

Potruga za kometima glavnog asteroidnog pojasa pomoću baze podataka Centra za mala tijela Sunčeva sustava

Stefan Cikota

Mentor: doc. dr. sc. Dejan Vinković

ZAVRŠNI RAD

Split, rujan 2014.

Odjel za fiziku
Prirodoslovno-matematički fakultet
Sveučilište u Splitu



Sažetak

Kometi glavnog asteroidnog pojasa su mala skupina objekata čije točno porijeklo još nije u potpunosti razjašnjeno. Proteklih godina otkriva se sve više kometa glavnog asteroidnog pojasa, a jedan od uzroka njihove pojave su sudari među objektima. Motiviran sudarom asteroida (596) Scheila s nepoznatim objektom, u ovom radu pregledano je ~75 milijuna promatranja baze podataka Centra za mala tijela Sunčeva sustava. U potrazi za sličnim fotometrijskim naznakama kometske aktivnosti uspoređivani su promatrani provodni sjaj objekata s njihovim predviđenim prividnim sjajem. Pri tom je u uzorku od ~300'000 numeriranih objekata pronađeno šest objekata s naznakama kometske aktivnosti. Jedan od tih objekata je već poznati komet glavnog asteroidnog pojasa 133P/(7968) Elst-Pizarro, što upućuje na to da korištena metoda ima potencijala u potrazi za naznakama kometske aktivnosti među objektima. Za konačnu potvrdu kometske aktivnosti među pronađenim kandidatima bit će potrebna daljnja promatranja. Metoda bi se u budućnosti mogla primjenjivati u projektima koji će redovito sakupljati promatranja malih tijela Sunčeva sustava, kao npr. LSST ili GAIA.

Sadržaj

| | |
|--|----|
| Popis slika | 4 |
| Popis tablica | 5 |
| 1. Uvod | 6 |
| 1.1 Mala tijela Sunčeva Sustava i glavni asteroidni pojas | 6 |
| 1.2 Kometi glavnog asteroidnog pojasa | 9 |
| 1.3 Mehanizmi gubitka mase..... | 12 |
| 2. Materijali i metode | 15 |
| 2.1 Baza podataka Centra za mala tijela Sunčeva Sustava | 16 |
| 2.2 Prividni sjaj malih tijela Sunčeva Sustava | 17 |
| 2.3 Potraga za objektima s odstupanjem od predviđenog sjaja | 18 |
| 3. Rezultati | 21 |
| 4. Diskusija | 24 |
| 5. Zaključak | 26 |
| Zahvale | 27 |
| Popis literature | 28 |
| Dodatak A: Odnos apsolutne zvjezdane veličine prema promjeru malog tijela..... | 29 |

Popis slika

| | | |
|-----------|--|----|
| Slika 1. | Unutarnji Sunčev sustav | 7 |
| Slika 2. | Kirkwoodove pukotine | 8 |
| Slika 3. | Empirijska klasifikacija malih tijela Sunčevog sustava | 11 |
| Slika 4. | Prividni sjaj objekata u odnosu na odstupanje od predviđenog prividnog sjaja | 19 |
| Slika 5. | Dijagrami za objekt (315) Constantia | 22 |
| Slika 6. | Dijagrami za objekt (1026) Ingrid | 22 |
| Slika 7. | Dijagrami za objekt (3646) Aduatiques | 22 |
| Slika 8. | Dijagrami za objekt 133P/(7968) Elst-Pizarro | 22 |
| Slika 9. | Dijagrami za objekt (24684) 1990 EU4 | 22 |
| Slika 10. | Dijagrami za objekt (35101) 1991 PL16 | 23 |

Popis tablica

| | | |
|------------|--|----|
| Tablica 1. | Orbitalne karakteristike do sada otkrivenih kometa glavnog asteroidnog pojasa | 12 |
| Tablica 2. | Pronađeni kandidati objekata s mogućim naznakama kometske aktivnosti | 21 |
| Tablica 3. | Odnos apsolutne zvjezdane veličine (H) prema promjeru malog tijela Sunčeva sustava | 29 |

1. Uvod

1.1. Mala tijela Sunčeva sustava i glavni asteroidni pojas

Asteroidi ili planetoidi su mala čvrsta tijela u planetarnim sustavima. U usporedbi s planetima mnogo su manji i najčešće nepravilnog oblika. Nastali su od ostataka protoplanetarne tvari koja se nije pripojila planetima za vrijeme formiranja sustava iz protoplanetarnog diska. Najčešće kruže oko matične zvijezde vlastitom putanjom ili kao prirodni sateliti (mjeseci) većih planeta. Neke od njih nalazimo vezane gravitacijskim silama uz planete, u grupama koje orbitiraju u putanji planeta, ispred ili iza.

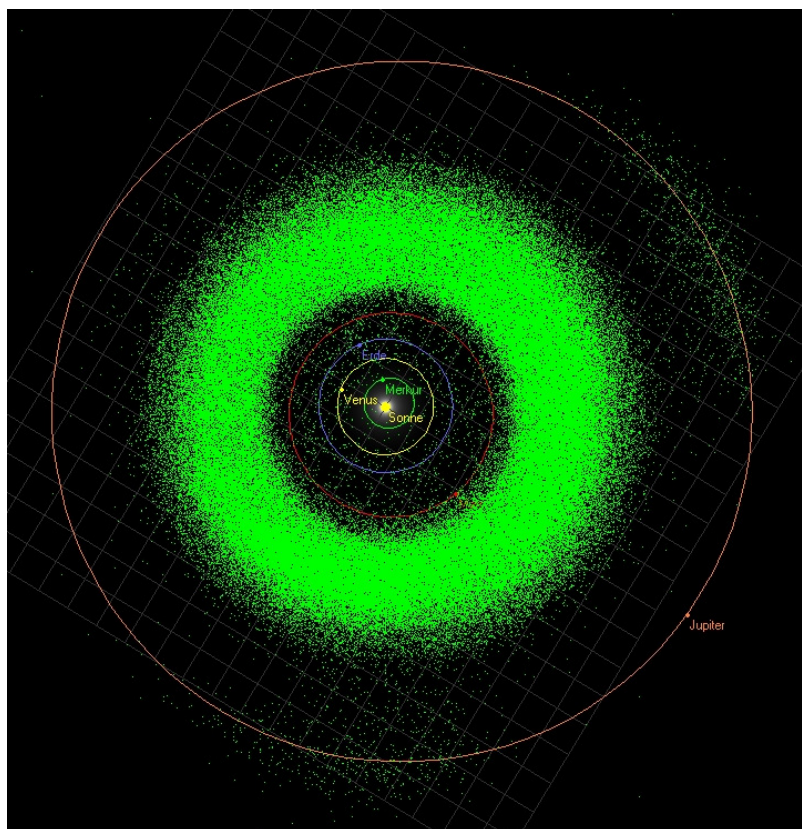
98.5% asteroida u Sunčevu sustavu nalazi se u glavnom asteroidnom pojasu između Marsa i Jupitera, te u Kuiperovom pojasu. Do sada ih je otkriveno preko 600'000. Procjenjuje se da bi ih u našem sustavu moglo biti nekoliko milijuna.

Glavni asteroidni pojas nalazi se između velikih, rezonancije s Jupiterom 4:1 i 2:1, Kirkwoodovih pukotina koje se nalaze na udaljenosti od 2.06 i 3.27 a.j. Ekscentricitet orbita tih asteroida manji je od 0.33, a inklinacija je do 20°.

Prvo otkriveni i numerirani asteroid je Ceres, otkriven od Giuseppe Piazzia 1801. godine. Tada je Ceres bio imenovan novim planetom, a sada je klasificiran kao patuljasti planet. Sir William Herschel, otkrivač Urana, uveo je pojam asteroid za prve objekte otkrivene u 19. st. između Marsa i Jupitera s orbitama malog ekscentriciteta. Od tada su otkrivani asteroidi između orbita svih planeta, od Merkura do Neptuna pa i iza Neptunove orbite – trans-Neptunski objekti (TNO).

Još uvijek ne postoji točna definicija asteroida. Stručnjaci se razilaze u mišljenjima kako na odgovarajući način klasificirati asteroide prema masi, veličini, sastavu i položaju u planetarnom sustavu.

Prijedlog je da se asteroidima nazivaju tijela veća od 50 m u promjeru, manja od planeta i kamenog ili metalnog sastava. Manja tijela, koja se potpuno raspadnu i izgore pri ulasku u Zemljinu atmosferu spadaju u kategoriju meteoroida.



Slika 1. Unutarnji Sunčev sustav – svaka zelena točkica je jedan asteroid (lijepo uočljiv glavni asteroidni pojas između Marsa i Jupitera, Trojanci, Grci i Hilde)

Fizička svojstva

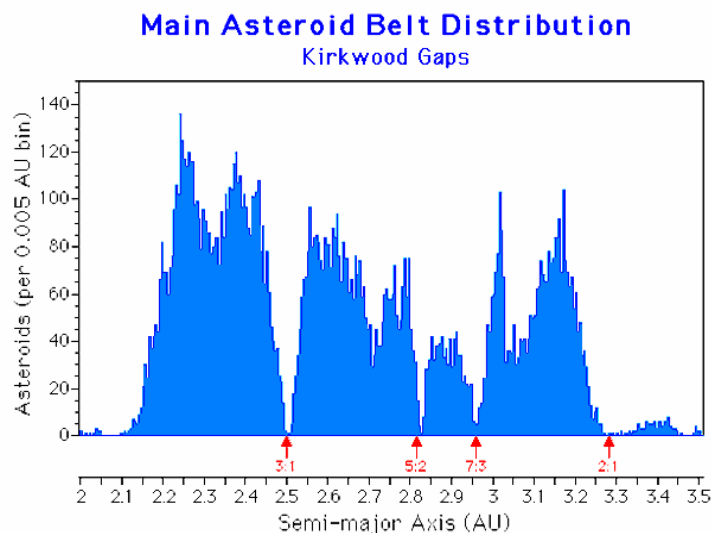
Ukupna masa asteroida danas se procjenjuje na 10^{22} kg (oko 1000 puta manje od mase Zemlje), od čega oko 10% otpada samo na Ceres. Do sada je pronađeno 238 asteroida većih od 100 km i vjeruje se da su to svi, dok se za manje asteroide vjeruje da ih je otkriven tek malen postotak. Procjena je da postoji oko milijun objekata većih od 1 km. Asteroidi se oko Sunca gibaju u istom smjeru kao i planeti. Prosječne inklinacije (nagib u odnosu na ekliptiku) su manje od 16° i asteroidi nemaju atmosfere. Većina ih je od Sunca udaljena između 1.7 i 4.0 a.j. u području nazvanom asteroidni pojas. Većina asteroida u asteroidnom pojasu imaju ekscentricitet od 0.1 do 0.2. U samom asteroidnom pojasu postoji područje najveće gustoće putanja asteroida (između 2.2 i 3.3 a.j.) - glavni pojas.

Asteroidi rotiraju, a kako su nepravilnog oblika, to dovodi do promjene njihova sjaja i prividne veličine. Na temelju mjerenja perioda promjene sjaja može se odrediti i period

rotacije asteroida. Periodi rotacije većine asteroida glavnog asteroidnog pojasa iznose između 4 i 16 h. Kako su asteroidi malih dimenzija, oblik im se ne može zamijetiti ni najvećim teleskopima, no promatranjem okultacija zvijezda asteroidima moguće je odrediti njihov oblik i dimenzije.

Glavni asteroidni pojas

Većina poznatih asteroida nalazi se u glavnom asteroidnom pojasu između Marsove i Jupiterove orbite na udaljenosti od 2 do 4 a.j. Oni ne mogu tvoriti planet zbog Jupiterovog gravitacijskog utjecaja koji, preko orbitne rezonancije, stvara i čisti Kirkwoodove pukotine (Slika 2.) koje je prvi primijetio Daniel Kirkwood 1874. godine.



Slika 2. Kirkwoodove pukotine (na x osi je udaljenost u a.j., a na y osi broj asteroida)

Glavni pojas, područje najveće gustoće koje se nalazi između Kirkwoodovih pukotina na udaljenosti od 2.06 do 3.27 a.j. s ekscentricitetima od oko 0.3 i inklinacijom manjom od 30° , može se podijeliti po Kirkwoodovim pukotinama na:

- **Unutarnji glavni pojas** nalazi se unutar velike Kirkwoodove pukotine, koja nastaje zbog 3:1 Jupiterove orbitne rezonancije na udaljenosti od 2.50 a.j. od Sunca. Najveći asteroid ove podskupine je (4) Vesta.
 - Unutarnji glavni pojas uključuje pojas zvan Glavni pojas I (Main Belt I) u

kojem orbite asteroida imaju prosječni radijus između 2.3 i 2.5 a.j. i inklinaciju manju od 18° .

- **Središnji glavni pojas**, nalazi se između Jupiterovih orbitalnih rezonancija 3:1 i 5:2, od 2.5 do 2.82 a.j. Najveći asteroid ovog pojasa je (1) Ceres. Dijeli se na dva dijela:
 - Glavni pojas IIa (Main Belt IIa) u kojem orbite asteroida imaju prosječni radijus između 2.5 i 2.706 a.j. i inklinaciju manju od 33° .
 - Glavni pojas IIb (Main Belt IIb) u kojem orbite asteroida imaju prosječni radijus između 2.706 i 2.82 a.j. i inklinaciju manju od 33° .
- **Vanjski glavni pojas** nalazi se između Jupiterovih orbitalnih rezonancija 5:2 i 2:1. Najveći asteroid u ovom pojasu je (10) Hygiea. Pojas se dijeli na dva dijela:
 - Glavni pojas IIIa (Main Belt IIIa) u kojem orbite asteroida imaju prosječni radijus između 2.82 i 3.03 a.j., ekscentricitet manji od 0.35 i inklinaciju do 30° .
 - Glavni pojas IIIb (Main Belt IIIb) u kojem orbite asteroida imaju prosječni radijus između 3.03 i 3.27 a.j., ekscentricitet manji od 0.35 i inklinaciju do 30° .

Oko 30-35% asteroida glavnog pojasa spada u dogovorene dinamičke obitelji.

1.2. Kometi glavnog asteroidnog pojasa

Znanstvenici su tijekom povijesti, koristeći različite metode i razvijajući različite kriterije, klasificirali mala tijela unutar Sunčevog sustava na asteroide i komete. Promatrački astronomi kometima nazivaju tijela sa slobodnom prozirnom atmosferom, vidljivom zbog raspršenja Sunčeva svjetla, a asteroidima tijela s konstantnim geometrijskim poprečnim presjekom.

Planetarni astronomi asteroide i komete razlikuju po mjestu nastanka. Kometi su ledena tijela nastala iza „snježne granice“, u hladnim područjima Sunčeva sustava, dok su asteroidi tijela nastala u područjima Sunčeva sustava s višim srednjim temperaturama. Dinamičari asteroide i komete razlikuju pomoću nekog dinamičkog parametra, najčešće pomoću Tisserand parametra mjerenim u odnosu na Jupiter (Kresak 1982, Kosai 1992) [6,7].

Tisserand parametar definiran je kao:

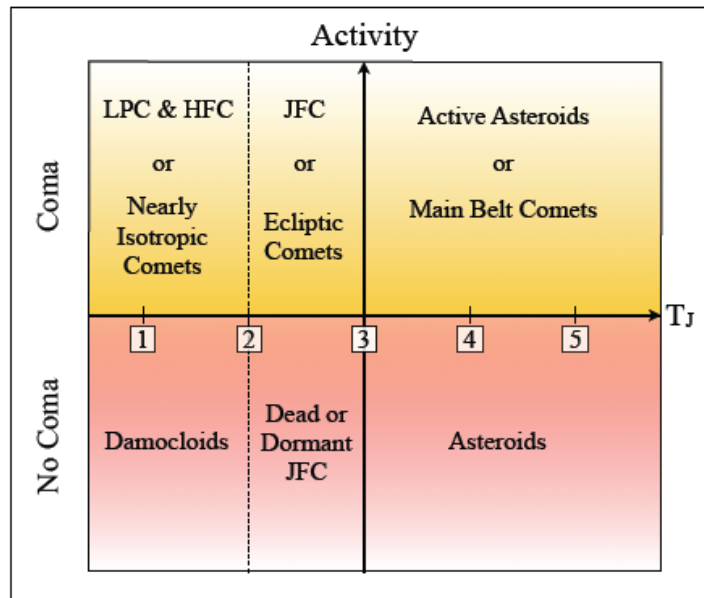
$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \left[(1 - e^2) \frac{a}{a_J} \right]^{1/2} \cos(i) \quad (1)$$

gdje su a , e i i glavna poluos, ekscentricitet i inklinacija orbite, dok je $a_J = 5.2$ a.j. glavna poluos Jupiterove orbite. Ovaj parametar je mjera za brzinu tijela pri bliskom prolazu Jupiteru. Sam Jupiter ima $T_J = 3$. Asteroidi glavnog asteroidnog pojasa imaju $a \leq a_J$ i $T_J > 3$, dok dinamički kometi imaju $T_J < 3$.

Tri spomenute metode klasifikacije (promatračka, kompozicijska i dinamička) malih tijela su nezavisne, ali nisu savršene. Npr., dali će se otkriti koma ili rep nekog objekta ovisi o svojstvima teleskopa. Malim teleskopima je ponekad teško vidjeti komu, koja se teško može predvidjeti velikim teleskopima. Ne postoji dogovorena količina leda koja dijeli komete od asteroida, niti, što je još važnije, postoji način za mjerenje frakcije leda malog tijela. Također je teško odrediti mjesto nastanka nekog malog tijela i njegovu dinamičku povijest zbog velikih neodređenosti ne-gravitacijskih sila elektromagnetskog zračenja (Yarkovsky efekt) i gubitka mase kometa (efekt rakete, Whipple 1950) [9], te zbog same kaotične prirode dinamike Sunčevog sustava. Podjela po Tisserandovom kriteriju nije savršena jer se bazira na idealiziranom Sunčevom sustavu (Jupiterova orbita nije kružnica, gravitacijski utjecaj drugih planeta nije zanemariv, itd.). Zbog toga je jednadžba (1) za dinamičko razlikovanje korisna samo za objekte koji imaju T_J oko 3.0.

Zanimljivo je da se za većinu objekata podudaraju promatračka, kompozicijska i dinamička definicija asteroida i kometa. Većina objekata karakterizirana kao asteroidi (kometi) po orbiti, imaju i fizička svojstva očekivana za asteroide (komete). Nomenklatura iznimaka, odnosno tijela s orbitama koje se ne poklapaju s očekivanim fizičkim svojstvima prikazana je na slici 3. Tradicionalni kometi gube masu i imaju $T_J < 3$. Kometi s $2 \leq T_J < 3$ nazivamo kometima Jupiterove obitelji i smatra se da su nastali u Kuiperovom pojasu. Kometi s $T_J \leq 2$ su dugo-periodični kometi, ili kometi Halley obitelji, porijeklom iz Oortovog oblaka. Neaktivna tijela s orbitama poput kometa Jupiterove obitelji nazivaju se - izumrlim, ugašenim, mrtvim ili spavajućim kometima (Hartmann et. al 1987) [3]. To su vjerojatno bivši kometi kojima je zbog Sunčevog zračenja tijekom prošlosti nestao sav led s površine, ali se vjeruje da posjeduju led u unutrašnjosti, te da bi ti objekti mogli postati ponovno aktivni.

Neaktivna dugo-periodična tijela Hallyjeve obitelji nazivaju se Damocloidima (Jewitt 2005) [4]. Ti objekti također vjerojatno nemaju više površinskog leda.



Slika 3. Empirijska klasifikacija malih tijela Sunčevog sustava po morfologiji (vertikalna os) i Tisserandovom dinamičkom parametru T_J (horizontalna os). LPC = dugo-periodični kometi, HFC = kometi Halleyjeve obitelji, JFC = Kometi Jupiterove obitelji. Za dinamičku klasifikaciju je korištena formula (1) s pretpostavkom $a \leq a_J$.

Zanimljiva je podskupina malih tijela koja je dinamički gledano poput asteroida ($a < a_J$, $T_J > 3$), ali gubi masu poput kometa. Takva tijela nazivaju se kometima glavnog asteroidnog pojasa ili aktivnim asteroidima, jer neka od tijela ne spadaju u glavni asteroidni pojas. Numeričke integracije ukazuju na to da ta tijela nisu nedavno zarobljeni (u glavni pojas) objekti Kuiperovog pojasa (Fernandez et al. 2002, Levison et al. 2006) [2,8]. Ti objekti zanimljivi su za istraživanje jer mogu dovesti do odgovora na pitanje je li vodeni led uspio opstati na asteroidima unatoč grijanju iz čvrste radioaktivne jezgre i grijanju od Sunca? Aktivni asteroidi su također izvor prašine koja uzrokuje Zodijačko svjetlo, a slična tijela mogla bi biti izvor diskova prašine oko drugih zvijezda.

Do danas je otkriveno jedanaest aktivnih asteroida, navedenih u tablici 1.

Tablica 1. *Orbitalne karakteristike do sada otkrivenih kometa glavnog asteroidnog pojasa (a – Tisserandov dinamički parametar, b – velika poluos, c – ekscentricitet orbite, d – inklinacija orbite, e – perihel [a.j.], f – afel [a.j.])*

| Naziv | T_J^a | a^b | e^c | i^d | q^e | Q^f |
|------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| (3200) Phaethon | 4.508 | 1.271 | 0.890 | 22.17 | 0.140 | 2.402 |
| P/2010 A2 | 3.582 | 2.291 | 0.124 | 5.26 | 2.007 | 2.575 |
| (2201) Oljato | 3.299 | 2.172 | 0.713 | 2.52 | 0.623 | 3.721 |
| P/2008 R1 (Garradd) | 3.216 | 2.726 | 0.342 | 15.90 | 1.794 | 3.658 |
| (596) Scheila | 3.208 | 2.928 | 0.165 | 14.66 | 2.445 | 3.411 |
| 300163 (2006 VW139) | 3.203 | 3.052 | 0.201 | 3.24 | 2.438 | 3.665 |
| 133P/Elst-Pizarro | 3.184 | 3.157 | 0.165 | 1.39 | 2.636 | 3.678 |
| 176P/LINEAR (118401) | 3.167 | 3.196 | 0.192 | 0.24 | 2.582 | 3.810 |
| 238P/Read | 3.152 | 3.165 | 0.253 | 1.27 | 2.364 | 3.966 |
| P/2010 R2 (La Sagra) | 3.098 | 3.099 | 0.154 | 21.39 | 2.622 | 3.576 |
| 107P/Wilson-Harrington | 3.083 | 2.638 | 0.624 | 2.79 | 0.993 | 4.284 |

1.3. Mehanizmi gubitka mase

U ovom odlomku ćemo razmotriti nekoliko procesa koji mogu uzrokovati „podizanje“ prašine oko malih tijela Sunčeva sustava.

Sublimacija

Iako je sublimacija konceptualno jednostavna, detaljna istraživanja kometa ukazuju da je sublimacija izrazito kompleksan proces ako se u obzir uzimu čimbenici poput poroznosti površine, rotacije jezgre, provođenja topline u unutrašnjost i razvoja otpornog plašta (Capria et al.) [1]. Pojednostavljenije predstavlja pretpostavka da asteroidi ne sadrže amorfni (nekrystaliziran) led. Uobičajena brzina sublimacije u asteroidnom pojasu $2.0 \leq R \leq 3.3$ a.j. je od $\sim 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (sublimacija na T_{\max}) do $< 10^{-8} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (sublimacija na T_{\min}). Brzina gubitka mase je oko 1 kg s^{-1} . Dok led izložen na površini sublimira u kratkom vremenskom periodu, led zaštićeni plaštom može opstati gotovo beskonačno pod direktnim osvjetljenjem. Jednometarska naslaga regolita može potisnuti sublimaciju tako da led opstane milijardama godina (Jewitt 2012) [5]. Za početak procesa sublimacije, plašt može biti uklonjen uslijed sudara ili prirodnim putem.

Izbacivanje uslijed sudara

Sudari među asteroidima događaju se pri brzinama od nekoliko km s^{-1} (Capria et al.) [1] i zbog toga su sudari jako erozivni. Pri sudarima je $m_e/M \gg 1$, gdje je m_e masa izbačenog materijala, a M masa projektila. Materijal izbačen pri sudarima mogao bi objasniti promatrane promjene u aktivnosti nekih asteroida. Udar projektila veličine jednog metra u asteroid promjera 1 km može uzrokovati promjenu u sjaju od $\Delta m \sim 3.5\text{mag}$, dok bi sudar istog projektila s asteroidom promjera 10 km uzrokovao bljesak od samo nekoliko mili-magnituda i gotovo sigurno ostao nezapažen.

U ovom slučaju postavlja se važno pitanje: koliko su učestali sudari među objektima glavnog asteroidnog pojasa? Capria et al. (2012) [1] napravili su procjenu učestalosti sudara u glavnom asteroidnom pojasu procjenjujući promjere kratera potrebne za izbacivanje promatrane količine materijala. Za provjeru modela odabrana je količina materijala oko objekta P/2005 U1 (Read) promjera 0.6 km, za koju bi trebao biti odgovoran krater procijenjenog promjera ~ 170 m. Pri prosječnoj vjerojatnosti sudara u gl. asteroidnom pojasu od $3.48 \times 10^{18} \text{ km}^2/\text{god.}$ i prosječnoj brzini sudara od 3.7 km/s , krater promjera ~ 170 m mogao je nastati udarom objekta od ~ 8 m u porozni, odnosno ~ 18.5 m u kohezijski materijal (pri pretpostavci da je gustoća mete 1000 km/m^3 , a projektila od $\sim 2600 \text{ km/m}^3$). Procijenjeno vrijeme za sudar projektila od ~ 8 m u objekt od ~ 0.6 km iznosi 5.1×10^7 godina. Pri procijeni da u glavnom asteroidnom pojasu postoji 2.9×10^6 objekata, sudari poput onog iz gore navedenog modela mogli bi se događati svakih ~ 17 godina. Za objekt od ~ 18.5 m, sličnim procjenama dolazimo do učestalosti od ~ 147 godina. Za veće objekte, kao npr. Elst-Pizzaro promjera ~ 5 km, procijenjena učestalost sudara iznosi ~ 10 godina za projekte promjera 8 m, odnosno ~ 100 godina za promjere projektila od ~ 18.5 m.

Elektrostatske sile

Utjecaj elektrostatske sile na čestice prašine na površini tijela najbolje je vidljiv na Mjesecu. Na snimkama Surveyor letjelice je vidljiva neočekivana svjetlost nad horizontom, uzrokovana raspršenjem svjetla od čestica prašine veličine $\sim 10 \mu\text{m}$ na lokaliziranim područjima ~ 1 m iznad tla (Jewitt 2012) [5]. Pojava je objašnjena elektrostatskom levitacijom. Naime, tijekom dana čestice prašine se električki nabijaju - pod djelovanjem UV i X-zračenja dolazi do izbijanja elektrona (fotoelektrični efekt). Izmjereni potencijal između

nabijene prašine i tla iznosi oko +10V. Osnovna razlika između Mjeseca i asteroida glavnog asteroidnog pojasa je ta što je prašina na Mjesecu zadržana „jakom“ gravitacijskom silom, dok prašina na asteroidima lako dostiže brzinu oslobađanja.

Termalna fraktura

Termalna fraktura događa se kad napetost, uzrokovana promjenom temperature materijala, nadmaši vlačnu čvrstoću materijala. Materijali pri prijelomu (ako toplinsku energiju naprezanja pretvorimo u kinetičku energiju) mogu dostići brzine do 20 m/s za $\delta T = 1000$ K, što je dovoljno brzio da nadmaši brzinu oslobađanja asteroida polumjera do oko $r \sim 20$ km.

Termalna i udarna dehidracija

Neke klase ugljikovih kondrita (vjerojatno fragmenti vanjskog dijela asteroidnog pojasa) sadrže 10-20% sveukupne mase vode koja je vezana u hidrianim mineralima (Levison et al.) [8]. Kad bi se ta voda oslobodila, ostavila bi vidljiv trag iza asteroida. Termalna dehidracija popraćena je promjenom volumena i može uzrokovati pukotine u dehidriranom materijalu i otpuštanje sitnih čestica, ali aktivacijske energije zahtijevaju temperature od oko ~ 1000 K, što je mnogo više od uobičajenih temperatura u asteroidnom pojasu.

Udarna dehidracija je dehidracija uzrokovana udarnim valom pri sudaru.

Tlak zračenja

Ukoliko je gravitacijska sila manja od tlaka zračenja, tlak zračenja s površine asteroida može "pomesti" čestice prašine. Tako asteroid promjera 1 km gubi čestice prašine manje od $a \sim 1$ μm .

2. Materijali i metode

Ideja za ovaj rad potaknuta je sudarom asteroida (596) Scheila s nepoznatim objektom. Nakon objave spektakularnih snimaka Scheile zajedno s mjerenjima dalo se primjetiti da prikupljena promatranja u Centru za mala tijela Sunčeva sustava (MPC) sadrže primjetna odstupanja u sjaju Scheile od njezinog predviđenog sjaja, izazvana sudarom Scheile s nepoznatim objektom.

Hipoteza rada je da je među objektima u glavnom asteroidnom pojasu vjerojatno već bilo sličnih sudara ili izbačaja materije koji rezultiraju pojavom kometске aktivnosti, a koji su do sada ostali nezapaženi.

Centar za mala tijela Sunčeva sustava od ~2010. godine redovito publicira sva, od amatera i profesionalaca, prikupljena promatranja malih tijela Sunčeva sustava. Baza svih promatranja dostupna je na web-stranicama MPC-a pod nazivom «Observation Archive¹» i raspoređena je u grupe objekata: numerirani, ne-numerirani, kometi te prirodni sateliti. Cilj rada je pronaći objekte u bazi podataka MPC-a kojima promatrani sjaj odstupa od njihovog predviđenog sjaja, i to u negativnom smjeru (sjajniji objekti kvantitativno imaju niže magnitude od tamnijih).

U ovom radu korištena je samo baza podataka svih numeriranih malih tijela Sunčeva sustava, iz razloga što numerirani objekti već imaju dovoljno precizno određene parametre orbite koji su nam važni za računanje predviđenog sjaja objekata (daljnji opis u poglavlju 2.2.).

¹ <http://www.minorplanetcenter.net/iau/ECS/MPCAT-OBS/MPCAT-OBS.html>

2.1. Baza podataka Centra za mala tijela Sunčeva sustava

Centar za mala tijela Sunčeva sustava (MPC) je službena organizacija Međunarodne Astronomske Unije (IAU) za prikupljanje, obrađivanje i objavljivanje podataka o svim malim tijelima Sunčeva sustava - asteroidima i kometima te prirodnim satelitima planeta. Sva otkrića novih asteroida i kometa MPC mora potvrditi. Imenovanje asteroida također, prije nego što postanu službeno priznata, mora potvrditi MPC.

Centar za mala tijela Sunčeva sustava osnovan je 1947. godine na Sveučilištu Cincinnati. Ovaj centar je grana IAU (Međunarodne Astronomske Unije), pripojen „Astrofizičkom opservatoriju Smithson (SAO)“ u suradnji s „Harvardovim sveučilišnim opservatorijem“.

Osim baze podataka svih do sada poslanih promatranja, MPC održava i bazu podataka s katalogom svih do sada otkrivenih tijela u Sunčevom sustavu s njihovim parametrima orbite, dostupnu svima preko Interneta („Minor Planet Center Orbit Catalogue“ - MPCORB).

S obzirom na to da je MPC baza potpuno automatizirana, sva promatranja koja se šalju moraju biti poslana u propisanom formatu. Format promatranja malih tijela Sunčeva sustava objašnjen je na sljedećem primjeru:

```
LS0001 C2007 01 17.17019 10 19 03.29 +12 57 08.1 17.9 R J75
```

- „LS0001“ je proizvoljno odabran provizorni naziv za novootkriveni objekt. Na ovom mjestu može biti naveden i broj numeriranog objekta ili designacija ne-numeriranog objekta.
- „C2007 01 17.17019“ je datum kada je snimka napravljena - godina (2007), mjesec (01), i dan u decimalnom obliku; pri čemu slovo na prvom mjestu stoji za metodu izvršenog promatranja – „C“ stoji za CCD promatranje
- „10 19 03.29“ je rektascenzija promatranog objekta – sati, minute i sekunde
- „+12 57 08.1“ je deklinacija promatranog objekta – sati, minute i sekunde

- „17.9 R“ označava sjaj objekta u magnitudama uz pripadajući filter - R (crveni), B (plavi), V (zeleni), C (prozirni), I (infracrveni).
- „J75“ označava jedinstveni kod zvjezdarnice koja šalje promatranje koji se posebnom procedurom zatraži od MPC-a

2.2. Prividni sjaj malih tijela Sunčeva Sustava

Kada je riječ o prividnom sjaju malih tijela Sunčeva sustava misli se na njihovu vizualnu zvjezdanu veličinu koju promatrač mjeri sa Zemlje.

Apsolutna zvjezdana veličina malog tijela Sunčeva sustava, H , jednaka je prividnoj zvjezdanoj veličini koju bi objekt imao da se nalazi na udaljenosti od 1 a.j. i od promatrača i od Sunca, pri fazi od nula stupnjeva. Naravno, ovakav opis bi promatrača smjestio u centar Sunca, i H je samo hipotetska vrijednost.

Relacija koja opisuje odnos između prividne zvjezdane veličine i apsolutne zvjezdane veličine dana je s:

$$m = H + 5\log\Delta + 5\log r \quad (2)$$

gdje je Δ udaljenost objekta od Zemlje, a r udaljenost objekta od Sunca; obe u astronomskim jedinicama.

Prividna zvjezdana veličina malog tijela Sunčeva sustava ovisi i o njegovom albedu, odnosno količini Sunčeve svjetlosti koja se reflektira od objekta.

Promjeri malih tijela Sunčeva sustava procjenjuju se na osnovu njihovih apsolutnih zvjezdanih veličina i pretpostavki njihovih albeda.

U dodatku A nalazi se tablica s odnosom promjera malih tijela Sunčeva sustava s obzirom na njihove apsolutne zvjezdane veličine.

U svom radu prividnu zvjezdanu veličinu za željene objekte u određeno vrijeme računao sam uz pomoć Pythonovog modula «PyEphem». Više informacija o postupku nalazi se u poglavlju 2.3.

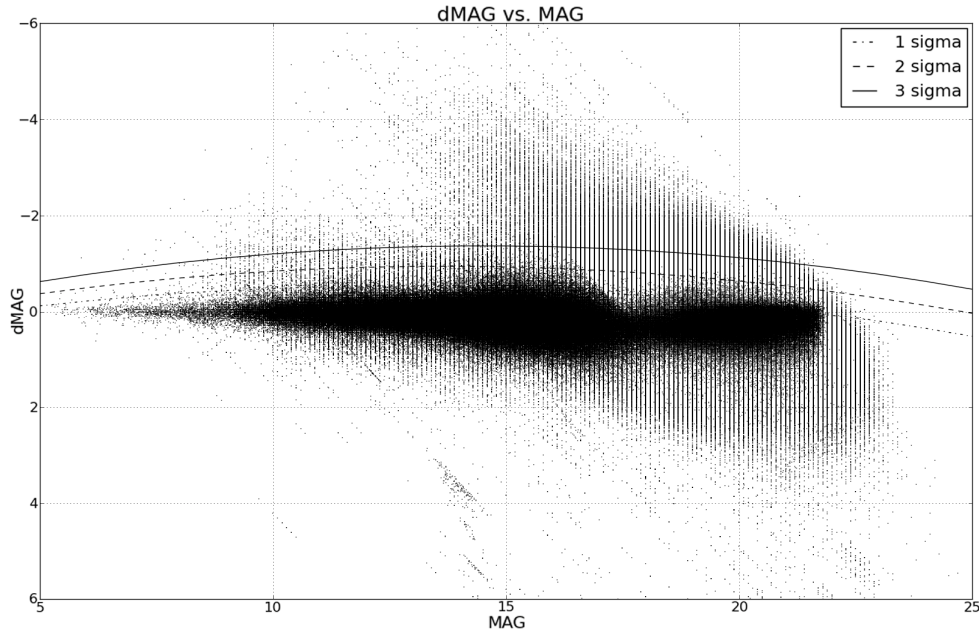
2.3. Potraga za objektima s odstupanjem od predviđenog sjaja

U potrazi za objektima koji imaju naznake kometске aktivnosti, u obzir je uzeto samo ~300'000 numeriranih objekata. Javno dostupna datoteka iz baze podataka centra za mala tijela Sunčeva sustava sadrži ukupno ~75 milijuna promatranja numeriranih objekata, no to uključuje promatranja izvršena svim filtrima. Kako se prividni sjaj objekta promatran kroz razne filtre mijenja, potrebno je odabrati samo jedan od filtara. Kako gotovo sve svemirske straže koriste zeleni (vizualni) filtar s naznakom „V“, i kako takvih promatranja ima najviše, za potragu je korišten vizualni filtar.

Prvi korak bio je reducirati promatranja na samo ona izvršena s vizualnim filtrom.

Drugi korak je računanje predviđenog sjaja za pojedino promatranje kako bih ga se kasnije moglo usporediti s pravim promatranjem. U tu svrhu napisana je jednostavna skripta u Pythonu koja iz datoteke promatranja MPC-a crpi datum, vrijeme i ime promatranog objekta, te uz pomoć Pythonovog modula „PyEphem“ računa predviđeni sjaj. Detaljniji opis računanja prividnog sjaja nalazi se u poglavlju 2.2., s tim da „PyEphem“ u obzir uzima još i fazu objekta, koja također utječe na ukupan sjaj.

Treći korak je usporedba promatranog sjaja objekta s predviđenim sjajem izračunatim uz pomoć Pythonovog modula „PyEphem“. Na slici 4 prikazan je plot koji sadrži ~24 milijuna promatranja u V filteru. Apscisa prikazuje promatrani prividni sjaj (MAG) dok je na ordinati prikazana razlika između predviđenog prividnog sjaja i promatranog prividnog sjaja (dMAG).



Slika 4. *Prividni sjaj objekata u odnosu na odstupanje od predviđenog prividnog sjaja. Apscisa prikazuje promatrani prividni sjaj (MAG), dok je na ordinati prikazana razlika između predviđenog prividnog sjaja i promatranog prividnog sjaja (dMAG).*

Četvrti korak je filtriracija objekata-kandidata objekata koji bi mogli imati naznake kometske aktivnosti. Sa dijagrama na slici 4 vidljivo je da ima mnogo mjerenja s odstupanjem čak do ~ 8 magnituda od predviđenog sjaja. Većina odstupanja je šum i nastaje prolaskom objekata blizu saturirane zvijezde ili je uzrokovano raznim artefaktima na snimkama koje su najčešće rezultat optičkih refleksija unutar instrumenta. S ciljem filtriranja podataka u obzir su uzeti samo objekti koji posjeduju najmanje 5 mjerenja s odstupanjem većim od najmanje 3-sigma vrijednosti.

Sigma vrijednosti su računane za usrednjene vrijednosti mjerenja u intervalima po jednu magnitudu, za interval od 8.0 do 23.0 magnituda. Kroz dobivene sigma vrijednosti fitane su krivulje 2. reda koje su prikazane na slici 4. za 1-sigma, 2-sigma i 3-sigma vrijednosti.

Krivulja 2. reda za granicu 3-sigma vrijednosti, koja je korištena kao uvijet filtriranja nama zanimljivih mjerenja, definirana je kao:

$$dMAG < 0.0082 \cdot MAG^2 - 0.2381 \cdot MAG + 0.3549 \quad (3)$$

Za svih ~1700 objekata napravljeni su dMAG-JD dijagrami – dijagrami odstupanja sjaja od predviđenog prividnog sjaja (dMAG) u odnosu na vrijeme koje je preračunato u Julijanske dane (JD). Pregledavanjem dijagrama pokušalo se doći do objekata koji imaju odstupanja u sjaju od predviđenog za najmanje dva različita datuma u kraćem razdoblju (nekoliko dana ili tjedana). Time je eliminirana većina slučajeva približavanja objekta saturiranoj zvijezdi ili artefaktu na snimci, koji su česta pojava, ali rijetka u kratkim vremenskim periodima za isti objekt.

Na ovaj način, pomoću dMAG-JD dijagrama pronađeno je šest kandidata (slike 5-10 lijevo), od kojih je jedan od njih otprije poznat komet glavnog asteroidnog pojasa (7968), poznat i pod nazivom Elst-Pizarro (slika 8). Svi kandidati i njima pripadajući dijagrami navedeni su u poglavlju 3, te diskutirani u poglavlju 4.

3. Rezultati

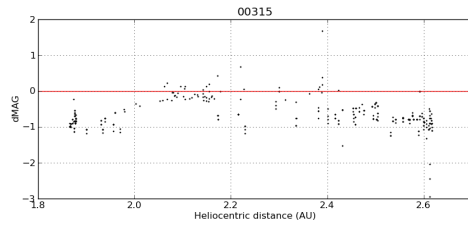
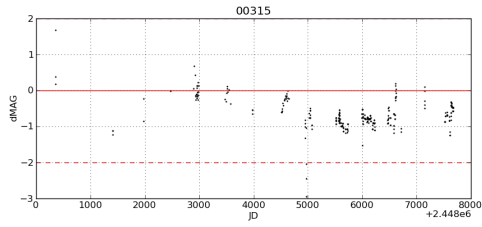
Pregledavanjem dijagrama pronađeno je šest objekata s naznakama moguće kometske aktivnosti. Objekti s mogućom naznakom kometske aktivnosti navedeni su u tablici 2 zajedno s parametrima njihovih orbita.

Tablica 2. Kandidati objekata s mogućim naznakama kometske aktivnosti

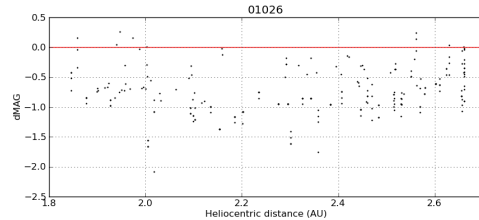
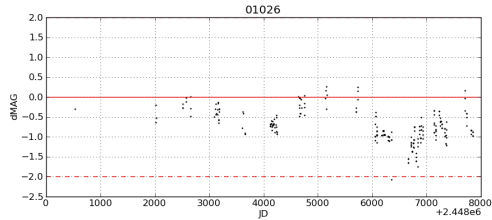
| Objekt | Velika poluos | Ekscentricitet | Inklinacija | Perihel |
|--------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|----------------|
| (315) Constantia | 2.241 a.j. | 0.168 | 2.427° | 1.866 a.j. |
| (1026) Ingrid | 2.255 a.j. | 0.181 | 5.398° | 1.846 a.j. |
| (3646) Aduatiques | 2.755 a.j. | 0.105 | 0.589° | 2.466 a.j. |
| 133P/(7968) Elst-Pizarro | 3.156 a.j. | 0.165 | 1.386° | 2.636 a.j. |
| (24684) 1990 EU4 | 2.319 a.j. | 0.080 | 3.943° | 2.133 a.j. |
| (35101) 1991 PL16 | 2.590 a.j. | 0.180 | 12.238° | 2.124 a.j. |

Među kandidatima se nalazi i objekt (7968) Elst-Pizzaro (slika 8), koji je ujedno poznat kao školski primjer skupine objekata kometa glavnog asteroidnog pojasa. Prisustvo (7968) Elst-Pizzara među gore navedenim kandidatima dobar je pokazatelj da opisana metoda potrage za kometima glavnog asteroidnog pojasa ima potencijala.

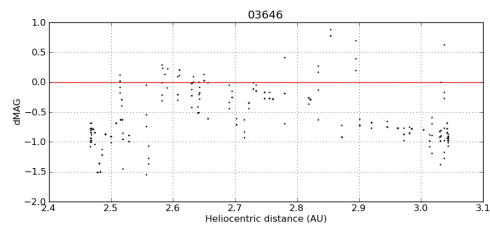
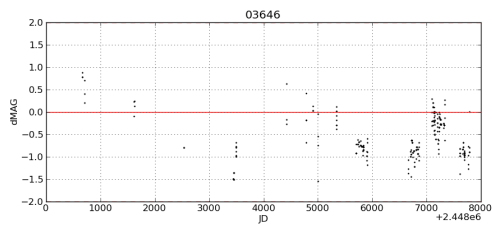
S ciljem provjere postoji li korelacija odstupanja od predviđenog sjaja i udaljenosti objekta od Sunca, naknadno su napravljeni dijagrami sjaja u odnosu na heliocentričnu udaljenost. Kod nekih objekata, kao npr. 3646 (slika 6, desno) i 35101 (slika 10, desno), korelacija je primjetna i slična onoj za objekt (7968) Elst-Pizzaro (slika 8, desno). Više o mogućim oblicima kometske aktivnosti može se pročitati u poglavlju 4.



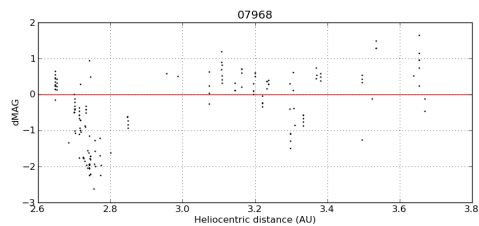
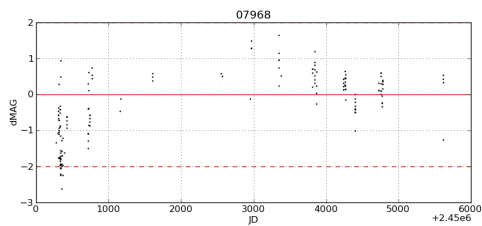
Slika 5. Dijagrami za objekt (315) Constantia



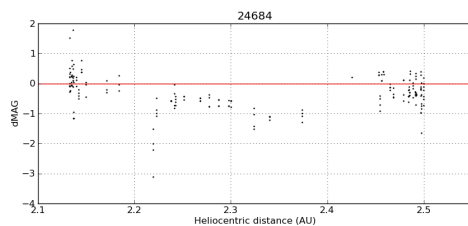
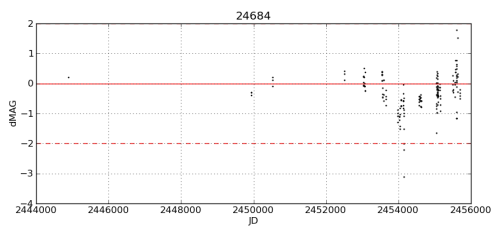
Slika 6. Dijagrami za objekt (1026) Ingrid



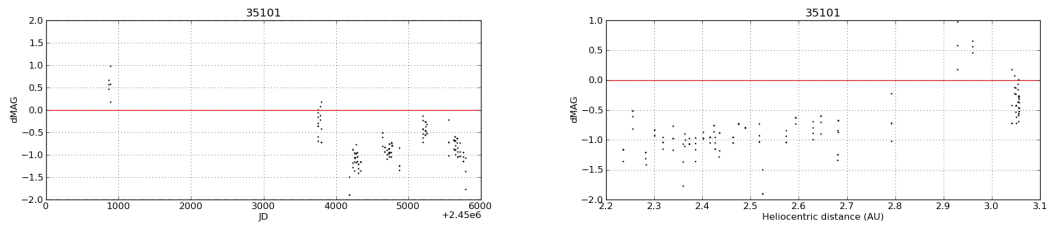
Slika 7. Dijagrami za objekt (3646) Aduatiques



Slika 8. Dijagrami za objekt 133P/(7968) Elst-Pizarro



Slika 9. Dijagrami za objekt (24684) 1990 EU4



Slika 10. Dijagrami za objekt (35101) 1991 PL16

Slike 5 do 10 Lijevo: Dijagram odstupanja sjaja od predviđenog prividnog sjaja ($dMAG$) u odnosu na vrijeme navedeno u Julijanskim danima (JD). Desno: Dijagram odstupanja sjaja od predviđenog prividnog sjaja ($dMAG$) u odnosu na heliocentričnu udaljenost navedenu u astronomskim jedinicama.

4. Diskusija

Primarni cilj ovog rada je potraga za objektima sličnim asteroidu (596) Scheila, s naglim kratkoročnim povišenjem prividnog sjaja, vjerojatno prouzrokovanim udarima manjih projektila u objekte.

Pregledavanjem ~3200 dMAG-JD dijagrama može se doći do zaključka da objekti imaju nedovoljno promatranja kako bi se zapazio porast sjaja koji se održava kroz samo nekoliko dana ili tjedana. Također, opisanim postupkom nisu pronađeni kratkotrajni „bljeskovi“. Jedan od nedostataka ove metode je preciznost fotometrijskih mjerenja u bazi podataka MPC-a. U ovom radu korištena su samo promatranja numeriranih malih tijela Sunčeva sustava promatrani vizualnim (zelenim) filtrom. Ovo uključuje promatranja s desecima različitih instrumenata u kombinaciji s različitim softwareskim paketima za obradu i različitim referentnim katalogima zvijezda za kalibraciju snimki, raštrkanih od profesionalnih „svemirskih straži“ koje se bave isključivo malim tijelima Sunčeva sustava, pa sve do astronoma amatera čija su promatranja manje precizna. Ako želimo ujediniti promatranja različitih instrumenata, razlike u kalibraciji i obradi snimki dovode do primjetnih pogrešaka koje za istraživanje ovakvog tipa nisu zanemariva. Zbog toga su postavljeni pragovi za filtriranje podataka opisani u poglavlju 2.3 morali biti relativno visoki.

Opisanim postupkom primijećena je neočekivana pojava koja se može svesti na nekakvu vrstu „slabe“ kometske aktivnosti.

Zapaženi su objekti koji konstantno, tijekom cijele opozicije, imaju negativno odstupanje u sjaju od očekivanoga. Ovo bi mogla biti naznaka da aktivnost nije izazvana naglim podražajima kao što su sudari, nego bi se mogla objasniti sporim procesima gubitka mase, kao što je sublimacija leda. U ovom slučaju otvara se još uvijek neodgovoreno pitanje količine leda na objektima glavnog asteroidnog pojasa, a otkrivanje ovakvih objekata, kod kojih kometska aktivnost nije odmah na prvi pogled uočljiva, mogla bi doprinijeti objašnjavanju procesa nastanka Sunčeva sustava ili porijekla vode na Zemlji.

Ovakvi oblici kometske aktivnosti do sada su ostajali nezapaženi jer objekti vjerojatno ne formiraju vizualno vidljiv rep nego samo rijetku komu koja blago povisi sjaj objekta za ~1-2 magnitude.

Naknadno izrađeni dijagrami odstupanja sjaja u ovisnosti s vremenom ukazuju na to da bi za tri od šest nepoznatih kandidata mogla postojati korelacija porasta sjaja s

heliocentričnom udaljenosti. Sličnu korelaciju pokazuje i poznati školski primjera kometa glavnog asteroidnog pojasa – 133P/(7968) Elst-Pizarro. Za ostale objekte trenutno nedostaje objašnjenje promatrane aktivnosti.

Detekcija kometske aktivnosti za objekt 133P/(7968) Elst-Pizarro upućuje na to da metoda ima potencijala, a njezina primjena će biti moguća na projektima koji će redovito vršiti astrometrijska i fotometrijska promatranja velikog broja malih tijela Sunčeva sustava, kao npr. Large Synoptic Survey Telescope (LSST) ili Global Astrometric Interferometer for Astrophysics (GAIA).

U svakom slučaju, valja pokušati potvrditi naznake kometske aktivnosti sakupljanjem novih promatranja pronađenih kandidata.

5. Zaključak

Motiviran sudarom asteroida (596) Scheila s nepoznatim objektom u ovom radu je provjereno mogu li se pronaći slični objekti pomoću baze podataka Centra za mala tijela Sunčeva sustava. Za izradu rada korištena je baza podataka svih numeriranih malih tijela Sunčeva sustava koja obuhvaća ~75 milijuna promatranja za ~300'000 objekata.

Metoda opisana u radu nije se pokazala korisnom u potrazi za objektima s naznakama kometske aktivnosti izazvane sudarima jer se pojedini objekti relativno rijetko promatraju.

Metodom je pronađeno 7 objekata s dugotrajnim odstupanjima u prividnom sjaju, koja je moguće objasniti „slabim“ tipom kometske aktivnosti. Među pronađenim objektima nalazi se i već poznati komet glavnog asteroidnog pojasa (7968) Elst-Pizzaro, što upućuje na to da se metoda može koristiti u svrhu detekcije kometske aktivnosti. Kometska aktivnost preostalih 6 pronađenih kandidata do sada vjerojatno nije zapažena jer se uglavnom očituje u promjeni sjaja, bez razvoja repa.

Slijedeći korak je u svakom slučaju sakupljanje promatranja s ciljem potvrde naznaka kometske aktivnosti kod pronađenih kandidata.

Opisana metoda mogla bi se primjenjivati za detekciju kometske aktivnosti pri projektima koji redovito vrše fotometrijska promatranja velikog broja malih tijela Sunčeva sustava, kao što su npr. LSST ili GAIA.

Zahvale

Zahvaljujem grupi za Sunčev sustav pod vodstvom dr. Jose Luis Ortiza s Instituta za Astrofiziku Andaluzija u Španjolskoj koji su mi kroz diskusiju i izmjenu ideja pružili potporu u realizaciji ovog rada.

Zahvaljujem Nicolas Morales Palermu koji me opskrbljuje snimkama pronađenih kandidata sa zvjezdarnice San Pedro de Atacama (MPC I16).

Zahvaljujem kolegici Mari Kozić na lekturi ovoga rada.

Popis literature

- [1] Capria, M. T., Marchi, S., De Sanctis, M. C., Coradini, A., Ammannito, E., 2012, *A&A*, 537, id.A71
- [2] Fernandez, J. A., Gallardo, T., & Brunini, A. 2002, *Icarus*, 159, 358
- [3] Hartmann, W. K., Tholen, D. J., & Cruikshank, D. P. 1987, *Icarus*, 69, 33
- [4] Jewitt, D. 2005, *AJ*, 129, 530
- [5] Jewitt, D., 2012, *AJ*, 143, Issue 3, article id. 66
- [6] Kosai, H. 1992, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 54, 237
- [7] Kresak, L. 1982, *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 33, 104
- [8] Levison, H. F., Terrell, D., Wiegert, P. A., Dones, L., & Duncan, M. J. 2006, *Icarus*, 182, 161
- [9] Whipple, F. L. 1950, *ApJ*, 111, 375
- [10] Conversion of Absolute Magnitude to Diameter, IAU MPC,
<http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Sizes.html>

Dodatak A

Tablica 3. Odnos apsolutne zvjezdane veličine (H) prema promjeru malog tijela Sunčeva sustava (izvor: IAU MPC [10])

| Apsolutna zvjezdana veličina (H) | Promjer |
|--------------------------------------|------------------|
| 3.0 | 670 km – 1490 km |
| 3.5 | 530 km – 1190 km |
| 4.0 | 420 km – 940 km |
| 4.5 | 330 km – 750 km |
| 5.0 | 270 km – 590 km |
| 5.5 | 210 km – 470 km |
| 6.0 | 170 km – 380 km |
| 6.5 | 130 km – 300 km |
| 7.0 | 110 km – 240 km |
| 7.5 | 85 km – 190 km |
| 8.0 | 65 km – 150 km |
| 8.5 | 50 km – 120 km |
| 9.0 | 40 km – 90 km |
| 9.5 | 35 km – 75 km |
| 10.0 | 25 km – 60 km |
| 10.5 | 20 km – 50 km |
| 11.0 | 15 km – 40 km |
| 11.5 | 13 km – 30 km |
| 12.0 | 11 km – 24 km |
| 12.5 | 8 km – 19 km |
| 13.0 | 7 km – 15 km |
| 13.5 | 5 km – 12 km |
| 14.0 | 4 km – 9 km |
| 14.5 | 3 km – 7 km |
| 15.0 | 3 km – 6 km |
| 15.5 | 2 km – 5 km |
| 16.0 | 2 km – 4 km |
| 16.5 | 1 km – 3 km |
| 17.0 | 1 km – 2 km |
| 17.5 | 1 km – 2 km |
| 18.0 | 670 m – 1500 m |
| 18.5 | 530 m – 1200 m |
| 19.0 | 420 m – 940 m |
| 19.5 | 330 m – 750 m |
| 20.0 | 270 m – 590 m |
| 20.5 | 210 m – 470 m |
| 21.0 | 170 m – 380 m |
| 21.5 | 130 m – 300 m |
| 22.0 | 110 m – 240 m |
| 22.5 | 85 m – 190 m |
| 23.0 | 65 m – 150 m |
| 23.5 | 50 m – 120 m |
| 24.0 | 40 m – 95 m |
| 24.5 | 35 m – 75 m |
| 25.0 | 25 m – 60 m |
| 25.5 | 20 m – 50 m |
| 26.0 | 17 m – 37 m |
| 26.5 | 13 m – 30 m |
| 27.0 | 11 m – 24 m |
| 27.5 | 8 m – 19 m |
| 28.0 | 7 m – 15 m |
| 28.5 | 5 m – 12 m |
| 29.0 | 4 m – 9 m |
| 29.5 | 3 m – 7 m |
| 30.0 | 3 m – 6 m |