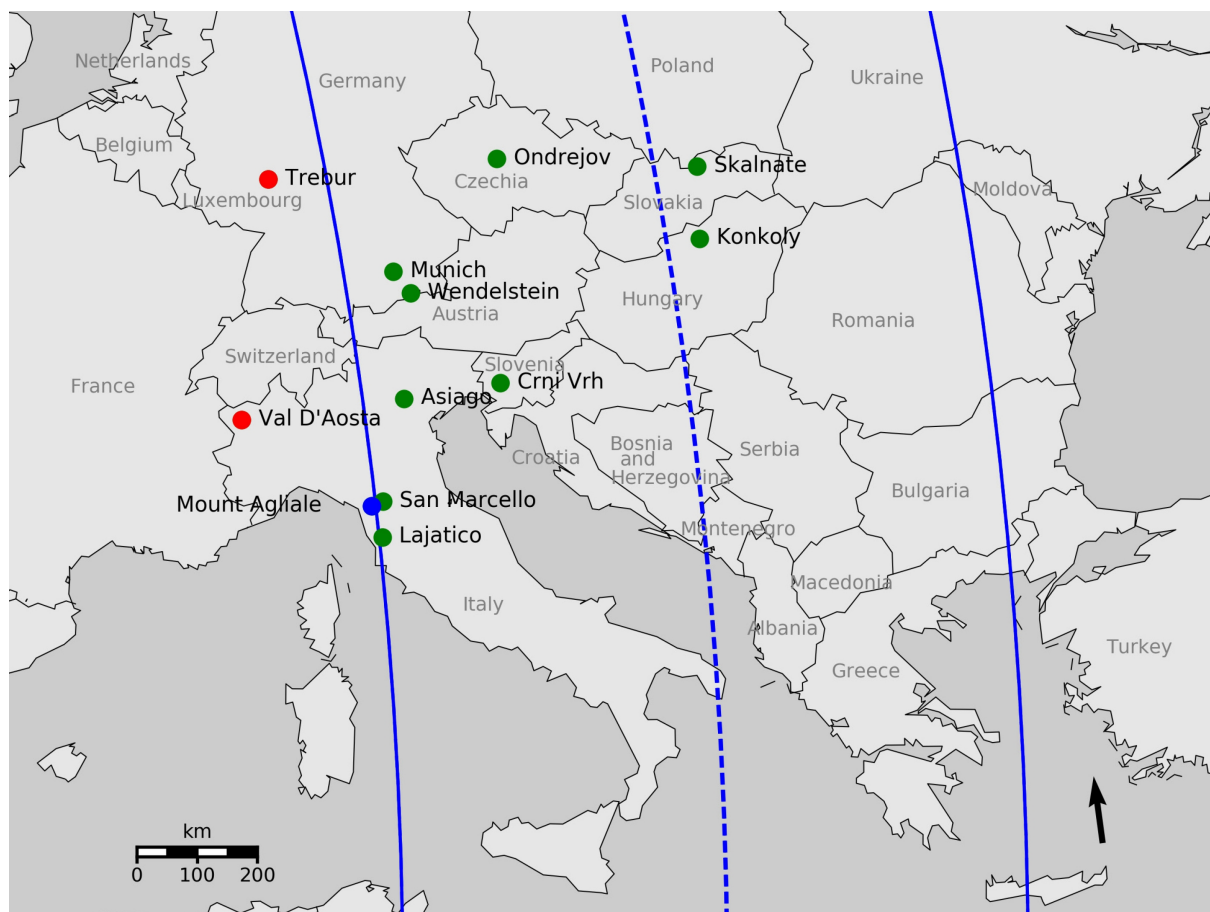
Dodatno, određena je udaljenost Haumea u odnosu na baricentar koristeći $1\,232/(1+r)$, gdje 1 232 predstavlja razmak Haumeinog prirodnog satelita Hi'iake od Haumea izražen u lučnim milisekundama, a r je omjer masa Haumea i Hi'iaka. Pretpostavljajući sličan albedo za Haumea i Hi'iake (ili čak veći za Hi'iake, prema dubini apsorpcijskih linija vodenog leda prikazanih u spektralnoj analizi opisanoj u Dumas et al. (2011)), omjer masa procijenjen je na približno 200. Projicirano na nebesku sferu, izračunato odstupanje položaja Haumea na dan 21. siječnja 2017. godine u odnosu na baricentar bio je -6 mas u deklinaciji i +2 mas u $\alpha \cos(\delta)$. Predviđena putanja sjene bila je povoljna za opažanja iz Italije i središnje Europe. S ciljem poboljšanja vjerojatnosti za pozitivnu detekciju, i kompenzacije mogućih sustavnih pogrešaka koje nisu bile uzete u obzir, organizirana je opsežna opažačka kampanja diljem Europe, u kojoj su na opažanje pozvani opažači s lokacija između Španjolske i Turske.

Karta završne putanje sjene projicirane na Zemlju, s označenim lokacijama koje su bile uključene u opažanja, prikazana je na slici 4.2. Središte Haumea za vrijeme okultacije odstupalo je od predviđanja za 17 mas u $\alpha \cos(\delta)$, i 16 mas u δ . Projicirano na Zemljinu površinu, to odstupanje iznosi 409 km od središta putanje Haumeine sjene, i 55 sekundi u predviđenom vremenu okultacije.

4.3 Opažanje zvjezdane okultacije i analiza podataka

Zvjezdana okultacija Haumeom, koja se dogodila 21. siječnja 2017. godine, opažana je s 12 različitih lokacija u Europi. Sekvence CCD snimki prikupljane na svakoj od opažačkih lokacija navedene su u tablici 4.1. Na opservatoriju Wendelstein snimke su prikupljane kroz Sloanov crveni optički filter pojasa r' , dok na svim ostalim lokacijama, s ciljem maksimiziranja omjera signala i šuma, nisu korišteni optički filteri. Izuzev opažanja prikupljenih s 1 m teleskopom Opservatorija Konkoly, sve sekvence snimki imale su prekide zbog nezanemarivog vremena očitavanja snimki s detektora kamere.

Iz sekvenci CCD snimki prikupljenih sa svakim teleskopom, te nakon uobičajenog oduzimanja tamnog polja i primjene ravnog polja, konstruirane su krivulje sjaja provođenjem sintetske



Slika 4.2: Karta Srednje Europe koja prikazuje lokacije opservatorija koji su detektirali okultaciju (zelene točke). Pune krivulje prikazuju granice putanje sjene. Opservatorij Mount Agliale je označen točkom plave boje jer okultacijom nije detektirano glavno tijelo, ali je detektiran prsten. Isprekidana krivulja prikazuje središte putanje Haumeine sjene. Oznaka München odgovara lokaciji Bavorskog javnog opservatorija. Puni nazivi opservatorija navedeni su u tablici 4.1. Crvenim točkama označeni su opservatoriji Trebur i Valle D'Aosta, dvije najbliže lokacije putanji sjene sa zabilježenim negativnim detekcijama. Koordinate opservatorija Trebur su $49^{\circ} 55' 31,5''$ N, $8^{\circ} 24' 40,6''$ E, a koordinate opservatorija Valle D'Aosta su $45^{\circ} 47' 22''$ N i $7^{\circ} 28' 42''$ E. Smjer kretanja Haumeine sjene je od dna slike prema vrhu, označen strelicom. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

Tablica 4.1: Popis opažača zvjezdane okultacije Haumeom, opažane 21. siječnja 2017. godine. Navedene su opažačke lokacije s kojih su prikupljena opažanja, glavni podaci opažanja za svaku lokaciju, te izmjerena vremena nestanka zvijezde (ulaska u sjenu), i ponovnog pojavljivanja zvijezde (izlaska iz sjene) uzrokovanih okultacijom glavnog tijela. Vremena su izmjerena prilagodbom modela jame prikazanih na slici 4.3. Vrijeme ciklusa predstavlja vremensko razdoblje između dvaju uzastopna osvjetljavanja. Na opservatorijima Wendelstein i Konkoly za opažanja su korištena po dva različita teleskopa. Meteorološki uvjeti na svim opažačkim mjestima bili su povoljni, osim na Bavarskom javnom opservatoriju (München) s povremenom naoblakom. Inicijale opažača u tablici P.B., M.M., L.N., L.M., M.B., F.M. i G.S. stoje za P. Bacci, M. Maestriepieri, L. Nerli, L. Mazzei, M. Bachini, F. Martinelli i G. Succi.

Lokacija	Koordinate, nadmorska visina	Promjer teleskopa, filter i opažać	Detektor/instrument, ekspozicija i vrijeme ciklusa	Vremena ulaska i izlaska (UT)
Opservatorij Skalnate Pleso, Slovačka (S)	49° 11' 21,8" N 20° 14' 02,1" E 1 826 m	1,3 m Bez filtra R. Komžik	Moravian G4-9000 10 s 15,503 s	3:08:26,79 ± 0,96 s 3:10:24,56 ± 0,8 s
Opservatorij Konkoly, Mađarska (K)	47° 55' 01,6" N 19° 53' 41,5" E 935 m	1,0 m Bez filtra A. Pál	Andor iXon-888 1 s 1,007 s	3:08:20,3 ± 0,2 s 3:10:17,39 ± 0,07 s
Opservatorij Konkoly, Mađarska (K)	47° 55' 01,6" N 19° 53' 41,5" E 935 m	0,6 m Bez filtra A. Pál	Apogee Alta U16HC 2 s 2,994 s	3:08:19,5 ± 0,8 s 3:10:16,4 ± 1,3 s
Opservatorij Ondrejov, Češka Republika (O)	49° 54' 32,6" N 14° 46' 53,3" E 526 m	0,65 m Bez filtra K. Hornoch	Moravian G2-3200 8 s 9,721 s	3:08:29,2 ± 0,8 s 3:10:12,2 ± 0,8 s
Opservatorij Črni Vrh, Slovenija (CV)	45° 56' 45,0" N 14° 04' 15,9" E 713 m	0,6 m Clear H. Mikuz	Apogee Alta U9000HC 300 s, driftano 315 s	3:07:54 ± 8 s 3:09:57 ± 10 s
Opservatorij Wendelstein, Njemačka (W)	47° 42' 13,6" N 12° 00' 44,0" E 1 838 m	2,0 m r' C. Ries	WWFI 10 s 14,536 s	3:08:27,9 ± 2,8 s 3:09:34,1 ± 0,5 s
Opservatorij Wendelstein, Njemačka (W)	47° 42' 13,6" N 12° 00' 44,0" E 1 838 m	0,4 m r' C. Ries	SBIG ST10-XME 30 s 53,096 s	3:08:18,8 ± 6 s 3:09:38,6 ± 6 s
Bavarski javni opservatorij, München, Njemačka (M)	48° 07' 19,2" N 11° 36' 25,2" E 538 m	0,8 m Bez filtra B. Gaehrken	ATIK 314L+ 20 s 20,304 s	3:08:30,0 ± 3,3 s 3:09:30,0 ± 4,9 s
Opservatorij Asiago, Cima Ekar, Italija (As)	45° 50' 54,9" N 11° 34' 08,4" E 1 376 m	1,82 m Bez filtra V. Nascimbeni	AFOSC 2 s 5,026 s	3:08:20,17 ± 0,08 s 3:09:13,27 ± 1,5 s
Opservatorij San Marcello Pistoiese, Italija (SMP)	44° 03' 51,0" N 10° 48' 14,0" E 965 m	0,6 m Bez filtra P.B., M.M., L.N., L.M.	Apogee Alta U6 10 s 11,877 s	3:08:22,9 ± 0,9 s 3:08:42,8 ± 0,9 s
Astronomski centar Lajatico, Italija (L)	43° 25' 44,7" N 10° 43' 01,2" E 433 m	0,5 m Bez filtra M.B., F.M., G.S.	Moravian G3-1000 15 s 16,254 s	3:08:19,9 ± 1,4 s 3:08:34,3 ± 1,4 s
Opservatorij Mount Agliale, Italija (Ag)	43° 59' 43,1" N 10° 30' 53,8" E 758 m	0,5 m Bez filtra F. Ciabattari	FLI Proline PL4710 15 s 16,724 s	*

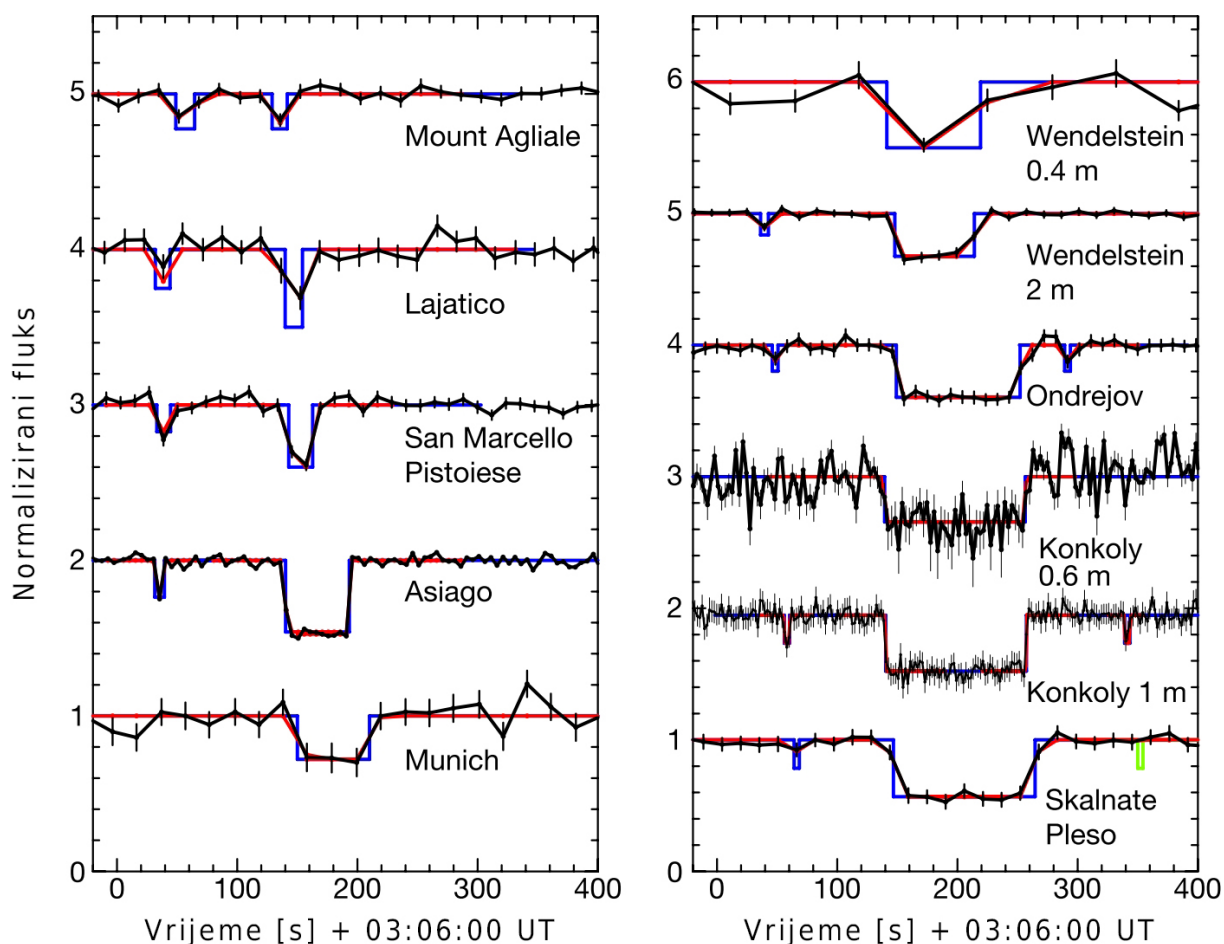
* S opservatorija Mount Agliale nije detektirana okultacija glavnog tijela Haumea. Kroz sporedne događaje detektirani su samo prstenovi. Detekcije prstenova navedene su u tablici 4.3.

Tablica 4.2: Osnovni podaci okultirane zvijezde. Podaci o sjaju preuzeti su iz kataloga zvijezda NOMAD. Promjer zvijezde procijenjen je na osnovu V, B, R, J, H i K fotometrijskih vrijednosti. Položaj je zadan u J2000 ekvinociju, za epohu 2017,0575, odnosno trenutak opažanog okultacijskog događaja Haumea. Brzina se odnosi na relativnu brzinu gibanja Haumea u odnosu na okultiranu zvijezdu, opažanu sa Zemljine površine.

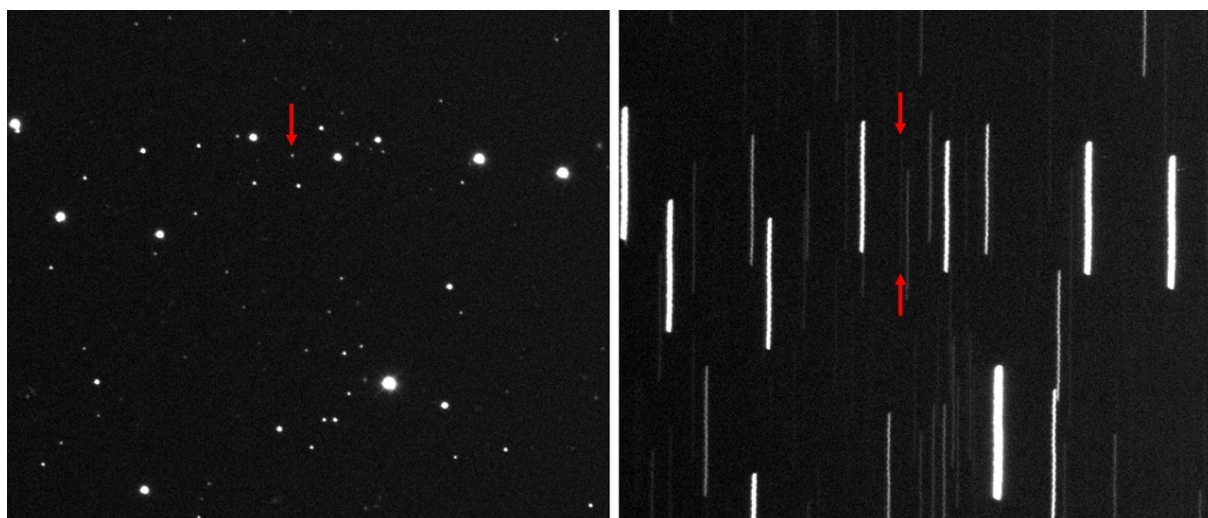
Oznaka	URAT1 533-182543 Gaia-DR1 1233009038221203584
Sjaj	B = 20,88 V = 17,97 R = 18,000 J = 15,353 H = 14,791 K = 14,532
Promjer	~0,007 mas (~0,27 km na udaljenosti Haumea)
Položaj	$\alpha = 14 \text{ h } 12 \text{ m } 03,2034 \text{ s}$ $\delta = +16^\circ 33' 58,624''$
Brzina	13,1 km/s

fotometrije aperture za okultiranu zvijezdu (u kombinaciji sa sjajem Haumea) u odnosu na referentne zvijezde u vidnom polju. Fotometrijska mjerenja sintetičke aperture izvedena su korištenjem DAOPHOT rutine, i odabirom optimalnog promjera aperture s ciljem smanjenja raspršenja u fotometrijskim mjerenjima. Izvedena su apsolutna fotometrijska mjerenja u odnosu na referentne zvijezde u vidnom polju na snimkama. Stoga je bilo moguće nadgledati male neujednačenosti u prozirnosti atmosfere, ili kompenzirati promjene u vidljivosti (seeingu). Vremenski podaci crpljeni su iz informacija dostupnim u zaglavljima CCD snimki. Odstupanja u ispisu vremena na različitim opservatorijima u prosjeku se procjenjuje na 0,1 s. Vremenska kalibracija na svim opservatorijima s kojih je okultacija opažana, izvedena je sinkronizacijom računalnih satova s vremenskim NTP serverima. Osnovni podaci okultirane zvijezde prikazani su u tablici 4.2. Prividni sjaj okultirane zvijezde bio je sličan prividnom sjaju Haumea. Stoga je za vrijeme okultacije bio očekivan pad u sjaju od približno 50 % od ukupnog iznosa kombiniranog sjaja okultirane zvijezde s Haumeom. Opažane krivulje sjaja okultacije (tok zračenja fotona u odnosu na prosječnu vrijednost u ovisnosti s vremenom) prikazane su na slici 4.3.

Opažanja prikupljena na opservatoriju Črni Vrh izvedena su metodom gibanja, opisanom u poglavlju 2.3.3. Korišteno vrijeme osvjetljavanja je 300 sekundi. Brzina gibanja teleskopa bila je 40"/min (lučnih sekundi po minuti) u smjeru deklinacijske osi. Stoga skup podataka prikupljen



Slika 4.3: Krivulje sjaja okultacije prikazane kroz normalizirani tok zračenja u ovisnosti o vremenu (za sredinu ekspozicije) prikupljene s različitih opservatorija koji su pozitivno detektirali okultaciju (tablica 4.1). Crne točke i linije predstavljaju fotometrijska mjerenja krivulja sjaja izvedenih iz prikupljenih opažanja. Plave linije prikazuju najbolje prilagodbe modela jame na glavno tijelo i prstenove, pod pretpostavkom širine i prozirnosti prstenova $W = 70$ km i $p' = 0,5$ (određenih iz opažanja prikupljenih na opservatoriju Konkoly). Crvene točke i linije odgovaraju optimalnom sintetičkom profilu izvedenom iz modela jame prilagođenom u svakoj točki opažanja (pogledaj poglavlje 4.6). Pravokutni profil zelene boje u opažanjima s opservatorija Skalnaté Pleso odgovara očekivanom trenutku izlaska prstenova, koji se dogodio za vrijeme očitavanja snimki s detektora kamere (pogledaj sliku 4.8). Krivulje sjaja pomicanе su okomito u koracima po 1 radi boljeg prikaza. Opažanja pod „Munich“ odgovaraju Bavarskom javnom opservatoriju. Prikazane trake pogrešaka odgovaraju 1σ . (Izvor: Ortiz et al. 2017)



Slika 4.4: Na lijevoj strani prikazan je isječak snimke prikupljen 21. siječnja 2017. godine s 0,6 m f/3,3 teleskopom Opservatorija Črni Vrh u Sloveniji, izravno pred okultaciju. Opažani izvor označen je crvenom strelicom. Sjaj izvora predstavlja ukupni kombinirani sjaj okultirane zvijezde i Haumee. Snimka je osvjetljavana 30 s i praćena sideričkom brzinom rotacije. Na desnoj strani prikazan je isječak snimke istog dijela neba prikupljen metodom gibanja. Snimka je osvjetljavana 300 s, a na brzinu sideričkog praćenja dodana je brzina gibanja od 40"/min na deklinacijsku os teleskopa. Rubovi traga opažanog izvora označeni su crvenim strelicama.

s opservatorija Črni Vrh nije obrađen uobičajenom fotometrijskom metodom sintetičke aperture, nego je nad njime primijenjen poseban postupak analize.

Budući da se teleskop gibao brzinom od 40"/min po deklinacijskoj osi, rezultirajuće snimke za vrijeme osvjetljavanja od 300 sekundi prikazuju zvijezde u tragovima duljine 200". Izmjereni SNR traga iznosio je približno 10. Iz razlučivosti CCD detektora od 1,4"/pix (lučnih sekundi po pikselu) slijedi da je postignuto efektivno vrijeme osvjetljenja od 2,1 sekunde po pikselu. Odabirom vremena osvjetljenja od 300 sekundi, te uz trajanje iščitavanja CCD detektora od 15 sekundi, udio neiskorištenog vremena u jednom ciklusu (ukupno vrijeme u kojemu se ne osvjetljava snimka) iznosio je samo oko 5 %.

Prikupljene snimke obrađene su standardnim procedurama u kojima je oduzeto tamno polje i primijenjeno ravno polje. Za analizu traga zvijezde okultirane s Haumeom (obje kombinirane u intenzitet traga), primijenjeni su alati za izradu linijskih profila, kao opisano u poglavlju 2.3.3. Isječak snimke s opažanim izvorom u vidnom polju, kao i primjer njegovog traga, prikazan je na slici 4.4. S lijeve strane, crvenom strelicom prikazan je opažani izvor izravno pred okultaciju. Sjaj izvora predstavlja ukupni kombinirani sjaj okultirane zvijezde i Haumee. S desne strane prikazan je isječak snimke istog dijela neba prikupljen metodom gibanja, na kojoj je crvenim strelicama označen početak i kraj kombiniranog traga Haumee i okultirane zvijezde.

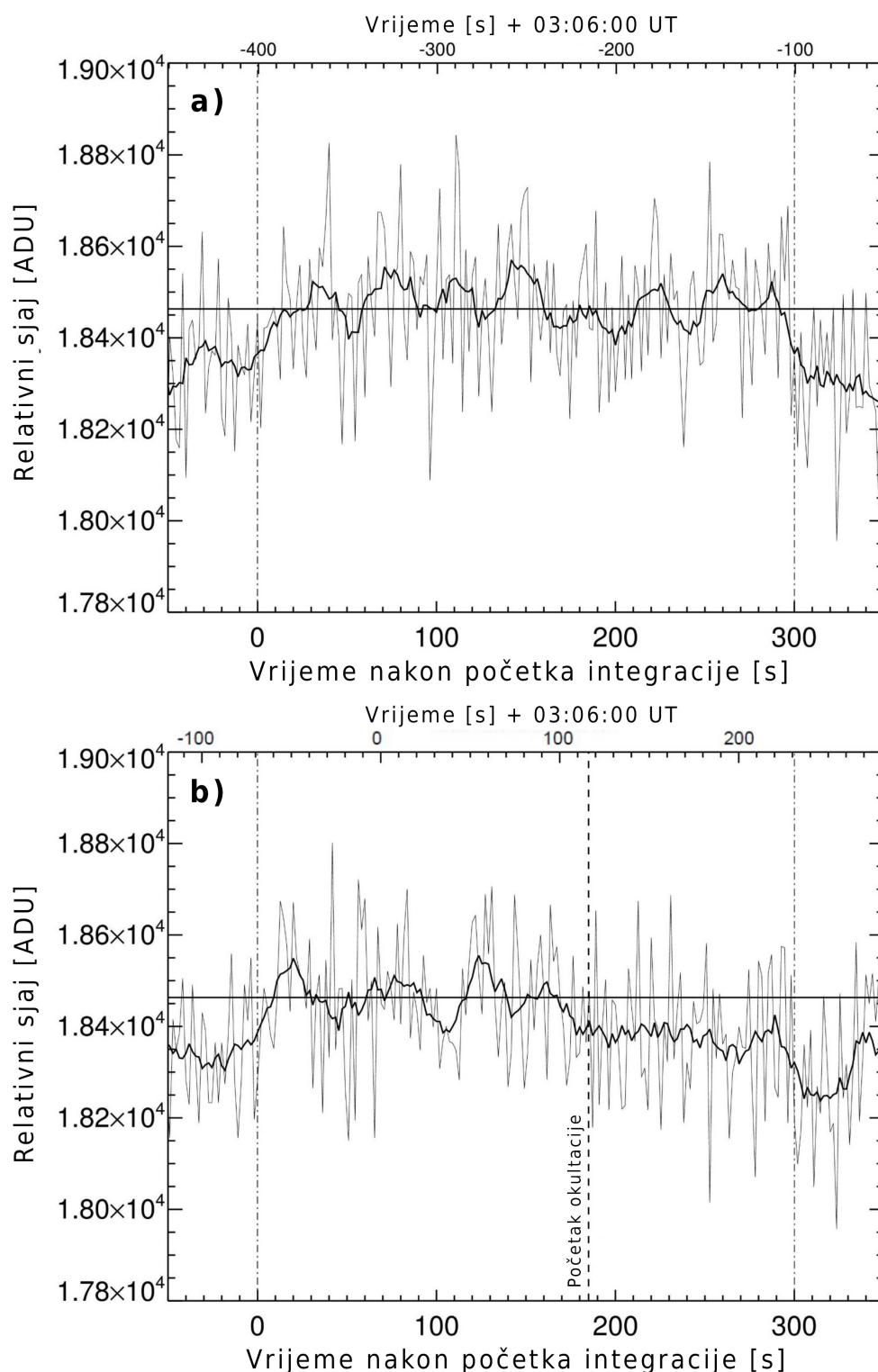
Poznavanjem brzine gibanja teleskopa, pikseli u profilnim linijama uzduž traga okultirane zvijezde preračunati su u vremensku skalu, i prikazani kao vrijeme nakon početka osvjetljavanja na grafičkim prikazima u slici 4.5.

Na slici 4.5a prikazana je profilna krivulja sjaja uzduž traga okultirane zvijezde (kombinirane sa sjajem Haumea) snimljene prije okultacije glavnim tijelom. Na y-osi prikazan je relativni intenzitet uzduž profilne krivulje. Kako bi bila prikazana razina pozadinskog šuma u snimci, te da prijelaz s pozadine na trag okultirane zvijezde nije oštro prepoznatljiv, početak profilne krivulje postavljen je 40 piksela prije početka traga, a završetak 40 piksela nakon završetka traga okultirane zvijezde. Horizontalna linija prikazuje srednju vrijednost intenziteta traga okultirane zvijezde. Debela crna krivulja predstavlja izgladenu profilnu liniju uz pomoć 10-pikselnog filtera usrednjavanja usrednjenog, korištenog za filtriranje visokofrekventnog šuma. Korištenjem brzine gibanja teleskopa od 40 lučnih sekundi po minuti, i poznavanjem kutnog razlučivanja teleskopa s CCD detektorom, pikseli profilne linije uzduž traga zvijezde prikazani na x -osi preračunati su u vremensku skalu. Tanke okomite isprekidane linije na 0 s i 300 s označavaju početak i kraj osvjetljavanja. Vrijeme početka osvjetljavanja snimke bilo je 02:59:19,50 UT. Intenzitet traga okultirane zvijezde je konstantan u odnosu na vrijeme. Profilna linija prije 0 s i nakon 300 s, pada do razine pozadinskog šuma snimke, jer ti pikseli obuhvaćaju područje izvan traga zvijezde. Stoga, vrijednosti prije 0 s i nakon 300 s, ne predstavljaju intenzitet traga okultirane zvijezde, nego intenzitet pozadinskog šuma. Slika 4.5b prikazuje profilnu liniju snimke okultirane zvijezde napravljene za vrijeme okultacije. Vrijeme početka osvjetljavanja snimke bilo je 03:04:50,11 UT. Debela isprekidana okomita linija na 185 s označava približni trenutak početka okultacije. Izgladena profilna linija prikazuje jasan pad intenziteta signala koji traje do kraja osvjetljavanja od 300 s, što znači da je okultirana zvijezda ostala zasjenjena od Haumea do kraja osvjetljavanja snimke. Stoga iz podataka s opservatorija Črni Vrh možemo odrediti samo vrijeme početka okultacije, te pretpostaviti da se izlazak iz Haumeine sjene dogodio za vrijeme očitavanja snimke s CCD detektora kamere. Ta pretpostavka bit će potvrđena i iz prilagodbe elipse na glavno tijelo, izvedene pomoću podataka prikupljenih na drugim opservatorijima, prikazanih u tablici 4.1. Iako su vremenske nepouzdanosti metode gibanja relativno velike, prikupljene snimke i dalje sadrže iskoristive podatke.

4.4 Prilagodba obrisa Haumea na okultacijske tetive

Vremena početaka i krajeva pomračenja okultirane zvijezde precizno su određena prilagodbom modela jame na prikupljena fotometrijska mjerenja okultacijskih opažanja sa svake od lokacija opažачkih opservatorija (tablica 4.1), osim za podatke prikupljene na opservatoriju Črni Vrh. Podaci prikupljeni na opservatoriju Črni Vrh obrađeni su u individualnoj tehnici obrade opisanoj u poglavlju 4.3.

Model jame, odnosno prilagodba naglog pada i rasta intenziteta krivulja sjaja zvjezdanih okultacija (Sicardy et al. 2011; Ortiz et al. 2012; Braga-Ribas et al. 2014; Benedetti-Rossi et al. 2016), aproksimacija je konvolucije sjene s Fresnelovim difrakcijskim uzorkom s kernelom



Slika 4.5: (a) Profilna krivulja sjaja uzduž traga okultirane zvijezde (kombinirane sa sjajem Haumea) snimljene metodom gibanja s opservatorija Črni Vrh prije okultacije s glavnim tijelom. Na y-osi prikazan je relativni intenzitet uzduž profilne krivulje. Horizontalna linija prikazuje srednju vrijednost intenziteta traga okultirane zvijezde. Debela crna krivulja predstavlja izgladenu profilnu liniju uz pomoć 10-pikselnog filtera usrednjavanja. Pikseli profilne linije uzduž traga zvijezde prikazani na x-osi preračunati su u vremensku skalu. Tanke okomite isprekidane linije na 0 s i 300 s označavaju početak i kraj osvjetljavanja. Vrijeme početka osvjetljavanja snimke bilo je 02:59:19,50 UT. (b) Profilna linija snimke okultirane zvijezde napravljenu za vrijeme okultacije. Vrijeme početka osvjetljavanja snimke bilo je 03:04:50,11 UT. Debela isprekidana okomita linija na 185 s označava približni trenutak početka okultacije. Izgladenu profilnu liniju prikazuje jasan pad intenziteta signala koji traje do kraja osvjetljavanja. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

zvjezdanoj promjera (van Belle 1999), za definirano spektralno područje osjetljivosti CCD detektora i konačno vrijeme integracije instrumenta (Widemann et al. 2009). No, treba primijetiti da je sintetička krivulja sjaja uvelike dominirana vremenom integracije pojedinih snimki, koje su u opažanju zvjezdane okultacije Haumea iznosile između 1 s i 30 s (tablica 4.1). Stoga projekcija gibanja Haumeine sjene po Zemljinoj površini brzinom od 13,1 km/s, za vremena eksponiranja pojedinih snimki, odgovara prijašnjem putu između 13,1 km i 393 km. Karakteristični razmak između maksimuma Fresnelovih difrakcijskih uzoraka projiciran na Zemljinu površinu je reda veličine 1,5 km (pojava Fresnelove difrakcije za vrijeme okultacija detaljnije je pojašnjen u poglavlju 5.4), te kutni promjer zvijezde, na udaljenosti Haumea, ekvivalentan je 0,27 km.

Slobodni parametri u prilagodbi kvadratne jame su vremena početka i kraja zvjezdane okultacije, t_{occ} , odnosno vremenski trenutci u kojima bi se okultacija dogodila po režimu geometrijske optike, s točkastim izvorom okultiranim s oštrim rubom. Procedura prilagodbe kvadratne jame na fotometrijska mjerenja bazirana je na potrazi za minimumom vrijednosti χ^2_{min} raspodjele:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\Phi_{i,obs} - \Phi_{i,cal})^2}{\sigma_i^2} \quad (4.1)$$

gdje su $\Phi_{i,obs}$ i $\Phi_{i,cal}$ opažani, odnosno izračunati tok zračenja u točki i ; σ_i je standardna devijacija u toj točki određena iz statistike intenziteta signala fotometrijskih mjerenja; a N je ukupan broj točaka uzetih u obzir.

Standardna devijacija σ za t_{occ} određena se variranjem t_{occ} na način da se poveća χ^2 od najbolje vrijednosti za χ^2_{min} do $\chi^2_{min} + 1$.

Konačno, glavni parametri prilagodbe su dubina jame (pad toka zračenja), vrijeme početka okultacije, i vrijeme kraja okultacije. Standardne devijacije su navedene u tablici 4.1. Za primijetiti je da su nepouzdanosti u zapisu vremena tijekom prikupljanja podataka red veličine manje od nepouzdanosti trenutaka početka i kraja okultacije koje proizlaze iz prilagodbe modela jame.

Iz vremena početka i kraja okultacije određenih na različitim geografskim lokacijama generirane su opažačke tetive okultacije, koji odgovaraju položajima okultirane zvijezde u odnosu na relativni položaj Haumea projicirane na nebesku sferu. Na relativne položaje početaka i krajeva okultacije prilagođen je obris (prividni rub nebeskog tijela) u obliku elipse, koja predstavlja obris Haumeine sjene. Prilagodba je izvedena potragom minimuma vrijednosti χ^2_{min} raspodjele, kao opisano jednadžbom (2.21) u poglavlju 2.3.4.

Prilagodbom su određeni parametri velike i male poluosi elipse a' i b' koji predstavljaju parametre eliptičnog prividnog ruba (obris) Haumea. Za razliku od parametara eliptičnog obrisa, koji opisuju dvodimenzionalnu projekciju Haumea na osnovnu ravninu, ovi parametri

ne smiju se zamijeniti s poluosima troosnog elipsoida, a , b i c . Korištenjem poznate udaljenosti Haumee od Zemlje u trenutku okultacije, u iznosu od 50,4847 a.j., parametri a' i b' preračunati su iz kutnih promjera izraženih u lučnim milisekundama u duljine izražene u kilometrima.

Prilagodбом su određeni parametri elipse od $1\,704 \pm 4$ km za veliku os i $1\,138 \pm 26$ km za malu os (slika 4.6), te pozicijski kut male osi od $-76,3^\circ \pm 1,2^\circ$. U prilagodbi je korišteno 9 okultacijskih tetiva, odnosno $N = 18$ točaka podataka raspoređenih po obrisu Haumea. Minimalna vrijednost raspodjele $\chi^2_{\min}$ (za najbolju prilagodbu) iznosi $\chi^2_{\min} = 18,6$. Promatrani problem ima $M = 5$ slobodnih parametara (veliku poluos a' , prividni elipticitet (spljoštenost) $\epsilon' = (a' - b')/a'$, orijentaciju elipse na nebu (pozicijski kut male poluosi P_{obris} koji se računa od lokalnog nebeskog sjevera prema istoku) i dvije koordinate središta elipse). Reducirana $\chi^2_{\min}$ -raspodjela (po stupnju slobode), $\chi^2_{\text{dof}} = \chi^2_{\min}/(N-M) = 1,43$, što implicira da je prilagodba zadovoljavajuća.

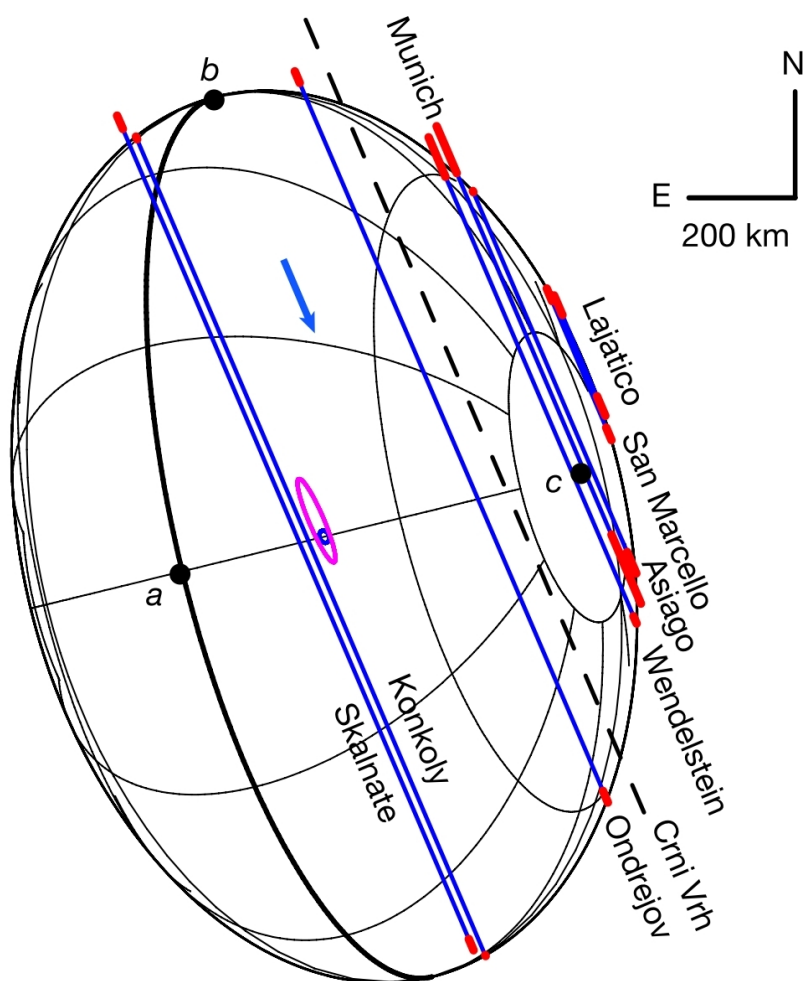
4.5 Mogućnost postojanja atmosfere i određivanje gornje vrijednosti atmosferskog tlaka

Globalne atmosfere poput onih viđenih kod Plutona, i na drugim tijelima Sunčevog sustava, tijekom zvjezdanih okultacija očituju se postepenim smanjenjem i povećanjem sjaja okultiranih zvijezda u rubnim kontaktima okultacije. Gornje vrijednosti atmosferskog tlaka u atmosferama poput Plutonove, u kojima dominiraju dušik ili metan, mogu se odrediti iz okultacijskih krivulja sjaja. Smrznuti dušik i metan su krutine koje još uvijek mogu sublimirati na udaljenostima od Sunca na kojem se nalazi Haumea (50,593 astronomskih jedinica). Iako ne postoje spektroskopski dokazi o postojanju smrznutog N_2 ili CH_4 u značajnim količinama na površini Haumea (Dumas et al. 2011), mogućnost njihove prisutnosti ispod površine ne može se u potpunosti odbaciti.

U ovom razmatranju mogućnosti za postojanjem atmosfere, i određivanje gornje vrijednosti Haumeinog atmosferskog tlaka, korišten je najbolji raspoloživi skup podataka - krivulja sjaja prikupljena na opservatoriju Asiago (slika 4.3). Iz mase Haumea $(4,006 \pm 0,040) \cdot 10^{21}$ kg (Ragozzine & Brown 2009), te uz pretpostavku da se tijelo nalazi u hidrostatskoj ravnoteži, određena je prosječna površinska gravitacija od $0,39 \text{ ms}^{-2}$.

Difrakciju i efekte loma svjetlosti okultiranih zvijezda kroz atmosfere objekata moguće je modelirati, u ovisnosti o postavljenoj slobodnoj varijabli atmosferskog tlaka na površini objekta p_{povrsina} , kao detaljno opisano u Sicardy et al. (2011) i Ortiz et al. (2012). Usporedbom modeliranih okultacijskih krivulja sjaja i opažanja, moguće je odrediti gornje vrijednosti globalnih atmosfera.

U prvom slučaju, razmatrana je čista izotermna atmosfera N_2 u termičkoj ravnoteži, s temperaturom na površini Haumea od 40 K (Lellouch et al. 2010). Na isti način kao u jednadžbi (4.1), osim što je sada slobodna varijabla p_{povrsina} , definirana je funkcija raspodjele χ^2 . Pronađeno je da je χ^2 minimalan za slučaj kada atmosfera nije prisutna, $p_{\text{povrsina}} = 0$, te da se $\chi^2_{\min} + 1$ dostiže



Slika 4.6: Plave linije prikazuju okultacijske tetive glavnog tijela, projicirane na nebesku sferu, opažane s 9 različitih lokacija (tablica 4.1). Crveni segmenti na rubovima svake okultacijske tetive prikazuju 1σ nepouzdanosti, određene pomoću vremenskih nepouzdanosti navedenih u tablici 4.1. Tetiva s opservatorija Črni Vrh prikazana je isprekidanom linijom jer ima značajne nepreciznosti. Za opservatorije na kojima su korištena dva teleskopa prikazana je samo bolja tetiva. Nebeski sjever („N“) i istok („E“) označeni su u gornjem desnom kutu, zajedno sa skalom duljine. Plava strelica prikazuje smjer gibanja okultirane zvijezde u odnosu na tijelo. Haumein prividni rub, uz pretpostavku da je eliptičkog oblika, prilagođen je na tetive, uzimajući u obzir nepouzdanosti na krajevima svake tetive (crvenih segmenata). Parametri elipse Haumeinog prividnog ruba (obrisa) određeni prilagodbom iznose $a' = 852 \pm 2$ km za veliku poluos i $b' = 569 \pm 13$ km za malu poluos, te pozicijski kut male poluosi $P_{\text{obris}} = -76,3^\circ \pm 1,2^\circ$. Haumein ekvator prikazan je pod pretpostavkom da je koplanaran s prstenovima, s planetocentričnim nagibom $B_{\text{prsten}} = 13,8^\circ \pm 0,5^\circ$ (pogledaj sliku 4.8). Ružičasta elipsa označava 1σ domenu nepouzdanosti za centar prstenova, a plava elipsa unutar nje domenu nepouzdanosti za Haumeino središte. Točke označene s „a“, „b“ i „c“ označavaju sjecišta poluosi modeliranog elipsoida a , b i c s površinom Haumea. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

za $p_{\text{povrsina}}(N_2) = 3 \text{ nbar}$, što predstavlja 1σ gornju vrijednost za atmosferu N_2 . Za 3σ gornju vrijednost atmosferskog tlaka $p_{\text{povrsina}}(N_2) = 15 \text{ nbar}$. Na slici 4.7 prikazano je kako bi izgledala opažana krivulja sjaja okultacije s prisutnom izotermnom atmosferom N_2 .

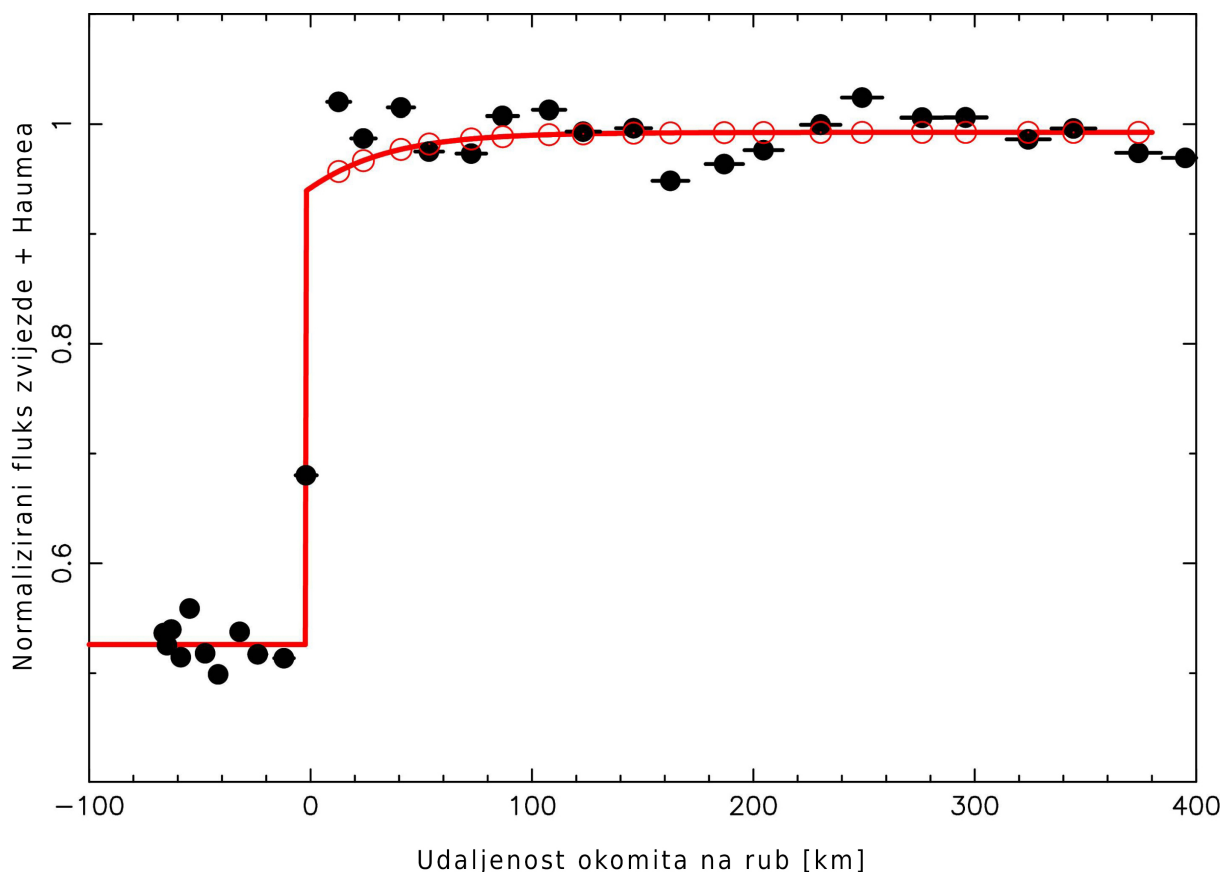
Atmosferu CH_4 bilo bi teže detektirati pomoću skupa podataka koji stoji na raspolaganju. To proizlazi iz činjenice da bi blisko-infracrveno zagrijavanje metana uzrokovalo toplinski profil počevši od tipične površinske temperature od 40 K, te se zatim povećavajući na približno 100 K u nekoliko kilometara debelu stratosferu (Ortiz et al. 2012). Skup podataka koji stoji na raspolaganju nema dovoljno visoko prostorno razlučivanje za detekciju tako tankog sloja atmosfere. Stoga iz skupa podataka možemo odrediti samo gornju vrijednost atmosferskog tlaka na površini od $p_{\text{povrsina}}(CH_4) = 10 \text{ nbar}$ (za 1σ nepouzdanost). U 3σ nepouzdanosti gornja vrijednost atmosferskog tlaka je $p_{\text{povrsina}}(CH_4) = 50 \text{ nbar}$.

Treba primijetiti da su određene gornje vrijednosti za tri reda veličine manje od atmosferskog tlaka na Plutonu, što znači da u slučaju da na Haumei postoji globalna atmosfera, bit će izuzetno rijetka.

4.6 Prilagodba prstenova na sekundarne okultacijske tetive

Osim okultacije glavnim tijelom Haumee, opažane fotometrijske krivulje sjaja otkrivaju i kratkotrajna zatamnjenja (padove u sjaju) prije i/ili nakon glavnog događaja okultacije, detektirane s većine opažačkih lokacija. Vremena ovih sporednih okultacijskih događaja, navedena u tablici 4.3, određena su prilagodbom modela jame na kratke događaje kao opisao za glavno tijelo u poglavlju 4.6. Međutim, jedini razlučeni profil presjeka prstenova prikupljen je u opažanjima s 1 m teleskopom opservatorija Konkoly (slika 4.3). Iz skupa podataka s opservatorija Konkoly određene su radijalne širine prstenova (širina u ravnini prstenova) $W_{\text{prsten}} \approx 74 \text{ km}$ pri ulasku u okultaciju i $W_{\text{prsten}} \approx 44 \text{ km}$ pri izlasku iz okultacije, s odgovarajućim prividnim prozirnostima (duž ravnine opažanja) od $p' = 0,55$ i $p' = 0,56$. To implicira tzv. ekvivalentne širine $W_{\text{ekvivalentna}} = W_{\text{prsten}} \cdot p'$ od 41 km, odnosno 25 km, koja predstavlja mjeru radijalno zbrojene količine materijala sadržane u prstenovima. Prividna prozirnost i prividna optička dubina su u relaciji kao $\tau' = -\ln(1-p')$. Konverzija iz prividne optičke dubine u normalnu optičku dubinu prstenova τ_N ovisi o tome je li prsten jedno- ili višeslojni, te o difrakcijskim pojavama do kojih može doći na pojedinim česticama prstenova (Braga-Ribas et al. 2014).

U prikupljenim podacima s ostalih opažačkih lokacija profili presjeka prstenova nisu razlučeni zbog duljine osvjetljavanja pojedinih snimki. Stoga je korišten pojednostavljen model jednolikog prstena širine 70 km i prividne prozirnosti 0,5, koji odgovara prosječnoj ekvivalentnoj širini određenoj iz podataka prikupljenih na opservatoriju Konkoly. Treba primijetiti da u opažanjima prikupljenim s opservatorija Skalnate (slika 4.3), izlazak prstenova nije detektiran jer se dogodio za vrijeme isčitavanja snimke s detektora (praznog hoda) CCD kamere. Nadalje,



Slika 4.7: Mjerenja na temelju kojih je određena gornja vrijednost atmosferskog tlaka Haumeine atmosfere N_2 . Crne popunjene točke prikazuju normalizirana fotometrijska mjerenja okultirane zvijezde u kombinaciji sa sjajem Haumea prikupljena na opservatoriju Asiago, s najvećim omjerom signala i šuma među svim opažačima, i dovoljnim vremenskim razlučivanjem za potragu za rijetkom atmosferom. Ta mjerenja kombiniraju podatke o toku zračenja prilikom ulaska i izlaska okultirane zvijezde u Haumeinu sjenu, i prikazani su u ovisnosti na udaljenost okomitu na Haumein lokalni rub, kakav je prikazan na slici 4.6. Horizontalne trake pogreške za svaku točku mjerenja prikazuju intervale udaljenosti koji odgovaraju vremenima integracije. Crvena krivulja prikazuje primjer krivulje sjaja generirane za izotermnu atmosferom N_2 pri temperaturi $T = 40$ K i površinskom tlaku $p_{\text{površina}} = 15$ nbar (za 3σ gornju vrijednost atmosferskog tlaka a bolju ilustraciju, jer bi vrijednost za 1σ od 3 nbar bila teško primjetna u ilustraciji). Crvene prazne točke prikazuju očekivani tok zračenja na svakoj podatkovnoj točki nakon konvolucije s točkom integracije. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

Tablica 4.3: Tablica prikazuje popis opažača sporednih okltacijskih događaja opažanih tijekom zvjezdane okultacije Haumeom, 21. siječnja 2017. godine. Navedene su opažačke lokacije s kojih su prikupljena opažanja, glavni podaci prikupljenih opažanja za svaku lokaciju, te izmjerena srednja vremena nestanka zvijezde (ulaska u sjenu), i ponovnog pojavljivanja zvijezde (izlaska iz sjene) uzrokovanih sekundarnim okultacijskim događajima, standardna devijacija toka zračenja i odnos šuma i signala (SNR) detekcije prstenova. Vrijeme ciklusa predstavlja vremensko razdoblje između dvaju uzastopna osvjetljavanja.

Lokacija	Koordinate nadmorska visina	Naziv teleskopa, promjer teleskopa, filter	Detektor/instrument, ekspozicija i vremenski ciklus	Srednje vrijeme događaja (UT), standardna devijacija toka zračenja, SNR detekcije prstenova (σ)
Opservatorij Skalnate Pleso, Slovačka (S)	49° 11' 21,8" N 20° 14' 02,1" E 1 826 m	Astelco 1300/10400, 1,3 m, Bez filtra	Moravian G4-9000 10 s 15,503 s	Ulazak 3:07:04,1 ± 5,6 0,044, 2,1
Opservatorij Skalnate Pleso, Slovačka (S)	49° 11' 21,8" N 20° 14' 02,1" E 1 826 m	Astelco 1300/10400, 1,3 m, Bez filtra	Moravian G4-9000 10 s 15,5 s	Izlazak * 3:11:50 ± 2,4 0,044, n.o.
Opservatorij Konkoly, Mađarska (K)	47° 55' 01,6" N 19° 53' 41,5" E 935 m	RCC, 1,0 m, Bez filtra	Andor iXon-888 1 s 1,007 s	Ulazak 3:06:58,1 ± 0,3 0,079, 4,5
Opservatorij Konkoly, Mađarska (K)	47° 55' 01,6" N 19° 53' 41,5" E 935 m	RCC, 1,0 m, Bez filtra	Andor iXon-888 1 s 1,007 s	Izlazak 3:11:40,7 ± 0,2 0,068, 3,5
Opservatorij Ondrejov, Češka Republika (O)	49° 54' 32,6" N 14° 46' 53,3" E 526 m	Ondrejov 650/2675, 0,65 m, Bez filtra	Moravian G2-3200 8 s 9,721 s	Ulazak 3:06:48,4 ± 4,2 0,041, 2,5
Opservatorij Ondrejov, Češka Republika (O)	49° 54' 32,6" N 14° 46' 53,3" E 526 m	Ondrejov 650/2675, 0,65 m, Bez filtra	Moravian G2-3200 8 s 9,721 s	Izlazak 3:10:51,6 ± 3,0 0,041, 2,9
Opservatorij Wendelstein, Njemačka (W)	47° 42' 13,6" N 12° 00' 44,0" E 1 838 m	2,0 m Fraunhofer f/7,8, 2,0 m, r'	WWFI 10 s 14,536 s	Ulazak 3:06:39,5 ± 3,9 0,021, 4,9
Opservatorij Asiago, Cima Ekar, Italija (As)	45° 50' 54,9" N 11° 34' 08,4" E 1 376 m	Copernico 1,82 m f/9, 1,82 m, Bez filtra	AFOSC 2 s 5,026 s	Ulazak 3:06:35,4 ± 0,3 0,029, 8,8
Opservatorij San Marcello Pistoiese, Italija (SMP)	44° 03' 51,0" N 10° 48' 14,0" E 965 m	0,60 f/4, 0,6 m, Bez filtra	Apogee Alta U6 10 s 11,877 s	Ulazak 3:06:38,8 ± 1,5 0,039, 5,8
Astronomski centar Lajatico, Italija (L)	43° 25' 44,7" N 10° 43' 01,2" E 433 m	RC 50 cm f/9, 0,5 m, Bez filtra	Moravian G3-1000 15 s 16,254 s	Ulazak 3:06:37,9 ± 5,1 0,067, 1,6
Opservatorij Mount Agliale, Italija (Ag)	43° 59' 43,1" N 10° 30' 53,8" E 758 m	50 cm f/4,6, 0,5 m, Bez filtra	FLI Proline PL4710 15 s 16,724 s	Ulazak 3:06:56,7 ± 1,4 0,031, 4,5
Opservatorij Mount Agliale, Italija (Ag)	43° 59' 43,1" N 10° 30' 53,8" E 758 m	50 cm f/4,6, 0,5 m, Bez filtra	FLI Proline PL4710 15 s 16,724 s	Izlazak 3:08:15,3 ± 4,2 0,031, 5,4

* Na opservatoriju Skalnate Pleso izlazak prstena nije detektiran jer se dogodio u praznom hodu CCD detektora (pogledaj sliku 4.8). Navedeno vrijeme izlaska je srednje vrijeme praznog hoda CCD detektora.

na opažачkim lokacijama opservatorija Lajatico, San Marcello Pistoiese, Asiago i Wendelstein, izlazak prstenova nije zabilježen, jer je bio prekriven glavnim tijelom Haumea (slika 4.8).

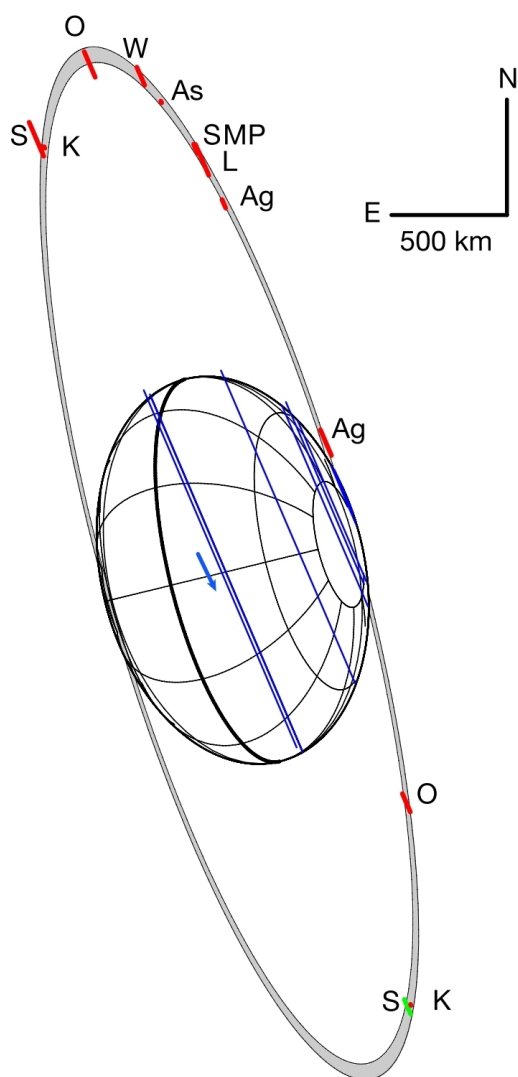
Dvanaest položaja ($N = 12$) sekundarnih događaja projiciranih na osnovnu ravninu korišteno je za pronalaženje prividno eliptične krivulje koja predstavlja Haumeine prstenove. Pri tome je korišten identičan pristup prilagodbe elipse kroz mjerenja kao i za prilagodbu obrisa glavnog tijela Haumea, opisan u poglavlju 4.6. S $M = 5$ slobodnih parametara u modelu, χ^2 testom po stupnju slobode na prilagođenu elipsu utvrđena je vrijednost $\chi^2_{\text{dof}} = 0,43$, što ukazuje na zadovoljavajuću prilagodbu. Izraženo u duljini, nepouzdanost radijalnog promjera prstenova iznosi 27 km. Završni model prstenova s pretpostavljenom širinom od 70 km, prikazan je na slici 4.8, te s detaljnijim prikazom sjevernog dijela prstenova na slici 4.9.

Parametri prilagodbe elipse su $a'_{\text{prsten}} = 2287^{+75}_{-45}$ km za prividnu veliku poluos elipse i $b'_{\text{prsten}} = 541 \pm 23$ km za malu poluos. Pozicijski kut male poluosi je $P_{\text{prsten}} = -74,3^\circ \pm 1,3^\circ$. Pod pretpostavkom da su prstenovi kružnog oblika, slijedi da je polumjer prstenova $r_{\text{prsten}} = 2287^{+75}_{-45}$ km i kut nagiba $B_{\text{prsten}} = \arcsin(b'/a') = 13,8^\circ \pm 0,5^\circ$. Pretpostavka o prstenovima oblika kružnice potkrepljuje činjenica da se središte postavljene elipse prstenova i centar prilagođenog obrisa Haumea podudaraju do na nepouzdanost (slika 4.8). Pozicijski kut male poluosi prstenova od $P_{\text{prsten}} = -74,3^\circ \pm 1,3^\circ$, do na nepouzdanost se poklapa s pozicijskim kutom male poluosi obrisa Haumea od $P_{\text{obris}} = -76,3^\circ \pm 1,2^\circ$, što je jedna dodatna indikacija da se Haumeini prstenovi nalaze u Haumeinoj ekvatorijalnoj ravnini.

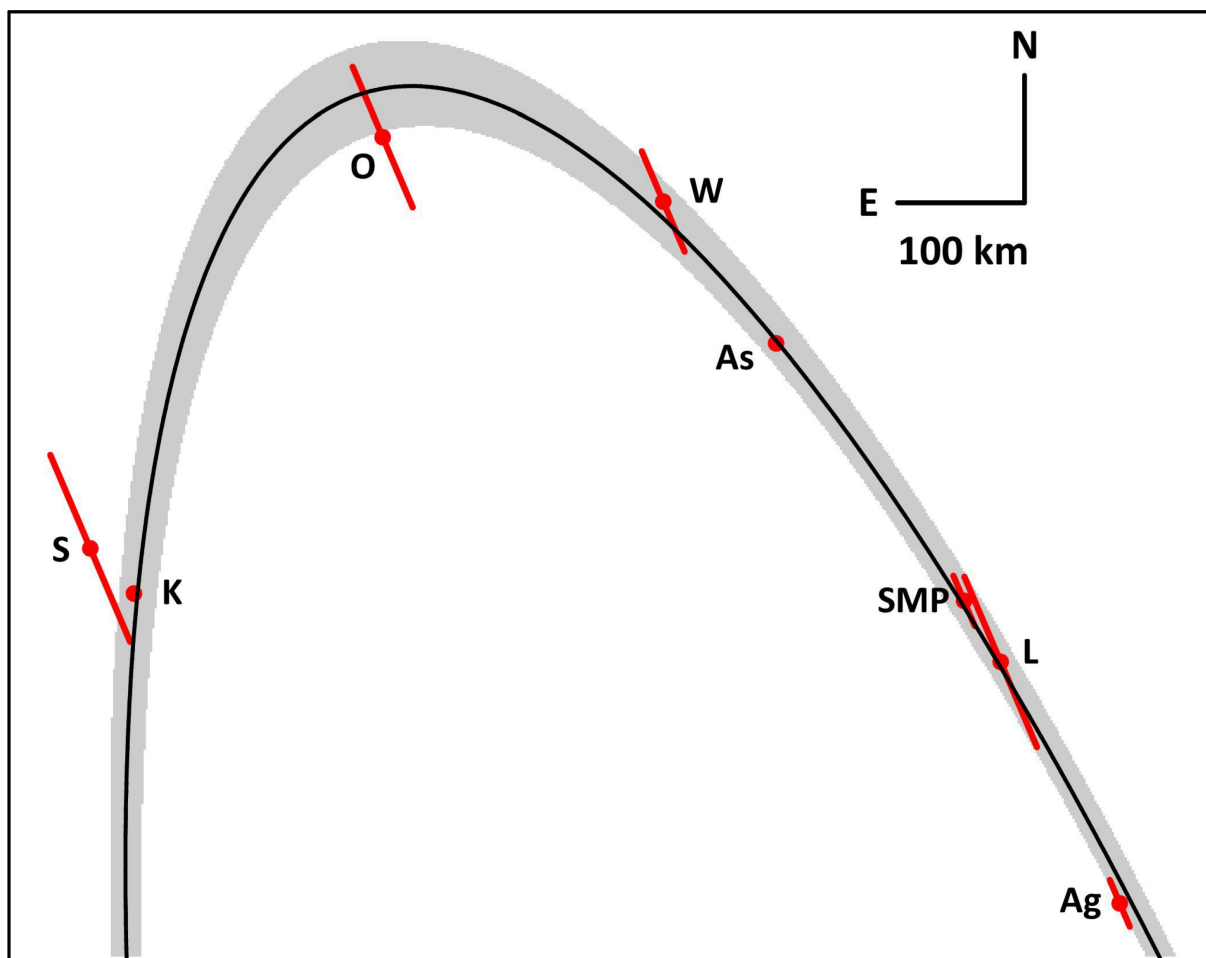
Polumjer prstenova podudara se s područjem gdje se očekuje 3:1 spin-orbit rezonancija. Ova rezonancija drugog reda nastaje kada je $2\kappa = \omega - n$, gdje je κ horizontalna epiciklička frekvencija čestice, n njezina srednja kutna brzina, a ω kutna brzina Haumeinog spina. Frekvencije κ i n klasično su zadane kao $n^2 = (dU_0/dr)/r$ i $\kappa^2 = d(r^4 n^2)/r^3$, pri čemu je $U_0(r)$ gravitacijski potencijal primarnog tijela usrednjen po azimutu, u ovisnosti o udaljenosti r od središta. Pod pretpostavkom da je primarno tijelo homogeni elipsoid s poluosima $a > b > c$, i uz definiranu spljoštenost $f = [\sqrt{(a^2 + b^2)/2} - c]/a$, slijedi f dobivamo $U_0(r) \approx -(GM/r)[1 + (f/5)(a/r)^2]$, gdje je G gravitacijska konstantna, a M masa Haumea. Uz korištenje određenih vrijednosti za a , b i c , te masu $M = (4,006 \pm 0,040) \cdot 10^{21}$ kg (Ragozzine & Brown 2009), slijedi da se rezonancija 3:1 pojavljuje na $r_{3:1} = 2285 \pm 8$ km, što se unutar nepouzdanosti podudara s određenim polumjerom prstenova.

4.7 Fotometrijska svojstva prstenova

Haumein opažani sjaj rezultat je sjaja glavnog tijela i doprinosa Haumeinih prstenova. S obzirom na to da je uspješno određena orijentacija prstenova, oblik glavnog tijela, geometrijski albedo glavnog tijela i polumjer prstenova, uz pretpostavku širine prstenova od 70 km i ostavljajući kao slobodan parametar reflektivnost prstenova I/F , moguće je modelirati sjaj Haumea i njezinih prstenova u ovisnosti o vremenu, te odrediti apsolutni sjaj Haumeinog sustava (Duffard et al.



Slika 4.8: Model Haumeine geometrije prstenova s parametrima najbolje prilagodbe na opažanja sporednih okultacijskih događaja (crvene oznake), s prikazom ostalih značajki glavnog tijela kao na slici 4.6. Crvene oznake prikazuju 1σ nepouzdanosti za srednje vrijeme sekundarnih događaja izmjerenih na opservatorijima Mount Agliale (Ag), Lajatico (L), San Marcello Pistoiese (SMP), Asiago (As), Wendelstein (W), Ondrejov (O), Konkoly (K) i Skalnate Pleso (S). Zbog niskog omjera šuma i signala, prstenovi nisu detektirani s Bavarskog javnog opservatorija (München). Na opservatorijima Wendelstein, Asiago, San Marcello Pistoiese i Lajatico prstenovi na izlasku nisu detektirani jer su prekriveni glavnim tijelom. Na opservatoriju Skalnate Pleso izlazak prstenova nije detektiran jer se dogodio za vrijeme isčitavanja snimki s CCD detektora (označeno zelenom bojom). Dvije prikazane elipse oko Haumea ocrtavaju prstenove široke 70 km s prividnom prozirnošću od 0,5 (sivi pojas) i velikom poluosi $a_{\text{prsten}} = 2287^{+75}_{-45}$ km. Najbolja prilagodba prstenova ukazuje na nagib prstenova od $B_{\text{prsten}} = 13.8^\circ \pm 0.5^\circ$ ($B_{\text{prsten}} = 0^\circ$ odgovaralo bi položaju prstenova u ravnini opažača), te pozicijski kut male poluosi od $P_{\text{prsten}} = -74.3^\circ \pm 1.3^\circ$, koji se do na nepouzdanost poklapa s pozicijskim kutom male poluosi Haumea od $P_{\text{obris}} = -76.3^\circ \pm 1.2^\circ$ (slika 4.6). Dodatno, položaj orbitalnog pola Hi'iaka (Gourgeot et al. 2016) za 21. siječanj 2017. godine ukazuje na visinu Hi'iaka od $B_{\text{Hi'iaka}} = -15.7^\circ$ i položaj gornje konjunkcije pod pozicijskim kutom od $P_{\text{Hi'iaka}} = -73.6^\circ$. Činjenica da su $|B_{\text{prsten}}| \approx |B_{\text{Hi'iaka}}|$ i $P_{\text{prsten}} \approx P_{\text{obris}} \approx P_{\text{Hi'iaka}}$, snažno podupiru tezu da Haumeini prstenovi i Hi'iaka orbitiraju u Haumeinoj ekvatorijalnoj ravnini. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

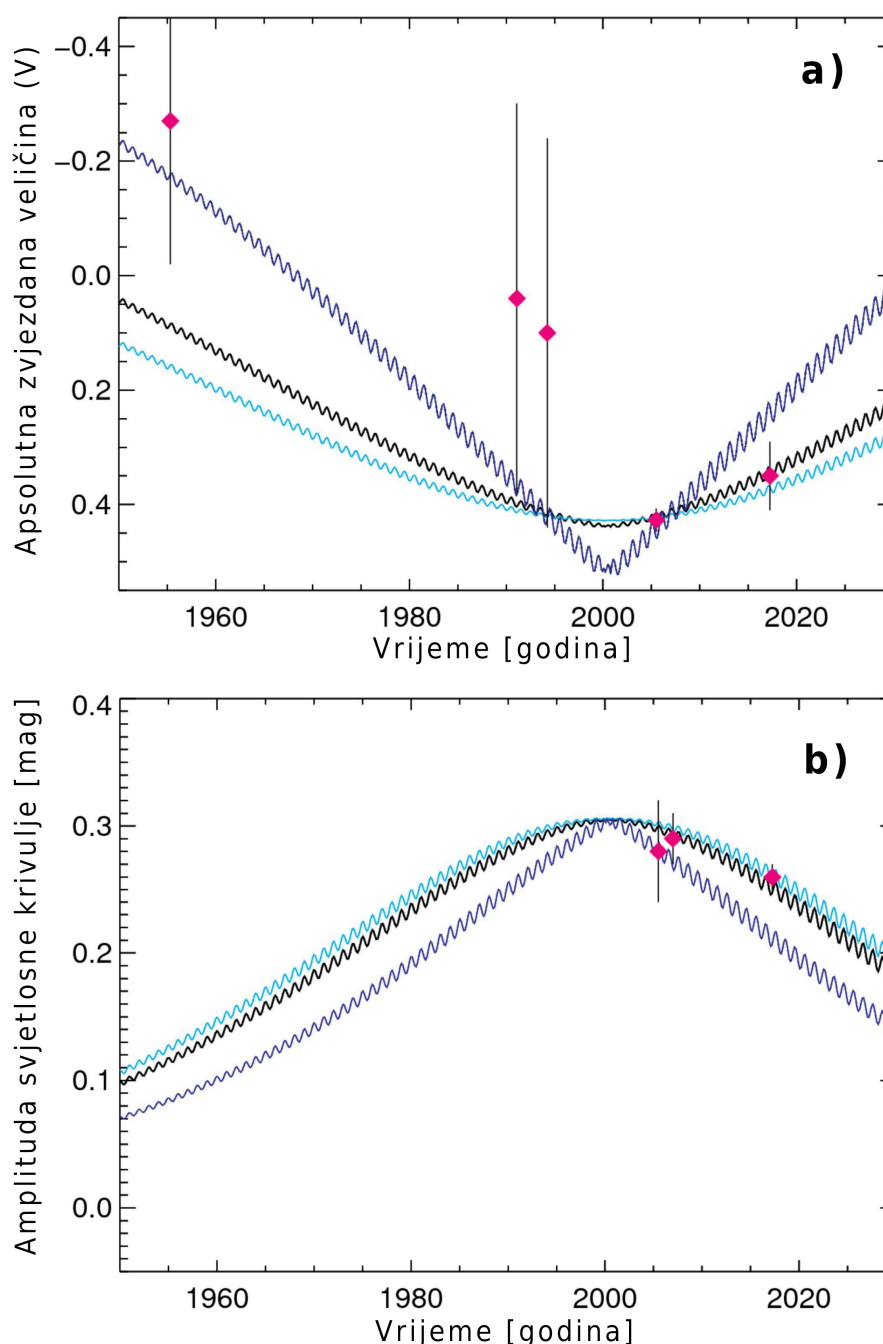


Slika 4.9: Detaljniji prikaz modela Haumeinih prstenova prikazuje okultacijske događaje duž sjevernog dijela prstenova. Najbolja prilagodba srednjeg polumjera prstenova od $a_{\text{prsten}} = 2287^{+75}_{-45}$ km prikazana je crnom krivuljom. Sivo područje prikazuje proširenje poluprozirnog prstena širokog 70 km, koji se podudara s prikupljenim podacima od dvanaest sekundarnih događaja prikazanih na slici 4.8. Duljinom crvenih segmenata označena je nepouzdanost koja proizlazi iz pogrešaka na vremenskim trakama pogreške. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

2014; Fernández-Valenzuela et al. 2017). Na slici 4.10a prikazan je apsolutni sjaj Haumeinog sustava kao funkcija epohe.

Za usporedbu predviđenog sjaja sa starim opažanjima, upotrijebljena je arhiva najranijih mjerenja dostupnih u bazi MPC-a. Iako je Haumea otkrivena 2003. godine, prva opažanja Haumea koja su naknadno pronađena i na snimkama projekta Digitized Sky Survey (DSS), potječu od 22. ožujka 1955. godine. Tada opažani prividni sjaj Haumea u spektralnom području crvenog R -pojasu iznosio je $m_R = 16,4$ mag. Pomoću Haumeinog $V-R$ indeksa boje koji iznosi $0,33 \pm 0,01$ (Snodgrass et al. 2010), izmjereni sjaj u R -pojasu preračunat je u prividni sjaj vidljivog spektralnog područja V -pojasu. Dakle, izvedeni prividni sjaj Haumea u vidljivom V -pojasu, te uz korekciju faznog kuta koristeći parametar nagiba za Haumeu od $0,11$ mag po stupnju (Rabinowitz et al. 2007), iznosi $m_V = 16,77$ mag. Iz Haumeinog prividnog sjaja, za heliocentrične i geocentrične udaljenosti, i bez rotacijske promjenjivosti uzete u obzir, za 1955. godinu određen je apsolutni sjaj od $H_V = -0,266$ mag, s procijenjenom nepouzdanošću od 20 %. Istom metodom, iz DSS podataka sadržanih u bazi podataka MPC-a određen je apsolutni sjaj za 1991. i 1994. godinu od $\sim 0,05$ mag, i $\sim 0,1$ mag, s procijenjenom fotometrijskom nepouzdanosti od najmanje oko 20 %. U sklopu ovog istraživačkog rada, iz opažanja prikupljenih s 1,5 m teleskopom na Opservatoriju Sierra Nevada Instituta za Astrofiziku Andaluzija (IAA), određeno je jedno novo mjerenje apsolutnog sjaja. Pri tome su korišteni standardni optički filtri Johnson Cousins u spektralnim pojasevima V i R . S ciljem što preciznijeg određivanja Haumeinog sjaja, istovremeno su prikupljana mjerenja Landolt referentnih zvijezda, koje su korištene za kalibraciju snimki istim metodama kao opisanim u poglavlju 3.3. Uz korekcije za heliocentrične i geocentrične udaljenosti, kao i korekciju faznog kuta korištenjem parametra nagiba navedenog u gornjem odlomku, te uzimanjem u obzir rotacijske promjenjivosti u trenutku opažanja (i uzimanjem u obzir srednje vrijednosti rotacijske krivulje sjaja), određen je apsolutni sjaj Haumea od $H_V = +0,35 \pm 0,06$ (slika 4.10a).

Kako bi apsolutni sjaj Haumea iz 1955. godine bio objašnjen, čini se da je potreban sustav prstenova sa znatnim doprinosom u Haumeinom sjaju. No snažan doprinos sjaja sustava prstenova rezultirao bi previše strmim ponašanjem modela koji se ne bi dobro podudarao preciznim mjerenjima izvedenim iz podataka prikupljenih 2005. i 2017. godine. Stoga, za prstenove širine 70 km trenutačno najbolja pretpostavka reflektivnosti, koja se dobro podudara s modelom, iznosi $I/F \approx 0,09$. U usporedbi s reflektivnošću prstenova drugih objekata u Sunčevom sustavu, slične prozirnosti kao Haumeinih prstenova, reflektivnost Haumeinih prstenova usporediva je s reflektivnošću glavnog prstena kentaura Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014), nešto je veće reflektivnosti od Uranovih α i β prstenova (Karkoschka 2001) reflektivnosti $I/F \approx 0,05$, te je manje reflektivnosti od Saturnovog A prstena (French et al. 2007) iznosa $I/F \approx 0,5$. Međutim, s ovom procjenom treba biti oprezan, jer su moguće i druge vrijednosti širine prstenova W_{prsten} , koje bi zadovoljavale relaciju $W_{\text{prsten}} \cdot I/F \approx 7$ km. Također, s obzirom na to da su nepouzdanosti mje-



Slika 4.10: Na slici a) prikazan je fotometrijski model apsolutnog sjaja spektralnog područja V-pojasa Haumeinog sustava kao funkcija ovisna o vremenu. Simboli crvene boje predstavljaju opažane vrijednosti, a linije su modeli. Krivuljom cijan boje prikazan je model bez prstenova, krivuljom crne boje model s prstenovima širine 70 km i reflektivnosti $I/F = 0,09$. U tom modelu, prstenovi Haumeinog sustava sa satelitom Hi'iaka u 2017. godini doprinose ukupnom sjaju s približno 2,5 %. Krivulja tamnoplave boje prikazuje model s prstenovima širine 140 km i reflektivnosti $I/F = 0,36$, koji doprinose s 20 % ukupnom sjaju Haumeinog sustava u 2017. godini. Na slici b) prikazan je model amplitude rotacijske krivulje sjaja za tri ista slučaja kao u a) slici. Crveni simboli predstavljaju opažanja amplitude iz literature (Rabinowitz et al. 2006; Lacerda et al. 2008), kao i iz ovog istraživačkog rada za 2017. godinu. (Izvor: Ortiz et al. 2017)

renja izvedenih iz starih podataka iz baze DSS-a velike, za poboljšanje modela bit će potrebna dodatna opažanja. Ova fotometrijska opažanja podudaraju se s orijentacijom pola prstenova, izraženom u ekvatorijalnim koordinatama J2000 (α_p, β_p) = (285,1°, - 10,6°). Model prstenova koji se najbolje podudara s fotometrijskim opažanjima iz 2005. i 2017. godine, ukupnom toku zračenja sustava u 2017. godini doprinosi s oko 2,5 %.

Dodatno, modelirana je promjenjivost amplitude Haumeine rotacijske krivulje sjaja u ovisnosti o epohi, pri čemu je uzet u obzir stalni doprinos Haumeinog prirodnog satelita Hi'iaka. Modelom su reproducirane amplitude rotacijskih promjenjivosti određene 2005. i 2007. godine (Rabinowitz et al. 2006; Lacerda et al. 2008), te amplituda koja je određena u sklopu ovog istraživačkog rada s prikupljenim podacima u 2017. godini. Za model glavnog tijela korišten je troosni elipsoid s $a = 1\,161$ km, $b = 852$ km i $c = 513$ km (vidi poglavlje 4.9). Pomoću modela određeno je da toku zračenja Haumeinog sustava prstenovi ne mogu pridonijeti s više od 5 %. U suprotnom brzina promjene amplitude bila bi previše visoka da bi bila kompatibilna s opažanjima (slika 4.10b).

Što se tiče porijekla prstenova, mogući su različiti mehanizmi koji su mogli dovesti do njihovog nastanka. Udari u Haumeu mogli su izbacivati materijal s Haumeine površine u njezinu orbitu, pri čemu dio materijala završi stvarajući prsten unutar Rocheove granice, eventualno koncentriran u posebno stabilnim područjima kao što su rezonantne orbite sa spinom, ili zaštićeni u blizini orbite prirodnog satelita. Alternativno, plimni ili kolizijski raspad prethodno postojećeg prirodnog satelita također bi mogao dovesti do nastanka diska krhotina u orbiti oko Haumea. Slični procesi diskutirani su već kao mogući mehanizmi nastanka prstenova pronađenih u sustavima oko Charikla (Braga-Ribas et al. 2014; Hyodo et al. 2016; Melita et al. 2017; Charnoz et al. 2018) i Chirona (Ortiz et al. 2015). Drugi scenariji se pak pozivaju na kometsku aktivnost kao izvor prstenova (Pan & Wu 2016), no s obzirom na to da je Haumea vrlo daleki i veliki transneptunski objekt, malo je vjerojatno da je scenarij kometske aktivnosti na Haumei glavni mehanizam odgovoran za nastanak prstenova. U svakom slučaju, moguće je da je proces nastanka prstenova oko Haumea povezan s procesom koji je stvorio Haumeine prirodne satelite Hi'iaku i Namaku, a možda i cijelu Haumeinu obitelj objekata sličnih orbitalnih parametara (Schlichting & Sari 2009).

Pojedini modeli (Hedman 2015) ograničavaju mogućnost da prstenovi mogu postojati isključivo na udaljenostima između 8 i 20 astronomske jedinice od Sunca. Otkrićem prstenova oko Haumea, koja se trenutno nalazi na heliocentričnoj udaljenosti većoj od 50 astronomske jedinice, ova teza je opovrgnuta, iako nije isključena mogućnost da je Haumea nastala mnogo bliže Suncu, te da je s već nastalim prstenovima migrirala na svoj trenutni položaj.

4.8 Geometrijski albedo Haumee

Za tijela Sunčevog sustava poznate projicirane veličine (A) i poznatog sjaja, može se odrediti geometrijski albedo objekta pomoću relacije:

$$p_v = \frac{10^{0,4(V_{\text{Sunce}} - H_V)}}{A/\pi} \quad (4.2)$$

gdje je V_{Sunce} prividni sjaj Sunca ($m_V = -26.74$ mag), a H_V apsolutni sjaj objekta, koji se može izvesti iz rotacijski usrednjenog apsolutnog sjaja ($\langle H_V \rangle$) glavnog tijela Haumee. Vrijednost $\langle H_V \rangle$ sadrži doprinos sjaja prstenova i prirodnih satelita Hi'iaka i Namake, koji bi za izračun pravog geometrijskog albeda glavnog tijela koristeći efektivni promjer Haumee, odnosno projiciranu površinu Haumeinog obrisa određenu okultacijom, trebali biti oduzeti od ukupnog sjaja.

Vrijednost $\langle H_V \rangle$ Haumeinog sustava određena na temelju zemaljskih opažanja (Rabinowitz et al. 2007) iznosi $0,428 \pm 0,011$ mag. Međutim, taj apsolutni sjaj odgovara mjerenjima iz 2005. godine, no treba koristiti vrijednost određenu u 2017. godini, prikazanu na slici 4.10, koja je za 0,07 mag sjajnije. Doprinos Haumeinih prstenova ukupnom sjaju Haumeinog sustava (glavno tijelo + prstenovi) u prethodnom poglavlju procijenjen je gotovo zanemarivim. Stoga, oduzimanjem doprinosa od 2,5 % u sjaju $\langle H_V \rangle$, te približno 11 % doprinosa Haumeinih prirodnih satelita Hi'iaka (Ragozzine & Brown 2009; Hastings et al. 2016) i Namaka, dobivamo vrijednost za apsolutni sjaj H_V glavnog tijela Haumee za vrijeme okultacije od $0,35$ mag + $0,14$ mag + $0,32/2$ mag (iznos od $0,32/2$ mag dodan je jer je Haumea u trenutku okultacije bila na svom rotacijskom minimumu, a amplituda krivulje sjaja je 0,32 mag, kao pojašnjeno u poglavlju 4.9).

Dobiveni geometrijski albedo s projiciranom površinom obrisa Haumee (A) uzetom u obzir za vrijeme okultacije je 0,51, što je mnogo manja vrijednost od posljednjeg mjerenja dostupnog u literaturi u iznosu od $0,804^{+0,062}_{-0,095}$, utvrđenog na temelju Herschelovih infracrvenih opažanja u kombinaciji sa Spitzerovim podacima (Fornasier et al. 2013). Nešto stariji modeli izvedeni iz Herschelovih i Spitzerovih mjerenja (Lellouch et al. 2010) rezultirali su s albedom od 0,70–0,75, što su također mnogo veće vrijednosti od onih određenih iz opažane okultacije.

Glavni razlog odstupanja u procjeni geometrijskog albeda proizlazi iz činjenice da rezultati opažane okultacije upućuju na veće glavno tijelo nego što je ranije procijenjeno pomoću Herschelovih i Spitzerovih infracrvenih mjerenja, moguće kao posljedica različitih parametara zračenja ili faznih integrala, ili nedostataka u termalnim modelima kada se primjenjuju na vrlo izdužene objekte kao što je Haumea. Termalni modeli za sferna tijela sustavno podcjenjuju promjere i precjenjuju albede elipsoidnih asteroida (Brown 1985). Čini se da isto vrijedi i za udaljene objekte poput transneptunskih objekata. Dodatno, prisustvo prstenova nije bilo predviđeno u dosadašnjim procjenama albeda, i njihov doprinos nije uzet u obzir u termičkim modelima. Dakle, Haumea je znatno veća i manje reflektirajuća nego što je bilo ranije proci-

jenjeno. Stoga je Haumeina površina vjerojatno prekrivena većim udjelom stijena u odnosu na led, nego do sada procijenjenog. S ovom vrijednošću geometrijskog albeda, ponovna analiza Haumeinog spektra nagovještava da dio površine koji nije prekriven ledom može biti puno veći od 8 % (Pinilla-Alonso et al. 2009).

4.9 Trodimenzionalni oblik i gustoća Haumee

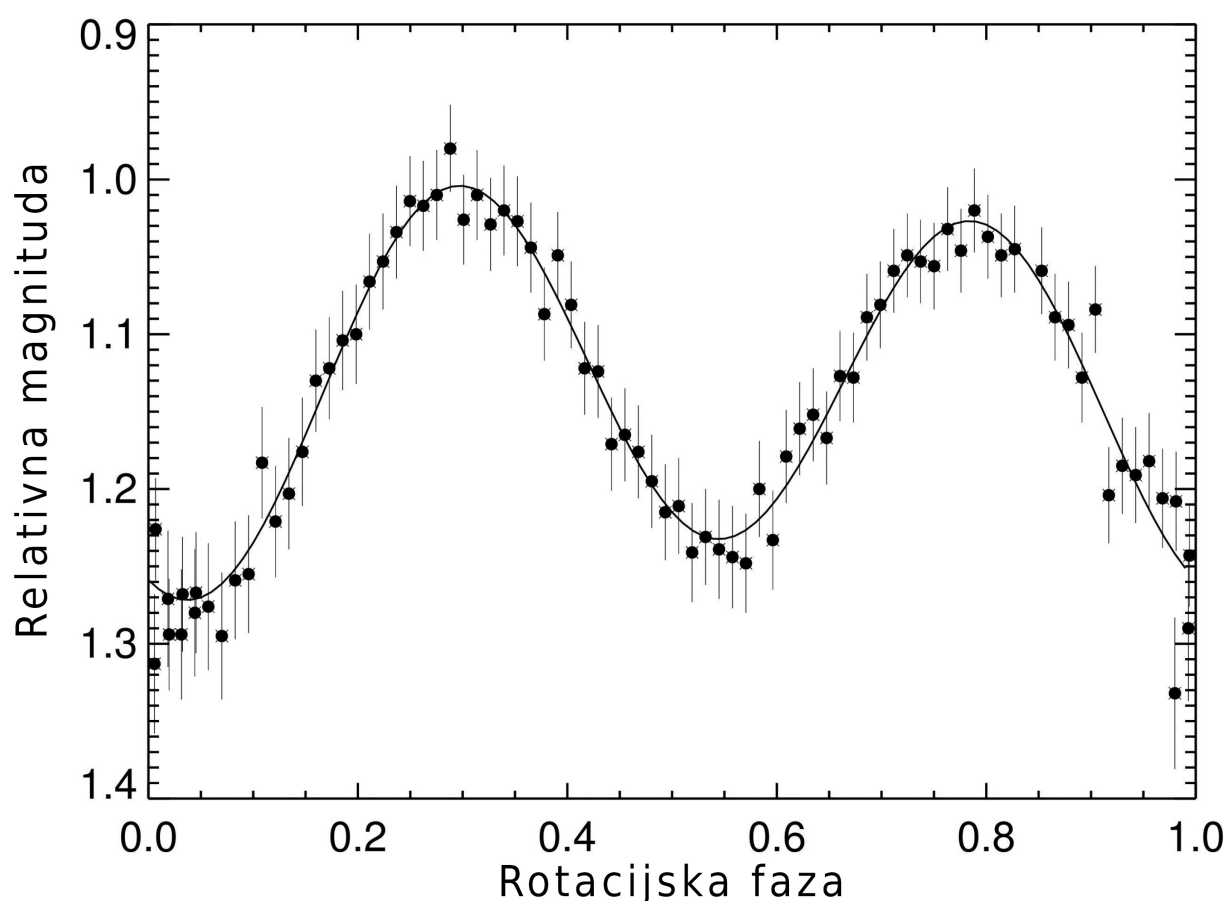
Iz mjerenja rotacijske krivulje sjaja izvedene prije i poslije okultacije, te pomoću precizno određenog perioda rotacije Haumee od $3,915341 \pm 0,000005$ h (Lellouch et al. 2010), određena je rotacijska faza u trenutku okultacije. Haumea se u trenutku okultacije nalazila u apsolutnom minimumu svog sjaja, što znači da je projicirani poprečni presjek tijela bilo u minimumu. Rotacijska krivulja sjaja Haumee prikupljena dva dana nakon okultacije s opservatorija Valle D'Aosta prikazana je na slici 4.11.

Budući da je amplituda rotacijske krivulje sjaja poznata i iznosi 0,32 mag (Lellouch et al. 2010), upotrijebljen je izraz koji povezuje amplitudu rotacijske krivulje sjaja i osi troosnog elipsoidnog tijela (Binzel et al. 1989):

$$\Delta m = -2,5 \log \left[\frac{b}{a} \left(\frac{a^2 \cos^2(\theta) + c^2 \sin^2(\theta)}{b^2 \cos^2(\theta) + c^2 \sin^2(\theta)} \right)^{1/2} \right] \quad (4.3)$$

gdje su $a > b > c$ poluosi elipsoida, Δm je amplituda krivulje sjaja, a θ je kut opažanja, koji je komplementaran kutu planetocentrične širine subzemljine točke (kut jednak kutu nagiba prstenova, kao prethodno spomenuto). Ovaj kut opažanja za 2017. godinu u trenutku okultacije iznosio je $\theta_{17} = 90^\circ - 13,8^\circ = 76,2^\circ \pm 0,5^\circ$, a 2009. godine, kada su prikupljena opažanja sa Svemirskim teleskopom Hubble (Lockwood et al. 2014), $\theta_{09} = 90^\circ - 6,5^\circ = 83,5^\circ \pm 0,5^\circ$. U ovoj procjeni korištena je amplituda iz Lockwood et al. (2014), koja je određena pomoću podataka prikupljenih sa Svemirskim teleskopom Hubble, te s kojim su razlučeni glavno tijelo Haumee od njezinih prirodnih satelita Hi'iaka i Namaka. Stoga, za razliku od svih drugih opažanja prikupljenih sa zemaljskim instrumentima, u ovoj procjeni doprinos sjaja Haumeinih prirodnih satelita nije utjecao na fotometrijska mjerenja.

Uz činjenicu da je os okultacije u trenutku okultacije bila okrenuta prema nama, pomoću relacije $(b')^2 = c^2 \sin^2(\theta_{17}) + a^2 \cos^2(\theta_{17})$ moguće je povezati malu poluos elipse Haumeinog obrisa izmjerenu 2017. godine ($b' = 569$ km) s malom poluosi troosnog elipsoida. Kombiniranjem ovu jednadžbe s prethodnom, i korištenjem prethodno spomenute numeričke vrijednosti, slijedi $a \times b \times c = (1\,161 \pm 30) \text{ km} \times (852 \pm 2) \text{ km} \times (513 \pm 16) \text{ km}$. nepouzdanost duljine poluosi a proizlazi iz nepouzdanosti amplitude krivulje sjaja Δm . Gore navedena vrijednost nepouzdanosti od $\pm 0,006$ činila se previše optimistična kao nepouzdanost na određenu amplitudu



Slika 4.11: Rotacijska krivulja sjaja Haumea snimljena bez optičkih filtera dva dana nakon okultacije s teleskopom promjera 0,81 m opservatorija Valle D'Aosta. Relativni sjaj na y-osi u prividnoj magnitudi prikazan je u odnosu na rotacijsku fazu na x-osi. Rotacijska nulta faza uspostavljena je za vrijeme okultacije, a upotrijebljeni period rotacije bilo je 3,915341 h. Prepoznatljivo je da je apsolutni minimum sjaja dostignut za vrijeme okultacije, što znači da je projicirani poprečni presjek Haumea u trenutku okultacije također bilo u svom minimumu. Amplituda od vrha do vrha krivulje sjaja iznosi $0,25 \pm 0,02$ mag. Trake pogrešaka su 1σ . (Izvor: Ortiz et al. 2017)

jer Haumea vjerojatno nije homogenog albeda u potpunosti. Zbog moguće prisutnosti stijena i leda na površini Haumea s različitim svojstvima albeda, korištena je vjerojatnija vrijednost od $\pm 0,02$. Nepouzdanost duljine poluosi b proizlazi uglavnom iz prilagodbe prividnog obrisa Haumea (slika 4.6), jer je poluos a za vrijeme okultacije bila okrenuta prema nama. Konačno, nepouzdanost duljine poluosi c proizlazi izravno iz nepouzdanosti prividne male poluosi, 569 ± 13 km, koja također proizlazi iz prilagodbe prividnog obrisa Haumea.

Amplituda od 0,32 mag zapravo je donja granica za Δm , jer konstantan doprinos sjaja prstenova nije uzet u obzir. Stvarna amplituda samo glavnog tijela Haumea, bez prstenova, bila bi veća od 0,32 mag. Međutim, kao što je prikazano u prethodnim poglavljima, doprinos prstenova Haumeinom sustavu je mali, a time je i očekivana razlika u amplitudi krivulje sjaja koja proizlazi iz utjecaja prstenova mala. Svedeno se ne može isključiti mogućnost još uvijek nepoznatih prirodnih satelita, ili dodatnih prstenova, koji bi mogli doprinijeti amplitudi po nekoliko posto.

Gustoća Haumea, određena kroz vrijednosti a , b i c , te masu određenu pomoću orbitalnog perioda satelita Hi'iake (Ragozzine & Brown 2009), je $1\,885 \pm 80 \text{ kg m}^{-3}$. Za poluos a veću od ovdje utvrđenih nominalnih 1 161 km, gustoća bi bila manja od $1\,885 \text{ kg m}^{-3}$. Za doprinos sjaja prstenova od 5 % (veći nego što je potreban da bi se uklopio u mjerenja apsolutnog sjaja), velika os iznosila bi 2 520 km, volumenu-ekvivalentni sferni promjer bio bi 1 632 km, a gustoća bi iznosila $1\,757 \text{ kg m}^{-3}$. Ova vrijednost smatra se donjom granicom. Gustoće vrijednosti od $1\,885$ - $1\,757 \text{ kg m}^{-3}$ dobro se poklapaju s prosječnim vrijednostima gustoće ostalih poznatih velikih transneptunskih objekata, i u skladu su s trendom povećanja gustoće u ovisnosti s promjerom (npr. Ortiz et al. 2012; Carry 2012; Stansberry et al. 2012).

Dobivene vrijednosti mogu se usporediti s granicama određenim hidrostatskom ravnotežom Jacobijevog elipsoida (Chandrasekhar 1987). U ovom slučaju, rotacijski parametar $\omega^2/(\pi G \rho)$ mora biti ograničen između 0,284 i 0,374 (gdje je ω je frekvencija spina tijela, G gravitacijska konstanta i ρ gustoća tijela). Korištenjem perioda rotacije za Haumeu od 3,915341 h, dobivamo uvjet za gustoću od $2\,530 \text{ kg m}^{-3} < \rho < 3\,340 \text{ kg m}^{-3}$. Te vrijednosti su daleko veće od naše gornje granice od $1\,885 \text{ kg m}^{-3} + 80 \text{ kg m}^{-3} = 1\,965 \text{ kg m}^{-3}$. Drugim riječima, Haumea ne može biti homogeni elipsoid u hidrostatskoj ravnoteži.

Omjeri osi $b/a \approx 0,73$ i $c/a \approx 0,44$ podudaraju se s onima iz Jacobijeva elipsoida s $\omega^2/(\pi G \rho) \approx 0,35$, ali za to rješenje potrebna gustoća od $2\,700 \text{ kg m}^{-3}$ nije konzistentna s izmjerenim vrijednostima. Već u prijašnjim istraživanjima (Holsapple 2007), primijećeno je da oblik Haumea ne mora nužno biti određen hidrostatskom ravnotežom Jacobijevog elipsoida, i to u slučaju razmatranja modela s granularnim materijalom, umjesto pojednostavljene pretpostavke fluidnog ponašanja. Također je zaključeno (Holsapple 2007) da gustoća Haumea može biti mnogo manja od donje granice od $2\,600 \text{ kg m}^{-3}$, koja je prethodno određena (Rabinowitz et al. 2006; Lockwood et al. 2014; Lellouch et al. 2010). Za elipsoidno tijelo s $b = (a + c)/2$, i gustoće

od 1885 kg m^{-3} , pomoću slike 4. u referenci Holsapple (2001) određen je kut trenja između 10° i 15° . Za usporedbu, maksimalan kut trenja za čvrstu stijenu na Zemlji je 45° , a kut trenja fluida je 0° . Nehomogeno tijelo također bi moglo dovesti do odstupanja klasičnih ravnotežnih oblika. Među velikim tijelima kao što je Haumea može dolaziti i do diferencijacije materijala, no preostaje provjeriti je li koncentrirana masa u jezgri može objasniti Haumein trenutni oblik i gustoću.

4.10 Zaključak

21. siječnja 2017. godine opažana je zvjezdana okultacija patuljastim planetom Haumea. Okultirana zvijezda URAT1 533-182543, relativno visokog prividnog sjaja od $m_R = 17,6$ mag, činila je objekt nezahtjevan za opažanje s teleskopima već manje i srednje klase. Stoga je ispočetka bilo jasno da će događaj biti opažan s mnogih lokacija, što je u konačnici rezultiralo s 12 opažača diljem Europe.

Iz prikupljenih sekvenci CCD snimki izvedena su fotometrijska mjerenja sintetičke aperture, ili u slučaju podataka prikupljenih s opservatorija Črni Vrh, primijenjen je poseban postupak fotometrijske analize zvjezdanog traga.

Prilagodbom modela jame na prikupljena fotometrijska mjerenja okultacijskog opažanja sa svake od opažачkih lokacija, određena su vremena početka i kraja pomračenja okultirane zvijezde, kojima su generirane opažачke tetive okultacije. Opažачke tetive odgovaraju položajima okultirane zvijezde u odnosu na relativni položaj Haumea projicirane na nebesku sferu. Na relativne položaje početaka i krajeva okultacije prilagođen je prividni rub nebeskog tijela u obliku elipse, koja predstavlja obris Haumeine sjene. Prilagodbom su određeni parametri elipse od 1704 ± 4 km za veliku os i 1138 ± 26 km za malu os, te pozicijski kut male osi od $-76,3^\circ \pm 1,2^\circ$.

U razmatranju mogućnosti za postojanjem atmosfere i određivanju gornje vrijednosti Haumeinog atmosferskog tlaka, korišten je najbolji raspoloživi skup podataka - krivulja sjaja prikupljena na opservatoriju Asiago. Iz mase Haumea, te uz pretpostavku da se tijelo nalazi u hidrostatskoj ravnoteži, određena je prosječna površinska gravitacija od $0,39 \text{ ms}^{-2}$. Usporedbom modeliranih okultacijskih krivulja sjaja i promatranja, određena je gornja vrijednost Haumeine čiste izotermne globalne atmosfere N_2 u termičkoj ravnoteži, s temperaturom na površini Haumea od 40 K od $p_{\text{povrsina}}(N_2) = 3 \text{ nbar}$, za 1σ gornju vrijednost, te $p_{\text{povrsina}}(N_2) = 15 \text{ nbar}$ za 3σ gornju vrijednost.

Osim okultacije glavnim tijelom Haumea, opažane fotometrijske krivulje sjaja otkrivaju i kratkotrajna zatamnjenja prije i nakon glavnog događaja okultacije, opažane s većine opažачkih lokacija, ukazujući na postojanje prstenova oko Haumea. Razlučeni profil presjeka prstenova prikupljen u opažanju s 1 m teleskopom opservatorija Konkoly otkriva radijalnu širinu prstenova

od $W_{\text{prsten}} \approx 74$ km pri ulasku u okultaciju i $W_{\text{prsten}} \approx 44$ km pri izlasku iz okultacije, s odgovarajućim prividnim prozirnostima od $p' = 0,55$ i $p' = 0,56$.

Određeni parametri prilagodbe elipse na prstenove su $a'_{\text{prsten}} = 2\,287^{+75}_{-45}$ km za prividnu veliku poluos, i $b'_{\text{prsten}} = 541 \pm 23$ km za malu poluos. Pozicijski kut male poluosi je $P_{\text{prsten}} = -74,3^\circ \pm 1,3^\circ$. Pod pretpostavkom da su prstenovi kružnog oblika, slijedi da je polumjer prstenova $r_{\text{prsten}} = 2\,287^{+75}_{-45}$ km i kut nagiba $B_{\text{prsten}} = 13,8^\circ \pm 0,5^\circ$. Pretpostavku o prstenovima oblika kružnice potkrepljuje činjenica da se središte postavljene elipse prstenova i centar prilagođenog obrisa Haumea podudaraju do na nepouzdanost. Pozicijski kut male poluosi prstenova od $P_{\text{prsten}} = -74,3^\circ \pm 1,3^\circ$, do na nepouzdanost se poklapa s pozicijskim kutom male poluosi obrisa Haumea od $P_{\text{obris}} = -76,3^\circ \pm 1,2^\circ$, što dodatno naznačuje da se Haumeini prstenovi nalaze u Haumeinoj ekvatorijalnoj ravнини. Nadalje, pronađeno je da se polumjer prstenova podudara se s područjem gdje se očekuje 3:1 spin-orbit rezonancija.

Opažanjem je određen i geometrijski albedo Haumea od 0,51, što je mnogo manja vrijednost od posljednjeg mjerenja dostupnog u literaturi.

Iz određenih parametara obrisa Haumeine sjene, određeni su trodimenzionalni oblik i gustoća Haumea. Dobiveni parametri troosnog elipsoida $a \times b \times c$ su $(1\,161 \pm 30)$ km $\times$ (852 ± 2) km $\times$ (513 ± 16) km. Srednja vrijednost gustoće Haumea, određena kroz parametre troosnog elipsoida, te masu određenu pomoću orbitalnog perioda satelita Hi'iake, iznosi $1\,885 \pm 80$ kg m⁻³.

Poglavlje 5

Unapređenje opažачkih metoda zvjezdanih okultacija korištenjem Čerenkovljevih teleskopa MAGIC

Rezultati istraživanja opisanih u ovom poglavlju još nisu objavljeni u znanstvenim časopisima. Doprinos autora doktorske disertacije u ovom istraživanju je studija potencijala korištenja atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa u svrhu mjerenja najmanjih kutnih promjera zvijezda ikad izmjerenih. U ovom poglavlju razmatrane su tehničke karakteristike teleskopa MAGIC, te su modelirani očekivani Fresnelovi difrakcijski uzorci kakvi bi bili opažani teleskopima MAGIC. Dodatno je razmatran utjecaj učinka rubnog zatamnjenja na određivanje kutnih promjera zvjezdanih diskova.

Autor ove disertacije voditelj je opažачkih prijedloga u opažачkom programu kolaboracije MAGIC. S ciljem opažanja zvjezdanih okultacija ostvario je pravo na teleskopsko vrijeme u 3 opažачka ciklusa - C14 (2018./2019.), C15 (2019./2020.), i C16 (2020./2021.).

5.1 Uvod

Već smo pokazali da je tijekom opažanja zvjezdanih okultacija, s ciljem preciznog određivanja fizikalnih karakteristika malih tijela, poželjno imati visoko vremensko razlučivanje instrumenta, s visokim odnosom signala i šuma. Granične vrijednosti sjaja okultiranih zvijezda, kao i vremensko razlučivanje opažanja okultacijskih događaja, moguće je poboljšati korištenjem teleskopa većih apertura, u kombinaciji s visoko-osjetljivim detektorima. Umjesto konvencionalnih astronomskih i video kamera, opremljenih s CCD ili CMOS detektorima, moguće je koristiti i fotomultiplikatore, koji dopuštaju visoke frekvencije uzorkovanja u području kHz.

Obje ove karakteristike, veliki promjer aperture i detektor sačinjen od fotomultiplikatora, posjeduju atmosferski Čerenkovljevi teleskopi kolaboracije MAGIC (Major Atmospheric Gamma

Imaging Cherenkov).

Prvi opisi mogućnosti korištenja Čerenkovljevih teleskopa u svrhu opažanja zvjezdanih okultacija (Lacki 2014) napravljeni su za teleskope kolaboracija H.E.S.S. (High Energy Stereoscopic System), VERITAS (Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System) i Cherenkov Telescope Array (CTA). U sklopu ove doktorske disertacije, u svrhu unapređenja opažачkih metoda zvjezdanih okultacija, razmatrano je korištenje Čerenkovljevih teleskopa MAGIC, te je kroz opažачke prijedloge ostvareno pravo korištenja teleskopskog vremena u opažачkim ciklusima C14, C15 i C16.

Teleskopi MAGIC su atmosferski Čerenkovljevi teleskopi aperture promjera 17 m, namijenjeni indirektnom opažanju visokoenergetskih gama-izvora (30 GeV - 50 TeV) pomoću Čerenkovljevog zračenja. Naime, propagacijom gama-zraka iz kozmičkih izvora, u Zemljinoj atmosferi nastaju pljuskovi čestica čiji visokoenergetski nabijeni dio uzrokuje Čerenkovljevo zračenje. Kamere teleskopa MAGIC sastoje se od saćastih skupova fotomultiplikatorskih detektora, s maksimalnom osjetljivosti u vidljivom dijelu spektra između 300 i 400 nm. Stoga, iako zamišljeni za opažanje visokoenergetskih izvora, teleskope MAGIC možemo koristiti i kao optičke teleskope za opažanje zvjezdanih okultacija.

Središnji detektor (središnji piksel) na teleskopu MAGIC-II dizajniran je za optičku detekciju pojedinih pulseva pulsara u maglici Messier 1 (maglici Rakovici) s frekvencijom uzorkovanja od 10 000 Hz (Lucarelli et al. 2008; Hoang et al. 2020). Za usporedbu, optički teleskopi opremljeni brzim CCD ili video kamerama posjeduju frekvencije uzorkovanja reda veličine 1-30 Hz. Uz pretpostavku da je opažani izvor beskonačno mali (točkasti), teorijsko razlučivanje koje je moguće postići ovakvim frekvencijama uzorkovanja, primjerice na udaljenim transneptunskim objektima, iznosi 0,5-1 m.

U nastavku ovog poglavlja diskutirane su pojedinosti razvoja metode opažanja zvjezdanih okultacija uz pomoću teleskopa MAGIC, te je procijenjena teorijska učestalost zvjezdanih okultacija, sa svim tehničkim karakteristikama središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II uzetim u obzir.

Budući da zvijezde nisu točkasti izvori, nego imaju konačan kutni promjer, opažanjem zvjezdanih okultacija, osim fizikalnih karakteristika okultacijskih malih tijela, moguće je određivati i promjere okultiranih zvijezda. Naime, tijekom pomračenja zvjezdanog diska, pad u sjaju ne čini oštru krivulju sjaja. Krivulja sjaja tijekom okultacije opisuje interferencijski uzorak čiji detalji ovise i o promjeru okultirane zvijezde. Visoke frekvencije uzorkovanja, poput onih središnjeg detektora teleskopa MAGIC, omogućuju bilježenje ovih interferencijskih uzoraka.

Potaknuti diskusijama s autorom ove doktorske disertacije (uz zahvalu u publikaciji), prva uspješna mjerenja promjera zvijezda okultacijskom metodom pomoću atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa izvedena su teleskopom kolaboracije VERITAS (Hassan & Daniel 2019; Benbow et al. 2019).

Kutni promjeri zvijezda bitni su za određivanje osnovnih fizikalnih svojstava zvijezda (npr. Mozurkewich et al. 2003). Određivanje promjera zvijezda bitno je za uspoređivanje modela razvoja zvijezda s opažanjima. Precizni podaci o zvjezdanim promjerima od posebnog su interesa za zvijezde malih masa. Na primjer, poznavanje promjera zvijezda tipa M potrebno je za određivanje fizikalnih karakteristika ekstrasolarnih planeta opažanih metodom tranzita, posebice ako su egzoplaneti u habitabilnim zonama i masa sličnih Zemljinoj.

5.2 Tehničke karakteristike atmosferskih Čerenkovljevih teleskopa MAGIC

MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) je sustav od dva atmosferska Čerenkovljeva teleskopa (slika 5.1a) aperture promjera 17 m (reflektor) i žarišne duljine 17,5 m (f/1,03). Smješteni su na opservatoriju Roque de los Muchachos na La Palmi, (28° 45' 43" N, 17° 53' 24" W), jednom od Kanarskih otoka, Španjolska, na približno 2230 m nadmorske visine.

Teleskopima MAGIC trenutačno upravlja međunarodna kolaboracija koja broji 165 astrofizičara iz 24 različite institucije i konzorcija iz 12 zemalja. Hrvatska je 2009. godine postala punopravna članica kolaboracije MAGIC, i to s Hrvatskim konzorcijem MAGIC koji trenutačno (listopad, 2020. godine) broji 18 članova iz 5 institucija u Zagrebu, Splitu, Rijeci i Osijeku: Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva, Institut Ruđer Bošković u Zagrebu, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Sveučilište u Rijeci, i Sveučilište u Splitu Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje.

Teleskopi MAGIC izgrađeni su s ciljem opažanja gama zraka iz galaktičkih i ekstragalaktičkih izvora u spektru vrlo visokih energija (VHE), u rasponu između ~30 GeV i ~50 TeV. Ove visokoenergetske čestice detektiraju se neizravno, pomoću Čerenkovljevog zračenja (Čerenkov 1937) koje nastaje propagacijom visokoenergetskih čestica u Zemljinoj atmosferi. Čerenkovljevi bljeskovi u prosjeku traju manje od 10 nanosekundi, a valna duljina maksimalne energije zračenja nalazi se na približno 330 nanometara (UV-plavi dio spektra). Na taj način MAGIC opaža kozmičke izvore bitno različite od običnih zvijezda, primjerice pulsare (brzorotirajuće neutronske zvijezde), ostatke supernova i aktivne galaktičke jezgre (unutar kojih se nalaze supermasivne crne rupe). Također, MAGIC pokušava indirektno opaziti tamnu tvar, a posjeduje i sustav automatskog odziva na provala gama-zračenja (npr. Cortina 2005).

Prvi teleskop, MAGIC-I, izgrađen je 2004. godine i radio je pet godina u samostalnom načinu opažanja. Drugi teleskop, MAGIC-II, na udaljenosti od 85 m od prvog, izgrađen je i stavljen u pogon u 2009. godine. Teleskopi MAGIC-I i MAGIC-II su povezani u stereoskopski sustav teleskopa MAGIC (npr. Paredes & MAGIC Collaboration 2020), te trenutačno opažaju u tzv. stereoskopskom načinu opažanja. U stereoskopskom načinu opažanja, bilježe se i

analiziraju isključivo oni događaji koje oba teleskopa detektiraju unutar kratkog vremenskog intervala od 180 nanosekundi. U usporedbi sa samostalnim načinom opažanja, opažanje s dva teleskopa osiguralo je značajno poboljšanje osjetljivosti zbog boljeg odbacivanja pozadine, a trodimenzionalnom rekonstrukcijom udarne točke stošca raspadajućih čestica (eng. „air shower“) i njenog dolaznog smjera, poboljšane su energetska i kutna razlučivanja.

Konstrukcija teleskopa sagrađena je od laganih cjevastih nosača sačinjenih od ugljičnih vlakana. Zbog relativno niske ukupne mase svakog teleskopa od 40 tona, teleskopi se mogu preusmjeriti na bilo koji položaj na nebu unutar 22 sekunde.

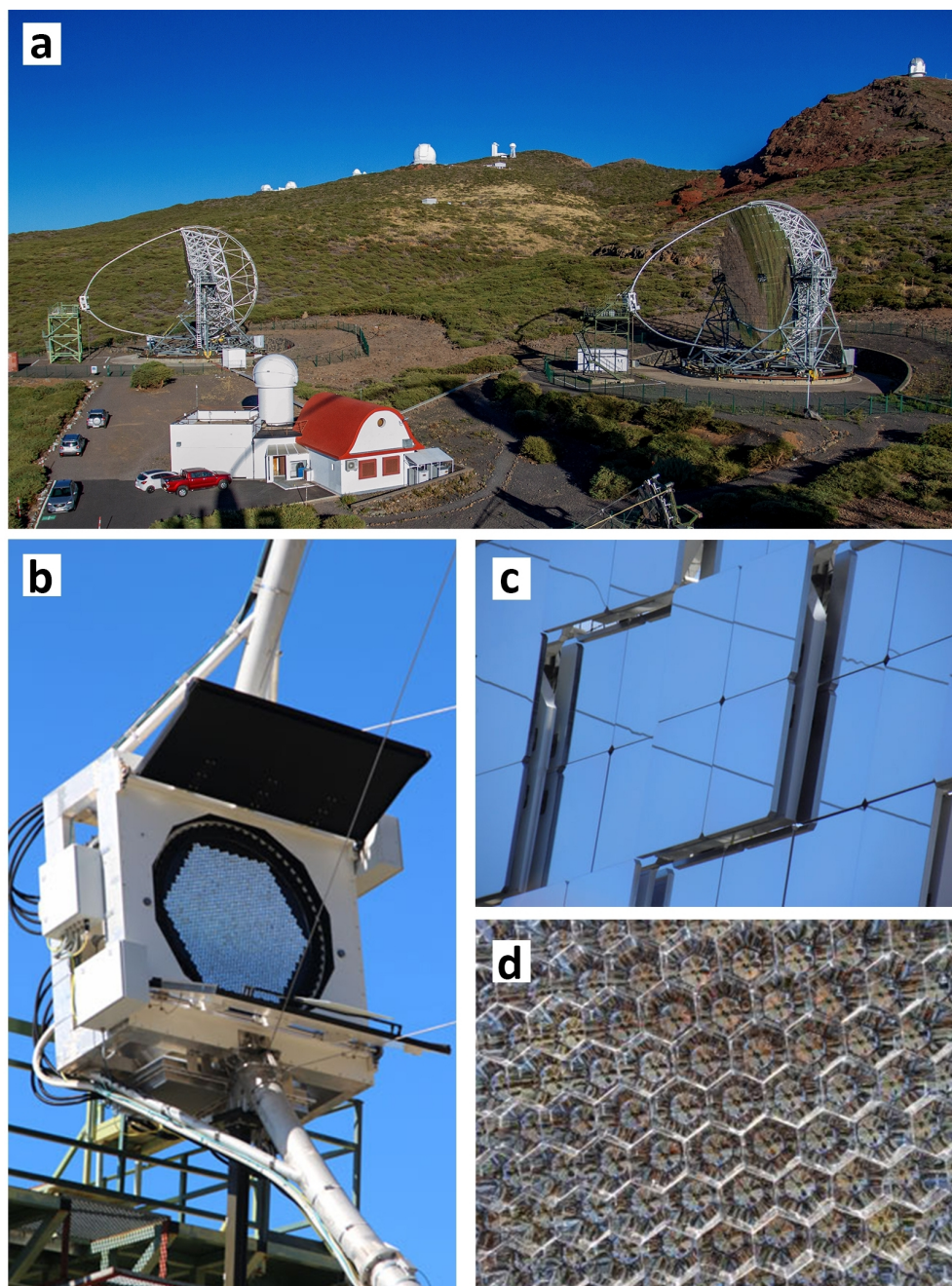
Svaka od reflektorskih površina teleskopa sastoji se od po 956 zrcala dimenzija $49,5 \times 49,5$ cm, ukupne površine od 236 m^2 . Svako zrcalo sastoji se od aluminijskog saćastog nosača, s eloksiranom reflektirajućom pločom debljine 5 mm od AlMgSi legure i prekrivenom tankim slojem kvarca kako bi zaštitila zrcalnu površinu od vanjskih čimbenika i oštećenja (slika 5.1c). Maksimalno odstupanje pojedinih zrcalnih elemenata od idealnog paraboloidea iznosi manje od 10 mikrometara. Prosječna reflektivnost zrcala je oko 90 %. Žarišna točka dobro fokusiranog teleskopa ima veličinu od približno pola fotomultiplikatorskog piksela ($<0,05^\circ$).

Zrcalni nosači s po četiri zrcala pričvršćeni su u tri točke, od kojih je jedna točka fiksna, a dvije su na pokretnim aktuatorima pomoću kojih se zrcalni nosač računalnom kontrolom može pozicionirati u bilo kojem smjeru. Usmeravanje teleskopa prema različitim kutnim visinama na nebu, uslijed gravitacije savijanjem deformira nosače teleskopa, tako da reflektor odstupa od svog idealnog oblika. Za korekciju ove deformacije, teleskopi MAGIC opremljeni su sustavom aktivne kontrole zrcala, koji automatskim podešavanjem orijentacije zrcalnih ploča pomoću sustava „Active Mirror Control (AMC)“ osigurava optimalan fokus u bilo kojem položaju teleskopa (Garczarczyk et al. 2003).

Detektor svakog teleskopa sastoji se od 1039 zasebnih fotomultiplikatora (Hsu et al. 2008), smještenih u saćastom rasporedu pomoću tzv. Winstonovih konusnih sabirača svjetlosti (slika 5.1d), svaki promjera 2,54 cm. Promjer cijelog detektora iznosi oko 1 m (slika 5.1b), a njime svaki od teleskopa ostvaruje vidno polje od $3,5^\circ$.

Signal s detektora u analognom formatu do obližnje kontrolne sobe prenosi se pomoću optičkih vodiča dugačkih 162 m, u kojoj se digitalizacija signala vrši putem analogno-digitalnog pretvarača (ADC) frekvencije 2 GHz, te se pohranjuje u 32 kB prstenasti međuspremnik. Čitanje podataka s prstenastog spremnika rezultira praznim hodom od $20 \mu\text{s}$, što odgovara otprilike 2 % praznog hoda pri brzini okidača od 1 kHz. Čitanje podataka kontrolira se FPGA (Xilinx) čipom na PCI (MicroEnable) kartici. Podaci se spremaju na sustav diskova brzinom do 20 MB/s, što rezultira s do 800 GB neobrađenih podataka po opažачkoj noći.

U idućem poglavlju razmatrana je osjetljivost središnjeg piksela.



Slika 5.1: (a) Sustav od dva atmosferska Čerenkovljeva MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) teleskopa aperture promjera 17 m i žarišne duljine 17,5 m. Na slici lijevo je MAGIC-I, izgrađen 2004. godine, desno, MAGIC-II, izgrađen 5 godina kasnije. Između njih, s crvenim krovom, nalazi se kontrolna soba. (b) Detektor svakog od teleskopa promjera je približno 1 m, i sastoji se od po 1039 zasebnih fotomultiplikatora Japanskog proizvođača Hamamatsu. (c) Reflektorske površine teleskopa MAGIC sastoje se od po 956 zrcala dimenzija $49,5 \times 49,5$ cm, ukupne površine od 236 m^2 (d) Pojedini fotomultiplikatori detektora teleskopa MAGIC smješteni su u sačastom rasporedu pomoću tzv. Winstonovih konusnih sabirača svjetlosti. (Izvor: S. Cikota/MAGIC kolaboracija)

5.3 Središnji piksel teleskopa MAGIC II

Otkriće novih vrlo kratkotrajnih tranzijentnih pojava poput brzih radio izbačaja (Fast Radio Burst, FRB) (Lorimer et al. 2007; Spitler et al. 2016) potaknulo je razvoj novih tehnika detekcije i opažanja kratkotrajnih elektromagnetskih pulseva u različitim spektralnim područjima (Germanà et al. 2012; Dhillon et al. 2007).

Središnji piksel teleskopa MAGIC-II razlikuje se od ostalih piksela detektora. Njegove komponente za iščitavanje signala dodatno su nadograđene za individualno iščitavanje signala u optičkom području spektra. Sustav središnjeg piksela sastoji se od potpuno izmijenjenog lanca očitavanja signala s fotomultiplikatora (Borla Tridon et al. 2009). Standardni pikseli MAGIC detektora sastoje se od fotomultiplikatora spojenih na pretpojačalo koje signal dijeli na dvije grane: takozvanu AC granu izmjenične struje, koja obrađuje svjetlosne Čerenkovljeve bljeskove s visokom frekvencijskom propusnosti, te istosmjernu DC granu, koja složi za nadzor napona na anodi fotomultiplikatora.

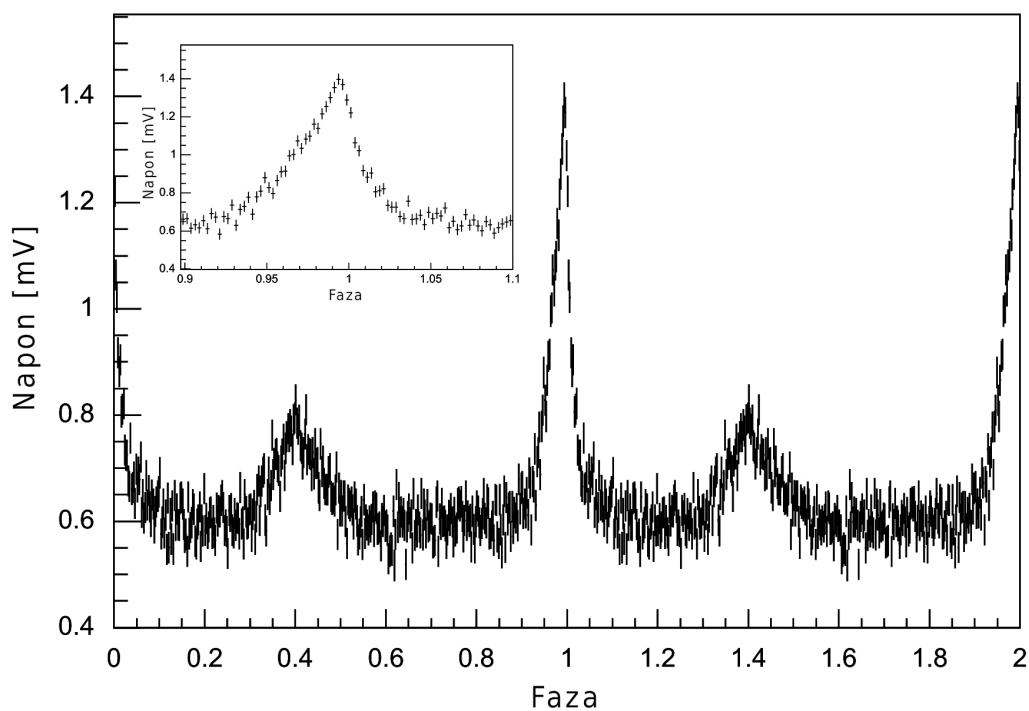
Sustav središnjeg piksela uključuje izmjenu elektroničkog sklopa DC grane istosmjerne struje, takvu da se frekvencijska propusnost obične DC grane s 8 Hz povećala na preko 3 kHz. Ta modifikacija uključivala je izmjenu nekoliko komponenti pretpojačala, ali tako da se očuva visoka frekvencijska propusnost AC grane. Tako modificirana DC grana istosmjerne struje može istovremeno opskrbiti potrebe standardnog sustava za nadzor napona na anodi fotomultiplikatora, kao i dodatnog optičkog odašiljača koji signal šalje u kontrolnu sobu. U kontrolnoj sobi, signal se pretvara u digitalni format i prilagođava za iščitavanje standardnim MAGIC DAQ sustavom za prikupljanje podataka, te dodatno isporučuje na računalo središnjeg piksela radi namjenskog iščitavanja.

Stoga središnji piksel teleskopa MAGIC-II, uz čitanje signala u sklopu opažanja visoko-energetskih izvora tijekom standardne operacije, istovremeno omogućuje potpuno nezavisno čitanje i spremanje optičkog signala, neovisno o okidačima prilagođenim za signal Čerenkovljevog zračenja.

5.3.1 Vremensko razlučivanje središnjeg piksela iz periodičnih optičkih pulseva pulsara u maglici Rakovici

Pomoću središnjeg piksela, teleskop MAGIC-II može detektirati pulseve pulsara u središtu maglice Rakovice, Messier 1, u vrlo kratkom vremenskom intervalu opažanja (Lucarelli et al. 2008; Lopez et al. 2009; Hoang et al. 2020). Slika 5.2 prikazuje faznu krivulju sjaja pulsara u maglici Rakovici, koja je rezultat prikupljenih podataka središnjim pikselom tijekom 40 minuta opažanja.

U prvom pokušaju procjene osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II pri opažanjima milisekundnih pulseva korištena su opažanja pulsara maglice Rakovice u optičkom



Slika 5.2: Primjer fazne krivulje sjaja pulsara u središtu maglice Rakovice, Messier 1. Fazna krivulja sjaja rezultat je prikupljenih podataka središnjim pikselom na teleskopu MAGIC-II tijekom 40 minuta opažanja, a prikazana je kao fazni dijagram za period rotacije pulsara u maglici Rakovici od 0,033045 sekundi. Umetnuta slika prikazuje povećani dio krivulje sjaja oko njezinog glavnog maksimuma, u fazi 0. (Izvor: Lucarelli et al. 2008)

fotometrijskom filteru spektralnog pojasa U (Hassan et al. 2017). Korištenjem prosječnog toka zračenja pulsara maglice Rakovice u ultraljubičastom spektralnog pojasu, te pretpostavljajući već poznati oblik krivulje sjaja pulseva, napon izmjerenog toka zračenja krivulje sjaja pretvaran je u prividni sjaj (magnitude) u fotometrijskom pojasu U filtera. Na taj način procijenjena granična osjetljivost pomoću krivulje sjaja pulsara maglice Rakovice, i minimalnog mjerljivog pozadinskog signala je $m_U \sim 13,4$ mag.

5.3.2 Vremensko razlučivanje središnjeg piksela na izoliranim optičkim pulsevima tijekom pomicanja teleskopa

Dodatno ispitivanje vremenskog razlučivanja središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II na kratkotrajne optičke bljeskove izvršeno je namjenskim opažanjima u kojima je teleskop MAGIC brzinom usmjeravanja pomican kroz zvjezdano polje (Hassan et al. 2017). Ovom metodom kratkotrajni optički bljeskovi proizvedeni su brzim prolascima zvijezda poznatog prividnog sjaja kroz vidno polje središnjeg piksela. Ovakvo opažanje omogućilo je eksperimentalno koreliranje maksimalnog napona na detektoru proizvedenog kratkotrajnim izlaganjima zvjezdanoj svjetlosti, s prividnim sjajem tih zvijezda.

Tijekom standardne operacije teleskopa MAGIC, maksimalna brzina gibanja teleskopa za vrijeme usmjeravanja iznosi približno $4,7^\circ/\text{s}$. Pri toj brzini gibanja, prijelazima zvijezda kroz vidno polje središnjeg piksela promjera približno $0,1^\circ$ proizvedeni su kratkotrajni pulsevi u signalu središnjeg piksela u trajanju ~ 20 ms. Koordinate vidnog polja u trenutku opažanja preuzimane su izravno iz izvještaja pogonskog sustava teleskopa, što je omogućilo identifikaciju zvijezda i njihovog prividnog sjaja pomoću kataloga zvijezda.

Identifikacijom 46 zvijezda u rasponu sjaja između $m = 7,0$ mag i $m = 13,0$ mag koje su prošle kroz vidno polje središnjeg piksela, izvršena su izravna mjerenja napona na fotomultiplikatoru središnjeg piksela u ovisnosti o prividnom sjaju zvijezda.

Konačna osjetljivost središnjeg piksela na izolirane optičke pulseve određena je ekstrapolacijom prilagođene krivulje izlaznog napona na fotomultiplikatoru u ovisnosti o prividnom sjaju. Granični prividni sjaj određen je minimalnim izmjerenim signalom proizvedenim milisekundnim optičkim pulsevima koji se uzdiže 5σ iznad pozadinskog šuma, i iznosi $m = 13,5 \pm 0,6$ mag (slika 5 u Hassan et al. 2017). Standardna devijacija u iznosu od $0,6$ mag označava mjeru raspršenosti izmjerenih napona u ovisnosti o prividnom sjaju zvijezda.

5.3.3 Primjena središnjeg piksela za opažanje zvjezdanih okultacija

Osjetljivost središnjeg piksela na kratkotrajne optičke pulseve razmatrana je s ciljem pripreme opažачkog prijedloga za ostvarivanje teleskopskog vremena na teleskopima MAGIC, opisanih u poglavlju 5.6. Umjetno generirani kratkotrajni optički pulsevi tijekom brzog pomicanja tele-

skopa, trajanja između 15 i 20 ms (Hassan et al. 2017), usporedivi su brzim padom sjaja izvora kakvi se događaju za vrijeme zvjezdanih okultacija. Ipak, neke od njegovih ograničavajućih karakteristika jesu nemogućnost kontroliranja frekvencije uzorkovanja, osjetljivost na ograničeno područje spektra između 300 i 400 nm, i malo kutno razlučivanje od $\sim 0,1^\circ/\text{piksel}$ (zbog fizički velikih piksela) koje je odgovorno za visoki pozadinski šum.

Ispitivanje osjetljivosti središnjeg piksel bilo je provedeno u standardnom opažачkom postavu zrcala teleskopa MAGIC (Hassan et al. 2017). To znači da se fokusna točka teleskopa nalazila u atmosferi, na visini od ~ 10 km, fokusirana u područje gdje se emitira atmosfersko Čerenkovljevo zračenje tijekom propagacije visokoenergetskih čestica. S ciljem optimizacije opažanja zvjezdanih okultacija s teleskopima MAGIC, i podizanje odnosa signala i šuma SNR, u sklopu ove doktorske disertacije, pomoću sustava aktivne kontrole zrcala provedeno je fokusiranje teleskopa na zvijezde. Rezultati ispitivanja fokusa i postupak diskutirani su u poglavlju 5.6. Stoga granični prividni sjaj od $m = 13,5 \pm 0,6$ mag postavljamo kao gornju granicu osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II.

5.4 Mjerenje zvjezdanih promjera uz pomoć zvjezdanih okultacija

Zvjezdane okultacije mogu se koristiti i za određivanje kutnih promjera okultiranih zvijezda. Tijekom pomračenja zvjezdanog diska, pad u sjaju ne čini oštri pad u krivulji sjaja, nego krivulja sjaja tijekom prekrivanja zvjezdanog diska opisuje difrakcijski uzorak, čiji detalji ovise o kutnom promjeru okultirane zvijezde. Visoke frekvencije uzorkovanja središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, omogućuju bilježenje ovih difrakcijskih uzoraka.

Uz poznavanje udaljenosti zvijezda, određivanje kutnih promjera omogućuje procjenu fizičkih promjera zvijezda koji se, u kombinaciji s efektivnom temperaturom dobivenom iz spektralnih opažanja, mogu koristiti za određivanje njezinih luminoziteta i masa.

Zbog velikih udaljenosti, zvijezde (osim Sunca) su previše malih kutnih promjera da bi bile razlučene bilo kojim individualnim optičkim instrumentom. Ovo ograničenje može se zaobići korištenjem interferometara (npr. Ligi et al. 2016) ili opažanjem difrakcijskog uzorka u krivulji sjaja zvijezde u trenutku kada asteroid okultira zvijezdu (Roques et al. 1987). Za opažanja metodom zvjezdanih okultacija moraju biti zadovoljena dva uvjeta: dovoljno visoko vremensko razlučivanje, te visoki odnos signala i šuma, odnosno nepouzdanost fotometrijskih mjerenja, koja uključuje i utjecaj atmosferske scintilacije, mora biti manja od šuma (Morbey 1974). Atmosferski Čerenkovljevi teleskopi koji se koriste za opažanja u području visokih energija, obično se ne koriste u optičkoj astronomiji zbog malog kutnog razlučivanja i skromne optičke kvalitete zrcalnih površina. Međutim, veliki promjeri njihovih zrcalnih reflektora i osjetljivi fotomultiplikatorski detektori čine ih pogodnim za fotometrijska mjerenja s visokim

frekvencijama uzorkovanja.

Kada malo tijelo Sunčevog sustava ili Mjesec prividno prekriju zvijezdu na nebeskoj sferi, opažać s površine Zemlje može mjeriti brzi pad toka zračenja zvjezdanog izvora modificiran difrakcijskim uzorkom koji prethode i prate rubove središnjeg područja sjene okultacijskog tijela. Prividni kutni promjeri diskova okultiranih zvijezda modificirat će okultacijsku krivulju sjaja i smanjiti intenzitet difrakcijskog uzorka odstupajući od difrakcijskog uzorka točkastog izvora (Ridgway 1977), sve do većih kutnih promjera okultiranih izvora koji su geometrijski razlučeni, kod kojih difrakcijski rubovi nisu vidljivi.

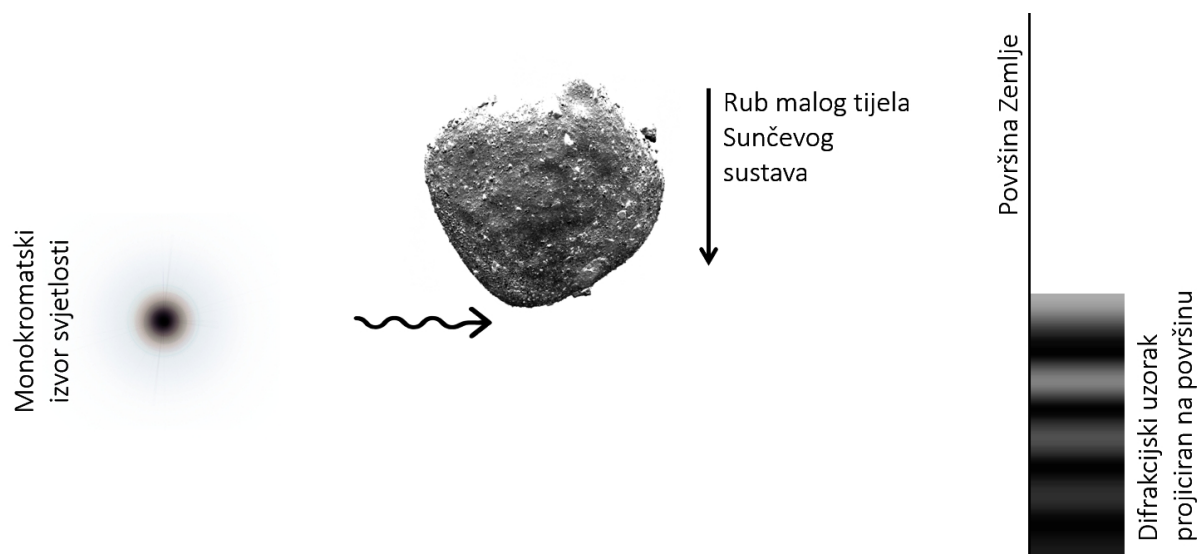
Prilagodba modela na opažane difrakcijske uzorke omogućava izravno mjerenje kutnog promjera zvjezdanih diskova, iako su oni obično daleko ispod granice kutnih razlučivanja teleskopa.

Od samih početaka okultacijske astronomije, zbog nemogućnosti preciznih predviđanja okultacijskih događaja s malim tijelima, zvjezdane okultacije uspješno su opažane uglavnom s Mjesecom. Granične vrijednosti razlučivanja zvjezdanih okultacija Mjesecom reda je veličine 1 lučna milisekunda, osobito u crvenom dijelu vidljivog spektra ($\lambda > 600$ nm) u kojemu je pozadinska svjetlost s Mjeseca niskog intenziteta.

Gotovo sva mjerenja kutnih promjera zvijezda reda veličine ispod 1 lučne milisekunde izvedena su interferometrijskim mjerenjima. Interferometrija amplitude (Baines et al. 2010, 2018) pak, u velikoj mjeri ograničena je na crveni dio spektra vidljive svjetlosti zbog učinka atmosferske scintilacije. Interferometrija intenziteta (Hanbury Brown et al. 1974) alternativna je metoda neovisna o šumu scintilacije koja može obuhvatiti i plavi dio spektra vidljive svjetlosti, no za provođenje su potrebni teleskopi velikih promjera, a tehnika je ograničena samo na mjerenje izrazito sjajnih izvora.

U okultacijskoj metodi, povećanje udaljenosti od ogibnog ruba tijela kojim je zvijezda okultirana može doprinijeti povećanju graničnih kutnih razlučivanja. Na primjer, mjerenje promjera zvijezda kroz opažanje zvjezdanih okultacija malim tijelima, u odnosu na okultacije Mjesecom, omogućuje kutna razlučivanja do reda veličine 0,1 lučnih milisekundi, što je za faktor dva bolje razlučivanje od raspoloživih interferometrijskih mjerenja (Chelli et al. 2016), te čak 10 puta veće kutno razlučivanje od onih koja se postižu okultacijama Mjesecom.

U poglavlju 5.4.1 prikazano je kako ograničavanje spektralnog područja opažanja primjenom optičkih filtera može doprinijeti smanjenju razrjeđivanja difrakcijskog uzorka, te dodatno poboljšati razlučivanje mjerenja.



Slika 5.3: Shematski prikaz difrakcije na rubu malog tijela Sunčevog sustava tijekom zvjezdanih okultacija. Rezultat ovog događaja bit će difrakcijski uzorak projiciran na površinu Zemlje, koji se giba projiciranom brzinom sjene tijela po površini Zemlje. (Skica po uzoru na: Richmond 2019)

5.4.1 Modeliranje difrakcijskih uzoraka koji nastaju tijekom zvjezdanih okultacija asteroidima

U slučajevima kada malo tijelo Sunčevog sustava ili Mjesec okultiraju zvijezdu, pad toka zračenja u krivulji sjaja koju opažatelj na površini Zemlje opaža nije u potpunosti oštar. Na rubovima geometrijske sjene okultacijskog tijela dolazi do pojave difrakcije.

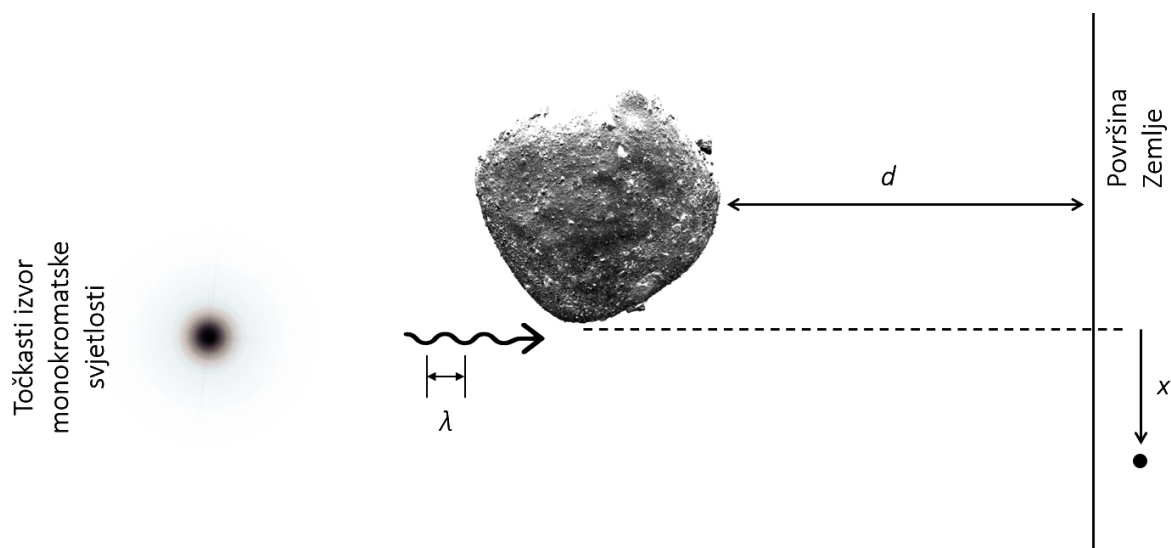
Za razliku od interferencijskog uzorka na pukotini, interferencijski maksimumi i minimumi u difrakcijskom uzorku oštrog ruba (beskonačne poluravnine) neće imati stalan razmak. Gibanjem malog tijela Sunčevog sustava (ili Mjeseca), difrakcijski uzorak projiciran na površinu Zemlje (u ulozu dalekog zaslona), kretat će se projiciranom brzinom sjene tijela po površini Zemlje. Kao rezultat međusobnog gibanja Zemlje i malog tijela, nepokretni opažatelj na površini Zemlje mjeri izmjenu toka zračenja svjetlosti dok sjena malog tijela, s difrakcijskim uzorkom na njezinim rubovima, prelazi preko njegove lokacije.

U nastavku su modelirani primjeri difrakcijskih uzoraka koji nastaju tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima Sunčevog sustava. Najprije je prikazan primjer točkastog izvora monokromatske svjetlosti, a kasnije netočasti izvor polikromatskih zvjezdanih diskova za valne duljine u rasponu osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II.

Difrakcijski uzorak tijekom okultacije monokromatskog točkastog izvora

U ovom poglavlju najprije promatramo model za pojednostavljeni slučaj difrakcijskog uzorka kakav bi nastao tijekom okultacije monokromatskog točkastog izvora.

U prvoj aproksimaciji, zbog velikih udaljenosti i promjera malih tijela od po nekoliko



Slika 5.4: Shematski prikaz geometrije okultacijskog događaja, u pojednostavljenom slučaju, tijekom okultacije monokromatskog točkastog izvora malim tijelom. Udaljenost između površine Zemlje i okultacijskog malog tijela označena je s d , valna duljina upadajućeg izvora svjetlosti s λ , te udaljenost opažača od ruba geometrijske sjene malog tijela projicirane na površinu Zemlje s x . (Skica po uzoru na: Richmond 2019)

desetaka kilometara, difrakcijski uzorci koji nastaju tijekom zvjezdanih okultacija mogu se opisati Fresnelovom difrakcijom na ostrim rubovima (Jennings & McGruder 1999).

Na slici (slika 5.4) definirane su udaljenosti koje se pojavljuju u razmatranju ovog problema: udaljenost između površine Zemlje i malog tijela d , valna duljina upadajućeg zračenja λ , te udaljenost opažača od ruba geometrijske sjene malog tijela projicirane na površinu Zemlje x .

Pomoću udaljenosti oštrog ruba (u našem slučaju malog tijela Sunčevog sustava) i valne duljine upadajućeg zračenja formira se karakteristična ljestvica Fresnelove difrakcije, tzv. „Fresnelova ljestvica“, $b = \sqrt{d\lambda/2}$, koja nam može poslužiti za procjenu razmaka prvog maksimuma difrakcijskog uzorka od ruba geometrijske sjene malog tijela projicirane na površinu Zemlje. Poznavanje ove veličine, uz podatke o projiciranoj brzini gibanja objekta preko Zemljine površine, pomaže u procjeni minimalnog vremenskog razlučivanja detektora potrebnog za opažanje difrakcijskog uzorka.

Uzme li se u razmatranje malo tijelo u glavnom asteroidnom pojasu, na udaljenosti od 1,5 a.j. od Zemlje, $d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m, i valna duljina svjetlosti na kojoj je središnji piksel teleskopa MAGIC-II najosjetljiviji, $\lambda = 350$ nm, Fresnelova ljestvica iznositi će $b \approx 200$ m.

Za opažača koji mjeri tok zračenja s izvora svjetlosti daleko od ruba geometrijske sjene malog tijela projicirane na površinu Zemlje, za $x \gg b$, moguća rješenja su trivijalna. Za pozitivne vrijednosti udaljenosti opažača od ruba geometrijske sjene malog tijela x , opažatelj će mjeriti puni tok zračenja s izvora svjetlosti (zvijezda neće biti prekrivena malim tijelom). Za negativne vrijednosti udaljenosti opažača od ruba geometrijske sjene malog tijela x , opažatelj će

se nalaziti daleko unutar geometrijske sjene malog tijela i neće vidjeti izvor svjetlosti (zvijezda će biti okultirana malim tijelom).

Na udaljenostima opažачa od ruba geometrijske sjene malog tijela projicirane na površinu Zemlje koje su reda veličine Fresnelove ljestvice, tok zračenja s izvora će varirati u rasponu intenziteta od 0 do $\sim 1,4$ puta normalnog sjaja zvijezde. Intenzitet u ovisnosti o udaljenosti opažачa od ruba geometrijske sjene malog tijela (beskonačne poluravnine) projicirane na površinu Zemlje može se opisati jednadžbom Fresnelove difrakcije na ostrim rubovima (Roques et al. 1987):

$$I(x) = I_0 \left[\left| \int_{-\infty}^x \cos\left(\frac{\pi r^2}{d\lambda}\right) dr \right|^2 + \left| \int_{-\infty}^x \sin\left(\frac{\pi r^2}{d\lambda}\right) dr \right|^2 \right] \quad (5.1)$$

Ovdje je I_0 faktor normalizacije intenziteta izvora, r i x udaljenosti do središta i ruba geometrijske sjene, d udaljenost od opažачa do malog tijela, a λ valna duljina izvora svjetlosti.

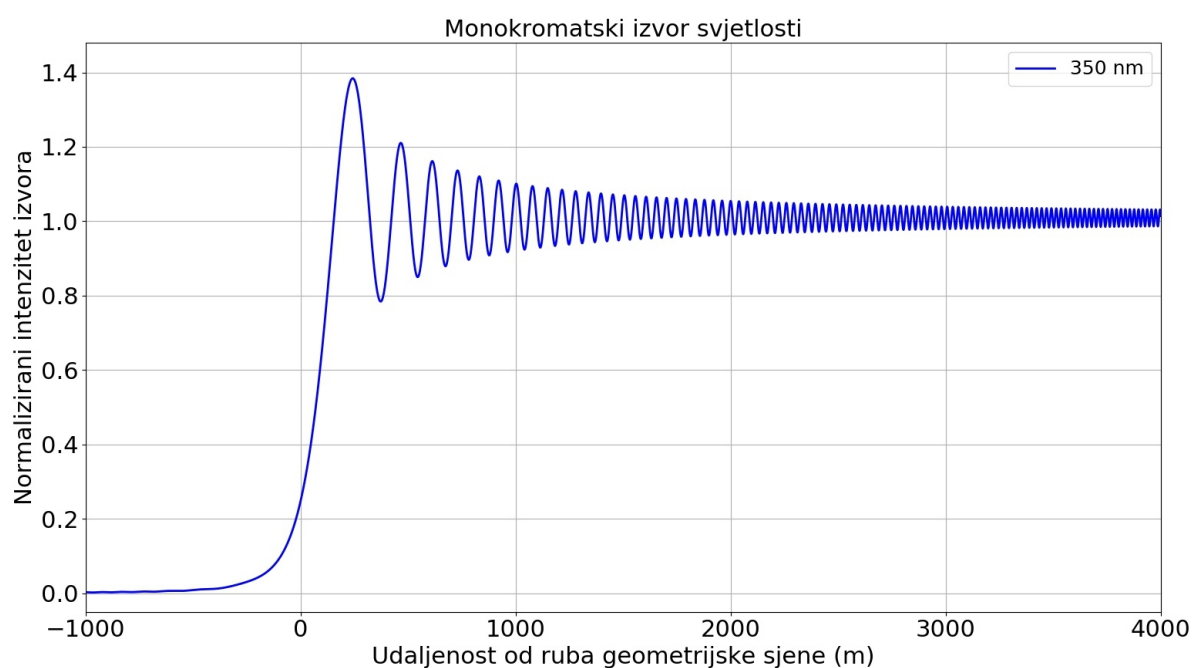
Na slici 5.5 prikazan je model Fresnelovog difrakcijskog uzorka na ostru rubu tijela postavljenog na udaljenosti od $d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m (1,5 a.j.), odnosno udaljenosti tipičnoj za malo tijelo Sunčevog sustava u glavnom asteroidnom pojasu opažanog sa Zemlje. U ovom modelu odabran je točkasti monokromatski izvor svjetlosti valne duljine $\lambda = 350$ nm, u kojoj je središnji piksel teleskopa MAGIC-II najosjetljiviji.

Na slici 5.6, prikazan je povećani dio Fresnelovog difrakcijskog uzorka sa slike 5.5 koji prikazuje prvih nekoliko difrakcijskih maksimuma. Za razliku od difrakcijskih uzoraka nastalih na pukotini, u Fresnelovom difrakcijskom uzorku razmaci među maksimumima nisu jednaki, nego se udaljavanjem od ruba geometrijske sjene smanjuju. Intenzitet izvora svjetlosti na rubu geometrijske sjene malog tijela ($x = 0$ m) jednak je točno $1/4$ ukupnog intenziteta izvora svjetlosti.

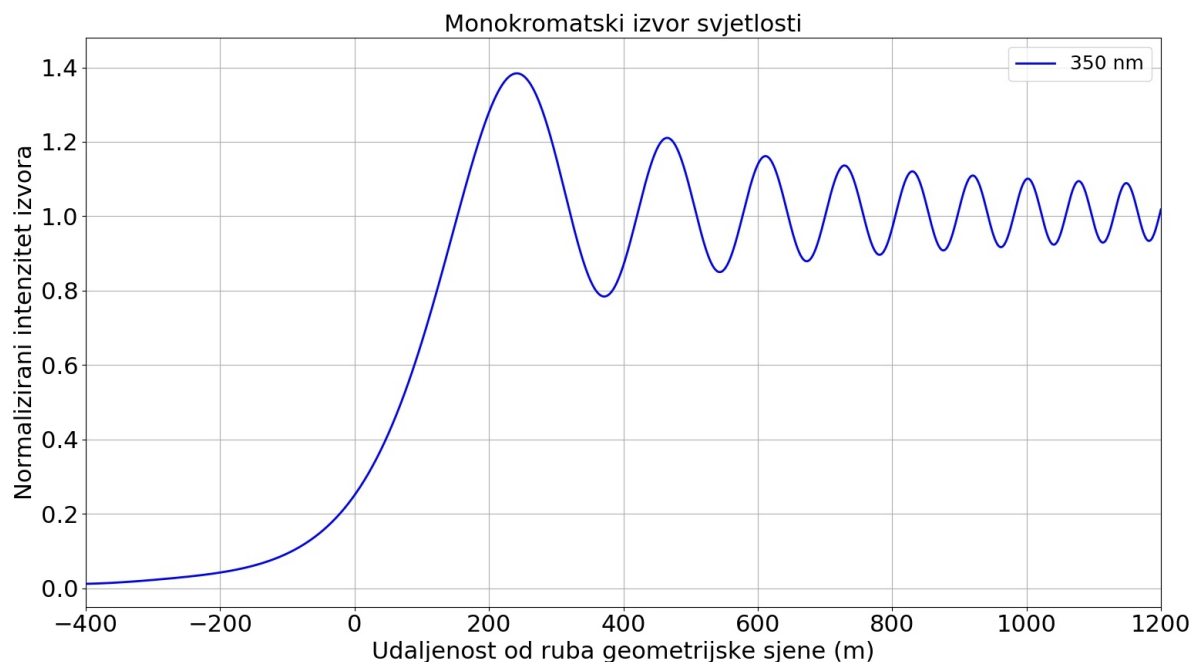
Difrakcijski uzorak tijekom okultacije polikromatskog točkastog izvora

U prijašnjem poglavlju razmatrali smo difrakcijske uzorke monokromatskog izvora svjetlosti. Međutim, u praksi će izvor svjetlosti uvijek biti polikromatski jer svjetlost zvijezda obuhvaća široki spektar valnih duljina. Osim toga, i detektor posjeduje određeni raspon osjetljivosti. Kvantne efikasnosti fotomultiplikatorskih detektora proizvođača Hamamatsu (super bialkali, tip R10408) korištenih u kamerama teleskopa MAGIC-I i MAGIC-II, u ovisnosti o valnim duljinama upadajuće svjetlosti, prikazani su na slici 5.7.

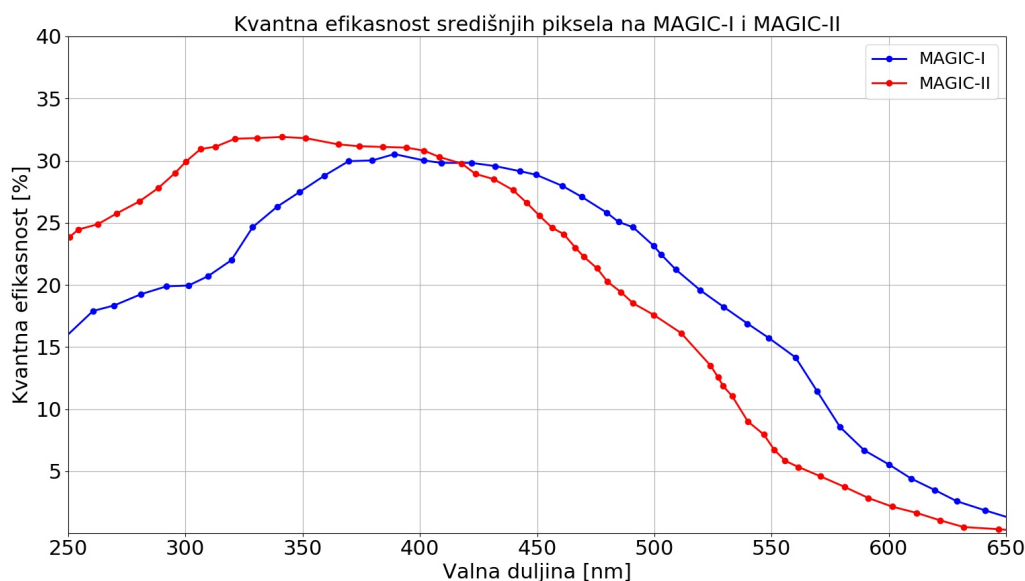
U ovim modelima pretpostavit ćemo da je spektar zvijezda u rasponu osjetljivosti teleskopa MAGIC neprekidan, a ograničenja u rasponu valnih duljina ćemo postavljati na temelju osjetljivosti detektora. Osim kvantne efikasnosti detektora, u realističnom slučaju intenziteti pojedinih valnih duljina u zvjezdanim spektrima nisu svi jednaki, nego približno slijede Planckovu krivu-



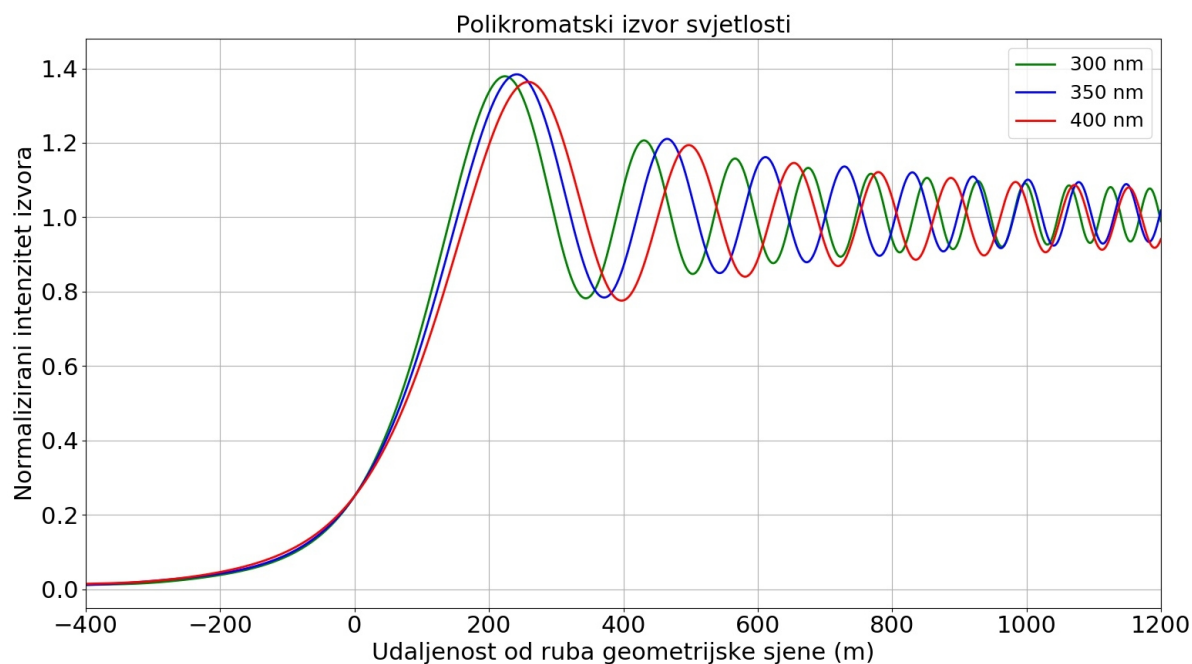
Slika 5.5: Model Fresnelovog difrakcijskog uzorka na oštrom rubu tijela postavljenog na udaljenosti $d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m (1,5 a.j.), odnosno, tipičnoj udaljenosti malih tijela Sunčevog sustava u glavnom asteroidnom pojasu opažanih sa Zemlje. U ovom modelu korišten je točkasti monokromatski izvor svjetlosti valne duljine $\lambda = 350$ nm, koja je blizu maksimuma kvantne efikasnosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II.



Slika 5.6: Prvih nekoliko difrakcijskih maksimuma Fresnelovog difrakcijskog uzorka sa slike 5.5. Uočavamo da se u Fresnelovom difrakcijskom uzorku razmaci među maksimumima udaljavanjem od ruba geometrijske sjene smanjuju. Može se zapaziti da je intenzitet izvora svjetlosti na rubu geometrijske sjene malog tijela ($x = 0$ m) jednak točno $1/4$ ukupnog intenziteta izvora svjetlosti.



Slika 5.7: Krivulje kvantne efikasnosti u ovisnosti o valnoj duljini fotomultiplikatorskih detektora proizvođača Hamamatsu (super bialkali, tip R10408) korištenih u kamerama teleskopa MAGIC-I i MAGIC-II. Vrijednosti točaka su preuzete iz Borla Tridon et al. (2009).



Slika 5.8: Model Fresnelovog difrakcijskog uzorka na oštrom rubu tijela postavljenog na udaljenosti $d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m, tipičnoj za mala tijela Sunčevog sustava u glavnom asteroidnom pojasu opažana sa Zemlje. Nacrane su krivulje za tri različite valne duljine točkastog izvora: $\lambda_1 = 300$ nm, $\lambda_2 = 350$ nm, i $\lambda_3 = 400$ nm.

lju zračenja crnog tijela, koju bi u modelima također trebalo uzeti u obzir za svaki individualni spektralni tip opažane zvijezde.

Budući da je središnji piksel teleskopa MAGIC-II osjetljiv u rasponu valnih duljina od 250-600 nm, s maksimumom u plavom dijelu optičkog spektra elektromagnetskog zračenja, s valnim duljinama između 300 nm i 400 nm, u ovom poglavlju ilustrirat ćemo kakve učinke na difrakcijske uzorke ima polikromatska svjetlost točkastog izvora u rasponu osjetljivosti središnjeg piksela.

Za početak promotrimo Fresnelove difrakcijske uzorke za tri izolirane valne duljine u području u kojemu se nalazi maksimum osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II: 300 nm, 350 nm i 400 nm (slika 5.8). Može se uočiti da svaka pojedina valna duljina izvora svjetlosti ima karakteristični difrakcijski uzorak i svoju Fresnelovu ljestvicu, te se pojedini maksimumi difrakcijskih uzoraka pojedinih valnih duljina neće poklapati. Očekujemo da će superpozicija difrakcijskih uzoraka različitih valnih duljina smanjiti signal pojedinih difrakcijskih maksimuma. Ovo smanjenje signala postaje značajnije kod superpozicije udaljenijih maksimuma od ruba geometrijske sjene, te proširenjem raspona valnih duljina izvora. Neovisno o valnoj duljini izvora, prvi difrakcijski maksimum je približno 40 % višeg intenziteta od prvobitnog intenziteta izvora svjetlosti. Udaljavanjem od ruba geometrijske sjene, intenziteti difrakcijskih maksimuma brzo konvergiraju prema prvobitnoj vrijednosti izvora svjetlosti.

Budući da je središnji piksel teleskopa MAGIC-II najosjetljiviji na spektralno područje između 300 nm i 400 nm, napravljen je probni model izgleda Fresnelovih difrakcijskih uzoraka za uski propusni pojas neprekidnog spektra ukupne širine 100 nm, u rasponu osjetljivosti središnjeg piksela. Rezultantni difrakcijski uzorak prikazan je na slici 5.9 krivuljom crvene boje, a sastoji se od superponiranih pojedinih difrakcijskih uzoraka za valne duljine između 300 nm i 400 nm u koracima po 5 nm, ukupno njih 21. U ovom modelu svakom od 21 doprinosa dana je jednaka težina (intenzitet izvora za svaku pojedinu valnu duljinu je normiran).

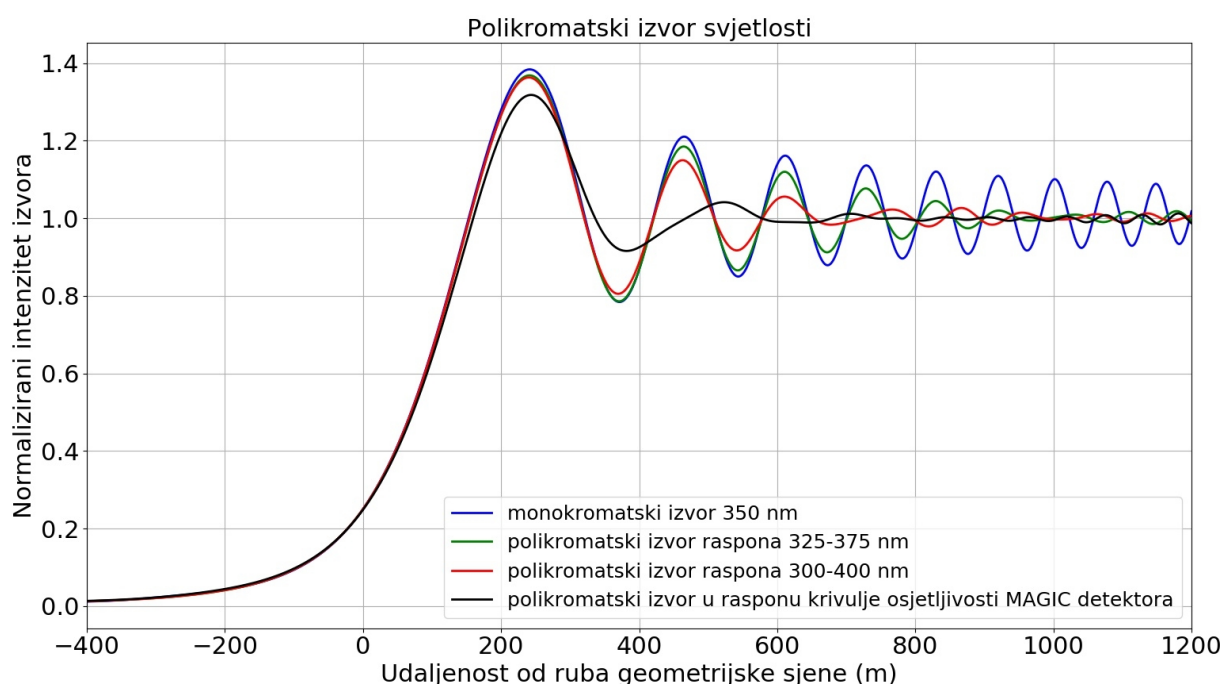
Za testiranje ovisnosti difrakcijskog uzorka o širini propusnosti, na slici 5.9 istovremeno je prikazan i difrakcijski uzorak još užeg propusnog pojasa neprekidnog spektra, širine 50 nm, valnih duljina u rasponu od 325 nm do 375 nm (krivulja zelene boje). U praksi takvo ograničavanje širine propusnosti spektra moglo bi se postići postavljanjem optičkih filtera ispred detektora.

Nakon ilustracije izgleda Fresnelovih difrakcijskih uzoraka za ograničene raspone valnih duljina, na slici 5.9 je linijom crne boje prikazan model difrakcijskih uzoraka u kojem je uzet u obzir raspon cjelokupne krivulje osjetljivosti fotomultiplikatora korištenih u kameri teleskopa MAGIC-II, kao prikazane na slici 5.7. Rezultantni model ovog difrakcijskog uzorka sastoji se od superponiranih pojedinih difrakcijskih uzoraka za valne duljine između 250 nm i 600 nm u koracima po 25 nm, ukupno njih 15. U ovom modelu svakom od 15 doprinosa valne duljine, dana je težina koja odgovara vrijednosti kvantne efikasnosti fotomultiplikatorskog detektora teleskopa MAGIC-II. Za usporedbu s difrakcijskim uzorkom monokromatskog izvora, krivuljom plave boje prikazan je referentni difrakcijski uzorak monokromatske svjetlosti valne duljine 350 nm.

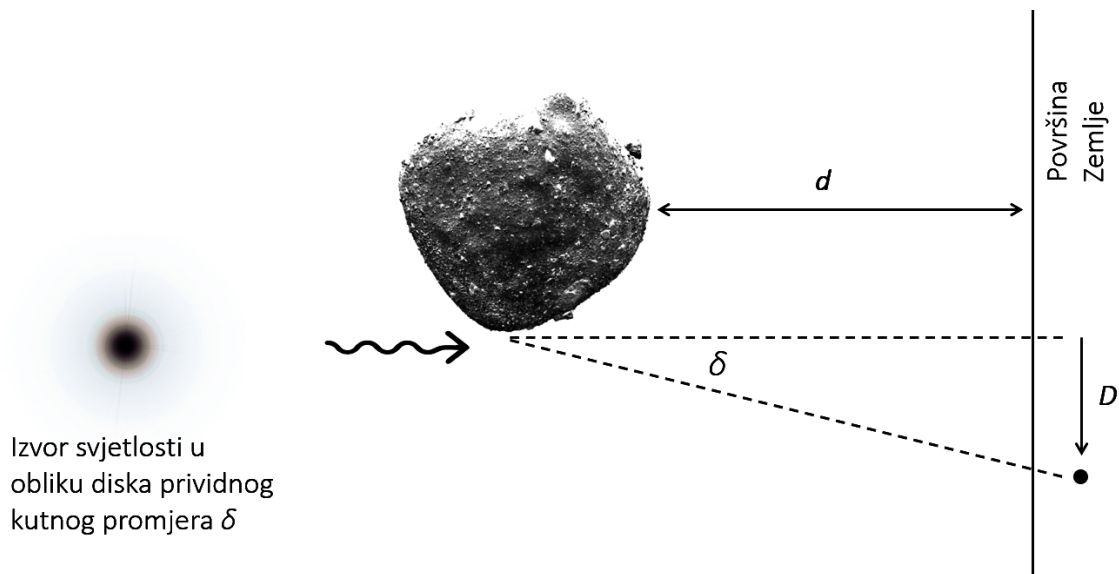
Difrakcijski uzorak tijekom okultacije polikromatskog zvjezdanog diska

U prijašnjem poglavlju razmatrali smo difrakcijske uzorke polikromatskog točkastog izvora svjetlosti. Međutim, zvjezdani izvorni nisu točkasti. Iako se zvijezde opažane sa Zemlje čine točkastim izvorima, u stvarnosti se radi o malim diskovima. Kutni promjeri zvijezda toliko su mali da zvjezdane diskove ne možemo razlučiti optičkim teleskopima, uz malobrojne iznimke poput zvijezde Betelgeuse u zviježđu Oriona. Okultacijska metoda, osim što dopušta istraživanje fizikalnih karakteristika malih tijela Sunčevog sustava, može biti iskorištena za direktno mjerenje kutnih promjera zvjezdanih diskova.

U ovom poglavlju modeliran je izgled Fresnelovog difrakcijskog uzorka polikromatskog homogenog kružnog izvora svjetlosti. U tom modelu pretpostavljeno je da je spektar zvijezde neprekidan, a razmatrani su rasponi osjetljivosti valnih duljina od 300 nm do 400 nm s ostrim rubnim uvjetima (kakav bismo imali korištenjem optičkog filtera) i jednakog doprinosa za sve obuhvaćene valne duljine, te raspon cjelokupne krivulje osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, s doprinosima valnih duljina koji odgovaraju vrijednostima kvantne efikasnosti fotomultiplikatorskog detektora, kao prikazane na slici 5.7.



Slika 5.9: Model Fresnelovog difrakcijskog uzorka na oštrom rubu tijela postavljenog na udaljenosti $d = 2,5 \cdot 10^{11}$ m, tipičnoj za mala tijela Sunčevog sustava u glavnom asteroidnom pojasu opažana sa Zemlje. U ovom modelu dan je primjer točkastog polikromatskog izvora svjetlosti uskog propusnog pojasa neprekidnog spektra širine 100 nm, u rasponu od 300 nm do 400 nm (krivulja crvene boje). Dodatno, prikazani su difrakcijski uzorci još užeg propusnog pojasa neprekidnog spektra širine 50 nm, valnih duljina u rasponu od 325 nm do 375 nm (krivulja zelene boje), te uzorci u kojima je uzet u obzir raspon cjelokupne krivulje osjetljivosti Hamamatsu fotomultiplikatora korištenih u kameri teleskopa MAGIC-II, kao prikazane na slici 5.7, s rasponom valnih duljina od 250-600 nm (krivulja crne boje). Referentni difrakcijski uzorak monokromatske svjetlosti valne duljine 350 nm prikazan je krivuljom plave boje.



Slika 5.10: Shematski prikaz geometrije okultacijskog događaja tijekom okultacije polikromatskog homogenog izvora svjetlosti u obliku zvjezdanog diska kutnog promjera δ . Udaljenost između površine Zemlje i okultirajućeg malog tijela označena je s d . Slika zvjezdanog diska promjera D čini projekciju kutne raspodjele izvora svjetlosti na Zemljinu površinu. (Skica po uzoru na: Richmond 2019)

Kutni promjer zvijezda se mijenja ovisno o valnoj duljini opažanja, tako da uglavnom raste s valnom duljinom. Dodatno, opažani zvjezdani diskovi nisu homogenog intenziteta. Njihova središta sjajnija su od rubova zbog tzv. pojave rubnog zatamnjenja (eng. limb darkening). Utjecaj rubnog zatamnjenja na određivanje kutnih promjera zvijezda diskutiran je zasebno u poglavlju 5.5.

Na slici 5.10, prikazana je geometrija problema. Slika zvjezdanog diska kutnog promjera δ opažana s udaljenosti d od opažača, na Zemljinu površinu se projicira kao disk promjera D . Ako je u modelu pretpostavljen zvjezdani disk homogenog intenziteta, njegova projekcija na Zemljinoj površini također će biti homogenog intenziteta.

Promjer projekcije zvjezdanog diska na Zemljinoj površini dan je s

$$D = d \tan(\delta). \quad (5.2)$$

Na primjer, pod pretpostavkom da malo tijelo Sunčevog sustava u glavnom asteroidnom pojasu, na udaljenosti od $\sim 1,5$ a.j. od opažača ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m) okultira zvijezdu prividnog kutnog promjera $\delta = 1$ mas, projekcija njezinog diska na površini Zemlje bit će promjera $D = 1090$ m. Konačni Fresnelov difrakcijski uzorak dobivamo konvolucijskim zbrojem Fresnelovog difrakcijskog uzorka točkastog izvora i slike zvjezdanog diska promjera D .

Konvoluciju dviju funkcija a i v , definiramo kao integral umnoška funkcija po intervalu njihove domene, gdje su te funkcije ravnopravne tako da svaka infinitezimalna promjena jedne

funkcije utječe na drugu funkciju u cijelome intervalu domene:

$$(a * v)[n] = \int_{-\infty}^{\infty} a(m) v(n - m) dm. \quad (5.3)$$

Formula konvolucije može se opisati kao površina pod funkcijom $a(m)$ usrednjena funkcijom $v(m)$ pomaknutom za iznos n . Kako se n mijenja, funkcija usrednjavanja $v(n - m)$ naglašava različite dijelove ulazne funkcije $a(m)$.

U diskretnom slučaju, konvolucija je definirana kao zbroj:

$$(a * v)[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a[m] v[n - m], \quad (5.4)$$

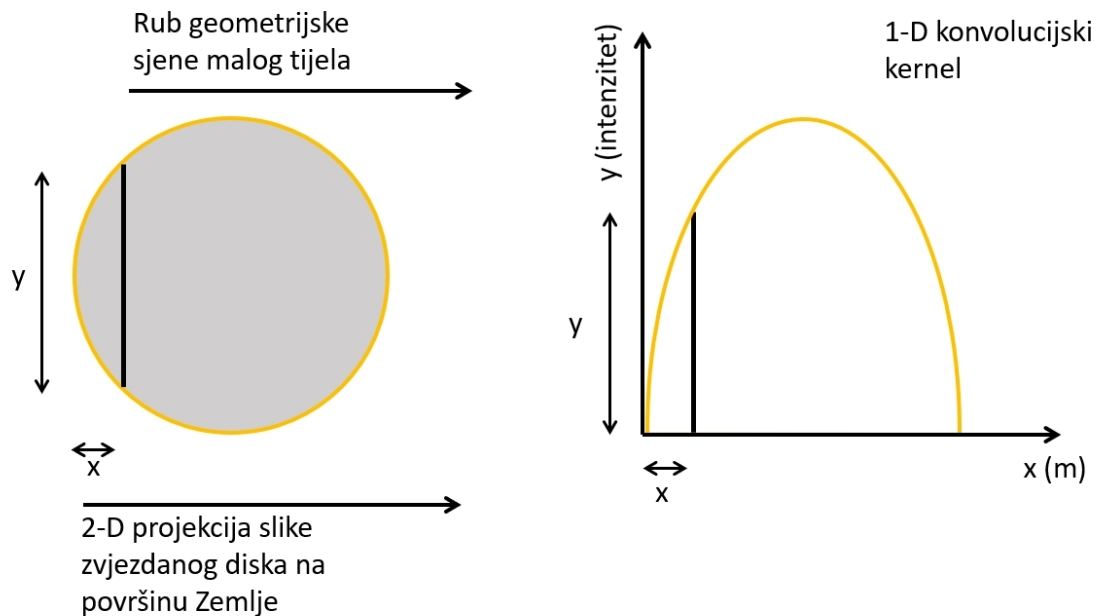
gdje je funkcija a ulazna funkcija, a funkcija v funkcija jezgre (kernel). U jednodimenzionalnom slučaju, koji je primijenjen u ovoj disertaciji kroz Pythonov modul „numpy.convolve“, ulazna funkcija i kernel su jednodimenzionalni nizovi od n i m elemenata respektivno, a rezultat konvolucije je jednodimenzionalni niz s n elemenata.

Konvolucijski kernel mora izraziti stvarni oblik dvodimenzionalne raspodjele svjetlosti zvjezdanog diska u jednodimenzionalnoj domeni. Jednodimenzionalni kernel je generiran podjelom zvjezdanog diska u niz poprečnih presjeka, okomitih na smjer gibanja ruba geometrijske sjene malog tijela preko zvjezdanog diska (slika 5.11).

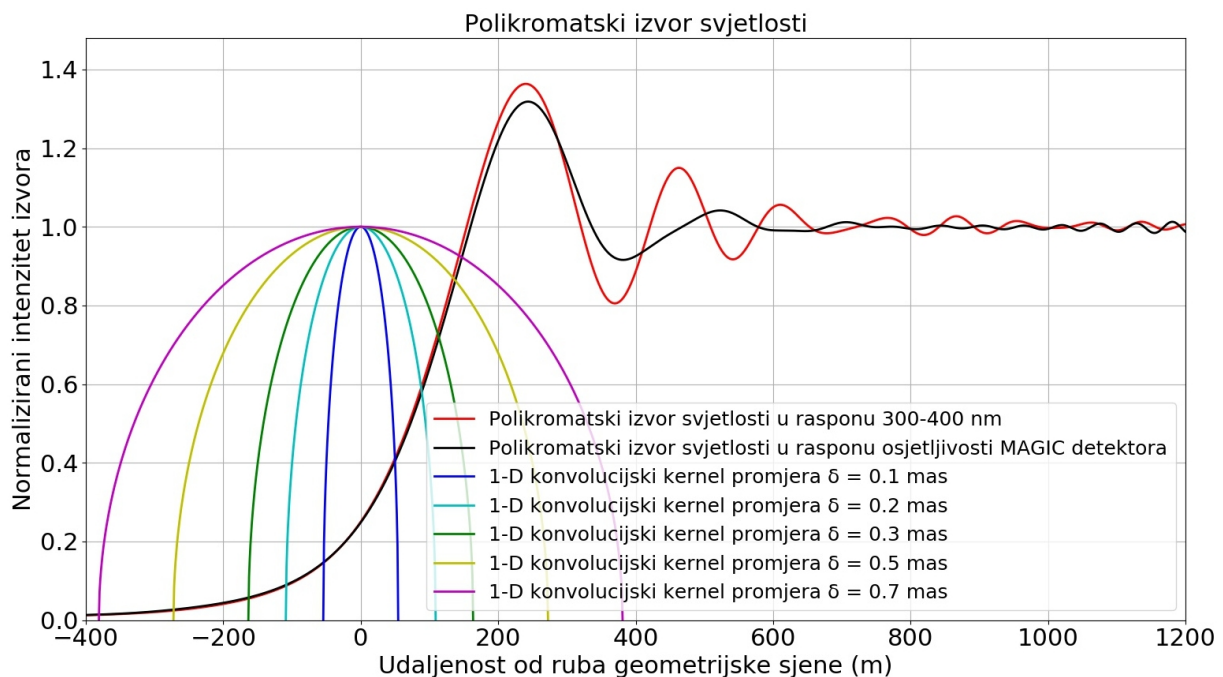
Na slici 5.12 prikazane su ulazne veličine konvolucijskog zbroja jednodimenzionalnog konvolucijskog kernela zvjezdanih diskova kutnih promjera 0,1 mas, 0,2 mas, 0,3 mas, 0,5 mas, i 0,7 mas, s modelima jednodimenzionalnih Fresnelovih difrakcijskih uzoraka točkastog polikromatskog izvora raspona 300-400 nm, te točkastog polikromatskog izvora u rasponu krivulje osjetljivosti detektora teleskopa MAGIC.

Primjenom konvolucijskog zbroja jednodimenzionalnih konvolucijskih kernela zvjezdanih diskova različitih prividnih kutnih promjera s jednodimenzionalnim Fresnelovim difrakcijskim uzorcima polikromatskog točkastog izvora raspona spektra između 300 i 400 nm, te raspona krivulje osjetljivosti fotomultiplikatorskih detektora teleskopa MAGIC-II (crvena i crna krivulja na slici 5.9), modelirani su Fresnelovi difrakcijski uzorci kakvi bi bili opažani središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II tijekom zvjezdane okultacije malim tijelom u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od $\sim 1,5$ a.j. ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m). Slike 5.13 i 5.14 prikazuju Fresnelove difrakcijske uzorke za različite prividne kutne promjere zvjezdanih diskova od 0,0 mas (točkasti izvor), 0,1 mas, 0,2 mas, 0,3 mas, 0,5 mas, i 0,7 mas.

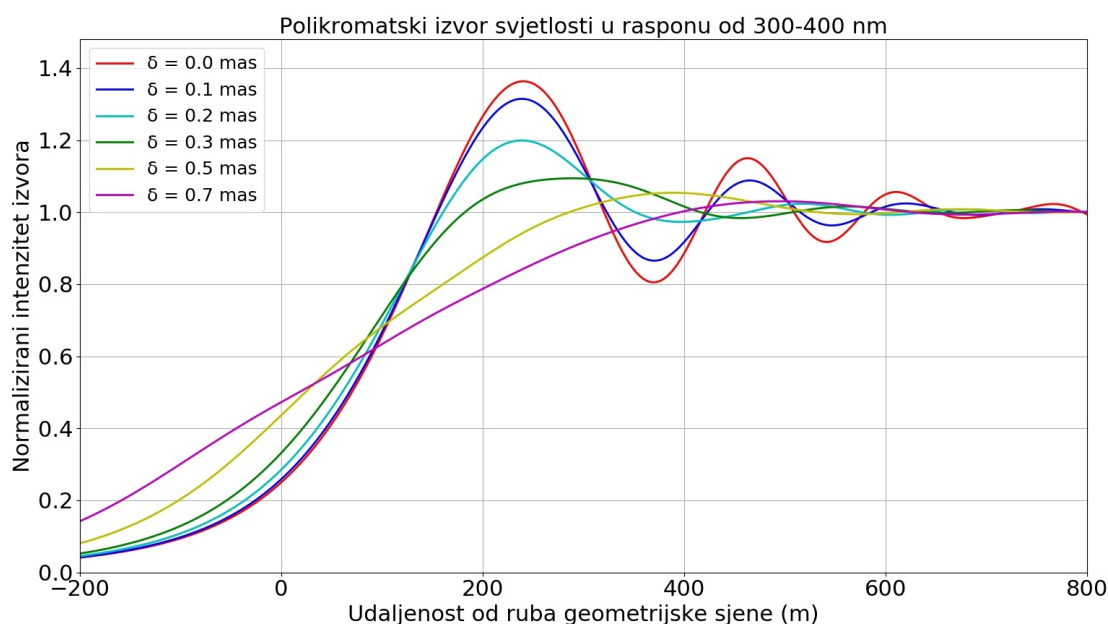
Nakon konvolucije sa zvjezdanom diskom, intenzitet prvog maksimuma difrakcijskog uzorka i dalje je iznad izvornog intenziteta zvijezde, dok intenziteti drugih maksimuma uzorka brzo konvergiraju izvornom intenzitetu neokultirane zvijezde.



Slika 5.11: Jednodimenzionalni konvolucijski kernel može se generirati razbijanjem zvjezdanog diska u niz poprečnih presjeka, okomitih na smjer gibanja ruba geometrijske sjene malog tijela preko zvjezdanog diska. (Skica po uzoru na: Richmond 2019)



Slika 5.12: Ulazne veličine konvolucijskog zbroja jednodimenzionalnog konvolucijskog kernela zvjezdanih diskova kutnih promjera 0,1 mas, 0,2 mas, 0,3 mas, 0,5 mas, i 0,7 mas, s modelima jednodimenzionalnih Fresnelovih difrakcijskih uzoraka točkastog polikromatskog izvora raspona 300-400 nm, te točkastog polikromatskog izvora u rasponu krivulje osjetljivosti detektora teleskopa MAGIC. Rezultat konvolucijskog zbroja bit će uprosječeni difrakcijski uzorci kakve bi opažач izmjerio tijekom okultacije malog tijela preko zvjezdanog diska, kao prikazane na slikama 5.13 i 5.14.



Slika 5.13: Modeli Fresnelovih difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opaženi središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II tijekom zvjezdane okultacije malim tijelom u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od $\sim 1,5$ a.j. ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m). Rezultantni uzorci generirani su konvolucijskim zbrojem jednodimenzionalnih konvolucijskih kernela zvjezdanih diskova različitih prividnih kutnih promjera od 0,0 mas (točkasti izvor), 0,1 mas, 0,2 mas, 0,3 mas, 0,5 mas, i 0,7 mas, s jednodimenzionalnim Fresnelovim difrakcijskim uzorkom polikromatskog točkastog izvora raspona spektra između 300 nm i 400 nm.

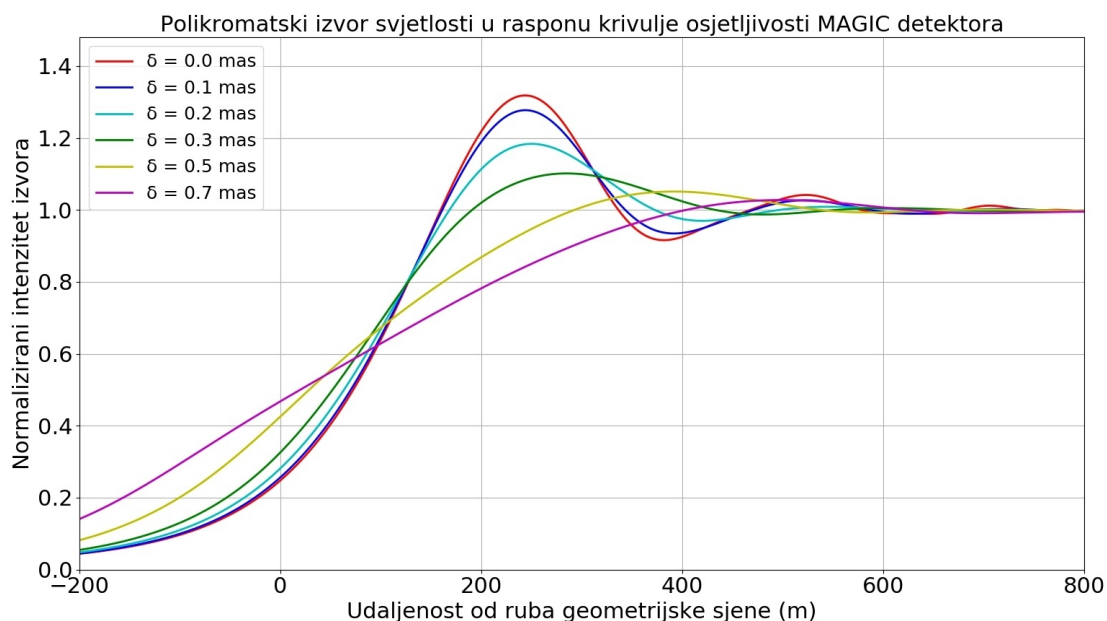
U konačnici, procjena prividnog kutnog promjera zvijezda slijedi usporedbom modela Fresnelovog difrakcijskog uzorka s opažanom krivuljom sjaja. Analiza podataka najčešće se svodi na potragu modela s najbolje odgovarajućim kutnim promjerom zvjezdanog diska na prikupljena opažanja metodom najmanjih kvadrata.

Osim prilagodbom modela na opažanu krivulju sjaja (metodom najmanjih kvadrata), kutni promjer zvjezdanog diska može se procijeniti iz omjera izmjenjenog intenziteta prvog difrakcijskog maksimuma Fresnelovog uzorka i izvornog intenziteta zvijezde daleko od ruba geometrijske sjene.

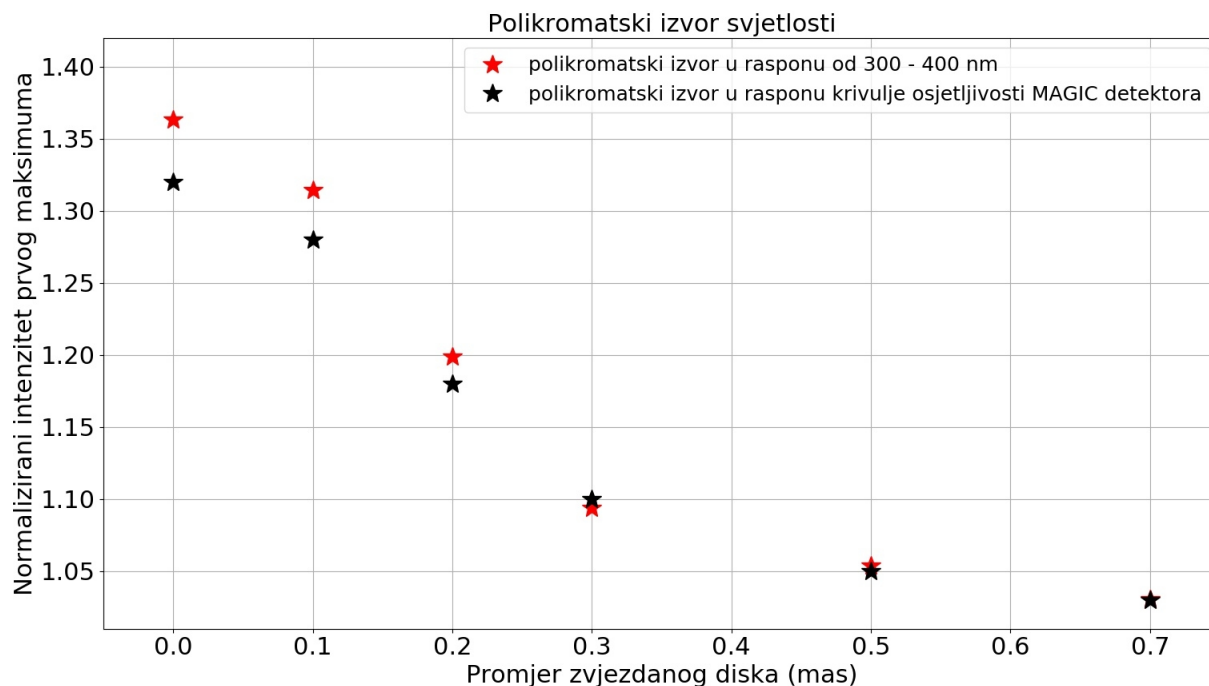
Na slici 5.15 prikazan je odnos izmjenjenog intenziteta prvog difrakcijskog maksimuma u ovisnosti o kutnom promjeru zvjezdanog diska za polikromatske izvore svjetlosti u rasponu između 300 i 400 nm (oznake crvene boje), te u cjelokupnom rasponu krivulje osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II (oznake crne boje). U modelu pretpostavljena udaljenost okultacijskog malog tijela od opažača je $\sim 1,5$ a.j. ($2,25 \cdot 10^{11}$ m).

U usporedbi s mjerenjima zvjezdanih promjera pomoću okultacija Mjesecom, mala tijela u glavom asteroidnom pojasu izrazito su pogodna za mjerenje kutnih veličina zvjezdanih promjera ispod 1 mas.

Tijekom opažanja najviše informacija donose mjerenja intenziteta prvog maksimuma i izvornog intenziteta zvijezde. Za okultacije malim tijelima u glavnom asteroidnom pojasu, prvi



Slika 5.14: Modeli Fresnelovih difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opaženi središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II tijekom zvjezdane okultacije malim tijelom u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od $\sim 1,5$ a.j. ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m). Rezultantni uzorci generirani su konvolucijskim zbrojem jednodimenzionalnih konvolucijskih kernela zvjezdanih diskova različitih prividnih kutnih promjera od 0,0 mas (točkasti izvor), 0,1 mas, 0,2 mas, 0,3 mas, 0,5 mas, i 0,7 mas, s jednodimenzionalnim Fresnelovim difrakcijskim uzorkom polikromatskog točkastog izvora raspona krivulje osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II između 250 nm i 600 nm, s doprinosima valnih duljina koji odgovaraju vrijednostima kvantne efikasnosti fotomultiplikatorskog detektora.



Slika 5.15: Odnos izmjerene intenziteta prvog difrakcijskog maksimuma u ovisnosti o kutnom promjeru zvjezdanog diska za polikromatski izvor svjetlosti u rasponu između 300 i 400 nm (crvene oznake), te polikromatski izvor svjetlosti u rasponu cjelokupne krivulje osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II. U modelu pretpostavljena udaljenost okultacijskog malog tijela od opažača je $\sim 1,5$ a.j. ($2,25 \cdot 10^{11}$ m).

maksimum traje nekoliko milisekundi. Stoga je za precizno mjerenje intenziteta prvog difrakcijskog maksimuma potrebno koristiti detektore s frekvencijama uzorkovanja ispod 1 milisekunde. Korištenje detektora s nedovoljnim vremenskim razlučivanjem rezultiralo bi integriranjem širokih dijelova (ili nekoliko pojedinih maksimuma) difrakcijskog uzorka, što bi za posljedicu smanjilo amplitudu izmjerene intenziteta „prvog“ maksimuma, te dovelo do precijenjenih kutnih promjera zvjezdanih diskova.

5.5 Utjecaj rubnog zatamnjenja na određivanje kutnih promjera zvijezda

U prijašnjem poglavlju razmatrani su difrakcijski uzorci koji nastaju tijekom okultacija polikromatskih zvjezdanih diskova homogenog intenziteta. U ovom poglavlju simulacije su proširene na realističniji slučaj, u kojemu je uzet u obzir utjecaj rubnog zatamnjenja zvjezdanih diskova.

Rubno zatamnjenje naziva se pojava u kojoj je opažani površinski sjaj zvjezdanog diska na rubovima manji u odnosu na površinski sjaj središta diska. Pojava rubnog zatamnjenja može se opaziti i na Suncu, a značajna je u opažanjima tranzita ekstrasolarnih planeta, pomrčinski dvojnih zvijezda, gravitacijskih mikroleća, i interferometrijskim mjerenjima (Howarth 2011).

Zračenje koje pristiže sa zvijezda možemo opisati zračenjem crnog tijela, no okruženog apsorbirajućom atmosferom. Na zvijezdama ne postoje oštre granice između zvjezdanih fotosfera i njihovih atmosfera nego gustoća i temperatura plina rastu postupno u ovisnosti o dubini. U atmosferu zvijezde moguće je vidjeti do dubine na kojoj je optička dubina $\tau_\lambda \approx 1$. Optička dubina predstavlja srednji broj raspršenja fotona na njegovom putu od početnog položaja do površine zvijezde, a $\tau_\lambda \approx 1$ je dubina na kojoj foton doživljava zadnje raspršenje i može slobodno napustiti površinu zvijezde.

Fotosfera zvijezde je sloj zvjezdane atmosfere u kojem nastaje vidljiva svjetlost i koja se nalazi na optičkoj dubini $\tau_\lambda = 2/3$, tj. dubini iz koje foton valne duljine λ može neraspršeno napustiti površinu zvijezde. Stoga će površina zvijezde opažana pod bilo kojim kutom, uvijek prikazivati sloj atmosfere koji se nalazi na optičkoj dubini $\tau_\lambda = 2/3$, mjereno uzduž doglednice. Smjer doglednice prema zvjezdanom disku je usmjeren okomito na zvjezdanu površinu u blizini središta diska. Približavanjem rubu zvjezdanog diska, smjer doglednice bit će usmjeren pod sve većim kutom u odnosu na okomicu na zvjezdanu površinu. Zbog toga, na rubu zvjezdanog diska, opažatelj ne može vidjeti toliko duboko u zvjezdanu atmosferu kao pri opažanju središta diska. Budući da se plići slojevi zvjezdanih atmosfera nalaze na nižim temperaturama, intenzitet zračenja je niži, pa rub diska za opažatelja izgleda tamniji od središta diska (Carroll & Ostlie 2006).

Zvjezdane atmosfere nisu uvijek samo apsorbirajuće nego emisijom svjetlosti iz pojedinih slojeva atmosfere mogu doprinositi ukupnom sjaju zvijezda. Mogući su slučajevi kada temperatura u zvjezdanim atmosferama ne opada s povećanjem visine. U tim slučajevima, za određene spektralne linije optička dubina je najveća u područjima povišene temperature, te dolazi do pojave rubnog posvijetljenja (Schlawin et al. 2011).

U ovoj doktorskoj disertaciji nisu modelirane zvjezdane atmosfere, no s ciljem određivanja utjecaja zatamnjenog ruba na određivanje kutnih promjera zvijezda metodom zvjezdanih okultacija, problem je tretiran empirijski. Prvi model rubnog zatamnjenja, kojega je razvio Schwarzschild (1906), predstavlja analitičko rješenje za atmosferu u kojoj je intenzitet linearna funkcija u ovisnosti o optičkoj dubini. Jednoparametarska funkcija rubnog zatamnjenja, koja daje dobar empirijski opis specifičnog intenziteta u ovisnosti o radijalnoj udaljenosti r od središta zvjezdanog diska dana je s:

$$I(r) = I(0) \left[1 - u \left(1 - \sqrt{\frac{a^2 - r^2}{a^2}} \right) \right], \quad (5.5)$$

gdje je a polumjer zvjezdanog diska, $I(0)$ specifični intenzitet u centru zvjezdanog diska, a u faktor rubnog zatamnjenja. Izraz (5.5) može se pisati i u ovisnosti o funkciji $\mu = \cos\theta$ (Howarth

2011):

$$I(\mu) = I(0)[1 - u(1 - \mu)] \quad (5.6)$$

gdje je θ kut između smjera doglednice prema zvjezdanom disku i normale na zvjezdanu površinu. Specifični intenzitet na rubu zvjezdanog diska, gdje je $r = a$, odnosno, $\theta = 90^\circ$, iznosi $I(0)(1-u)$. Faktor rubnog zatamnjenja u definiran je kao:

$$u = \frac{I_{\text{sredistediska}} - I_{\text{rubdiska}}}{I_{\text{sredistediska}}} \quad (5.7)$$

Realističniji modeli rubnog zatamnjenja zvjezdanih atmosfera temelje se na nelinearnim funkcijama. Kvadratni model s dva koeficijenta rubnog zatamnjenja, dan je funkcijom:

$$I(\mu) = I(0)[1 - u_1(1 - \mu) - u_2(1 - \mu)^2] \quad (5.8)$$

gdje su u_1 i u_2 koeficijenti rubnog zatamnjenja (Kopal 1950). Ovaj model se obično koristi za analizu fotometrijskih krivulja tranzita ekstrasolarnih planeta preko zvjezdanih diskova primjenom MCMC (eng. Markov chain Monte Carlo) metode (npr. Mandel & Agol 2002). Iako jednačbe (5.6) i (5.8) daju zadovoljavajući model za opis opažanja, još precizniji model može se postići primjenom nelinearnog četveroparametarskog modela:

$$I(\mu) = I(0) \left[1 - \sum_{n=1}^4 a_n (1 - \mu^{n/2}) \right], \quad (5.9)$$

gdje su a_n koeficijenti rubnog zatamnjenja Claret (2000). Zbog nelinearnosti, ovaj model nije praktičan za određivanje numeričkih vrijednosti koeficijenata rubnog zatamnjenja iz fotometrijskih opažanja tranzita ekstrasolarnih planeta, no omogućuje prilagodbe modela atmosferskih intenziteta s odstupanjima ispod 0,05 % (Mandel & Agol 2002).

Osim gore spomenutih modela rubnog zatamnjenja, među ostalima, modeli koji su svoju primjenu pronalazili u prošlosti i često se pojavljuju u literaturi su model kvadratnog korijena (Diaz-Cordoves & Gimenez 1992), logaritamski model (Klinglesmith & Sobieski 1970), eksponencijalni model (Claret & Hauschildt 2003), te Singov troparametarski model (Sing et al. 2009).

Koeficijenti rubnog zatamnjenja modela određuju se prilagodbom atmosferskih modela na izravna mjerenja relevantnih fizičkih veličina ili mjerenja toka zračenja u kombinaciji s dodatnim parametrom, poput efektivne temperature zvijezde (Zhao & Hang 2000). Koeficijenti rubnog

zatamnjenja za pojedine modele, u konačnici se objavljuju u katalozima, gdje su navedeni u ovisnosti o efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji zvijezda. Neki od kataloga sadrže dodatno navedene parametre atmosferskih metaliciteta M/H , te mikroturbulentne brzine V_{micro} . Budući da faktor rubnog zatamnjenja ovisi o valnoj duljini (učinak je izraženiji u plavom dijelu spektra, a manje u crvenom), katalogi rubnog zatamnjenja sadrže informacije o propusnosti spektralnog područja u kojima su izmjereni, uključujući podatke za bolometrijska mjerenja, te standardne fotometrijske filtere Strömgren, Johnson, SDSS seriju, kao i filtere korištene na satelitima CoRoT i Kepler (npr. van Hamme 1993; Diaz-Cordoves et al. 1995; Claret 2000; Sing 2010; Claret 2004).

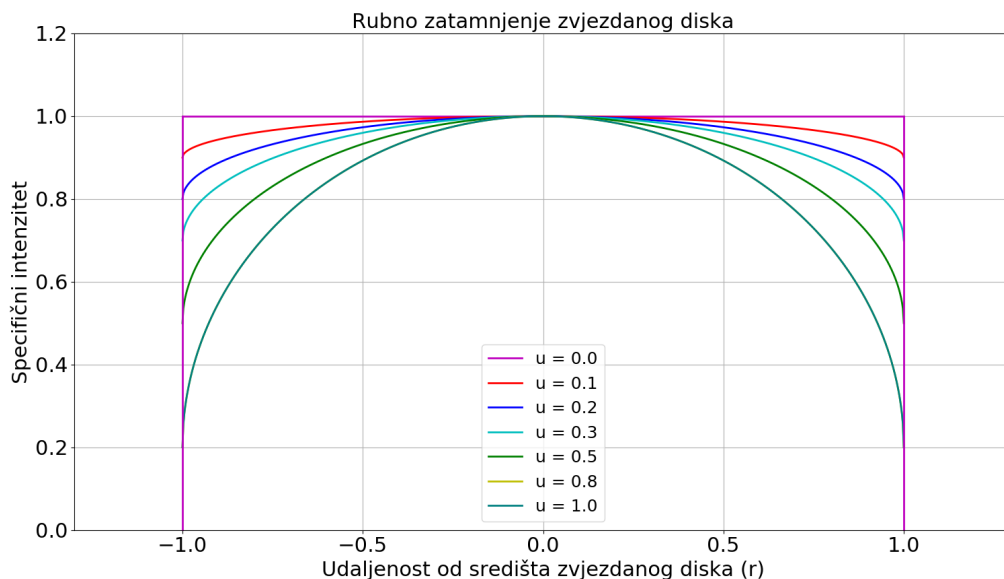
Katalogi koeficijenata rubnog zatamnjenja, razvrstani po atmosferskim modelima i spektralnim pojasevima propusnosti, dostupni su preko portala astronomskih kataloga usluge VizieR. Trenutačno najpotpuniji katalog dostupan je pod poveznicom <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/529/A75>, i obuhvaća koeficijente rubnog zatamnjenja za zvijezde u rasponu efektivne temperature $T_{\text{eff}} = 3500\text{--}50\,000$ K, logaritam površinske gravitacije $\log(g) = 0,0\text{--}5,0$, i to za fotometrijske sustave propusnih filtera Kepler, CoRoT, Spitzer, uvby, UBVRIJHK i SDSS (Claret & Bloemen 2011).

5.5.1 Priprema 1-D konvolucijskog kernela zvjezdanih diskova s učinkom rubnog zatamnjenja

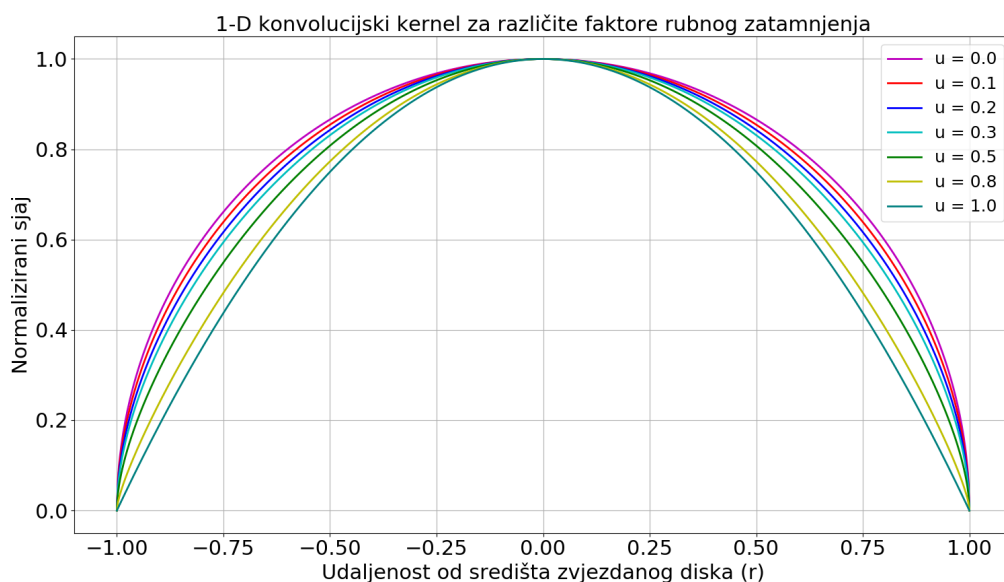
S ciljem modeliranja difrakcijskih uzoraka okultacija zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjenjem uzetim u obzir, pripremljeni su odgovarajući konvolucijski kerneli.

U prvom koraku promotrena je funkcija specifičnog intenziteta u ovisnosti o udaljenosti od središta zvjezdanog diska, za različite koeficijente rubnog zatamnjenja. Na slici 5.16 grafički je prikazana jednadžba (5.5) za koeficijente rubnog zatamnjenja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$, gdje je $u = 0,0$ slučaj homogeno osvijetljenog diska, kao korištenog u dosadašnjim modelima opisanim u poglavlju 5.4.1. Koeficijent rubnog zatamnjenja $u = 1,0$ prema jednadžbi (5.5) predstavlja polukružnicu specifičnog intenziteta $I = 0$ na rubovima zvjezdanog diska ($I(r = -1) = I(r = 1) = 0$).

Konvolucijski kerneli zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjenjem uzetim u obzir generirani su množenjem funkcije specifičnog intenziteta s kernelima zvjezdanih diskova homogenog intenziteta. Slika 5.11 prikazuje jednodimenzionalne konvolucijske kernele zvjezdanih diskova polumjera r , za faktore rubnog zatamnjenja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$.



Slika 5.16: Grafički prikazane funkcije specifičnog intenziteta prema jednadžbi (5.5) s koeficijentima rubnog zatamnjivanja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$. Za koeficijent rubnog zatamnjivanja $u = 0,0$ (krivulja ljubičaste boje), krivulja prikazuje slučaj homogeno osvijetljenog diska, kao korištenog u dosadašnjim modelima opisanim u poglavlju 5.4.1. Koeficijent rubnog zatamnjivanja $u = 1,0$ (krivulja tirkizne boje) prikazuje polukružnicu specifičnog intenziteta $I = 0$ na rubovima zvjezdanog diska ($I(r = -1) = I(r = 1) = 0$).



Slika 5.17: Jednodimenzionalni konvolucijski kerneli zvjezdanih diskova polumjera r , za faktore rubnog zatamnjivanja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$. Krivulja faktora rubnog zatamnjivanja $u = 0,0$ (krivulja ljubičaste boje) prikazuje slučaj homogeno osvijetljenog diska, korištenog u dosadašnjim modelima opisanim u poglavlju 5.4.1.

5.5.2 Učinak rubnog zatamnjivanja zvjezdanih diskova na izgled difrakcijskih uzoraka

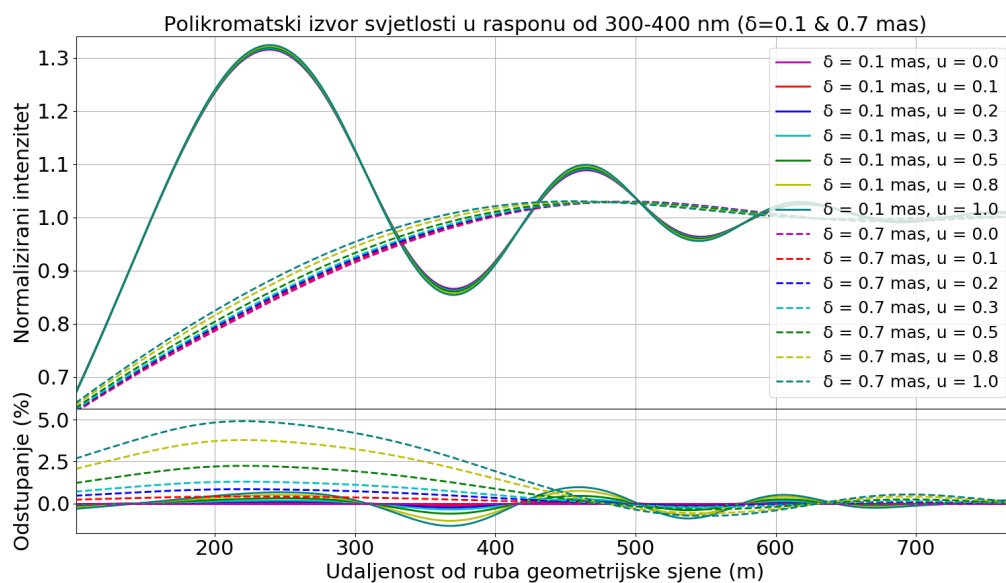
U ovom poglavlju istražen je učinak rubnog zatamnjivanja na izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima. Napravljena je konvolucija Fresnelovih difrakcijskih uzoraka polikromatskog točkastog izvora raspona spektra između 300 i 400 nm i jednodimenzionalnih kernela zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjivanjem (opisanih u poglavlju 5.5.1).

Slika 5.18 prikazuje izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od 1,5 astronomskih jedinica ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m) za zvjezdane diskove s faktorima rubnog zatamnjivanja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$ (prikazani krivuljama u različitim bojama). Neprekidne i isprekidane krivulje prikazuju difrakcijske uzorke kakvi bi nastali okultacijama zvjezdanih diskova kutnog promjera $\delta = 0,1$ mas, i $\delta = 0,7$ mas respektivno.

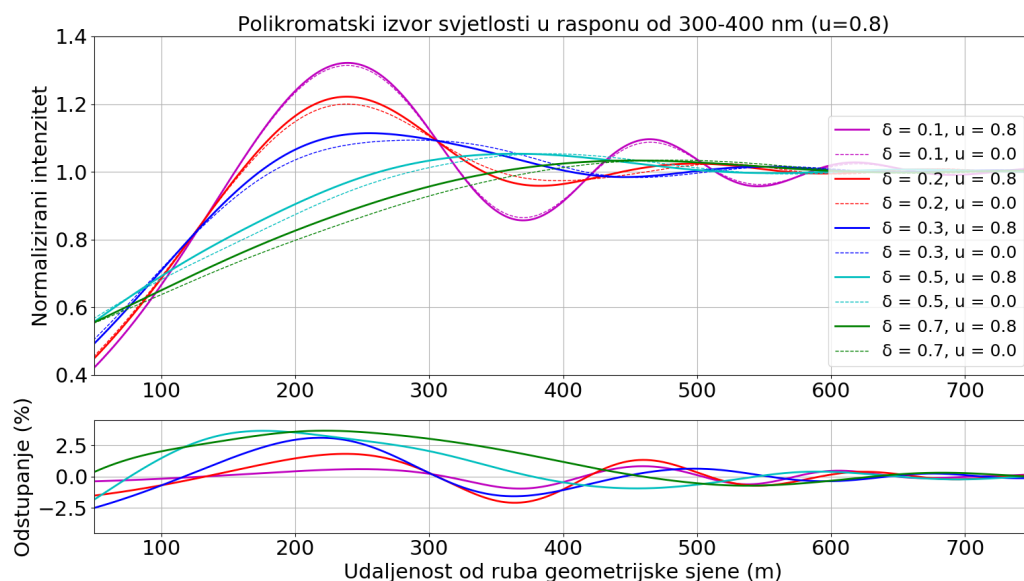
Donji graf slike 5.18 prikazuje krivulje odstupanja difrakcijskih uzoraka s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir, od difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih zvjezdanih diskova. Uočljivo je da difrakcijski uzorci nastali okultacijama zvjezdanih diskova kutnog promjera $0,1$ mas i faktora rubnog zatamnjivanja $u = 1,0$, od difrakcijskog uzorka homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska odstupaju u intenzitetu do oko 1,3 %. Difrakcijski uzorci okultacija zvjezdanih diskova kutnih promjera $0,7$ mas i faktora rubnog zatamnjivanja $u = 1,0$ pokazuju odstupanja od difrakcijskog uzorka homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska do oko 5,0 %.

U modelu sa zvjezdanom diskom promjera $0,1$ mas, najveća odstupanja nastala na mjestu prvog minimuma difrakcijskog uzorka. U modelu s diskom promjera $0,7$ mas, najveća odstupanja nastala su na uzlaznoj krivulji intenziteta prvog maksimuma, dok se u prvom maksimumu nalazi čvor difrakcijskih krivulja različitih faktora rubnog zatamnjivanja. Drugim riječima, zbog činjenice da odstupanja ne nastaju uvijek u maksimumima difrakcijskih uzoraka, samom procjenom omjera izmjerenih intenziteta prvog difrakcijskog maksimuma opažanih Fresnelovih uzorka, kao opisano u poglavlju 5.4.1 i prikazano na slici 5.15, nije moguće detektirati učinke rubnog zatamnjivanja zvjezdanih diskova.

Kako bi bila istražena ovisnost odnosa difrakcijskih uzoraka zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir, u odnosu na one bez učinka rubnog zatamnjivanja, za fiksiran faktor rubnog zatamnjivanja prikazana je usporedba difrakcijskih krivulja za diskove različitih kutnih promjera. Slika 5.19 prikazuje izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od 1,5 astronomskih jedinica za polikromatske zvjezdane diskove raspona spektra između 300 i 400 nm kutnih promjera $\delta = 0,1$ mas, $0,2$ mas, $0,3$ mas, $0,5$ mas i $0,7$ mas. Za pojedine kutne promjere, isprekidanim krivuljama prikazani su difrakcijski uzorci za diskove bez učinka rubnog



Slika 5.18: Izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od 1,5 a.j. ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m) za zvjezdane diskove s faktorima rubnog zatamnjivanja $u = 0,0, 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$ (prikazani krivuljama u različitim bojama). Neprekidne i isprekidane krivulje prikazuju difrakcijske uzorke kakvi bi nastali okultacijama polikromatskih zvjezdanih diskova raspona spektra između 300 i 400 nm, kutnog promjera $\delta = 0,1$ mas, i $\delta = 0,7$ mas respektivno. Donji graf prikazuje krivulje odstupanja difrakcijskih uzoraka s rubnim zatamnjением uzetim u obzir, od difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih zvjezdanih diskova. Odstupanja su izražena u postotcima.



Slika 5.19: Izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom zvjezdanih okultacija malim tijelima u glavnom asteroidnom pojasu na udaljenosti od 1,5 a.j. ($d = 2,25 \cdot 10^{11}$ m) za polikromatske zvjezdane diskove raspona spektra između 300 i 400 nm, i kutnih promjera $\delta = 0,1$ mas, $0,2$ mas, $0,3$ mas, $0,5$ mas i $0,7$ mas. Za pojedine kutne promjere, isprekidanim krivuljama prikazani su difrakcijski uzorci za diskove bez učinka rubnog zatamnjivanja ($u = 0,0$), a neprekidnim krivuljama za diskove s faktorom rubnog zatamnjivanja $u = 0,8$. Donji graf prikazuje krivulje odstupanja difrakcijskih uzoraka s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir, od difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih zvjezdanih diskova. Uočljivo je da difrakcijski uzorci nastali okultacijama manjih zvjezdanih diskova, od difrakcijskog uzorka homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska odstupaju manje u intenzitetu od onih nastalih okultacijama većih zvjezdanih diskova.

zatamnjivanja ($u = 0,0$), a neprekidnim krivuljama za diskove s faktorom rubnog zatamnjivanja $u = 0,8$.

Donji graf prikazuje krivulje odstupanja difrakcijskih uzoraka s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir, od difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih zvjezdanih diskova. Uočljivo je da difrakcijski uzorci nastali okultacijama manjih zvjezdanih diskova, od difrakcijskog uzorka homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska odstupaju manje u intenzitetu od onih nastalih okultacijama većih zvjezdanih diskova. Tako za faktor rubnog zatamnjivanja $u = 0,8$, najveća izmjerena odstupanja za diskove kutnih promjera $0,1$ mas, $0,2$ mas, $0,3$ mas, $0,5$ mas i $0,7$ mas iznose približno $1,3\%$, $2,3\%$, $2,8\%$, $3,7\%$ i $3,8\%$ respektivno.

Do sada smo pokazali da uzimanjem u obzir učinka rubnog zatamnjivanja, opažani difrakcijski uzorci za diskove visokih faktora rubnog zatamnjivanja od $u = 1,0$, odstupaju od onih sa zanemarenim rubnim zatamnjivanjem za približno između $1-5\%$ (ovisno o kutnom promjeru diska). No, pitanje koje se ovdje postavlja jest koliki utjecaj ova odstupanja u intenzitetu u konačnici imaju na određivanje kutnih promjera zvjezdanih diskova.

Utjecaj rubnog zatamnjivanja na procjenu kutnog promjera zvjezdanih diskova istražen je potragom za najboljim prilagodbama krivulja difrakcijskih uzoraka s rubnim zatamnjivanjem uzetim

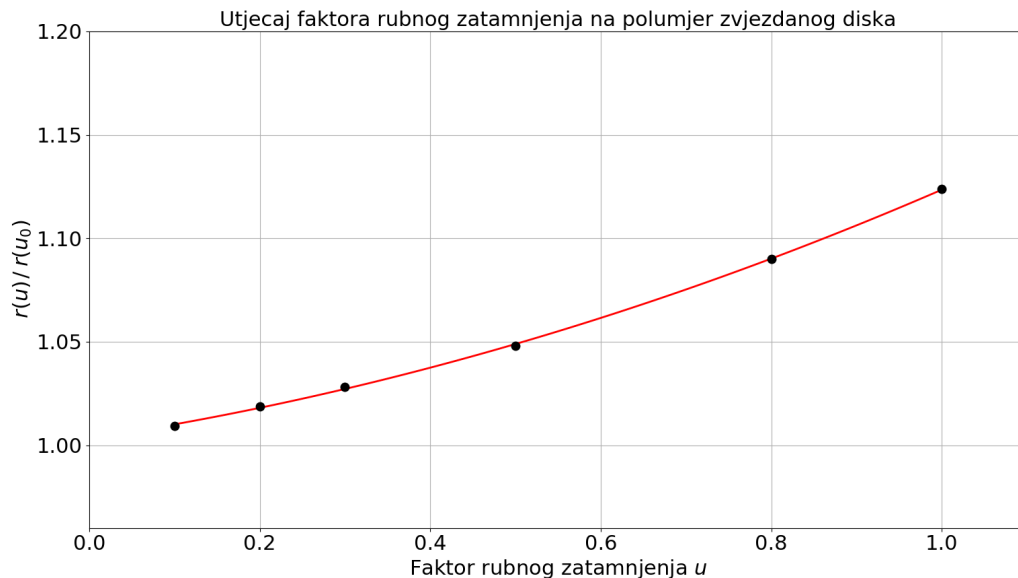
Tablica 5.1: Faktor rubnog zatamnjivanja u u ovisnosti o odnosu $r(u)/r(u_0)$. Odnos $r(u)/r(u_0)$ nastao je dijeljenjem kutnih polumjera zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjivanjem faktora u uzetim u obzir, s kutnim polumjerima homogeno osvijetljenih diskova ($u = 0,0$), čije se krivulje difrakcijskih uzoraka dobro podudaraju. Uočljivo je da odnos $r(u)/r(u_0)$ za faktor rubnog zatamnjivanja $u = 1,0$ dostiže $\sim 12,4\%$.

u	$r(u)/r(u_0)$
0,1	1,009259259
0,2	1,018691589
0,3	1,028301887
0,5	1,048076923
0,8	1,09
1,0	1,12371134

u obzir, na krivulje difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih diskova. U toj potrazi, za fiksirani polumjer homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska, $r(u_0)$, najprije je modelirana krivulja difrakcijskih uzoraka sa zanemarenim rubnim zatamnjivanjem. Za proizvoljno odabrane faktore rubnog zatamnjivanja u , variranjem polumjera zvjezdanih diskova $r(u)$, metodom najmanjih kvadrata tražene su krivulje difrakcijskih uzoraka s najboljom prilagodbom krivulji difrakcijskih uzoraka sa zanemarenim rubnim zatamnjivanjem. Na taj način određeni su polumjeri zvjezdanih diskova s učinkom rubnog zatamnjivanja uzetim u obzir koji svojim krivuljama difrakcijskih uzoraka odgovaraju polumjeru r homogenog zvjezdanog diska, bez rubnog zatamnjivanja uzetog u obzir.

Dijeljenjem kutnih polumjera zvjezdanih diskova s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir, $r(u)$, s kutnim polumjerima homogeno osvijetljenih diskova $r(u_0)$, čije se krivulje difrakcijskih uzoraka dobro podudaraju, pronađena je korelacija faktora rubnog zatamnjivanja u i odnosa $r(u)/r(u_0)$. Tablica 5.1 prikazuje dobivene vrijednosti odnosa $r(u)/r(u_0)$ za zvjezdane diskove s faktorima rubnog zatamnjivanja $u = 0,1, 0,2, 0,3, 0,5, 0,8$ i $1,0$. Uočljivo je da je procijenjeni kutni polumjer homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska, u usporedbi s diskom s faktorom rubnog zatamnjivanja $u = 1,0$ uzetim u obzir za oko $12,4\%$ veći.

Ovi odnosi omogućuju uvođenje korekcijskog faktora na polumjere određene iz prilagodbi krivulji modela difrakcijskih uzoraka sa zanemarenim rubnim zatamnjivanjem. Gore je pokazano da modeliranje difrakcijskih uzoraka s diskovima u kojima je rubno zatamnjeno uzeto u obzir zahtijeva pripremu konvolucijskih kernela za svaki pojedini faktor rubnog zatamnjivanja. S obzirom na to da za velik broj zvijezda ne poznajemo pouzdano faktor rubnog zatamnjivanja, odlučili smo modelirati Fresnelove difrakcijske uzorke bez faktora rubnog zatamnjivanja uzetih u obzir, a zatim uz procjenu faktora rubnog zatamnjivanja, i njemu pripadajućeg odnosa $r(u)/r(u_0)$ dati naknadnu korekciju na kutni polumjer diska zvijezde.



Slika 5.20: Crne točke prikazuju vrijednosti faktora rubnog zatamnjivanja u u ovisnosti o odnosu $r(u)/r(u_0)$, navedenih u tablici 5.1. Crvenom krivuljom prikazan je prilagođeni polinom drugog stupnja određen jednažbom (5.10).

Na točke iz tablice 5.1, prilagodbom polinoma drugog stupnja određena je jednažba:

$$y = 0,0578x^2 + 0,0624x + 1,0033, \quad (5.10)$$

gdje varijabla x predstavlja faktor rubnog zatamnjivanja u , a y odnos $r(u)/r(u_0)$. Nepouzdanosti vodećeg koeficijenta polinoma (koeficijent drugog stupnja), linearnog koeficijenta, i slobodnog koeficijenta iznose 0,0056, 0,0063, i 0,0014 respektivno. Korelacijski koeficijent polinoma i zadanih vrijednosti iznosi $R^2 = 0,9998$. Dobivena krivulja prikazana je na slici 5.20.

Polinom iz jednažbe (5.10) omogućuje računanje korekcijskog faktora na kutni promjer za proizvoljno odabran faktor rubnog zatamnjivanja u .

5.5.3 Ovisnost faktora rubnog zatamnjivanja o efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji zvijezde

Faktore rubnog zatamnjivanja diskova opažanih zvijezda moguće je procijeniti uz poznavanje njihovih fundamentalnih atmosferskih karakteristika koje se mogu eksperimentalno odrediti - efektivne temperature (T_{eff}) i površinske gravitacije, često izražene kao logaritam $\log(g)$. Podaci o temperaturama zvijezda i površinskoj gravitaciji dostupni su u katalozima zvijezda. Efektivna temperatura zvijezda može se odrediti prilagodbom Planckovog zakona zračenja crnog tijela na spektar zvijezde. Uz poznatu efektivnu temperaturu zvijezda, posebice za $T_{\text{eff}} > 8000$ K,

vrijednosti površinske gravitacije mogu se odrediti iz profila Balmerovih linija (npr. Vidal et al. 1973). Višepojasna fotometrija također može služiti za procjenu atmosferskih parametara (npr. Moon & Dworetsky 1985) s nepouzdanostima od ± 200 K u efektivnoj temperaturi i $\pm 0,2$ dex (oko 20 %) u logaritmu površinske gravitacije (Smalley 2005).

Slika 5.21 prikazuje vrijednosti faktora rubnog zatamnjenja u ovisnosti o efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji zvijezda. Podaci su preuzeti iz kataloga kojega su objavili Claret & Bloemen (2011), a obuhvaćaju koeficijente rubnog zatamnjenja za zvijezde u rasponu efektivne temperature $T_{\text{eff}} = 3500\text{--}50\,000$ K i logaritam površinske gravitacije $\log(g) = 0,0\text{--}5,0$. Faktor rubnog zatamnjenja raspona $u = 0,0\text{--}1,0$, za odgovarajuće vrijednosti efektivne temperature i površinske gravitacije prikazan je ljestvicom u boji. Može se primijetiti da je faktor rubnog zatamnjenja manje osjetljiv na temperaturu i gravitaciju za zvijezde toplije od približno 8000 K. Vrijednosti koeficijenata rubnog zatamnjenja prikazani su zasebno za spektralne pojaseve propusnosti standardnih fotometrijskih filtera serije Johnson-Cousins - U , B , V , R , I , J , H , i K . Raspon osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC usporediv je s područjem spektralne propusnosti standardnog fotometrijskog filtera B .

5.6 Opažanja zvjezdanih okultacija s teleskopima MAGIC

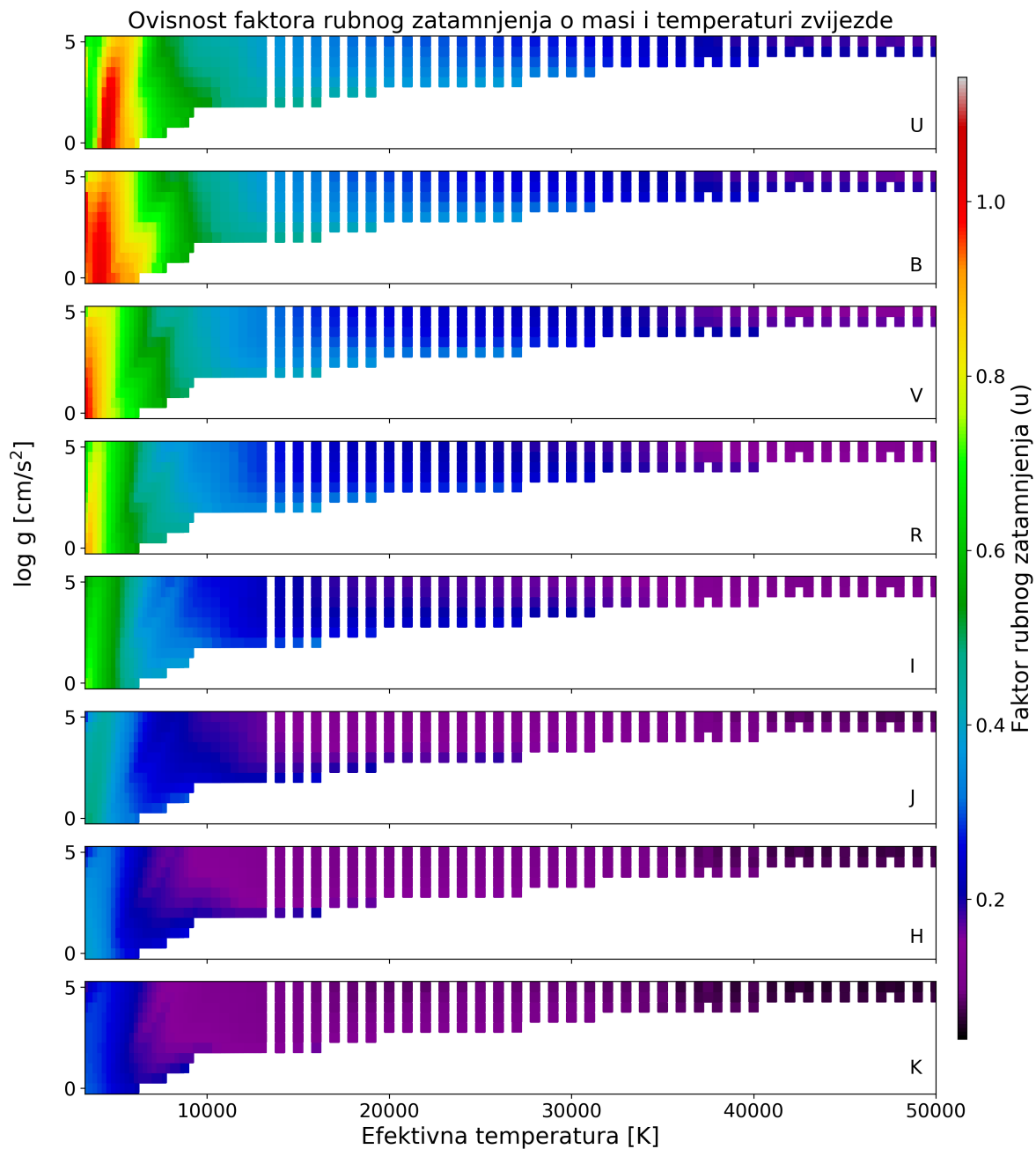
5.6.1 Prednosti teleskopa MAGIC

Kamere teleskopa MAGIC sastoje se od sačastih skupova 1039 fotomultiplikatorskih detektora, osjetljivih na optički dio spektra između 300 i 400 nm. Središnji detektor kamere teleskopa MAGIC-II (središnji piksel), može se koristiti i kao individualni optički detektor, s mogućnošću iščitavanja signala s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, osjetljiv na milisekundne optičke bljeskove graničnog prividnog sjaja $\sim 13,5$ mag.

Iako niske kutne moći razlučivanja od $0,1^\circ/\text{pikselu}$, visoko vremensko razlučivanje i veliki promjer objektiva od 17 m, teleskope MAGIC čine izvrsnim optičkim instrumentima za fotometrijska opažanja zvjezdanih okultacija. Uobičajena opažanja okultacija zvijezda malim tijelima optičkim teleskopima srednje i velike klase omogućuje procjenu njihovih fizikalnih karakteristika - promjera, oblika, postojanja atmosfere i drugih fizikalnih značajki poput prisustva prstenovi ili prirodnih satelita, i to razlučivanjima od nekoliko kilometara, za nekoliko redova veličine većim od bilo koje druge zemaljske metode opažanja.

Opažanja zvjezdanih okultacija bitna su za istraživanje transneptunskih i drugih udaljenih objekata u vanjskim dijelovima Sunčevog sustava, jer su okultacije jedina metoda za precizno određivanje njihovih fizičkih karakteristika.

Na primjer, iz opažanja zvjezdanih okultacija precizno su određeni promjeri patuljastih planeta (136199) Eris i (134340) Pluton (Sicardy et al. 2011), te je izmjeren albedo i postavljena



Slika 5.21: Vrijednosti faktora rubnog zatamnjivanja u u ovisnosti o efektivnoj temperaturi i površinskoj gravitaciji zvijezda. Podaci su preuzeti iz kataloga Claret & Bloemen (2011), a obuhvaćaju koeficijente rubnog zatamnjivanja za zvijezde u rasponu efektivne temperature $T_{\text{eff}} = 3500\text{--}50\,000$ K (x -os) i logaritam površinske gravitacije $\log(g) = 0,0\text{--}5,0$ (y -os). Faktor rubnog zatamnjivanja raspona vrijednosti $u = 0,0\text{--}1,0$, za odgovarajuće vrijednosti efektivne temperature i površinske gravitacije, prikazan je bojom prema legendi na desnoj strani. Vrijednosti koeficijenata rubnog zatamnjivanja prikazani su zasebno za spektralne pojaseve propusnosti standardnih fotometrijskih filtera serije Johnson-Cousins - U , B , V , R , I , J , H , i K . Raspon osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC usporediv je s područjem spektralne propusnosti standardnog fotometrijskog filtera B .

donja granica gustoće atmosfere patuljastog planeta (136472) Makemake (Ortiz et al. 2012).

Prikupljanjem izravnih snimki svemirskim letjelicama, što je dugotrajan i skup pothvat, dostižu se veća razlučivanja od onih koje se postižu na temelju okultacijskih opažanja. Nedavni primjer jedne takve svemirske misije, lansirane 2006. godine prema Kuiperovom pojasu, jest misija New Horizons. 2015. i 2019. godine, tijekom bliskih preleta letjelice New Horizons, prikupljeni su vrijedni podaci o patuljastom planetu Plutonu (Stern et al. 2015), te malom tijelu Kuiperovog pojasa (486958) Arrokoth (Spencer et al. 2020).

Motivirani nedavnim otkrićima prstenova oko kentaura (10199) Chariklo (Braga-Ribas et al. 2014), i oko patuljastog planeta (136108) Haumea metodom opažanja zvjezdanih okultacija (Ortiz et al. 2017), opisanog u ovoj doktorskoj disertaciji, s ciljem iskorištavanja potencijala teleskopa MAGIC i unapređenja vremenskog razlučivanja u okultacijskim opažanjima za nekoliko redova veličine, sastavljen je prijedlog za opažanje zvjezdanih okultacija središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II.

Dugoročni ciljevi opažanja okultacija visokofrekventnim uzorkovanjem jesu razlučiti pojedine fizikalne karakteristike malih tijela, za koje uobičajeni instrumenti koji se danas koriste za okultacijska opažanja nisu dovoljno osjetljivi. Na primjer, uobičajene brzine uzorkovanja tijekom opažanja okultacijskih događaja CCD kamerama su između 1-10 Hz, što za udaljene objekte i transneptunske objekte može rezultirati razlučivanjima između 5 i 10 km. Za usporedbu, frekvencija uzorkovanja središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II od 10 kHz za tri je reda veličine veća. U najboljem slučaju, takva opažanja mogu rezultirati razlučivanjima između 0,5 i 1 m (za izrazito male kutne promjere okultiranih zvijezda). Stoga bi opažanje središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II omogućilo razlučivanje struktura unutar sustava prstenova kao onih oko (10199) Charikla i (136108) Haumea, ili u najboljem slučaju čak detekciju pojedinih fragmenata unutar prstenova. Takva opažanja mogla bi doprinijeti razumijevanju porijekla prstenova ili procjenu njihove starosti.

Kratkoročni ciljevi predlaganih opažačkih kampanja, opisanih u idućem potpoglavlju, su ispitivanje osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II za detekciju okultacijskih događaja, te prva detekciju okultacijskog događaja ovim instrumentom. Za prvu detekciju, kriteriji odabira malog tijela su prošireni i uzeta su u obzir sva tijela glavnog asteroidnog pojasa.

5.6.2 Procjena učestalosti okultacijskih događaja za teleskope MAGIC i opažački prijedlozi za opažačke cikluse C14, C15 i C16

Godišnja stopa učestalosti zvjezdanih okultacija malim tijelima Sunčevog sustava eksponencijalno raste s porastom graničnog prividnog sjaja. Predviđanje okultacijskih događaja provodi se kombiniranjem zvjezdanih kataloga s bazom orbitalnih efemerida poznatih malih tijela. Glavni doprinos nepouzdanosti predviđanja okultacijskih događaja su nepouzdanosti orbitalnih para-

metara malih tijela i njihovih kutnih promjera (detaljnije opisano u poglavlju 2.3.2), a objavom kataloga zvijezda nove generacije, doprinos nepouzdanosti položaja zvijezda postao je zanemarljiv.

Godišnja stopa učestalosti okultacijskih događaja, koja predstavlja teorijsku vrijednost temeljenu na geometriji, pod pretpostavkom da se opažач nalazi na jednoj nepokretnoj lokaciji na površini Zemlje, a ne uzimajući u obzir „vidljivost“ svakog događaja, za sve zvijezde sjajnije od $\sim 13,5$ mag i promjere malih tijela veće od približno 300 km (uobičajeni promjeri poznatih kentaura i transneptunskih objekata) iznosi $\sim 6 \cdot 10^{-2}$ okultacija po objektu godišnje (Tanga & Delbo 2007). Pomnožimo li ovu stopu učestalosti s brojem svih poznatih objekata većih od 300 km, njih približno 100, ukupno je predviđeno manje od 6 okultacijskih događaja godišnje. Uzimajući u obzir maksimalno efektivno vrijeme opažanja teleskopa MAGIC od oko 1500 sati godišnje (sukladno opažачkim statistikama kolaboracije MAGIC, ~ 17 % ukupnog noćnog vremena), pomoću teleskopa MAGIC moguće je u prosijeku opaziti manje od 1 zvjezdane okultacije godišnje uzrokovane malim tijelom promjera većeg od 300 km.

Stoga, opažачki prijedlozi nisu ograničeni isključivo na velike i udaljene objekte u vanjskim dijelovima Sunčevog sustava, nego su u obzir uzeta i mala tijela iz glavnog asteroidnog pojasa, prvenstveno s ciljem ispitivanja osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II.

S ciljem pronalaženja odgovarajućih kandidata okultacijskih događaja visoke vjerojatnosti, u razmatranje je uključeno oko 10 000 tijela iz glavnog asteroidnog pojasa s dobro poznatim orbitama, te većih od približno 10-20 km. Godišnja stopa učestalosti okultacijskih događaja s nepomičnog geografskog položaja (opservatorij Roque de Los Muchachos na kanarskom otoku La Palma), i za sve zvijezde sjajnije od $\sim 13,5$ mag, za ovaj skup malih tijela iznosi 20-50 okultacija. Uzimajući u obzir prosječno efektivno vrijeme opažanja teleskopa MAGIC, za nepomičnu lokaciju preostaje 4-10 okultacijskih događaja godišnje koji zadovoljavaju sve opažачke kriterije.

Trajanje zvjezdanih okultacija u pravilu je vrlo kratko, u rasponu od nekoliko sekundi do približno 120 sekundi. Za kompenzaciju vremenske nepouzdanosti u predviđanju okultacijskog događaja, okultacijsko opažanje u pravilu počinje nekoliko minuta prije i završava nekoliko minuta poslije predviđenog trenutka okultacijskog događaja. Prikupljeni podaci mogu se koristiti i za fotometrijsku kalibraciju, te za potragu za sekundarnim događajima uzrokovanih npr. prirodnim satelitima okultacijskog malog tijela, prisustva prstenova, izbačaja materijala, ili drugih fizikalnih značajki. U praksi, za opažanje zvjezdane okultacije potrebno je 10-12 minuta teleskopskog vremena. Zbog učestalih objava novih parametara orbite malih tijela, precizna predviđanja okultacijskih događaja često dolaze s relativno kratkom najavom od najviše nekoliko tjedana u naprijed. Stoga se okultacijska opažanja u pravilu planiraju kratkoročno prije samog događaja.

Uzimajući u obzir najbolji scenarij s 10 kandidata zvjezdanih okultacija visoke vjerojatnosti u

godini, za opažački prijedlog potrebno je ukupno 2,0 sata (120 minuta) efektivnog teleskopskog vremena, raspoređenih u deset opažanja u trajanju od 0,2 sata (12 minuta). Zbog kratkoročnih predviđanja zvjezdanih okultacija, u opažačkom prijedlogu zatraženo je teleskopsko vrijeme u terminima ovisnim o okolnostima, kategorije „ToO“ (eng. Target of Opportunity), s naznakom kritičnosti na vremenske okvire u minutama/sekundama.

Početkom opažačkog ciklusa C15, u veljači 2020. godine, instaliran je središnji piksel i na teleskopu MAGIC-I, no tehnički nije bio spreman za prikupljanje podataka sve do rujna 2020. godine. Osim što će drugi središnji piksel biti koristan za potvrdu opažanja prvoga, otvara mogućnost visoko preciznih astrometrijskih opažanja mjerenjem kašnjenja početka i kraja okultacijskog događaja između 2 teleskopa, koje se javlja zbog fizičke udaljenosti između teleskopa MAGIC-I i MAGIC-II od 85 m, te konačne brzine gibanja okultacijske sjene po površini Zemlje. Ovakva visokoprecizna astrometrijska opažanja, osim za precizno određivanje orbitalnih parametara malih tijela, mogu biti iskorištena primjerice za detekciju orbitalnih perturbacija ili mjerenje Yarkovsky efekta (Bottke et al. 2006).

Postavljanjem uskopojasnih optičkih filtera ispred središnjih piksela teleskopa MAGIC-I i MAGIC-II, iz zvjezdanih okultacija malim tijelima mogli bi se detektirati difrakcijski uzorci kroz dva neovisna spektralna kanala. Istodobnim mjerenjima difrakcijskih uzoraka u dva različita spektralna pojasa, moguće je smanjiti relativne pogreške mjerenja prividnih zvjezdanih promjera.

Teleskopsko vrijeme u svrhu opažanja zvjezdanih okultacija malim tijelima dodijeljeno je u ciklusima C14 (tablica 5.2), C15 (tablica 5.3) i C16 (tablica 5.4). U sklopu dodijeljenog opažačkog vremena, u ciklusima C14 i C15 izvedena su ispitivanja fokusa, te prikupljena prva opažanja zvjezdanih okultacija teleskopima MAGIC, opisano u idućim potpoglavljima. U opažačkom ciklusu C16 dodijeljeno je 10 sati teleskopskog vremena. U tom ciklusu planirano je prikupljanje podataka za 60 pojedinačnih okultacijskih događaja, povećavajući ukupnu vjerojatnost za pozitivnim detekcijama. Prva opažanja okultacijskih kandidata u ciklusu C16 planirana su za travanj 2021. godine.

5.6.3 Fokusiranje teleskopa MAGIC-II i prikupljena opažanja

U standardnom opažačkom postavu, zrcala teleskopa MAGIC fokusirana su u atmosferu, odnosno u atmosferski sloj u kojemu se emitira atmosfersko Čerenkovljevo zračenje tijekom raspada čestica iz visokoenergetskih izvora. Ovisno o zenitnoj udaljenosti izvora na koju je teleskop usmjeren, fokusna točka obično se nalazi na udaljenosti između 10 i 20 km. U svrhu optimizacije opažanja zvjezdanih okultacija s teleskopima MAGIC, i podizanje odnosa signala i šuma SNR, jedan od ciljeva opažačkih prijedloga bio je pronalaženje optimalnog fokusa teleskopa MAGIC.

Test fokusiranja teleskopa u beskonačnost, na zvijezde, proveden je pomoću sustava aktivne kontrole zrcala (AMC). U postupku fokusiranja, teleskop je usmjeren na proizvoljnu zvijezdu,

Tablica 5.2: Sažetak opažačkog prijedloga s dodijeljenim teleskopskim vremenom u ciklusu C14

Ciklus:	C14 (veljača 2019. - veljača 2020.)
Naslov:	„Central pixel observations of stellar occultations by asteroids“
Kategorija:	ToO, kritičnost vremenskih okvira u minutama/sekundama
Vrijeme:	2,0 sata
Modus opažanja:	MAGIC-II mono, središnji piksel
Nositelj (PI):	Stefan Cikota, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR
Suradnici:	Ana Babić, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR Juan Cortina, CIEMAT, Madrid, ES

Tablica 5.3: Sažetak opažačkog prijedloga s dodijeljenim teleskopskim vremenom u ciklusu C15

Ciklus:	C15 (veljača 2020. - veljača 2021.)
Naslov:	„Central pixel observations of stellar occultations by asteroids“
Kategorija:	ToO, kritičnost vremenskih okvira u minutama/sekundama
Vrijeme:	2,0 sata
Modus opažanja:	MAGIC-I & MAGIC-II, središnji piksel
Nositelj (PI):	Stefan Cikota, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR
Suradnici:	Ana Babić, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR Juan Cortina, CIEMAT, Madrid, ES Jose Luis Contreras, Universidad Complutense de Madrid, ES Andres Baquero Larriva, Universidad Complutense de Madrid, ES Juan Abel Barrio, Universidad Complutense de Madrid, ES

Tablica 5.4: Sažetak opažačkog prijedloga s dodijeljenim teleskopskim vremenom u ciklusu C16

Ciklus:	C16 (veljača 2020. - veljača 2021.)
Naslov:	„Exploiting asteroid occultation optical diffraction features with the MAGIC central pixel“
Kategorija:	ToO, kritičnost vremenskih okvira u minutama/sekundama
Vrijeme:	10,0 sati
Modus opažanja:	MAGIC-I & MAGIC-II, središnji piksel + standard DAQ
Nositelj (PI):	Stefan Cikota, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR
Suradnici:	Ana Babić, Sveučilište u Zagrebu, FER, HR Tarek Hassan, CIEMAT, Madrid, ES Juan Cortina, CIEMAT, Madrid, ES Jose Luis Contreras, Universidad Complutense de Madrid, ES Andres Baquero Larriva, Universidad Complutense de Madrid, ES Juan Abel Barrio, Universidad Complutense de Madrid, ES John Hoang, Universidad Complutense de Madrid, ES Marcos Lopez-Moya, Universidad Complutense de Madrid, ES Marc Ribo, Universitat de Barcelona, ES Luis Angel Tejedor, Universidad Complutense de Madrid, ES

te je očitavan signal na pretpojačalu fotomultiplikatora (središnjeg piksela), koji prikazuje struju na anodi fotomultiplikatora.

Postavljanjem različitih zrcalnih konfiguracija, položaj optimalne žarišne točke određen je potragom maksimalne struje na fotomultiplikatoru. Mjerenjima je određeno da se fokalna točka nalazi oko 28 mm od standardnog postava zrcala u smjeru prema unutrašnjosti kamere, u položaju $F=-28$, $X=0$, $Y=0$.

Postupak postavljanja fokusa u softverskom sučelju AMC sustava za kontrolu zrcala sastoji se od samo nekoliko koraka i izvediv je u roku od 2-3 minute. Upute za operatore teleskopa MAGIC koji vrše opažanja u opažачkim smjenama su pripremljene i dostupne putem internih web sadržaja kolaboracije MAGIC.

U razdoblju od prosinca 2017. godine do veljače 2020. godine, sa središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II, zakazano je ukupno 6 opažanja okultacijskih događaja (tablica 5.5). Postupak zakazivanja teleskopskog vremena i stavljanja u noćni raspored provodi se putem internog obrasca na mrežnim stranicama kolaboracije MAGIC, te u dogovoru s povjerenstvom za dodjelu opažачkog vremena (Time Allocation Comitee, TAC). Budući da je opažачkim prijedlozima teleskopsko vrijeme već dodijeljeno, te projekt ima najvišu kategoriju kritičnosti vremenskih okvira u minutama/sekundama, postupak uvrštavanja zakazanog snimanja u noćni raspored vrši se sukladno proceduri za objekte najviše kategorije kritičnosti.

Od ukupno 6 opažanja zakazanih u noćni raspored, četiri opažanja nisu uspješno prikupljena zbog loših vremenskih prilika ili tehničkih razloga. Dva opažanja zvjezdanih okultacija, malim tijelima (83) Beatrix i (28) Bellona, uspješno su prikupljena i prikazana na slikama 5.22 - 5.25.

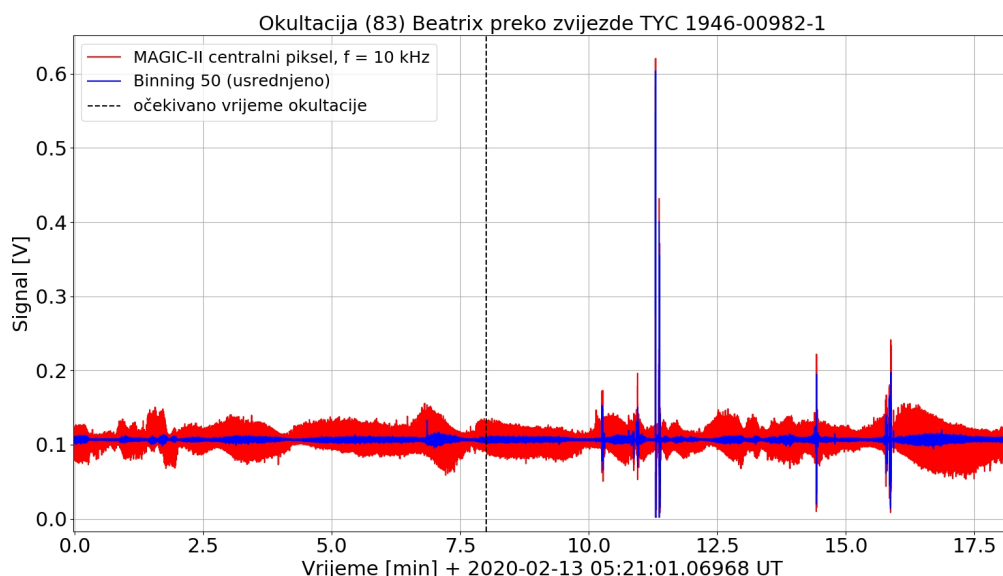
Slika 5.22 prikazuje prikupljeno opažanje zvjezdane okultacije malim tijelom (83) Beatrix koja se dogodila 13. veljače 2020. godine oko 05:29 UT preko zvijezde TYC 1946-00982-1, prividnog sjaja $m_V = 10,8$ mag. Predviđeno maksimalno trajanje zvjezdane okultacije iznosilo je 9,6 sekundi, a predviđeni pad u sjaju $\sim 1,5$ mag.

Ovaj okultacijski događaj procijenjen je na vjerojatnost od 99 % da će biti opažen. Vjerojatnost opažanja ovisi o kutnom promjeru malog tijela na nebu, nepouzdanosti u položaju malog tijela, i nepouzdanosti u položaju zvijezde. Uobičajeno je da su predviđene vjerojatnosti opažanja kod asteroida s većim kutnim promjerima visoke. Kod asteroida (83) Beatrix, vjerojatnost opažanja okultacijskog događaja visoka je jer se radilo o velikom objektu, procijenjenog kutnog promjera od $0,092''$ (oko 91 km), pa je širina sjene koju (83) Beatrix stvara tijekom okultacijskog događaja daleko veća od nepouzdanosti položaja malog tijela i zvijezde.

U globalnoj mreži opažачa zvjezdanih okultacija „Planoccult“, umrežene javnom listom elektroničke pošte (<http://vps.vvs.be/mailman/private/planoccult/>), za okultacijski događaj od 13. veljače 2020. godine, nije poslano niti jedno izvješće o opažanju zvjezdane okultacije (83) Beatrix (niti pozitivno, niti negativno). Glavni razlog tomu jest prolazak sjene preko rijetko naseljenih područja Kanade, te Atlantskim oceanom. Stoga nije bilo moguće

Tablica 5.5: Zakazana opažanja zvjezdanih okultacija sa središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II u razdoblju od prosinca 2017. godine do veljače 2020. godine. Četiri opažanja nisu uspješno prikupljena zbog loših meteoroloških uvjeta ili tehničkih razloga. Dva opažanja uspješno su prikupljena, no s negativnim detekcijama.

Okultacijski objekt	Datum, vrijeme, okultacijska zvijezda i podaci o sjaju	Komentar
(50) Virginia	Datum: 2017-12-21 Vrijeme: 04:22 UT Naziv zvijezde: TYC 1316-00147-1 R.A. = 05 58 0,146 DEC = +18 27 56,401 Sjaj zvijezde: $m_V = 12,2$ mag Pad u sjaju: 0,6 mag	Opažanje odobreno kroz direktorsko vrijeme (DDT). Opažanje odgođeno zbog loših meteoroloških uvjeta (jak vjetar)
(746) Marlu	Datum: 2018-04-10 Vrijeme: 03:40 UT Naziv zvijezde: 2UCAC 25999130 R.A. = 13 04 1,747 DEC = -15 53 39,402 Sjaj zvijezde: $m_V = 11,2$ mag Pad u sjaju: 3,3 mag	Opažanje odobreno kroz direktorsko vrijeme (DDT). Dodatna astrometrija prikupljena sa Opservatorija San Pedro de Atacama (MPC I16). Opažanje odgođeno zbog loših meteoroloških uvjeta (visoka vlažnost, jak vjetar i zaledena zrcala).
(13) Egeria	Datum: 2018-05-12 Vrijeme: 22:21 UT Naziv zvijezde: TYC 6785-00592-1 R.A. = 15 43 29,323 DEC = -26 15 6,675 Sjaj zvijezde: $m_V = 9,7$ mag Pad u sjaju: 1,1 mag	Opažanje odobreno kroz direktorsko vrijeme (DDT), ali odgođeno zbog nesporazuma s komisijom za dodjelu vremena (TAC).
(751) Faina	Datum: 2019-04-27 Vrijeme: 00:57 UT Naziv zvijezde: UCAC4 465-51138 R.A. = 14 29 0,013 DEC = +02 53 3,954 Sjaj zvijezde: $m_V = 10,1$ mag Pad u sjaju: 2,9 mag	Opažanje odobreno kroz opažачki prijedlog. Opažanje odgođeno zbog propuštanja fluida za hlađenje u ormaru s elektronikom teleskopa MAGIC-II.
(83) Beatrix	Datum: 2020-02-13 Vrijeme: 05:29 UT Naziv zvijezde: TYC 1946-00982-1 R.A. = 08 45 56,133 DEC = +26 24 15,213 Sjaj zvijezde: $m_V = 10,8$ mag Pad u sjaju: 1,5 mag	Opažanje odobreno kroz opažачki prijedlog. Početak DAQ: 05:21 UT Kraj DAQ: 05:39 UT
(28) Bellona	Datum: 2020-02-13 Vrijeme: 22:56 UT Naziv zvijezde: UCAC4 518-009258 R.A. = 04 50 59,099 DEC = +13 30 09,132 Sjaj zvijezde: $m_V = 11,4$ mag Pad u sjaju: 0,9 mag	Opažanje odobreno kroz opažачki prijedlog. Početak DAQ: 22:48 UT Kraj DAQ: 23:08 UT



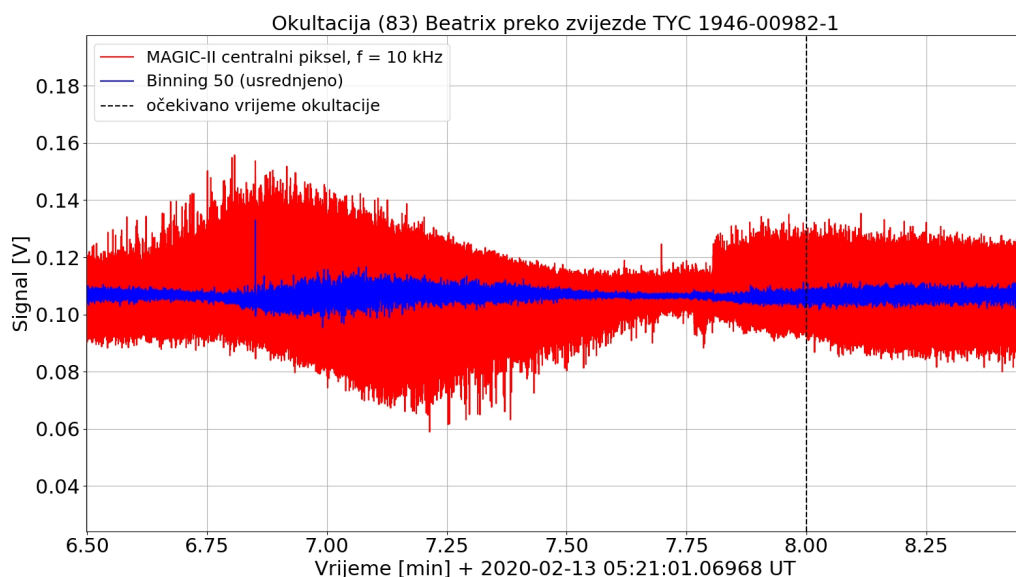
Slika 5.22: Prikupljeno opažanje zvjezdane okultacije malim tijelom (83) Beatrix koja se dogodila 13. veljače 2020. godine oko 05:29 UT preko zvijezde TYC 1946-00982-1, prividnog sjaja $m_V = 10,8$ mag. Predviđeno maksimalno trajanje zvjezdane okultacije iznosilo je 9,6 sekundi. Prividni sjaj malog tijela (83) Beatrix iznosio je $m = 11,9$ mag, a predviđeni pad u ukupnom sjaju iznosio je $\sim 1,5$ mag. Signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je signal usrednjen preko 50 točaka, što je ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije prikazano je iscrtkanom vertikalnom linijom crne boje.

izravno potvrditi je li okultacijska sjena prešla preko predviđenih područja, ili je predviđanje bilo neprecizno.

No, nepunih 6 dana nakon zvjezdane okultacije preko zvijezde TYC 1946-00982-1, 19. veljače 2020. godine (83) Beatrix je oko 01:39 UT okultirao zvijezdu TYC 1945-00656-1, s jednom pozitivnom detekcijom opažачa Simon Kidd, Cottered (Velika Britanija) koja je dobro odgovarala predviđanju (objavljeno 19. veljače 2020. godine u 20:45:15 h na javnoj elektroničkoj grupi globalne mreže opažачa zvjezdanih okultacija „Planoccult“). Ova pozitivna detekcija iz Cottered nije izravni dokaz da je predviđanje okultacije 13. veljače 2020. godine neupitno precizno, no daje naznaku da su orbitalni parametri (83) Beatrix dobro određeni.

Na slici 5.22, signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je usrednjeni signal od po 50 točaka, što bi bilo ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije za lokaciju teleskopa MAGIC prikazano je iscrtkanom vertikalnom linijom crne boje. Vremenska nepouzdanost okultacijskog događaja, procijenjena u predviđanju okultacije, iznosila je 2,53 sekundi.

Na slici 5.22 uočljivo je da signal ne prikazuje značajne promjene u očekivanom vremenskom trenutku početka zvjezdane okultacije, kao niti u rasponu vremenske nepouzdanosti. Slika 5.23 prikazuje povećani isječak signala oko očekivanog vremenskog trenutka okultacijskog doga-



Slika 5.23: Povećani isječak signala oko očekivanog početka zvjezdane okultacije s malim tijelom (83) Beatrix. U signalu nisu vidljive naznake pada u toku zračenja, odnosno detekcija okultacijskog događaja s malim tijelom (83) Beatrix je negativna. Signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je signal usrednjen preko 50 točaka, što je ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije prikazano je crnom iscrtnom vertikalnom linijom.

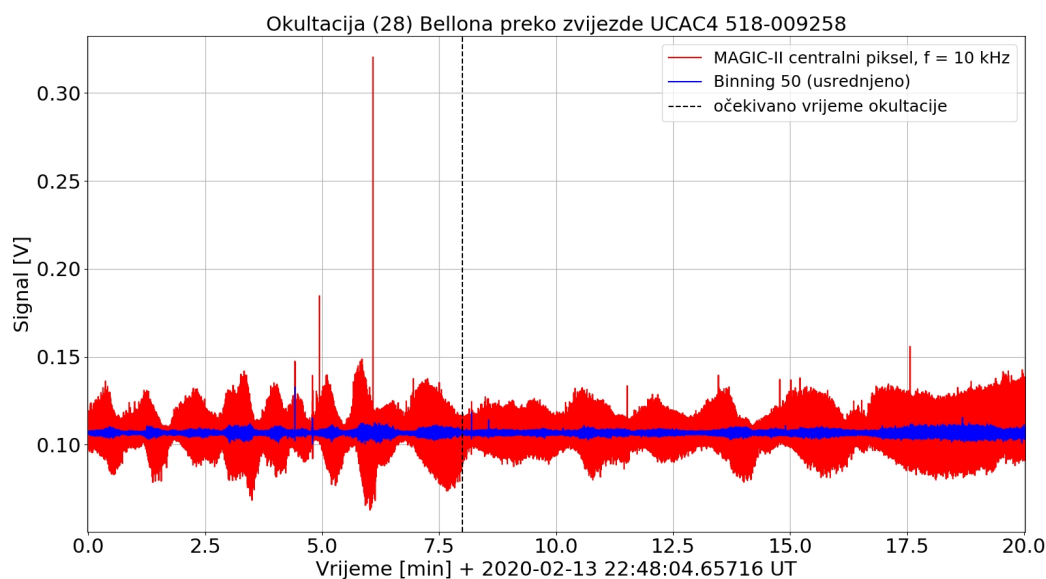
đaja, no niti u detaljnom prikazu nisu vidljive naznake pada toka zračenja, odnosno detekcije okultacijskog događaja. Drugim riječima, detekcija zvjezdane okultacije malim tijelom (83) Beatrix bila je negativna.

Kratkotrajni maksimumi koji se pojavljuju između 10. i 16. minute opažanja, vidljivi na slici 5.22, uzrokovani su bljeskovima prednjih svjetala automobila koji se uspinjao prema vrhu Roque de Los Muchachos. Tijekom prikupljanja podataka za teleskopima MAGIC, operatori ovakve bljeskove u opažačkom dnevniku dokumentiraju kao „car flash“ no oni za standardna opažanja ne čine ozbiljnu smetnju jer signal nema svojstva tipična za Čerenkovljeve bljeskove.

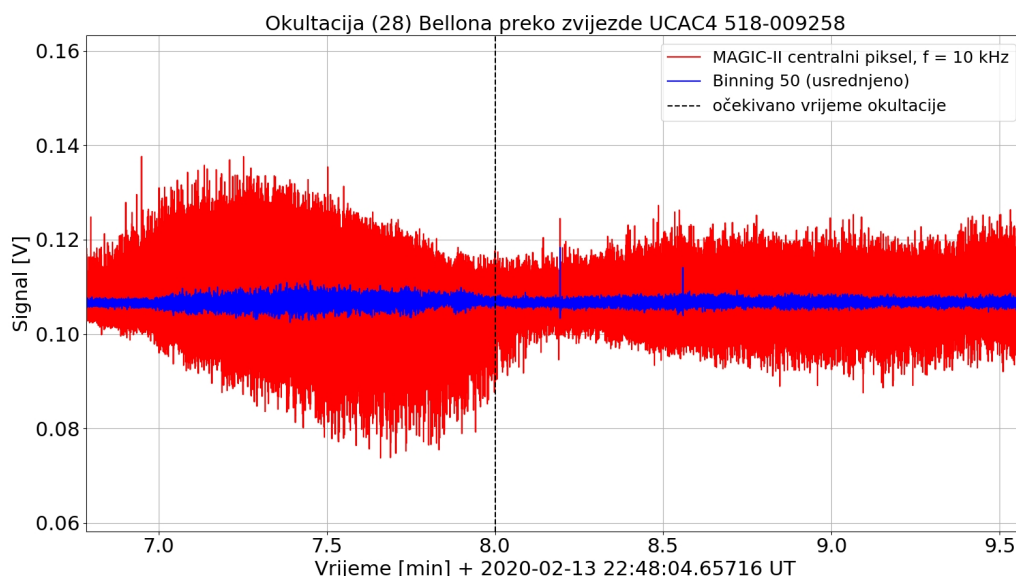
Slika 5.24 prikazuje prikupljeno opažanje zvjezdane okultacije malim tijelom (28) Bellona koja se dogodila 13. veljače 2020. godine oko 22:56 UT preko zvijezde UCAC4 518-009258, prividnog sjaja $m_V = 11,4$ mag. Predviđeno maksimalno trajanje zvjezdane okultacije iznosilo je 12,3 sekundi. Prividni sjaj malog tijela (28) Bellona iznosio je $m = 11,6$ mag, a predviđeni pad u ukupnom sjaju iznosio je $\sim 0,9$ mag.

Malo tijelo (28) Bellona, kao i (83) Beatrix, spadaju među veće asteroide glavnog asteroidnog pojasa. S promjerom procijenjenim na približno 97 km (Đurech et al. 2011), kutni promjer Bellone za vrijeme okultacijskog događaja iznosio je $0,070''$. Stoga je i ovaj okultacijski događaj procijenjen na visoku vjerojatnost opažanosti od 99 %.

U globalnoj mreži opažača zvjezdanih okultacija „Planoccult“ nije poslano niti jedno izvješće o opažanju zvjezdane okultacije (28) Bellona za okultacijski događaj od 13. veljače 2020. godine.



Slika 5.24: Prikupljeno opažanje zvjezdane okultacije malim tijelom (28) Bellona koja se dogodila 13. veljače 2020. godine oko 22:56 UT preko zvijezde UCAC4 518-009258, prividnog sjaja $m_V = 11,4$ mag. Predviđeno maksimalno trajanje zvjezdane okultacije iznosilo je 12,3 sekundi. Prividni sjaj malog tijela (28) Bellona iznosio je $m = 11,6$ mag, a predviđeni pad u ukupnom sjaju iznosio je $\sim 0,9$ mag. Signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je signal usrednjen preko 50 točaka, što je ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije prikazano je iscrtkanom vertikalnom linijom crne boje.



Slika 5.25: Povećani isječak signala oko očekivanog početka zvjezdane okultacije s malim tijelom (28) Bellona. U signalu nisu vidljive naznake pada u toku zračenja, odnosno detekcija okultacijskog događaja s malim tijelom (28) Bellona je negativna. Signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je signal usrednjen preko 50 točaka, što je ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije prikazano je crnom iscrtnom vertikalnom linijom.

Razlog tomu je, kao i kod (83) Beatrixa, prolazak sjene preko velikih dijelova oceanske površine, te nakon Kanarskog otočja, preko rijetko naseljenih područja sjeverne Afrike.

Na slici 5.24, signal očitao sa središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, prikupljen s frekvencijom uzorkovanja od 10 kHz, prikazan je crvenom krivuljom. Plavom krivuljom prikazan je signal usrednjen preko 50 točaka, što je ekvivalentno frekvenciji uzorkovanja od 200 Hz. Očekivano vrijeme početka zvjezdane okultacije za lokaciju teleskopa MAGIC prikazano je iscrtnom vertikalnom linijom crne boje. Vremenska nepouzdanost okultacijskog događaja, procijenjena u predviđanju okultacije, iznosila je 1,35 sekundi. Uočljivo je da signal ne prikazuje značajne promjene u očekivanom vremenskom trenutku početka zvjezdane okultacije, kao niti u rasponu vremenske nepouzdanosti. Slika 5.25 prikazuje povećani isječak signala oko očekivanog vremenskog trenutka okultacijskog događaja, no niti u detaljnom prikazu nisu vidljive naznake pada toka zračenja, odnosno detekcije okultacijskog događaja. Stoga je i ova detekcija zvjezdane okultacije malim tijelom (28) Bellona pomoću središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II bila negativna.

Za razumijevanje negativnih detekcija unatoč predviđanjima s visokim vjerojatnostima opažanosti od 99 %, treba pažljivije analizirati instrumentalna ograničenja i očekivani signal. U poglavlju 5.3.2 diskutirana je granična osjetljivost središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II na kratkotrajne optičke bljeskove u trajanju ~ 20 ms, za izvore do prividnog sjaja iznosa $m = 13,5 \pm 0,6$ mag. Ovi kratkotrajni optički bljeskovi su bili umjetno proizvedeni brzim gibanjem tele-

skopa kroz zvjezdano polje, odnosno detektirani signal generiran je brzim prolascima zvijezda kroz vidno polje središnjeg piksela.

Iako su opažani izvori okultacijskih događaja sjajniji od graničnog sjaja na čije je kratkotrajne pulseve ispitan središnji piksel, okultacijski događaji se razlikuju od umjetno generiranih kratkotrajnih pulseva, jer za vrijeme okultacije sjaj ne pada na nulu. Središnji piksel dizajniran je za detekciju brzih optičkih pulseva poput onih kod pulsara maglice Rakovice.

Krivulja sjaja optičkog pulsara, slično kao u i testu s gibanjem teleskopa, dostiže maksimalni sjaj unutar nekoliko milisekundi, nakon čega sjaj ponovno pada ispod razine pozadinskog šuma. Opažanja zvjezdanih okultacija malim tijelima (83) Beatrix i (28) Bellona su specifična jer su početni sjaj, kao i sjaj za vrijeme okultacije, iznad signala pozadinskog šuma neba. Dodatno, padovi u sjaju za vrijeme okultacije relativno su niski. Malim tijelom (83) Beatrix, prividnog sjaja $m = 11,9$ mag okultirana je zvijezda prividnog sjaja $m_V = 10,8$ mag. Njihov ukupni (kombinirani) sjaj iznosio je $m = 10,4$ mag, a za vrijeme okultacije sjaj je pao za $1,46$ mag, na $m = 11,88$ mag. U slučaju okultacije malim tijelom (28) Bellona, prividni sjaj asteroida iznosio je $m = 11,6$ mag, a okultirana je zvijezda prividnog sjaja $m_V = 11,4$ mag. Njihov kombinirani sjaj iznosio je $m = 10,74$ mag, a za vrijeme okultacije sjaj je pao za $0,85$ mag, na $m = 11,59$ mag.

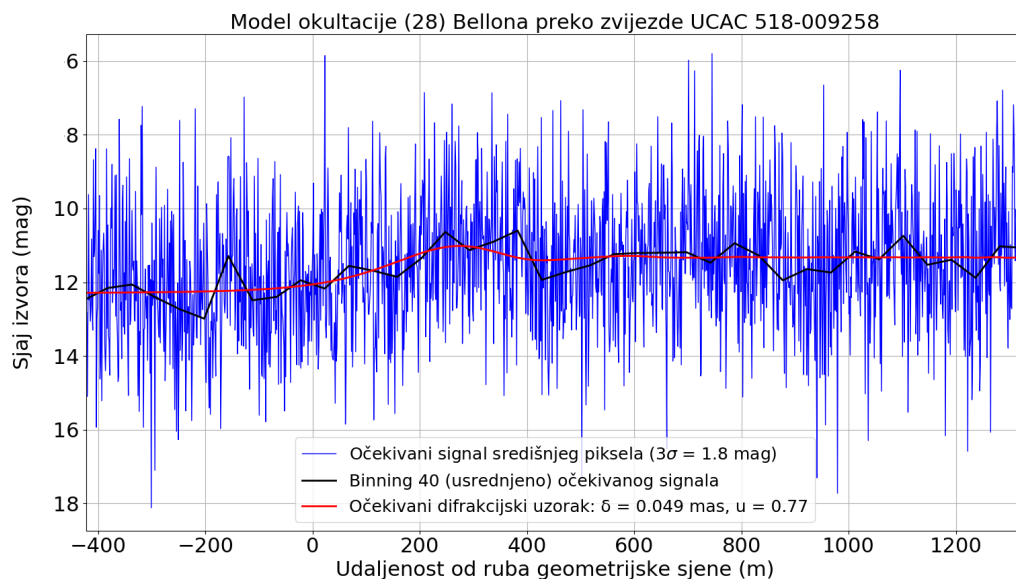
Uzmemo li u obzir da je standardna devijacija osjetljivosti središnjeg piksela $0,6$ mag, pad u sjaju od $1,5$ mag za vrijeme okultacije s (83) Beatrix iznosi $2,5\sigma$, dok pad u sjaju od $0,9$ mag za vrijeme okultacije s (28) Bellonom, tek $1,5\sigma$. Stoga, iako su okultacijski događaji bili na dovoljno sjajnim izvorima, najvjerojatniji razlog negativnih detekcija ovih okultacijskih događaja jest previše mali pad u sjaju.

Za bolje razumijevanje izgleda očekivanog signala, provedene su simulacije okultacijskih događaja malim tijelima (83) Beatrix i (28) Bellonom, pri čemu su uzeti u obzir svi poznati parametri.

U trenutku okultacije, udaljenost (28) Bellonom od Zemlje iznosila je $d = 1,903$ a.j., odnosno, $2,85 \cdot 10^{11}$ m. Brzina gibanja ruba geometrijske sjene preko Zemljine površine iznosila je $9,8389$ km/s, što na frekvenciju uzorkovanja od 10 kHz daje razlučivost od $1,0164$ podatkovnih točaka po metru udaljenosti od ruba geometrijske sjene.

Okultirana zvijezda UCAC4 518-009258 (Gaia DR2 3296415956918048512) spada u zvijezde spektralnog razreda F8. Njezina efektivna temperatura iznosi $T_{\text{eff}} = 5495$ K. Iz kataloga zvjezdanih promjera „JMMC Stellar Diameters Catalogue, JSDC“ (Bourgés et al. 2014) preuzet je podatak o promjeru homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska u spektralnog pojasu B u iznosu od $\delta = 0,048522$ mas. Na portalu astronomskih kataloga usluge VizieR nisu dostupni precizni podaci o površinskoj gravitaciji, no za procjenu faktora rubnog zatamnjenja korišten je iznos $\log(g) = 3,5$ cm/s² (jednak onomu korištenom u sintetskom spektru pomoću kojega je određena radijalna brzina navedena u katalogu zvijezda GAIA DR2).

Iz kataloga faktora rubnih zatamnjenja (Claret & Bloemen 2011), te pomoću slike 5.21



Slika 5.26: Simulacija okultacijskog događaja malim tijelom (28) Bellona preko zvijezde UCAC4 518-009258. Krivulja crvene boje prikazuje Fresnelov difrakcijski uzorak signala bez šuma. Pri tome su uzeti svi poznati parametri u obzir - raspon osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, udaljenost malog tijela od opažača u trenutku okultacije $d = 1,903$ a.j., poznati promjer zvijezde $\delta = 0,049$ mas s faktorom rubnog zatamnjivanja $u = 0,77$ uzetim u obzir, sjaj okultirane zvijezde iznosa 11,4 mag i pad u sjaju za vrijeme okultacije iznosa 0,9 mag. Krivulja plave boje prikazuje simulaciju očekivanog signala središnjeg piksela, sa šumom standardne devijacije iznosa 3σ uzetim u obzir. Krivulja crne boje prikazuje signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.

iz poglavlja 5.5.3, određen je faktor rubnog zatamnjivanja iznosa $u = 0,765$. Iz relacije (5.10) određen je korekcijski faktor za kutni promjer homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska $y = 1,08486$. Umnožak promjera homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska s korekcijskim faktorom ekvivalentan je promjeru homogeno osvijetljenog diska zvijezde s rubnim zatamnjivanjem uzetim u obzir. Stoga je za simulaciju u konačnici korišten konvolucijski kernel homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska promjera 0,0526 mas.

Na slici 5.26, krivuljom crvene boje prikazan je Fresnelov difrakcijski uzorak signala bez šuma, kakav bi bio opažan za vrijeme okultacije (28) Bellonom preko UCAC4 518-009258. Pri tome su uzeti svi poznati parametri u obzir - raspon osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, udaljenost malog tijela od opažača u trenutku okultacije, poznati promjer zvijezde s uzetim faktorom rubnog zatamnjivanja u obzir, sjaj okultirane zvijezde i pad u sjaju za vrijeme okultacije. Krivuljom plave boje prikazana je simulacija očekivanog signala središnjeg piksela, sa šumom uzetim u obzir. Šum standardne devijacije iznosa 3σ osjetljivosti središnjeg piksela dodan je generatorom proizvoljnih brojeva normalne raspodjele na krivulju crvene boje. Krivuljom crne boje prikazan je signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.

U trenutku okultacije, udaljenost (83) Beatrix od Zemlje iznosila je $d = 1,372$ a.j., odnosno,

$2,05 \cdot 10^{11}$ m. Brzina gibanja ruba geometrijske sjene preko Zemljine površine iznosila je 9,4794 km/s, što na frekvenciju uzorkovanja od 10 kHz daje razlučivost od 1,0549 podatkovnih točaka po metru udaljenosti od ruba geometrijske sjene.

Okultirana zvijezda TYC 1946-00982-1 (Gaia DR2 691155075099373824) spada u zvijezde spektralnog razreda F0. Njezina efektivna temperatura iznosi $T_{\text{eff}} = 7012$ K. Iz kataloga zvjezdanih promjera preuzet je podatak o promjeru homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska u spektralnog pojasa B u iznosu od $\delta = 0,038685$ mas.

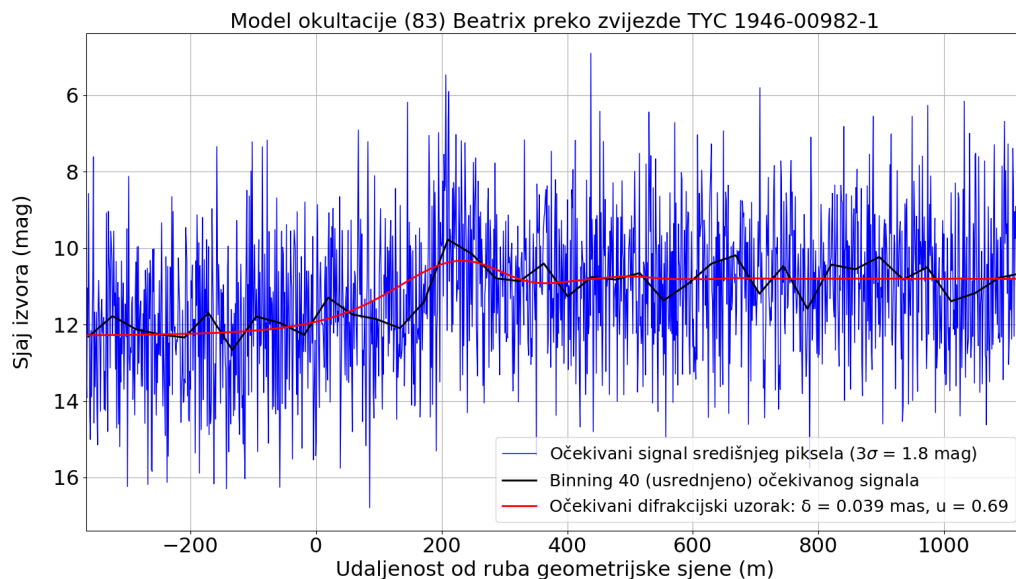
Iz kataloga faktora rubnih zatamnjenja (Claret & Bloemen 2011), te pomoću slike 5.21 iz poglavlja 5.5.3, uz korištenje površinske gravitacije $\log(g) = 3,5$ cm/s², određen je faktor rubnog zatamnjenja iznosa $u = 0,690$. Iz relacije (5.10) određen je korekcijski faktor na kutni promjer homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska $y = 1,07387$. Umnožak promjera homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska s korekcijskim faktorom ekvivalentan je promjeru homogeno osvijetljenog diska zvijezde s rubnim zatamnjenjem uzetim u obzir. Stoga je za simulaciju difrakcijskih uzoraka ovog okultacijskog događaja korišten konvolucijski kernel homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska promjera 0,0415 mas.

Na slici 5.27, krivuljom crvene boje prikazan je Fresnelov difrakcijski uzorak signala bez šuma, kakav bi bio opažan za vrijeme okultacije (83) Beatrix preko TYC 1946-00982-1. Pri tome su uzeti u obzir raspon osjetljivosti središnjeg piksela MAGIC-II teleskopa, udaljenost malog tijela od opažača u trenutku okultacije, poznati promjer zvijezde s uzetim faktorom rubnog zatamnjenja u obzir, sjaj okultirane zvijezde i pad u sjaju za vrijeme okultacije. Krivuljom plave boje prikazana je simulacija očekivanog signala središnjeg piksela, sa šumom standardne devijacije iznosa 3σ osjetljivosti središnjeg piksela uzetim u obzir. Krivuljom crne boje prikazan je signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.

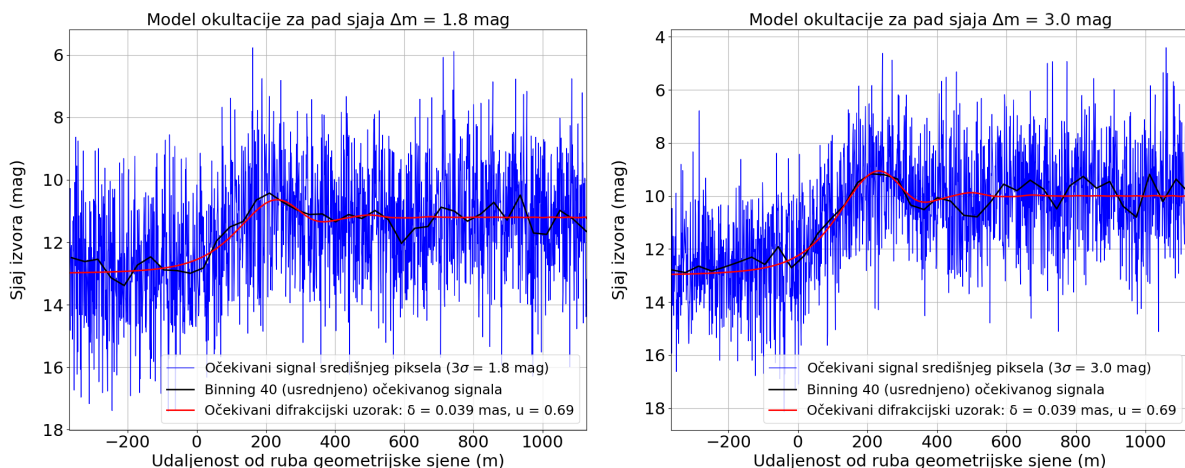
U simulacijama je prikazano da pad u sjaju okultacijskih događaja (83) Beatrix i (28) Bellone u iznosu od 0,9 mag i 1,5 mag respektivno, u odnosu na pozadinski šum središnjeg piksela, nije dovoljno velik da bi one bile detektirane. Prva uspješna detekcija zvjezdane okultacije pomoću središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II za očekivati je za slučaj kada pad sjaja tijekom okultacije bude najmanje $3-5\sigma$, odnosno $>1,8-3,0$ mag.

Na slici 5.28 simulirani su primjeri okultacijskih događaja u kojima je pad sjaja 1,8 mag i 3,0 mag, odnosno 3σ i 5σ respektivno. U simulaciji korištena zvijezda jednaka je onoj u simulaciji okultacijskog događaja s malim tijelom (83) Beatrix. Krivuljom plave boje prikazana je simulacija očekivanog signala središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, sa šumom standardne devijacije iznosa 3σ (jednakim kao u simulacijama okultacijskih događaja prikazanim na slikama 5.27 i 5.26). Krivulja crne boje prikazuje signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.

Opažачka kampanja okultacijskih događaja teleskopima MAGIC će biti nastavljena i u budućnosti, zasigurno još najmanje u opažачkom ciklusu C16, u 2021./2022. godini, čiji je



Slika 5.27: Simulacija okultacijskog događaja malim tijelom (83) Beatrix preko zvijezde TYC 1946-00982-1. Krivulja crvene boje prikazuje Fresnelov difrakcijski uzorak beskonačno velikog signala. Pri tome su uzeti svi poznati parametri u obzir - raspon osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, udaljenost malog tijela od opažača u trenutku okultacije $d = 1,372$ a.j., poznati promjer zvijezde $\delta = 0,039$ mas s faktorom rubnog zatamnjenja $u = 0,69$ uzetim u obzir, sjaj okultirane zvijezde iznosa 10,8 mag i pad u sjaju za vrijeme okultacije iznosa 1,5 mag. Krivulja plave boje prikazuje simulaciju očekivanog signala središnjeg piksela, sa šumom standardne devijacije iznosa 3σ uzetim u obzir. Krivulja crne boje prikazuje signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.



Slika 5.28: Simulacija okultacijskih događaja u kojemu su pad sjaja 1,8 mag (lijevo) i 3,0 mag (desno), odnosno 3σ i 5σ respektivno. U simulaciji korištena zvijezda jednaka je onoj u iz simulacije okultacijskog događaja s malim tijelom (83) Beatrix. Krivuljom plave boje prikazana je simulacija očekivanog signala središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II, sa šumom standardne devijacije iznosa 3σ (jednakim kao u simulacijama okultacijskih događaja prikazanim na slikama 5.27 i 5.26). Krivulja crne boje prikazuje signal usrednjen preko 40 točaka simuliranog signala plave boje.

opažачki prijedlog već prihvaćen.

5.7 Zaključak

Tijekom opažanja zvjezdanih okultacija, s ciljem preciznog određivanja fizikalnih karakteristika malih tijela, poželjno je visoko vremensko razlučivanje detektora, s visokim odnosom signala i šuma. U svrhu unapređenja opažачkih metoda zvjezdanih okultacija, razmatrano je korištenje Čerenkovljevih teleskopa MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov). Teleskopi MAGIC svojim velikim aperturama promjerima 17 m i osjetljivim detektorima sačinjenim od fotomultiplikatora, ističu se u odnosu na optičke teleskope do sada korištene za okultacijska opažanja, opremljene konvencionalnim astronomskim CCD ili CMOS detektorima.

Teleskop MAGIC-II posjeduje središnji fotomultiplikatorski detektor (središnji piksel), dizajniran za optičku detekciju pojedinih pulseva pulsara u maglici Rakovici (Messier 1), s frekvencijom uzorkovanja od 10 000 Hz.

Preispitivanjem osjetljivosti središnjeg piksela, pokazano je da je teleskop MAGIC-II, zbog visokog vremenskog razlučivanja središnjeg piksela od 10 kHz, u kombinaciji s velikim promjerom objektiva teleskopa, izvrstan instrument za detekciju kratkotrajnih milisekundnih bljeskova u optičkom području, koji bi mogao uvelike doprinijeti u području opažanja zvjezdanih okultacija.

U usporedbi s bilo kojim drugim optičkim teleskopom korištenim za opažanje okultacija, središnji piksel teleskopa MAGIC-II ima za dva reda veličine više vremensko razlučivanje. No, neke od njegovih ograničavajućih karakteristika jesu nemogućnost kontroliranja frekvencije uzorkovanja, osjetljivost samo na vidljivo područje spektra između 300 i 400 nm, i malo kutno razlučivanje (zbog fizički velikih piksela) koje je odgovorno za relativno visoki granični prividni sjaj od $m = 13,5 \pm 0,6$ mag.

Promatranjem zvjezdanih okultacija, osim fizikalnih karakteristika okultirajućih malih tijela, moguće je određivati i promjere okultiranih zvijezda. Naime, budući da zvijezde nisu točkasti izvori nego imaju konačan kutni promjer, tijekom pomračenja zvjezdanog diska, pad u sjaju ne čini ostru krivulju sjaja, nego krivulja sjaja opisuje Fresnelov interferencijski uzorak čiji detalji ovise o promjeru okultirane zvijezde. Visoke frekvencije uzorkovanja, poput onih središnjeg detektora teleskopa MAGIC, omogućuje bilježenje ovih interferencijskih uzoraka, i time čine temelj za direktna mjerenja kutnih promjera zvijezda.

Modeliranjem Fresnelovog difrakcijskog uzorka kakav nastaje na rubu geometrijske sjene malih tijela za vrijeme zvjezdanih okultacija, promotrene su mogućnosti direktnih mjerenja kutnih promjera zvijezda pomoću središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II. Pri tome su razmatrani utjecaji korištenja optičkih filtera različitih raspona optičke osjetljivosti, kao i punog raspona optičke osjetljivosti središnjeg piksela teleskopa MAGIC-II.

Dodatno, istražen je učinak rubnog zatamnjenja zvjezdanih diskova na izgled difrakcijskih uzoraka kakvi bi bili opažani tijekom okultacija. Ustanovljeno je da difrakcijski uzorci nastali okultacijama velikih diskova kutnih promjera $0,7 \text{ mas}$, i s najvišim faktorima rubnog zatamnjenja ($u = 1,0$), od difrakcijskih uzoraka homogeno osvijetljenih zvjezdanih diskova odstupaju u intenzitetu do približno 5% . Za zvjezdane diskove manjih promjera, ili manjih faktora rubnog zatamnjenja, odstupanja u intenzitetu su manja.

Ova odstupanja u intenzitetu difrakcijskih uzoraka odražavaju se na određivanje kutnih promjera zvjezdanih diskova. Pronađeno je da kutni polumjer homogeno osvijetljenog zvjezdanog diska, u usporedbi s diskom s faktorom rubnog zatamnjenja uzetim u obzir, za faktor rubnog zatamnjenja $u = 1,0$ odstupa približno $12,4 \%$.

Pokazano je da je poznavanjem efektivne temperature i površinske gravitacije zvijezde, za spektralno područje propusnosti u kojemu se vrši opažanje, moguće procijeniti koeficijente rubnog zatamnjenja. Uveden je korekcijski faktor pomoću kojega se iz izmjerenog promjera homogenog zvjezdanog diska, uz poznavanje faktora rubnog zatamnjenja može procijeniti promjer zvjezdanog diska s rubnim zatamnjenjem uzetim u obzir. Uzimanje faktora rubnog zatamnjenja u obzir doprinosi točnosti mjerenja kutnih promjera zvjezdanih diskova, no za dostizanje ove točnosti, potrebna su precizna fotometrijska mjerenja s pogreškama ispod 5% .

U povijesti, gotovo sva mjerenja kutnih promjera zvijezda reda veličine ispod 1 lučne milisekunde izvedena su interferometrijskim mjerenjima. Mjerenje promjera zvijezda opažanjem zvjezdanih okultacija malim tijelima omogućuje kutna razlučivanja do reda veličine $0,1$ lučnih milisekundi, koja su najmanje za faktor dva veća od raspoloživih interferometrijskih mjerenja, te čak 10 puta veća od onih koja se postižu okultacijama Mjesecom. Stoga je metoda okultacijskih opažanja malim tijelima izrazito pogodna za mjerenje kutnih promjera zvijezda ispod 1 lučne milisekunde.

S ciljem provođenja prvih opažanja zvjezdanih okultacija s teleskopima MAGIC, kroz opažачke prijedloge ostvareno je pravo na teleskopsko vrijeme u opažачkim ciklusima C14 i C15 u najvišoj kategoriji, s naznakom kritičnosti na vremenske okvire u minutama/sekundama. Pomoću sustava aktivne kontrole zrcala (Active Mirror Control, AMC), u pripremi opažanja okultacijskih događaja, provedeno je ispitivanje fokusa teleskopa u beskonačnost, te su pripremljene upute za dežurne opažачe.

U razdoblju od prosinca 2017. godine do veljače 2020. godine, zakazano je ukupno 6 opažanja okultacijskih događaja sa središnjim pikselom teleskopa MAGIC-II. Od 6 opažanja zakazanih u noćni raspored, četiri opažanja nisu uspješno prikupljena zbog loših vremenskih prilika ili tehničkih razloga. Dva opažanja zvjezdanih okultacija, malim tijelima (83) Beatrix i (28) Bellona, uspješno su prikupljena, no s negativnim detekcijama. Iako su se okultacijski događaji malim tijelima (83) Beatrix i (28) Bellona dogodili nad dovoljno sjajnim izvorima, te im je vjerojatnost opažanja bila procijenjena na 99% , vjerojatni razlog negativnih detekcija ovih okultacijskih

događaja jest previše mali pad u sjaju, od $\sim 1,5$ mag za vrijeme okultacije s (83) Beatrix ($2,5 \sigma$ iznad pozadinskog šuma), i $\sim 0,9$ mag za vrijeme okultacije s (28) Bellonom ($1,5 \sigma$ iznad pozadinskog šuma). Na temelju analize prikazane u ovoj disertaciji, očekujemo da bi svaki događaj s padom sjaja većim od $1,8\text{--}3,0$ mag ($3\text{--}5 \sigma$ iznad pozadinskog šuma) trebao biti detektiran. Stoga će opažačka kampanja okultacijskih opažanja na teleskopima MAGIC biti nastavljena i u budućnosti, uključujući i opažački ciklus C16 u 2021./2022. godini čiji je opažački prijedlog već prihvaćen.

Početkom opažačkog ciklusa C15, u veljači 2020. godine, instaliran je središnji piksel i na teleskopu MAGIC-I. Središnji piksel na MAGIC-I iz tehničkih razloga nije bio spreman za prikupljanje podataka sve do rujna 2020. godine, no u novom opažačkom ciklusu C16 služit će za potvrđivanje opažanja, te ispitivanje mogućnosti izvođenja visoko preciznih astrometrijskih opažanja mjerenjem kašnjenja početka i kraja okultacijskog događaja između 2 teleskopa. Nadalje, postavljanjem različitih uskopojasnih optičkih filtera ispred središnjih piksela teleskopa MAGIC-I i MAGIC-II, dodatno se mogu smanjiti relativne pogreške mjerenja prividnih zvjezdanih promjera.

Buduća opažanja okultacija neće biti provođena samo na teleskopima MAGIC. U sklopu suradnje s Institutom za astrofiziku Andaluzija (IAA-CSIC), s ciljem određivanja fizikalnih karakteristika transneptunskih objekata, održavamo kontakte s preko 80 opažača raspoređenih po svijetu. Iz regije uključeni su mnogi opažači iz Slovenije, Italije i Srbije. U Hrvatskoj je ostvarena suradnja s Opservatorijem Hvar Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, s kojega je u 8. kolovoza 2020. godine, na 1 m Austrijsko-hrvatskom teleskopu uspješno snimljena prva okultacija, transneptunskim objektom 2002 MS4. S ciljem određivanja zvjezdanih polumjera snimanjem okultacijskih događaja visokim frekvencijama uzorkovanja, ostvarena je suradnja s „Thai National Observatory“ u Tajlandu.

Budući da se primjena visokoosjetljivih detektora ove vrste tek razvija (primjerice, silikonski fotomultiplikatori proizvođača Hamamatsu postaju dostupni i manjim istraživačkim grupama), u bližoj budućnosti oni će zasigurno biti upotrijebljeni i na manjim optičkim teleskopima u svrhe prikupljanja okultacijskih opažanja.

Zahvala

Ovaj Doktorski rad izrađen je na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, na Zavodu za primijenjenu fiziku. Istraživanja obuhvaćena u radu napravljena su uz potporu Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Podaci su prikupljeni na Opservatoriju Centro Astronómico Hispano Alemán (CAHA) na Calar Alto (Almería, Španjolska), Opservatoriju Sierra Nevada - IAA (Granada, Španjolska) i opservatoriju Roque de los Muchachos - IAC (La Palma, Španjolska).

Istraživanja su financirana iz Programa za istraživanje i inovacije Obzor 2020 Europske unije (sporazum projekta br. 687378), te pomoću španjolskih bespovratnih sredstava AYA-2011-30106-CO2-O1, MINECO AYA-2014-56637-C2-1-P, Proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía, J. A. 2012-FQM1776, te FEDER sredstva.

Opažačke šihte za teleskopima MAGIC financirane su iz istraživačkog projekta Hrvatske zaklade za znanost pod naivom „Visokoenergijska astronomija gama-zraka teleskopima MAGIC i CTA“ (HRZZ IP-2016-06-9782), sredstvima iz namjenskog višegodišnjeg institucijskog financiranja znanstvene djelatnosti (VIF) Sveučilišta u Zagrebu, te kroz program za poticanje istraživanja i inovacija Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu.

Na suradnji diskusijama i ustupanju instrumenata na korištenje, zahvaljujem dr. sc. Domagoju Ružđaku i dr. sc. Romanu Brajši s Opservatorija Hvar Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, doc. dr. sc. Dragani Ilić s Odjela za astronomiju Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, dr. sc. Oliveru Vinci s Astronomske stanice na Vidojevici Astronomske opservatorije Beograd, te Alanu Jadaniću, dr. sc. Draganu Roši i Damiru Hržini, dipl. ing. iz Astronomskog društva Zagreb i Zvezdarnice Zagreb.

Zahvaljujem mentorima izv. prof. dr. sc. Ani Babić i dr. sc. Jose Luis Ortiz Morenu na savjetima i uputama, te doc. dr. sc. Sandi Pleslić i članovima Povjerenstva za ocjenu doktorske disertacije na konstruktivnim prijedlozima za poboljšanje ovog doktorskog rada.

Literatura

- Altmann, M., Roeser, S., Demleitner, M., et al. 2017, A&A, 600, L4
- Baines, E. K., Döllinger, M. P., Cusano, F., et al. 2010, ApJ, 710, 1365
- Baines, E. K., Armstrong, J. T., Schmitt, H. R., et al. 2018, AJ, 155, 30
- Belskaya, I. N., Bagnulo, S., Barucci, M. A., et al. 2010, Icarus, 210, 472
- Benbow, W., Bird, R., Brill, A., et al. 2019, Nature Astronomy, 3, 511. doi:10.1038/s41550-019-0741-z
- Benedetti-Rossi, G., Sicardy, B., Buie, M. W., et al. 2016, AJ, 152, 156
- Berg, O. E., Wolf, H., & Rhee, J. 1976, Interplanetary Dust and Zodiacal Light, 233. doi:10.1007/3-540-07615-8_486
- Bertin, E., & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393
- Binzel, R. P., Farinella, P., Zappala, V., et al. 1989, Asteroids II, 416
- Biver, N., Bockelée-Morvan, D., Crovisier, J., et al. 2002, Earth Moon and Planets, 90, 323
- Bohren, C. F. & Huffman, D. R. 1983, New York: Wiley, 1983
- Borla Tridon, D., Goebel, F., Fink, D., et al. 2009, arXiv:0906.5448
- Bose, K. & Ganguly, J. 1995, Earth and Planetary Science Letters, 136, 109. doi:10.1016/0012-821X(95)00188-I
- Bottke, W. F., Nolan, M. C., Greenberg, R., et al. 1994, Icarus, 107, 255. doi:10.1006/icar.1994.1021
- Bottke, W. F., Durda, D. D., Nesvorný, D., et al. 2005, Icarus, 175, 111
- Bottke, W. F., Jr., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., & Nesvorný, D. 2006, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 34, 157

- Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., et al. 2006, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 157
- Bourgés, L., Lafrasse, S., Mella, G., et al. 2014, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXIII*, 485, 223
- Bowell, E., Hapke, B., Domingue, D., et al. 1989, *Asteroids II*, 524
- Bradley, L., Sipocz, B., Robitaille, T., et al. 2019, *astropy/photutils: v0.6*, v0.6, Zenodo, doi:10.5281/zenodo.2533376
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., et al. 2014, *Nature*, 508, 72
- Britt, D. T., Yeomans, D., Housen, K., et al. 2002, *Asteroids III*, 485
- Brown, M. E., Bouchez, A. H., Rabinowitz, D., et al. 2005, *ApJ*, 632, L45
- Brown, M. E., Barkume, K. M., Ragozzine, D., et al. 2007, *Nature*, 446, 294
- Brown, R. H. 1985, *Icarus*, 64, 53
- Bus, S. J., & Binzel, R. P. 2002, *Icarus*, 158, 146
- Bus, S. J., Bowell, E., Harris, A. W., & Hewitt, A. V. 1989, *Icarus*, 77, 223
- Bus, S. J., A'Hearn, M. F., Schleicher, D. G., & Bowell, E. 1991, *Science*, 251, 774
- Bus, S. J., Buie, M. W., Schleicher, D. G., et al. 1996, *Icarus*, 123, 478
- Bus, S. J., A'Hearn, M. F., Bowell, E., & Stern, S. A. 2001, *Icarus*, 150, 94
- Bus, S. J., Vilas, F., & Barucci, M. A. 2002, *Asteroids III*, 169
- Carroll, B. W. & Ostlie, D. A. 2006, *An introduction to modern astrophysics and cosmology* / B. W. Carroll and D. A. Ostlie. 2nd edition. San Francisco: Pearson, Addison-Wesley, ISBN 0-8053-0402-9. 2007, XVI+1278+A32+I31 pp.
- Carry, B. 2012, *Planet. Space Sci.*, 73, 98
- Chandrasekhar, S. 1987, New York : Dover
- Chapman, C. R., Morrison, D., & Zellner, B. 1975, *Icarus*, 25, 104
- Charnoz, S., Canup, R. M., Crida, A., et al. 2018, *Planetary Ring Systems. Properties, Structure, and Evolution*, 517
- Chelli, A., Duvert, G., Bourguès, L., et al. 2016, *A&A*, 589, A112

- Cikota, S., Ortiz, J. L., Cikota, A., et al. 2014, *A&A*, 562, A94
- Cikota, S., Fernández-Valenzuela, E., Ortiz, J. L., et al. 2018, *MNRAS*, 475, 2512
- Claret, A. & Bloemen, S. 2011, *A&A*, 529, A75. doi:10.1051/0004-6361/201116451
- Claret, A. & Hauschildt, P. H. 2003, *A&A*, 412, 241. doi:10.1051/0004-6361:20031405
- Claret, A. 2000, *A&A*, 363, 1081
- Claret, A. 2004, *A&A*, 428, 1001. doi:10.1051/0004-6361:20041673
- Colwell, J. E., Batiste, S., Horányi, M., et al. 2007, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2006. doi:10.1029/2005RG000184
- Comito, C., Thirouin, A., Campo Bagatin, A., et al. 2011, *EPSC-DPS Joint Meeting 2011*, 420
- Cortina, J. 2005, *Ap&SS*, 297, 245
- Crifo, J.-F., Loukianov, G. A., Rodionov, A. V., et al. 2005, *Icarus*, 176, 192. doi:10.1016/j.icarus.2005.01.003
- Crosta, M. T. & Mignard, F. 2006, *Classical and Quantum Gravity*, 23, 4853
- Čerenkov, P. A. 1937, *Physical Review*, 52, 378
- De, B. R. & Criswell, D. R. 1977, *J. Geophys. Res.*, 82, 999. doi:10.1029/JA082i007p00999
- de León, J., Ortiz, J. L., Pinilla-Alonso, N., et al. 2013, *A&A*, 555, L2
- Desmars, J., Camargo, J. I. B., Braga-Ribas, F., et al. 2015, *A&A*, 584, A96
- Desmars, J., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2019, *SF2A-2019: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, Di
- Dhillon, V. S., Marsh, T. R., Stevenson, M. J., et al. 2007, *MNRAS*, 378, 825
- Diaz-Cordoves, J. & Gimenez, A. 1992, *A&A*, 259, 227
- Diaz-Cordoves, J., Claret, A., & Gimenez, A. 1995, *A&AS*, 110, 329
- Duffard, R., Lazzaro, D., Pinto, S., et al. 2002, *Icarus*, 160, 44
- Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Ortiz, J. L., et al. 2014, *A&A*, 568, A79
- Duffy, T. S., Ahrens, T. J., & Lange, M. A. 1991, *J. Geophys. Res.*, 96, 14,319. doi:10.1029/91JB00987

- Dumas, C., Carry, B., Hestroffer, D., et al. 2011, *A&A*, 528, A105
- Dunham, D. W., Dunham, J. B., Binzel, R. P., et al. 1990, *AJ*, 99, 1636
- Dunham, D. W., Goffin, E., Manek, J., et al. 2002, *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 73, 662
- Durda, D. D., & Stern, S. A. 2000, *Icarus*, 145, 220
- Durech, J., Sidorin, V., & Kaasalainen, M. 2010, *A&A*, 513, A46. doi:10.1051/0004-6361/200912693
- Řurech, J., Kaasalainen, M., Herald, D., et al. 2011, *Icarus*, 214, 652
- Elliot, J. L., Dunham, E., & Mink, D. 1977, *Nature*, 267, 328
- Elliot, J. L., Olkin, C. B., Dunham, E. W., et al. 1995, *Nature*, 373, 46
- Elst, E. W., Pizarro, O., Pollas, C., et al. 1996, *IAU Circ.*, 6456, 1
- Farrell, W. M., Stubbs, T. J., Vondrak, R. R., et al. 2007, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14201. doi:10.1029/2007GL029312
- Fernández, J. A., Gallardo, T., & Brunini, A. 2002, *Icarus*, 159, 358
- Fernández-Valenzuela, E., Ortiz, J. L., Duffard, R., Santos-Sanz, P., & Morales, N. 2016, *MNRAS*, 456, 2354
- Fernández-Valenzuela, E., Ortiz, J. L., Duffard, R., et al. 2017, *MNRAS*, 466, 4147
- Fornasier, S., Lellouch, E., Müller, T., et al. 2013, *A&A*, 555, A15
- Fornasier, S., Lellouch, E., Müller, T., et al. 2013, *A&A*, 555, A15
- French, R. G., Verbiscer, A., Salo, H., et al. 2007, *PASP*, 119, 623
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2016, *A&A*, 595, A2
- Gaia Collaboration, Brown, A. G. A., Vallenari, A., et al. 2018, *A&A*, 616, A1
- Gaia Collaboration, Mignard, F., Klioner, S. A., et al. 2018, *A&A*, 616, A14
- Garcia, R. F., Murdoch, N., & Mimoun, D. 2015, *Icarus*, 253, 159. doi:10.1016/j.icarus.2015.02.014
- Garczarczyk, M., Merck, M., Danielyan, V., et al. 2003, *International Cosmic Ray Conference*, 5, 2935
- Germanà, C., Zampieri, L., Barbieri, C., et al. 2012, *A&A*, 548, A47

- Gourgeot, F., Carry, B., Dumas, C., et al. 2016, *A&A*, 593, A19
- Griffiths, E. 1927, *Nature*, 119, 735. doi:10.1038/119735a0
- Groussin, O., Lamy, P., & Jorda, L. 2004, *A&A*, 413, 1163
- Guilbert-Lepoutre, A. & Jewitt, D. 2011, *ApJ*, 743, 31. doi:10.1088/0004-637X/743/1/31
- Hahn, G., & Bailey, M. E. 1990, *Nature*, 348, 132
- Hanbury Brown, R., Davis, J., & Allen, L. R. 1974, *MNRAS*, 167, 121
- Hartmann, W. K., Tholen, D. J., Meech, K. J., & Cruikshank, D. P. 1990, *Icarus*, 83, 1
- Hassan, T. & Daniel, M. 2019, 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), 36, 692
- Hassan, T., Hoang, J., López Moya, M., et al. 2017, 35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017), 301, 807
- Hastings, D. M., Ragozzine, D., Fabrycky, D. C., et al. 2016, *AJ*, 152, 195
- Hedman, M. M. 2015, *ApJ*, 801, L33
- Hergenrother, C. W., Adam, C. D., Chesley, S. R., et al. 2020, *Journal of Geophysical Research (Planets)*, 125, e06549
- Hoang, J., Hassan, T., Tejedor, L. A., et al. 2020, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 6, 036002. doi:10.1117/1.JATIS.6.3.036002
- Holsapple, K. A. 2001, *Icarus*, 154, 432
- Holsapple, K. A. 2007, *Icarus*, 187, 500
- Housen, K. R. & Holsapple, K. A. 2011, *Icarus*, 211, 856. doi:10.1016/j.icarus.2010.09.017
- Howarth, I. D. 2011, *MNRAS*, 418, 1165. doi:10.1111/j.1365-2966.2011.19568.x
- Hsieh, H. H., & Jewitt, D. 2006, *Science*, 312, 561
- Hsieh, H. H., Jewitt, D. C., & Fernández, Y. R. 2004, *AJ*, 127, 2997. doi:10.1086/383208
- Hsieh, H. H. 2009, *A&A*, 505, 1297
- Hsu, C. C., Errando, M., Goebel, F., et al. 2008, International Cosmic Ray Conference, 3, 1507
- Hubbard, W. B., Brahic, A., Sicardy, B., et al. 1986, *Nature*, 319, 636
- Hyodo, R., Charnoz, S., Genda, H., et al. 2016, *ApJ*, 828, L8

- Jacobson, S. A. & Scheeres, D. J. 2011, *Icarus*, 214, 161. doi:10.1016/j.icarus.2011.04.009
- Jarosewich, E. 1990, *Meteoritics*, 25, 323. doi:10.1111/j.1945-5100.1990.tb00717.x
- Jennings, J. K. & McGruder, C. H. 1999, *AJ*, 118, 3061
- Jewitt, D. & Li, J. 2010, *AJ*, 140, 1519. doi:10.1088/0004-6256/140/5/1519
- Jewitt, D., Weaver, H., Agarwal, J., Mutchler, M., & Drahus, M. 2010, *Nature*, 467, 817
- Jewitt, D., Weaver, H., Mutchler, M., Larson, S., & Agarwal, J. 2011, *ApJ*, 733, L4
- Jewitt, D. 2009, *AJ*, 137, 4296
- Jewitt, D. 2012, *AJ*, 143, 66
- Johnston, K. J., & de Vegt, C. 1999, *ARA&A*, 37, 97
- Jordi, C., Gebran, M., Carrasco, J. M., et al. 2010, *A&A*, 523, A48. doi:10.1051/0004-6361/201015441
- Kaasalainen, M. & Torppa, J. 2001, *Icarus*, 153, 24. doi:10.1006/icar.2001.6673
- Kaasalainen, M., Torppa, J., & Muinonen, K. 2001, *Icarus*, 153, 37. doi:10.1006/icar.2001.6674
- Kadono, T., Sugita, S., Ootsubo, T., et al. 2010, *Earth, Planets, and Space*, 62, 13. doi:10.5047/eps.2008.12.005
- Karkoschka, E. 2001, *Icarus*, 151, 51
- Kelley, M. S., & Gaffey, M. J. 2000, *Icarus*, 144, 27
- Kirkwood, D. 1884, *Sidereal Messenger*, 3, 6
- Klinglesmith, D. A. & Sobieski, S. 1970, *AJ*, 75, 175. doi:10.1086/110960
- Knežević, Z., & Milani, A. 2000, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 78, 17
- Kopal, Z. 1950, *Harvard College Observatory Circular*, 454
- Kosai, H. 1992, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 54, 237
- Kovalevsky, J., Lindegren, L., Perryman, M. A. C., et al. 1997, *A&A*, 323, 620
- Kowal, C. T., Liller, W., & Marsden, B. G. 1979, *Dynamics of the Solar System*, 81, 245
- Kresak, L. 1982, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 33, 104

- Lacerda, P., Jewitt, D., & Peixinho, N. 2008, *AJ*, 135, 1749
- Lacki, B. C. 2014, *MNRAS*, 445, 1858. doi:10.1093/mnras/stu1800
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, 104, 340
- Larson, S. M. 2010, *IAU Circ.*, 9188, 1
- Lauretta, D. S., Hergenrother, C. W., Chesley, S. R., et al. 2019, *Science*, 366, 3544
- Lauriello, P. J. 1974, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11, 75. doi:10.1016/0148-9062(74)92651-5
- Lebofsky, L. A., & Spencer, J. R. 1989, *Asteroids II*, 128
- Lellouch, E., Kiss, C., Santos-Sanz, P., et al. 2010, *A&A*, 518, L147
- Levison, H. F., Terrell, D., Wiegert, P. A., et al. 2006, *Icarus*, 182, 161
- Ligi, R., Creevey, O., Mourard, D., et al. 2016, *A&A*, 586, A94
- Lindgren, L., Hernández, J., Bombrun, A., et al. 2018, *A&A*, 616, A2
- Lisse, C. M., VanCleve, J., Adams, A. C., et al. 2006, *Science*, 313, 635. doi:10.1126/science.1124694
- Lockwood, A. C., Brown, M. E., & Stansberry, J. 2014, *Earth Moon and Planets*, 111, 127
- Lomb, N. R. 1976, *Ap&SS*, 39, 447
- Lopez, M., Otte, N., Rissi, M., et al. 2009, arXiv:0907.0832
- Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., et al. 2007, *Science*, 318, 777
- Lucarelli, F., Barrio, J. A., Antoranz, P., et al. 2008, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 589, 415
- Luu, J. X., & Jewitt, D. C. 1990, *AJ*, 100, 913
- Luu, J. X., Jewitt, D. C., & Trujillo, C. 2000, *ApJ*, 531, L151
- Mandel, K. & Agol, E. 2002, *ApJ*, 580, L171. doi:10.1086/345520
- Marcialis, R. L., & Buratti, B. J. 1993, *Icarus*, 104, 234
- Marzari, F., Rossi, A., & Scheeres, D. J. 2011, *Icarus*, 214, 622. doi:10.1016/j.icarus.2011.05.033

- Masiero, J., Jedicke, R., Ďurech, J., et al. 2009, *Icarus*, 204, 145
- McCall, G. J. H., Bowden, A. J., & Howarth, R. J. 2006, *The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections: Fireballs, Falls and Finds*
- Meech, K. J., & Belton, M. J. S. 1990, *AJ*, 100, 1323
- Melita, M. D., Duffard, R., Ortiz, J. L., et al. 2017, *A&A*, 602, A27
- Moon, T. T. & Dworetsky, M. M. 1985, *MNRAS*, 217, 305. doi:10.1093/mnras/217.2.305
- Morbey, C. L. 1974, *AJ*, 79, 1304
- Morbidelli, A. 2005, arXiv e-prints, astro-ph/0512256
- Moreno, F., Licandro, J., Ortiz, J. L., et al. 2011b, *ApJ*, 738, 130
- Moreno, F., Licandro, J., Tozzi, G. P., et al. 2011a, *Highlights of Spanish Astrophysics VI*, 587
- Morrison, D. & Lebofsky, L. 1979, *Asteroids*, 184
- Mozurkewich, D., Armstrong, J. T., Hindsley, R. B., et al. 2003, *AJ*, 126, 2502
- Muironen, K. & Bowell, E. 1993, *Icarus*, 104, 255
- Nesvorný, D., Brož, M., & Carruba, V. 2015, *Asteroids IV*, 297
- O’Leary, B., Marsden, B. G., Dragon, R., et al. 1976, *Icarus*, 28, 133
- Oikawa, S., & Everhart, E. 1979, *AJ*, 84, 134
- Oort, J. H. 1950, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, 11, 91
- Ortiz, J. L., Cikota, A., Cikota, S., et al. 2011, *A&A*, 525, A31
- Ortiz, J. L., Sicardy, B., Braga-Ribas, F., et al. 2012, *Nature*, 491, 566. doi:10.1038/nature11597
- Ortiz, J. L., Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., et al. 2015, *A&A*, 576, A18
- Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., et al. 2017, *Nature*, 550, 219
- Pan, M., & Wu, Y. 2016, *ApJ*, 821, 18
- Paredes, J. M. & MAGIC Collaboration 2020, arXiv:2003.03841
- Pariseau W. G., 2006, darm.book. doi:10.1201/9780203968253
- Pinilla-Alonso, N., Brunetto, R., Licandro, J., et al. 2009, *A&A*, 496, 547

- Pravec, P., Harris, A. W., & Michalowski, T. 2002, *Asteroids III*, 113
- Rabinowitz, D. L., Barkume, K., Brown, M. E., et al. 2006, *ApJ*, 639, 1238. doi:10.1086/499575
- Rabinowitz, D. L., Schaefer, B. E., & Tourtellotte, S. W. 2007, *AJ*, 133, 26
- Ragozzine, D., & Brown, M. E. 2009, *AJ*, 137, 4766
- Rambaux, N., Chambat, F., Castillo-Rogez, J., et al. 2016, *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #48*, 120.15
- Rennilson, J. J. & Criswell, D. R. 1974, *Moon*, 10, 121. doi:10.1007/BF00655715
- Richardson, J. E., Melosh, H. J., & Greenberg, R. 2004, *Science*, 306, 1526. doi:10.1126/science.1104731
- Richardson, J. E., Melosh, H. J., Greenberg, R. J., et al. 2005, *Icarus*, 179, 325. doi:10.1016/j.icarus.2005.07.005
- Richmond, M., 2019, <http://spiff.rit.edu/richmond/occult/bessel/bessel.html>
- Richter, D. & Simmons, G. 1974, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 11, 403. doi:10.1016/0148-9062(74)91111-5
- Ridgway, S. T. 1977, *AJ*, 82, 511
- Roig, F., Ribeiro, A. O., & Gil-Hutton, R. 2008, *A&A*, 483, 911
- Romon-Martin, J., Delahodde, C., Barucci, M. A., de Bergh, C., & Peixinho, N. 2003, *A&A*, 400, 369
- Roques, F., Moncuquet, M., & Sicardy, B. 1987, *AJ*, 93, 1549
- Rossi, A., Marzari, F., Scheeres, D. J., & Jacobson, S. 2012, *Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts*, 43, 2095
- Rubin, A. E., & Grossman, J. N. 2010, *Meteoritics and Planetary Science*, 45, 114
- Ruprecht, J. D., Bosh, A. S., Person, M. J., et al. 2015, *Icarus*, 252, 271
- Sarid, G., & Prialnik, D. 2009, *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 1905
- Scheeres, D. J., Marzari, F., & Rossi, A. 2004, *Icarus*, 170, 312
- Schlawin, E., Agol, E., Walcovicz, L., et al. 2011, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #217*

- Schlichting, H. E., & Sari, R. 2009, *ApJ*, 700, 1242
- Schorghofer, N. 2008, *ApJ*, 682, 697. doi:10.1086/588633
- Schwarzschild, K. 1906, *Astronomische Mitteilungen der Universitaets-Sternwarte zu Goettingen*, 13, 1
- Sicardy, B., Ortiz, J. L., Assafin, M., et al. 2011, *Nature*, 478, 493
- Silva, A. M., & Cellone, S. A. 2001, *Planet. Space Sci.*, 49, 1325
- Sing, D. K., Désert, J.-M., Lecavelier Des Etangs, A., et al. 2009, *A&A*, 505, 891. doi:10.1051/0004-6361/200912776
- Sing, D. K. 2010, *A&A*, 510, A21. doi:10.1051/0004-6361/200913675
- Smalley, B. 2005, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi*, 8, 130
- Snodgrass, C., Carry, B., Dumas, C., et al. 2010, *A&A*, 511, A72
- Snodgrass, C., Tubiana, C., Vincent, J.-B., et al. 2010, *Nature*, 467, 814
- Sonnett, S., Kleyna, J., Jedicke, R., & Masiero, J. 2011, *Icarus*, 215, 534
- Spencer, J. R., Stern, S. A., Moore, J. M., et al. 2020, *Science*, 367, aay3999
- Spitler, L. G., Scholz, P., Hessels, J. W. T., et al. 2016, *Nature*, 531, 202
- Stansberry, J. A., Grundy, W. M., Mueller, M., et al. 2012, *Icarus*, 219, 676
- Stern, S. A., Bagenal, F., Ennico, K., et al. 2015, *Science*, 350, aad1815
- Stern, S. A., Bagenal, F., Ennico, K., et al. 2015, *Science*, 350, aad1815
- Stetson, P. B., Davis, L. E., & Crabtree, D. R. 1990, *Ccbs in Astronomy*, 289
- Takasawa, S., Nakamura, A. M., Kadono, T., et al. 2011, *ApJ*, 733, L39. doi:10.1088/2041-8205/733/2/L39
- Tancredi, G., & Favre, S. 2008, *Icarus*, 195, 851
- Tancredi, G., Maciel, A., Heredia, L., Richeri, P., & Nesmachnow, S. 2012, *MNRAS*, 420, 3368
- Tancredi, G. 2012, *LPI Contributions*, 1667, 6202
- Tancredi, G. 2014, *Icarus*, 234, 66. doi:10.1016/j.icarus.2014.02.013
- Tanga, P., & Delbo, M. 2007, *A&A*, 474, 1015

- Tedesco, E. F., Tholen, D. J., & Zellner, B. 1982, *AJ*, 87, 1585. doi:10.1086/113248
- Tedesco, E. F., Noah, P. V., Noah, M., et al. 2002, *AJ*, 123, 1056
- Tedesco, E. F., Cellino, A., & Zappalà, V. 2005, *AJ*, 129, 2869
- Tedesco, E. F. 1979, *Icarus*, 40, 375
- Tedesco, E. F. 1995, *VizieR Online Data Catalog*, II/190
- Thirouin, A., Ortiz, J. L., Duffard, R., et al. 2010, *A&A*, 522, A93
- Tholen, D. J., Hartmann, W. K., Cruikshank, D. P., et al. 1988, *IAU Circ.*, 4554, 2
- Tholen, D. J. 1989, *Asteroids II*, 1139
- van Belle, G. T. 1999, *PASP*, 111, 1515
- van Hamme, W. 1993, *AJ*, 106, 2096. doi:10.1086/116788
- Vidal, C. R., Cooper, J., & Smith, E. W. 1973, *ApJS*, 25, 37. doi:10.1086/190264
- Walter, H. G., & Sovers, O. J. 2000, *Astrometry of Fundamental Catalogues: The Evolution from Optical to Radio Reference Frames*
- Warner, B. D., Harris, A. W., & Pravec, P. 2009, *Icarus*, 202, 134. doi:10.1016/j.icarus.2009.02.003
- Warner, B. D. D. 2016, *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis: The Patrick Moore Practical Astronomy Series*, ISBN 978-3-319-32749-5. Springer International Publishing Switzerland, 2016. doi:10.1007/978-3-319-32750-1
- Whipple, F. L. 1950, *ApJ*, 111, 375. doi:10.1086/145272
- Widemann, T., Sicardy, B., Dusser, R., et al. 2009, *Icarus*, 199, 458
- Williams, J. G. 1992, *Icarus*, 96, 251
- Yamada, T. M., Ando, K., Morota, T., et al. 2016, *Icarus*, 272, 165. doi:10.1016/j.icarus.2016.02.032
- Zacharias, N., Urban, S. E., Zacharias, M. I., et al. 2004, *AJ*, 127, 3043
- Zacharias, N., Finch, C. T., Girard, T. M., et al. 2013, *AJ*, 145, 44
- Zacharias, N., Finch, C., Subasavage, J., et al. 2015, *VizieR Online Data Catalog*, I/329
- Zappalà, V., Bendjoya, P., Cellino, A., et al. 1995, *Icarus*, 116, 291

Zappalà, V., Cellino, A., & Dell'Oro, A. 2002, *Icarus*, 157, 280

Zhao, D. & Hang, H. 2000, *Chinese Astron. Astrophys.*, 24, 481. doi:10.1016/S0275-1062(00)00079-5

Životopis

Stefan Cikota rođen je 1988. godine u Osijeku. Odrastao je i školovao se u Švicarskoj i Hrvatskoj. Obrazovao se na Sveučilištu u Zürichu, Sveučilištu u Splitu i Sveučilištu u Zagrebu.

Interes za astronomijom pokazuje od rane mladosti. Već kao srednjoškolac, i za vrijeme prvih godina studija, stekao je ekspertizu u području malih tijela Sunčevog sustava. Od 2006.-2010. sudjelovao je u osnivanju Španjolske zvjezdarnice La Sagra, te kao otkrivač preko 3300 malih tijela Sunčevog sustava, i s više od milijun izvršenih astrometrijskih opažanja, ubraja se među svjetski najproduktivnije astronome u ovom području. U Hrvatskoj javnosti poznat je kao suotkrivač asteroida (187700) Zagreb, imenovanog 2011. godine. Početkom 2017. godine upisao je doktorat iz astrofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu, te je zaposlen na Zavodu za primijenjenu fiziku Fakulteta Elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Sudjelovao je u izvođenju nastave kolegija iz fizike, u kojima je na FER-u i na Vojnom studijskom programu Sveučilišta u Zagrebu ostvario više od 800 norma nastavnih sati.

Trenutno usko surađuje s Institutom za Astrofiziku Andaluzija (CSIC-IAA) u Granadi, s glavnim interesom za fizikalne karakteristike transneptunskih objekata. Suotkrivač je prstenova oko patuljastog planeta Haumea, objavljenog u Natureu 2017. godine. U 2017. i 2018. godini pristupio je međunarodnim kolaboracijama MAGIC i CTA, gdje doprinosi sudjelovanjem u opažачkim kampanjama, razvojem instrumenata i vodstvom opažачkih prijedloga.

Osim znanstvene i stručne djelatnosti, zainteresiran je za aerosvemirsku industriju. 2018. godine imenovan je članom Nacionalne referentne skupine za svemir pri Ministarstvu znanosti i obrazovanja, gdje se zalaže za pozicioniranje Hrvatske u Europskoj svemirskoj politici te uspostavljanje hrvatskog aerosvemirskog sektora. 2020. godine imenovan je nacionalnim predstavnikom stručnjaka u Europskoj komisiji za područje “Space Situational Awareness - Space Surveillance and Tracking”.

Kroz javna predavanja za širu javnost, objavljivanje članaka u popularno-znanstvenim časopisima, i javna medijska istupanja, rado sudjeluje u popularizacijskim aktivnostima znanosti i tehnologije.

Popis objavljenih djela

Radovi u časopisima zastupljenim u bazi Current Contents

1. Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., Benedetti-Rossi, G., Duffard, R., Morales, N., Braga-Ribas, F., Fernández-Valenzuela, E., Nascimbeni, V., Nardiello, D., Carbognani, A., Buzzi, L., Aletti, A., Bacci, P., Maestripieri, M., Mazzei, L., Mikuz, H., Skvarc, J., Ciabattari, F., Lavalade, F., Scarfi, G., Mari, J. M., Conjat, M., Sposetti, S., Bachini, M., Succi, G., Mancini, F., Alighieri, M., Dal Canto, E., Masucci, M., Vara-Lubiano, M., Gutiérrez, P. J., Desmars, J., Lecacheux, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Colas, F., Beisker, W., Behrend, R., Mueller, T. G., Meza, E., Gomes-Junior, A. R., Roques, F., Vachier, F., Mottola, S., Hellmich, S., Campo Bagatin, A., Alvarez-Candal, A., Cikota, S., Cikota, A., Christille, J. M., Pál, A., Kiss, C., Pribulla, T., Komžík, R., Madiedo, J. M., Charmandaris, V., Alikakos, J., Szakáts, R., Farkas-Takács, A., Varga-Verebélyi, E., Marton, G., Marciniak, A., Bartczak, P., Butkiewicz-Bak, M., Dudziński, G., Alí-Lagoa, V., Gazeas, K., Paschalis, N., Tsamis, V., Guirado, J. C., Peris, V., Iglesias-Marzoa, R., Schnabel, C., Manzano, F., Navarro, A., Perelló, C., Vecchione, A., Noschese, A., Morrone, L., "The large trans-Neptunian object 2002 TC302 from combined stellar occultation, photometry, and astrometry data", *Astronomy and Astrophysics*, 639, 2020, A134.
2. Cikota, A., Patat, F., Wang, L., Wheeler, J. C., Bulla, M., Baade, D., Höflich, P., Cikota, S., Clocchiatti, A., Maund, J. R., Stevance, H. F., Yang, Y., "Linear spectropolarimetry of 35 Type Ia supernovae with VLT/FORS: an analysis of the Si II line polarization", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 2019, 578.
3. Cikota, A., Leloudas, G., Bulla, M., Inserra, C., Chen, T.-W., Spyromilio, J., Patat, F., Cano, Z., Cikota, S., Coughlin, M. W., Kankare, E., Lowe, T. B., Maund, J. R., Rest, A., Smartt, S. J., Smith, K. W., Wainscoat, R. J., Young, D. R., "Testing the magnetar scenario for superluminous supernovae with circular polarimetry", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 479, 2018, 4984.
4. Cikota, A., Hoang, T., Taubenberger, S., Patat, F., Mazzei, P., Cox, N. L. J., Zelaya, P., Cikota, S., Tomasella, L., Benetti, S., Rodeghiero, G., "Spectropolarimetry of Galactic stars with anomalous extinction sightlines", *Astronomy and Astrophysics*, 615, 2018, A42.
5. Cikota, S., Fernández-Valenzuela, E., Ortiz, J. L., Morales, N., Duffard, R., Aceituno, J., Cikota, A., Santos-Sanz, P., "Activity of (2060) Chiron possibly caused by impacts?", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 475, 2018, 2512.
6. Ortiz, J. L., Santos-Sanz, P., Sicardy, B., Benedetti-Rossi, G., Bérard, D., Morales, N., Duffard, R., Braga-Ribas, F., Hopp, U., Ries, C., Nascimbeni, V., Marzari, F., Granata, V., Pál, A., Kiss, C., Pribulla, T., Komžík, R., Hornoch, K., Pravec, P., Bacci, P., Maestripieri,

- M., Nerli, L., Mazzei, L., Bachini, M., Martinelli, F., Succi, G., Ciabattari, F., Mikuz, H., Carbognani, A., Gahrken, B., Mottola, S., Hellmich, S., Rommel, F. L., Fernández-Valenzuela, E., Campo Bagatin, A., Cikota, S., Cikota, A., Lecacheux, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Colas, F., Behrend, R., Desmars, J., Meza, E., Alvarez-Candal, A., Beisker, W., Gomes-Junior, A. R., Morgado, B. E., Roques, F., Vachier, F., Berthier, J., Mueller, T. G., Madieto, J. M., Unsalan, O., Sonbas, E., Karaman, N., Erece, O., Koseoglu, D. T., Ozisik, T., Kalkan, S., Guney, Y., Niaei, M. S., Satir, O., Yesilyaprak, C., Puskullu, C., Kabas, A., Demircan, O., Alikakos, J., Charmandaris, V., Leto, G., Ohlert, J., Christille, J. M., Szakáts, R., Takácsné Farkas, A., Varga-Verebélyi, E., Marton, G., Marciniak, A., Bartczak, P., Santana-Ros, T., Butkiewicz-Bąk, M., Dudziński, G., Alí-Lagoa, V., Gazeas, K., Tzouganatos, L., Paschalis, N., Tsamis, V., Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S., Hueso, R., Guirado, J. C., Peris, V., Iglesias-Marzoa, R., "The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation", *Nature*, 550, 2017, 219.
7. Cikota, A., De Cia, A., Schulze, S., Vreeswijk, P. M., Leloudas, G., Gal-Yam, A., Perley, D. A., Cikota, S., Kim, S., Patat, F., Lunnan, R., Quimby, R., Yaron, O., Yan, L., Mazzali, P. A., "Spatially resolved analysis of superluminous supernovae PTF 11hrq and PTF 12dam host galaxies", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 469, 2017, 4705.
 8. Cikota, A., Patat, F., Cikota, S., Spyromilio, J., Rau, G., "Common continuum polarization properties: a possible link between proto-planetary nebulae and Type Ia Supernova progenitors", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 471, 2017, 2111.
 9. Cikota, A., Patat, F., Cikota, S., Faran, T., "Linear spectropolarimetry of polarimetric standard stars with VLT/FORS2", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 2017, 4146.
 10. Cikota, S., Ortiz, J. L., Cikota, A., Morales, N., Tancredi, G., "A photometric search for active Main Belt asteroids", *Astronomy and Astrophysics*, 562, 2014, A94.
 11. de León, J., Ortiz, J. L., Pinilla-Alonso, N., Cabrera-Lavers, A., Alvarez-Candal, A., Morales, N., Duffard, R., Santos-Sanz, P., Licandro, J., Pérez-Romero, A., Lorenzi, V., Cikota, S., "Visible and near-infrared observations of asteroid 2012 DA14 during its closest approach of February 15, 2013", *Astronomy and Astrophysics*, 555, 2013, L2.
 12. Ortiz, J. L., Cikota, A., Cikota, S., Hestroffer, D., Thirouin, A., Morales, N., Duffard, R., Gil-Hutton, R., Santos-Sanz, P., de La Cueva, I., "A mid-term astrometric and photometric study of trans-Neptunian object (90482) Orcus", *Astronomy and Astrophysics*, 525, 2011, A31.

Kolaboracijski radovi MAGIC kolaboracije u časopisima zastupljenim u bazi Current Contents

1. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingarian, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Amico, G., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Gliwny, P., Godinović, N., Green, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kajiwara, Y., Karjalainen, M., Kerszberg, D., Kobayashi, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mender, S., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Ohtani, Y., Oka, T., Otero-Santos, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pavletić, L., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schleicher, B., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Spolon, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Ventura, S., Verguilov, V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Nieves-Rosillo, M., Arcaro, C., D'Ammando, F., de Palma, F., Hodges, M., Hovatta, T., Kiehlmann, S., Max-Moerbeck, W., Readhead, A. C. S., Reeves, R., Takalo, L., Reinthal, R., Jormanainen, J., Wierda, F., Wagner, S. M., Berdyugin, A., Nabizadeh, A., Talebpour Sheshvan, N., Oksanen, A., Bachev, R., Strigachev, A., Kehusmaa, P., "Testing two-component models on very high-energy gamma-ray-emitting BL Lac objects", *Astronomy and Astrophysics*, 640, 2020, A132.

2. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingarian, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Amico, G., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Gliwny, P., Godinović, N., Green, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kajiwara, Y., Karjalainen, M., Kerszberg, D., Kobayashi, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mender, S., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Ohtani, Y., Oka, T., Otero-Santos, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pavletić, L., Peñil, P., Perennes, C., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schleicher, B., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Spolon, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Ventura, S., Verguilov, V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Nava, L., MAGIC Collaboration, "Bounds on Lorentz Invariance Violation from MAGIC Observation of GRB 190114C", *Physical Review Letters*, 125, 2020, 021301.
3. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Asano, K., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Baquero, A., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Bernardos, M., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingarian, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Amico, G., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B.,

- Delfino, M., Delgado, J., Delgado Mendez, C., Depaoli, D., di Girolamo, T., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Gliwny, P., Godinović, N., Green, D., Hadasch, D., Hahn, A., Heckmann, L., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kajiwara, Y., Karjalainen, M., Kerszberg, D., Kobayashi, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mender, S., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nozaki, S., Ohtani, Y., Oka, T., Otero-Santos, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pavletić, L., Peñil, P., Perennes, C., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Priyadarshi, C., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schleicher, B., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Spolon, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Truzzi, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Ventura, S., Verguilov, V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., "Studying the nature of the unidentified gamma-ray source HESS J1841-055 with the MAGIC telescopes", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 497, 2020, 3734.
4. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Gliwny, P., Green, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kajiwara,

- Y., Kerszberg, D., Kobayashi, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mender, S., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Ohtani, Y., Oka, T., Otero-Santos, J., Paiano, S., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pavletić, L., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schleicher, B., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Spolon, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Ventura, S., Verguilov, V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Baack, D., Fact Collaboration, Balbo, M., Beck, M., Biederbeck, N., Biland, A., Blank, M., Bretz, T., Bruegge, K., Bulinski, M., Buss, J., Doerr, M., Dorner, D., Hildebrand, D., Iotov, R., Klinger, M., Mannheim, K., Achim Mueller, S., Neise, D., Neronov, A., Nöthe, M., Paravac, A., Rhode, W., Schleicher, B., Sedlaczek, K., Shukla, A., Sliusar, V., Tani, L., Theissen, F., Walter, R., Acosta Pulido, J., Mwl Collaborators, Filippenko, A. V., Hovatta, T., Kiehlmann, S., Larionov, V. M., Max-Moerbeck, W., Raiteri, C. M., Readhead, A. C. S., Šegon, M., Villata, M., Zheng, W., "An intermittent extreme BL Lac: MWL study of IES 2344+514 in an enhanced state", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 496, 2020, 3912.
5. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L. K., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingarian, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Del Puppo, F., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Prester, D. D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Ramazani, V. F., Fattorini, A., Ferrara, G., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Gliwny, P., Godinović, N., Green, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kajiwara, Y., Kerszberg, D., Kobayashi, Y.,

- Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mender, S., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Ohtani, Y., Oka, T., Otero-Santos, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pavletić, L., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Moroni, P. G. P., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schleicher, B., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Spolon, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Ventura, S., Verguilov, V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., MAGIC Collaboration, Finke, J., D'Ammando, F., Baloković, M., Madejski, G., Mori, K., Puccetti, S., Leto, C., Perri, M., Verrecchia, F., Villata, M., Raiteri, C. M., Agudo, I., Bachev, R., Berdyugin, A., Blinov, D. A., Chanishvili, R., Chen, W. P., Chigladze, R., Damjanovic, G., Eswaraiah, C., Grishina, T. S., Ibryamov, S., Jordan, B., Jorstad, S. G., Joshi, M., Kopatskaya, E. N., Kurtanidze, O. M., Kurtanidze, S. O., Larionova, E. G., Larionova, L. V., Larionov, V. M., Latev, G., Lin, H. C., Marscher, A. P., Mokrushina, A. A., Morozova, D. A., Nikolashvili, M. G., Semkov, E., Smith, P. S., Strigachev, A., Troitskaya, Y. V., Troitsky, I. S., Vince, O., Barnes, J., Güver, T., Moody, J. W., Sadun, A. C., Hovatta, T., Richards, J. L., Max-Moerbeck, W., Readhead, A. C. S., Lähteenmäki, A., Tornikoski, M., Tammi, J., Ramakrishnan, V., Reinthal, R., "Unraveling the Complex Behavior of Mrk 421 with Simultaneous X-Ray and VHE Observations during an Extreme Flaring Activity in 2013 April", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 248, 2020, 29.
6. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bosnjak, Z., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C.,

- Fukami, S., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Fermi-Lat Collaboration, Hayashida, M., "Broadband characterisation of the very intense TeV flares of the blazar 1ES 1959+650 in 2016", *Astronomy and Astrophysics*, 638, 2020, A14.
7. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingarian, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Gliwny, P., Godinović, N., Green, D., Green, J. G., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Miener, T., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno,

- V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Saturni, F. G., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., MAGIC Collaboration, "A search for dark matter in Triangulum II with the MAGIC telescopes", *Physics of the Dark Universe*, 28, 2020, 100529.
8. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Blanch, O., Bonnoli, G., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Doro, M., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarezyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nieves Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Fact Collaboration, Arbet-Engels, A., Baack, D., Balbo, M., Biland, A., Blank, M., Bretz, T., Bruegge, K., Bulinski, M., Buss, J., Doerr, M., Dorner, D., Einecke, S., Elsaesser, D., Hildebrand, D., Linhoff, L., Mannheim, K., Mueller, S., Neise, D., Neronov, A., Noethe,

- M., Paravac, A., Rhode, W., Schleicher, B., Schulz, F., Sedlacek, K., Shukla, A., Sliusar, V., von Willert, E., Walter, R., Wendel, C., Tramacere, A., Lien, A., Perri, M., Verrecchia, F., Armas Padilla, M., Leto, C., Lähteenmäki, A., Tornikoski, M., Tammi, J., "Study of the variable broadband emission of Markarian 501 during the most extreme Swift X-ray activity", *Astronomy and Astrophysics*, 637, 2020, A86.
9. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Arcaro, C., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Bangale, P., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Tsujimoto, S., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Acosta, M. V., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Asano, K., Hada, K., Harris, D. E., Giroletti, M., Jermak, H. E., Madrid, J. P., Massaro, F., Richter, S., Spanier, F., Steele, I. A., Walker, R. C., "Monitoring of the radio galaxy M 87 during a low-emission state from 2012 to 2015 with MAGIC", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492, 2020, 5354.

10. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Engels, A. A., Asano, K., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., Di Pierro, F., Di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Ramazani, V. F., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Mineev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Arcaro, C., Carosi, A., D'Ammando, F., Tombesi, F., Lohfink, A., "New Hard-TeV Extreme Blazars Detected with the MAGIC Telescopes", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 247, 2020, 16.
11. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser,

- D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarezyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., "MAGIC very large zenith angle observations of the Crab Nebula up to 100 TeV", *Astronomy and Astrophysics*, 635, 2020, A158.
12. Abeysekara, A. U., Benbow, W., Bird, R., Brill, A., Brose, R., Buchovecky, M., Buckley, J. H., Christiansen, J. L., Chromey, A. J., Daniel, M. K., Dumm, J., Falcone, A., Feng, Q., Finley, J. P., Fortson, L., Furniss, A., Galante, N., Gent, A., Gillanders, G. H., Giuri, C., Gueta, O., Hassan, T., Hervet, O., Holder, J., Hughes, G., Humensky, T. B., Johnson, C. A., Kaaret, P., Kar, P., Kelley-Hoskins, N., Kertzman, M., Kieda, D., Krause, M., Krennrich, F., Kumar, S., Lang, M. J., Moriarty, P., Mukherjee, R., Nelson, T., Nieto, D., Nievas-Rosillo, M., O'Brien, S., Ong, R. A., Otte, A. N., Park, N., Petrashyk, A., Pichel, A., Pohl, M., Prado, R. R., Pueschel, E., Quinn, J., Ragan, K., Reynolds, P. T., Richards, G. T., Roache, E., Rovero, A. C., Rulten, C., Sadeh, I., Santander, M., Sembroski, G. H., Shahinyan, K., Stevenson, B., Sushch, I., Tyler, J., Vassiliev, V. V., Wakely, S. P., Weinstein, A., Wells, R. M., Wilcox, P., Wilhelm, A., Williams, D. A., Zitzer, B., Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Di

- Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nieves Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Sun, S., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Aller, H. D., Aller, M. F., Carini, M. T., Horan, D., Jordan, B., Jorstad, S. G., Kurtanidze, O. M., Kurtanidze, S. O., Lähteenmäki, A., Larionov, V. M., Larionova, E. G., Madejski, G., Marscher, A. P., Max-Moerbeck, W., Moody, J. W., Morozova, D. A., Nikolashvili, M. G., Raiteri, C. M., Readhead, A. C. S., Richards, J. L., Sadun, A. C., Sakamoto, T., Sigua, L. A., Smith, P. S., Talvikki, H., Tammi, J., Tornikoski, M., Troitsky, I. S., Villata, M., "The Great Markarian 421 Flare of 2010 February: Multiwavelength Variability and Correlation Studies", *The Astrophysical Journal*, 890, 2020, 97.
13. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cerruti, M., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch,

- D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mić, Anović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Asano, K., D'Ammando, F., Clavero, R., "Testing emission models on the extreme blazar 2WHSP J073326.7+515354 detected at very high energies with the MAGIC telescopes", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 2019, 2284.
14. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Engels, A. A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E.,

- Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Moroni, P. G. P., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Nava, L., Veres, P., Bhat, P. N., Briggs, M. S., Cleveland, W. H., Hamburg, R., Hui, C. M., Mailyan, B., Preece, R. D., Roberts, O. J., von Kienlin, A., Wilson-Hodge, C. A., Kocevski, D., Arimoto, M., Tak, D., Asano, K., Axelsson, M., Barbiellini, G., Bissaldi, E., Dirirsa, F. F., Gill, R., Granot, J., McEnery, J., Omodei, N., Razzaque, S., Piron, F., Racusin, J. L., Thompson, D. J., Campana, S., Bernardini, M. G., Kuin, N. P. M., Siegel, M. H., Cenko, S. B., O'Brien, P., Capalbi, M., Dai, A., de Pasquale, M., Gropp, J., Klingler, N., Osborne, J. P., Perri, M., Starling, R. L. C., Tagliaferri, G., Tohuvavohu, A., Ursi, A., Tavani, M., Cardillo, M., Casentini, C., Piano, G., Evangelista, Y., Verrecchia, F., Pittori, C., Lucarelli, F., Bulgarelli, A., Parmiggiani, N., Anderson, G. E., Anderson, J. P., Bernardi, G., Bolmer, J., Caballero-García, M. D., Carrasco, I. M., Castellón, A., Castro Segura, N., Castro-Tirado, A. J., Cherukuri, S. V., Cockeram, A. M., D'Avanzo, P., di Dato, A., Diretse, R., Fender, R. P., Fernández-García, E., Fynbo, J. P. U., Fruchter, A. S., Greiner, J., Gromadzki, M., Heintz, K. E., Heywood, I., van der Horst, A. J., Hu, Y.-D., Inserra, C., Izzo, L., Jaiswal, V., Jakobsson, P., Japelj, J., Kankare, E., Kann, D. A., Kouveliotou, C., Klose, S., Levan, A. J., Li, X. Y., Lotti, S., Maguire, K., Malesani, D. B., Manulis, I., Marongiu, M., Martin, S., Melandri, A., Michałowski, M. J., Miller-Jones, J. C. A., Misra, K., Moin, A., Mooley, K. P., Nasri, S., Nicholl, M., Noschese, A., Novara, G., Pandey, S. B., Peretti, E., Pérez Del Pulgar, C. J., Pérez-Torres, M. A., Perley, D. A., Piro, L., Ragosta, F., Resmi, L., Ricci, R., Rossi, A., Sánchez-Ramírez, R., Selsing, J., Schulze, S., Smartt, S. J., Smith, I. A., Sokolov, V. V., Stevens, J., Tanvir, N. R., Thöne, C. C., Tiengo, A., Tremou, E., Troja, E., de Ugarte Postigo, A., Valeev, A. F., Vergani, S. D., Wieringa, M., Woudt, P. A., Xu, D., Yaron, O., Young, D. R., "Observation of inverse Compton emission from a long -ray burst", *Nature*, 575, 2019, 459.
15. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, A., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin,

- U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Amico, G., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., di Pierro, F., di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Tsujimoto, S., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., Nava, L., "Teraelectronvolt emission from the -ray burst GRB 190114C", *Nature*, 575, 2019, 455.
16. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Bošnjak, Ž., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Chilingaryan, A., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Depaoli, D., Di Pierro, F., Di Venere, L., Do Souto Espiñeira, E., Dominis Prester, D., Donini, A., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Fukami, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giglietto, N., Giordano, F., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Hütten, M., Inada, T., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Jouvin, L., Kerszberg, D., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E.,

- Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Loporchio, S., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Mazin, D., Mićanović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nozaki, S., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Sakurai, S., Satalecka, K., Schmidt, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Suda, Y., Surić, T., Takahashi, M., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tosti, L., Vagelli, V., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vigorito, C. F., Vitale, V., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., MAGIC Collaboration, Fiore, F., Feruglio, C., Rephaeli, Y., "Constraints on Gamma-Ray and Neutrino Emission from NGC 1068 with the MAGIC Telescopes", *The Astrophysical Journal*, 883, 2019, 135.
17. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bellizzi, L., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Chai, Y., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, U., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Di Pierro, F., Do Souto Espiñeira, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Coto, R., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Mić, anović, S., Miceli, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Morcuende, D., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nievas Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Paiano, S., Palacio, J., Palatiello, M., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A.,

- Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strom, D., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vázquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., "Measurement of the extragalactic background light using MAGIC and Fermi-LAT gamma-ray observations of blazars up to $z = 1$ ", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 2019, 4233.
18. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Green, D., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nieves Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., "Deep observations of the globular cluster M15 with the MAGIC telescopes", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 2019, 2876.
19. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Bangale, P., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Carosi, R., Ceribella, G.,

- Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nievas Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., D'Ammando, F., Hada, K., Jorstad, S., Marscher, A. P., Mobeen, M. Z., Hovatta, T., Larionov, V. M., Borman, G. A., Grishina, T. S., Kopatskaya, E. N., Morozova, D. A., Nikiforova, A. A., Lähteenmäki, A., Tornikoski, M., Agudo, I., "A fast, very-high-energy -ray flare from BL Lacertae during a period of multi-wavelength activity in June 2015", *Astronomy and Astrophysics*, 623, 2019, A175.
20. Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Arcaro, C., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Bangale, P., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A.,

- Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nievas Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Ward, J. E., Will, M., Zarić, D., MAGIC Collaboration, "Constraining dark matter lifetime with a deep gamma-ray survey of the Perseus galaxy cluster with MAGIC", *Physics of the Dark Universe*, 22, 2018, 38.
21. Abeysekara, A. U., Benbow, W., Bird, R., Brill, A., Brose, R., Buckley, J. H., Chromey, A. J., Daniel, M. K., Falcone, A., Finley, J. P., Fortson, L., Furniss, A., Gent, A., Gillanders, G. H., Hanna, D., Hassan, T., Hervet, O., Holder, J., Hughes, G., Humensky, T. B., Kaaret, P., Kar, P., Kertzman, M., Kieda, D., Krause, M., Krennrich, F., Kumar, S., Lang, M. J., Lin, T. T. Y., Maier, G., Moriarty, P., Mukherjee, R., O'Brien, S., Ong, R. A., Otte, A. N., Park, N., Petrashyk, A., Pohl, M., Pueschel, E., Quinn, J., Ragan, K., Richards, G. T., Roache, E., Sadeh, I., Santander, M., Schlenstedt, S., Sembroski, G. H., Sushch, I., Tyler, J., Vassiliev, V. V., Wakely, S. P., Weinstein, A., Wells, R. M., Wilcox, P., Wilhelm, A., Williams, D. A., Williamson, T. J., Zitzer, B., VERITAS Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Becerra González, J., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonoli, G., Busetto, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., Da Vela, P., Dazzi, F., De Angelis, A., De Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., Di Pierro, F., Do Souto Espíñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gasparyan, S., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Machado de Oliveira Fraga, B., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Mallamaci, M., Maneva, G., Manganaro,

- M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nievas Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Nöthe, M., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Sahakyan, N., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Will, M., Zarić, D., MAGIC Collaboration, "Periastron Observations of TeV Gamma-Ray Emission from a Binary System with a 50-year Period", *The Astrophysical Journal*, 867, 2018, L19.
22. MAGIC Collaboration, Acciari, V. A., Ansoldi, S., Antonelli, L. A., Arbet Engels, A., Arcaro, C., Baack, D., Babić, A., Banerjee, B., Bangale, P., Barres de Almeida, U., Barrio, J. A., Bednarek, W., Bernardini, E., Berti, A., Besenrieder, J., Bhattacharyya, W., Bigongiari, C., Biland, A., Blanch, O., Bonnoli, G., Carosi, R., Ceribella, G., Cikota, S., Colak, S. M., Colin, P., Colombo, E., Contreras, J. L., Cortina, J., Covino, S., D'Elia, V., da Vela, P., Dazzi, F., de Angelis, A., de Lotto, B., Delfino, M., Delgado, J., di Pierro, F., Do Souto Espiñera, E., Domínguez, A., Dominis Prester, D., Dorner, D., Doro, M., Einecke, S., Elsaesser, D., Fallah Ramazani, V., Fattorini, A., Fernández-Barral, A., Ferrara, G., Fidalgo, D., Foffano, L., Fonseca, M. V., Font, L., Fruck, C., Galindo, D., Gallozzi, S., García López, R. J., Garczarczyk, M., Gaug, M., Giammaria, P., Godinović, N., Guberman, D., Hadasch, D., Hahn, A., Hassan, T., Herrera, J., Hoang, J., Hrupec, D., Inoue, S., Ishio, K., Iwamura, Y., Kubo, H., Kushida, J., Kuveždić, D., Lamastra, A., Lelas, D., Leone, F., Lindfors, E., Lombardi, S., Longo, F., López, M., López-Oramas, A., Maggio, C., Majumdar, P., Makariev, M., Maneva, G., Manganaro, M., Mannheim, K., Maraschi, L., Mariotti, M., Martínez, M., Masuda, S., Mazin, D., Minev, M., Miranda, J. M., Mirzoyan, R., Molina, E., Moralejo, A., Moreno, V., Moretti, E., Munar-Adrover, P., Neustroev, V., Niedzwiecki, A., Nievas Rosillo, M., Nigro, C., Nilsson, K., Ninci, D., Nishijima, K., Noda, K., Nogués, L., Paiano, S., Palacio, J., Paneque, D., Paoletti, R., Paredes, J. M., Pedalletti, G., Peñil, P., Peresano, M., Persic, M., Prada Moroni, P. G., Prandini, E., Puljak, I., Garcia, J. R., Rhode, W., Ribó, M., Rico, J., Righi, C., Rugliancich, A., Saha, L., Saito, T., Satalecka, K., Schweizer, T., Sitarek, J., Šnidarić, I., Sobczynska, D., Somero, A., Stamerra, A., Strzys, M., Surić, T., Tavecchio, F., Temnikov, P., Terzić, T., Teshima, M., Torres-Albà, N., Tsujimoto, S., van Scherpenberg, J., Vanzo, G., Vazquez Acosta, M., Vovk, I., Ward, J. E., Will, M., Zarić, D., Fermi-Lat Collaboration, Becerra

González, J., Raiteri, C. M., Sandrinelli, A., Hovatta, T., Kiehlmann, S., Max-Moerbeck, W., Tornikoski, M., Lähteenmäki, A., Tammi, J., Ramakrishnan, V., Thum, C., Agudo, I., Molina, S. N., Gómez, J. L., Fuentes, A., Casadio, C., Traianou, E., Myserlis, I., Kim, J.-Y., "Detection of persistent VHE gamma-ray emission from PKS 1510-089 by the MAGIC telescopes during low states between 2012 and 2017", *Astronomy and Astrophysics*, 619, 2018, A159.

Radovi u drugim časopisima

1. Pletikosa, I., Cikota, S., Rodriguez, J., Burwitz, V., "Lightcurve Photometry of 6670 Wallach", *Minor Planet Bulletin*, 38, 2011, 205.
2. Cikota, S., Cikota, A., "Lightcurve Photometry of 112 Iphigenia", *Minor Planet Bulletin*, 37, 2010, 107.
3. Cikota, S., Sancehz, S., Nomen, J., Rodrigez, J., Cikota, A., "Lightcurve Photometry of the NEO 2007 PU11", *Minor Planet Bulletin*, 37, 2010, 23.

Biography

Stefan Cikota was born in 1988 in Osijek. He grew up and was educated in Switzerland and Croatia, at the University of Zurich, the University of Split and the University of Zagreb. He has been interested in astronomy since his early youth. Already as a high school student, and in the early years of his studies, he gained expertise in the field of small Solar system bodies. From 2006-2010 he participated in founding of the Spanish La Sagra Observatory. As discoverer of over 3300 small Solar system bodies, and with more than one million reported astrometric measurements, he is one of the world's most productive astronomers in this area. To the Croatian public he is known as co-discoverer of the asteroid (187700) Zagreb, which was named in 2011 after Croatia's capital city. At the beginning of 2017, he enrolled a PhD program in astrophysics at the Faculty of Science, and was employed at the Department of Applied Physics, Faculty of Electrical Engineering and Computing at University of Zagreb. He participated in the teaching of physics courses at FER and the Military Study Program of the University of Zagreb, where he achieved more than 800 teaching hours in total. Currently, he is closely collaborating with the Institute of Astrophysics Andalusia (CSIC-IAA) in Granada, with a major interest in the physical characteristics of Trans-Neptunian objects. He is co-discoverer of the rings around the dwarf planet Haumea which was published in 2017 in *Nature*. In 2017 and 2018, he joined the international collaborations MAGIC and CTA, where he contributes by participating in observation campaigns, developing instruments and leading observation proposals as principal investigator.

In addition to the scientific and professional activities, he is interested in aerospace industry. In 2018, he was appointed a member of the National Reference Group for Space at the Ministry of Science and Education, where he advocates the positioning of Republic of Croatia in European space policy, and encourages the establishment of the Croatian aerospace sector. In 2020, he was appointed National Representative of Republic of Croatia for the European Commission expert group of Space Situational Awareness - Space Surveillance and Tracking.

Through public lectures for the general public, publication of articles in popular science journals, and public media appearances, he enjoys participating in activities popularising science and technology.