

## Evolucija meteorskih rojeva Halejeve komete

---

*Dosadašnja istraživanja rojeva Halejeve komete ukazuju na periodične promene ZHR-a, kao i promene trenutaka njihovih maksimuma u različitim prolazima, ali na osnovu posmatračkih podataka nije konstatovana periodičnost u separaciji, tj. distribuciji čestica po masi. U cilju utvrđivanja osobina ovih rojeva napisana je simulacija njihove evolucije. Evolucija rojeva čestica izbačenih iz jezgra komete je modelirana linearnim simplektičkim integratorom, u koji je uključen Poynting-Robertsonov efekat i pritisak zračenja. Korišćeni model nije dovoljno precizan za detaljnu analizu separacije po masi, ali omogućava analiziranje opštih karakteristika struje i uticaja gustine komete i mase meteoroida na njeno formiranje. Utvrđeno je postojanje separacije po masi, na koju utiču masa i gustina čestica, dok uticaj ovih veličina na disperziju čvorova nije značajan.*

---

### Uvod

Meteorski rojevi koji potiču od Halejeve komete su Eta akvaridi (ETA – početak maja) i Orionidi (ORI – sredina oktobra). Na osnovu vizuelnih posmatranja, konstatovana je periodičnost u aktivnosti ovih rojeva sa periodom od približno 12 godina koji je samerljiv sa revolucijom Jupitera (Dubietis 2003), ali periodičnost u populacionom indeksu (koja bi ukazala na periodičnost u separaciji po masi meteorskih čestica) nije utvrđena. Pri tome treba napomenuti da analizirani posmatrački materijal obuhvata nepune tri decenije, što je nedovoljno da bi se uočile finije pravilnosti. Prisustvo separacije, usled koje sjajni i manje sjajni meteori imaju različite maksimume aktivnosti, može se uočiti i na osnovu analize vizuelnih podataka (Marjanović i Đoković 2002).

Zbog promena orbite komete, čestice koje kometa otpušta pri različitim prolascima nemaju potpuno iste orbite. To dovodi do formiranja filamenata, koji preplitanjem čine strukturu roja komplikovanom. Taj scenario formiranja strukture meteorske struje se naziva *shell model* (Hajduk & McIntoch 1983). Rotacija komete i različiti položaji aktivnih regiona na

---

*Milan Darijević  
(1987), Beograd,  
Vladetina 18/48,  
učenik 4. razreda Pete  
beogradske gimnazije*

*Vladisav Jelisavčić  
(1987), Obrenovac,  
Vojvode Putnika 38/7,  
učenik 4. razreda  
Obrenovačke gimnazije*

*Natalija Jovanović  
(1988), Valjevo,  
Birčaninova 69,  
učenica 4. razreda  
Matematičke gimnazije  
u Beogradu*

*MENTOR:  
Mihailo Čubrović,  
student Fizičkog  
fakulteta u Beogradu*

njoj, dovode do različitih oskulatornih elemenata čestica u trenutku odvajanja od komete. Ipak, te razlike nisu velike i, statistički gledano, čestice imaju slične početne oskulatorne elemente kao i kometa u datom trenutku.

Gravitacioni uticaji Jupitera i Saturna su najznačajniji za promene orbita čestica struje. Uticaj Jupitera je značajniji, kako zbog veće mase, tako i zbog toga što meteorska struja prilazi bliže orbiti Jupitera nego Saturna. Tokom jedne svoje revolucije, Jupiter se dva puta približi meteorskoj struji. Kako se i čestice kreću, Jupiter u svakom prolasku utiče na drugu grupu čestica (McIntoch & Jones 1988).

Meteorske rojeve ETA i ORI odlikuje umerena zenitna časovna frekvencija (Zenith Hour Rate – ZHR), 15-30 za Orionide i 40-80 za Eta Akvaride, kao i velika brzina meteora. Ipak, jasno je uočljiv maksimum aktivnosti za oba roja. Pored glavnog maksimuma, postoje i dva sporedna, koja su uočena radio posmatranjem ([www.imo.net](http://www.imo.net)).

Sjaj meteora u principu zavisi od mase, hemijskog sastava, brzine čestice i upadnog ugla. Međutim, čestice jedne struje su istog porekla i sličnih orbitalnih elemenata, pa razlika u sjaju pojedinih meteora u struji praktično potiče samo od mase čestice. Dakle, u okviru jednog roja, moguće je utvrditi odnos masa čestica na osnovu razlika u sjaju. Ako u okviru struje postoji separacija, onda se maksimumi za manje i veće čestice, odnosno sjajnije i manje sjajne meteore, vremenski razlikuju.

Modifikacijom metoda kojeg je koristio Audrius Dubietis (2003), prvo smo pokušali da analizom raspoloživih podataka iz IMO VMDB baze ([www.imo.net](http://www.imo.net)) utvrdimo postojanje periodičnosti između maksimuma aktivnosti sitnijih i krupnijih meteorskih čestica na osnovu vizuelnih posmatranja ETA i ORI za proteklih 16 godina. Međutim, ispostavilo se da je taj interval suviše kratak da bi se uočio bilo kakav period srazmeran periodu revolucije Jupitera. Moguće je da periodičnost u separaciji postoji, ali da nije uočljiva sa Zemlje. To upućuje na numeričko modeliranje kao najpogodniji pristup za analizu strukture rojeva Halejeve komete, pa time i separacije čestica po masama. Ideja je da se evolucija roja modelira integracijom trajektorija velikog broja čestica i tako ispita promena udaljenosti čvorova grupa sitnih i krupnih čestica. Ovo je potrebno da bi se utvrdilo da li se razlika u vremenu njihove aktivnosti periodično menja.

## Model i simulacija

Za integraciju je korišćen simplektički integrator (Holman i Wisdom 1991) sa modifikacijama koje su predložili Saha i Tremaine (1994). Osnovna ideja ovog algoritma je podela svakog vremenskog koraka na dva nezavisna: jedan u kome se tela kreću po ne-perturbovanim Keplerovim orbitama i drugi u kome se određuje gravitacioni uticaj planeta i koriguje impuls svakog tela pri čemu koordinate ostaju nepromenjene. To se for-

malno može predstaviti kao podela hamiltonijana sistema na integrabilni (Keplerov) i perturbativni deo:

$$H = H_{\text{Kep}} + H_{\text{pert}} \quad (1)$$

Simulacija je podeljena na dva dela: prvo se izvršava integracija putanje komete, a zatim integracija čestica koje kometa izbaci. Vremenski interval rada oba dela je isti, kao i vremenski korak, koji iznosi 0.1 dan. Kôd oba integratora je napisan na programskom jeziku C.

Rezultat prvog dela simulacije su orbita komete, njeni čvorovi i početni podaci o česticama koje kometa otpusti. U ovom modelu, verovatnoća izbacivanja čestica je zadata funkcijom koja opisuje sublimaciju vodenog snega, uz aproksimaciju da su sneg i prašina dobro izmešani. Ova verovatnoća zavisi samo od rastojanja od Sunca (Marsden *et al.* 1972):

$$Z = Z_0 \cdot g(r) \quad (2)$$

$$g(r) = \alpha \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-m} \cdot \left[\left(\frac{r}{r_0}\right)^n + 1\right]^{-k} \quad (3)$$

gde je  $Z$  fluks isparavanja,  $Z_0 = 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $r_0 = 2.808 \text{ AU}$ , dok bezdimenzioni parametri iznose  $m = 2.15$ ,  $k = 4.6142$ ,  $n = 5.093$ ,  $\alpha = 0.1113$ . Jednačina (3) opisuje slučajeve male osvetljenosti. Konstante  $Z_0$  i  $\alpha$  su odabrane tako da za jedinično heliocentrično rastojanje sublimacija kometskog snega iznosi  $Z_0$ .

Integracijom su dobijeni inicijalni položaji čestica za koje je uzeto da se poklapaju sa položajem komete u trenutku njihovog izbacivanja.

Intenzitet početne brzine čestice u odnosu na kometu je računat kao u Whipple-ovom modelu:

$$V_e = 656 R_c^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \frac{1}{n \cdot b \cdot \rho \cdot r \cdot b^{\frac{3}{4}}} - 0.013 \cdot R_c \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

gde je  $V_e$  početna brzina čestica u cm/s,  $R_c$  radijus komete u kilometrima,  $1/n$  je količina Sunčevog zračenja za sublimaciju leda ( $n = 1$ , kad je prečnik komete 1 km, a udaljenost od Sunca 1 AU),  $r$  je udaljenost komete od Sunca u AU,  $\rho$  je gustina u  $\text{g/cm}^3$ , a  $b$  poluprečnik čestice u cm (Whipple 1951). U našem modelu, jezgro komete je sfernog oblika, a verovatnoća izbacivanja čestice je ista za svaku tačku osvetljenog dela jezgra. Vektori početnih brzina čestica su normalni na površinu komete.

Čestice su podeljene u 4 klase po masama:  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$ ,  $10^{-6}$  i  $10^{-8}$  kg. Raspon masa nije kontinualan, što pojednostavljuje definisanje jasne granice između sitnih i krupnih čestica i analizu problema separacije po masi.

Takav pristup olakšava detekciju ovog fenomena, iako odstupa od realnih osobina meteorske struje. Gustina čestica je varirana između 1.2 i 2.0 g/cm<sup>3</sup>. Albedo čestica i komete su jednaki, 0.03, što je uobičajena vrednost za hondritnu prašinu.

U drugom delu je vršena integracija trajektorija čestica. Vreme integracije trajektorije svake čestice je određeno trenutkom izbacivanja te čestice i krajem rada simulacije. Izlazni podaci ovog dela simulacije su orbite čestica. U simulaciji je ostavljena mogućnost za integraciju samo određene grupe čestica, kako bi se dobili precizniji podaci za čestice odgovarajuće starosti, tako da je moguće u integraciju pustiti veći broj čestica iz datog intervala, a ostale zanemariti.

Pored gravitacionog uticaja svih planeta Sunčevog sistema, prilikom integracije orbite komete uračunati su efekti koji potiču od izbacivanja materijala sa komete tako što je vršena korekcija velike poluose (Sitarski 1988).

Prilikom integracije čestica uračunat je i pritisak Sunčevog zračenja, kao i Poynting-Robertsonov efekat u nerelativističkoj aproksimaciji (Klačka 2000):

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\frac{\mu}{r^2}\mathbf{S} + \beta\frac{\mu}{r}\left[\left(1 - \frac{\mathbf{v}\cdot\mathbf{S}}{c}\right)\cdot\mathbf{S} - \frac{\mathbf{v}}{c}\right] \quad (5)$$

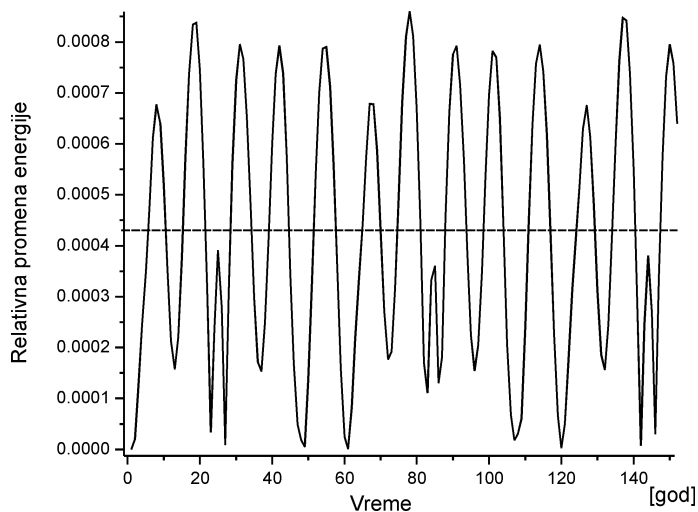
gde je  $\mathbf{v}$  vektor brzine,  $\mu$  proizvod gravitacione konstante i mase tela,  $r$  udaljenost čestice u odnosu na Sunce,  $\mathbf{S}$  površina čestice,  $c$  brzina svetlosti,  $\beta$  odnos gravitacione sile i pristiska svetlosti. Zanemarivanje relativističkih efekata može se smatrati opravdanim na nivou preciznosti naših integracija, kao i zanemarivanje efekta Yarkovskog koji je, za submilimetarske čestice, zanemarljiv u odnosu na Poynting-Robertsonov efekat.

Zbog diskretnosti numeričke simulacije, čvor tj. presečna tačka orbite čestice i ravni ekliptike, dobija se interpolacijom dva položaja čestice najbliža ekliptičkoj ravni.

Čestice koje bi tokom integracije ušle u Hilovu sferu neke od planeta nisu izuzimane iz dalje integracije, zato što je vremenski korak u simulaciji veći od minimalnog vremena potrebnog da čestica prođe kroz Hilovu sferu neke planete.

U cilju procene numeričke greške, testirano je održanje energije u integraciji. Uzeta je u obzir ukupna energija planeta, jer se kometa i čestice tretiraju kao objekti zanemarljive mase. Kako simplektički integrator identički održava energiju do na grešku zaokruživanja (roundoff grešku), detektovane varijacije energije (oko 0.04 procenta) predstavljaju procenu ove greške (slika 1).

Prema tome, može se tvrditi da glavni izvor nepreciznosti integracije jeste linearnost integratora, tj. odsecanje članova višeg reda u jednačinama kretanja, dok greška zaokruživanja nije značajna.



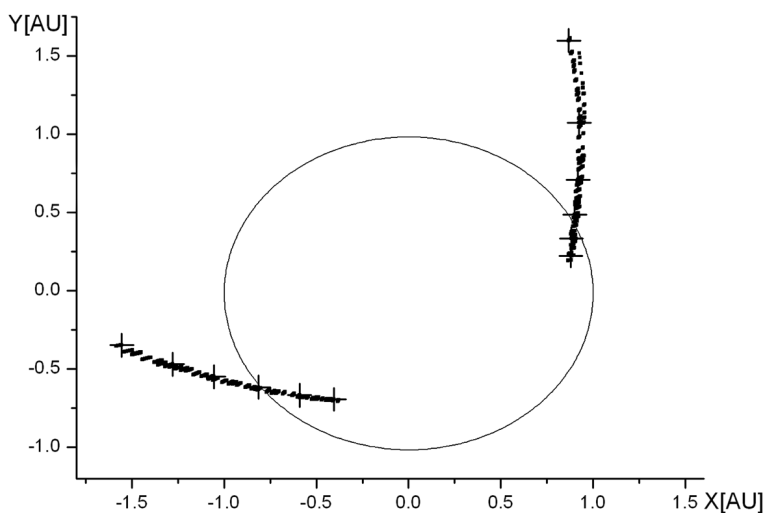
Slika 1.  
Relativna promena energije planeta u toku integracije.

Figure 1.  
Relative energy change during the integration.

## Rezultati i diskusija

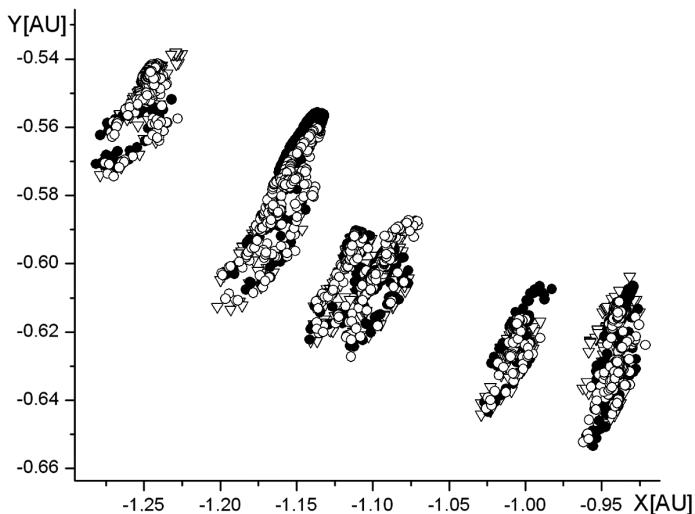
Za početne podatke usvojeni su orbitalni elementi komete iz epohe 2. 6. 1458. god. pre nove ere (Sitarski 1988).

Startno vreme rada integratora je 29. 05. 1458 pre nove ere. Kometa je do 2020. godine napravila približno 45 revolucija, što znači da je srednji period komete 77.3 godina. Kometa je u ovom intervalu isпустиła približno 34000 čestica, prosečno 750 po prolasku, raspoređenih u 4 klase po masama.



Slika 2.  
Prikaz čvorova komete i čestica u ekliptičkoj ravni u odnosu na orbitu Zemlje. Čvorovi komete su krstovi, a čestica tačke. Ose na grafiku su kartezijanske koordinate u ekliptičkoj ravni.

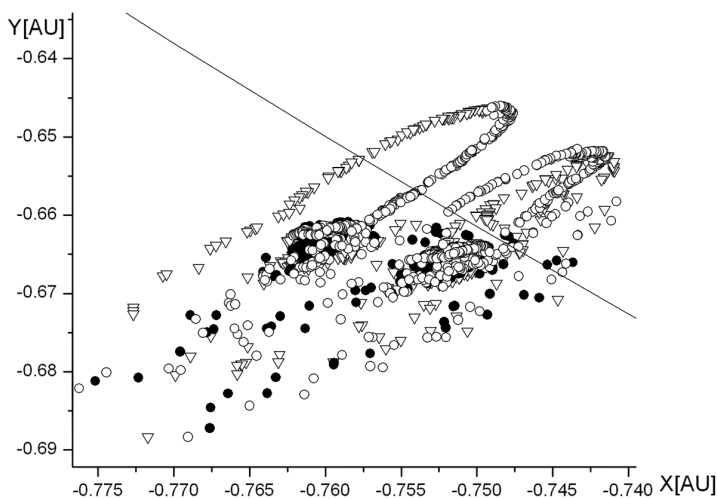
Figure 2.  
Comet nodes (crosses) and particle nodes (dots) in the ecliptic plane. Ellipse is the Earth's orbit. The axes of the figure are Cartesian coordinates in the ecliptic plane.



Slika 3.  
Uvećani prikaz uzlaznih čvorova čestica koje su nastale tokom 5 prolazaka komete. Čvorovi prikazani punim krugovima su iz perioda 1960-1980 godine, praznim krugovima 1980-2000, a trouglovima iz perioda 2000-2020. Ose na grafiku su kartezijanske koordinate u ekliptičkoj ravni.

Figure 3.  
Magnified view of the region containing the particle's ascending nodes from five apparitions of the comet. Filled circles represent the nodes from the interval between 1960 and 1980, blank circles those from 1980-2000 and triangles those from 2000-2020.

Čestice nastale u 19, 20. i 21. prolasku su najzastupljenije u roju Eta akvarida, a čestice nastale u 14. i 15. prolasku komete čine glavni deo strukture današnjih Orionida (slika 4). Promena položaja čvorova čestica se uočava na slikama 3 i 4, ali njena periodičnost nije ispitana, zbog kratkog vremenskog intervala integracije. Ova analiza je sprovedena za čestice svih zastupljenih klasa mase. Primetno je da postoje nejednaki razmaci između grupa čvorova, koji su posledica pre svega gravitacionih perturbacija orbite komete, u trenucima izbacivanja tih čestica. Isti fenomen je uočljiv kod čvorova čestica nastalih u jednom prolasku komete (slika 5), ali je on posledica negravitacionih preturbacija čestica različite mase (jer negravitacione preturbacije, za razliku od gravitacionih, zavise od mase

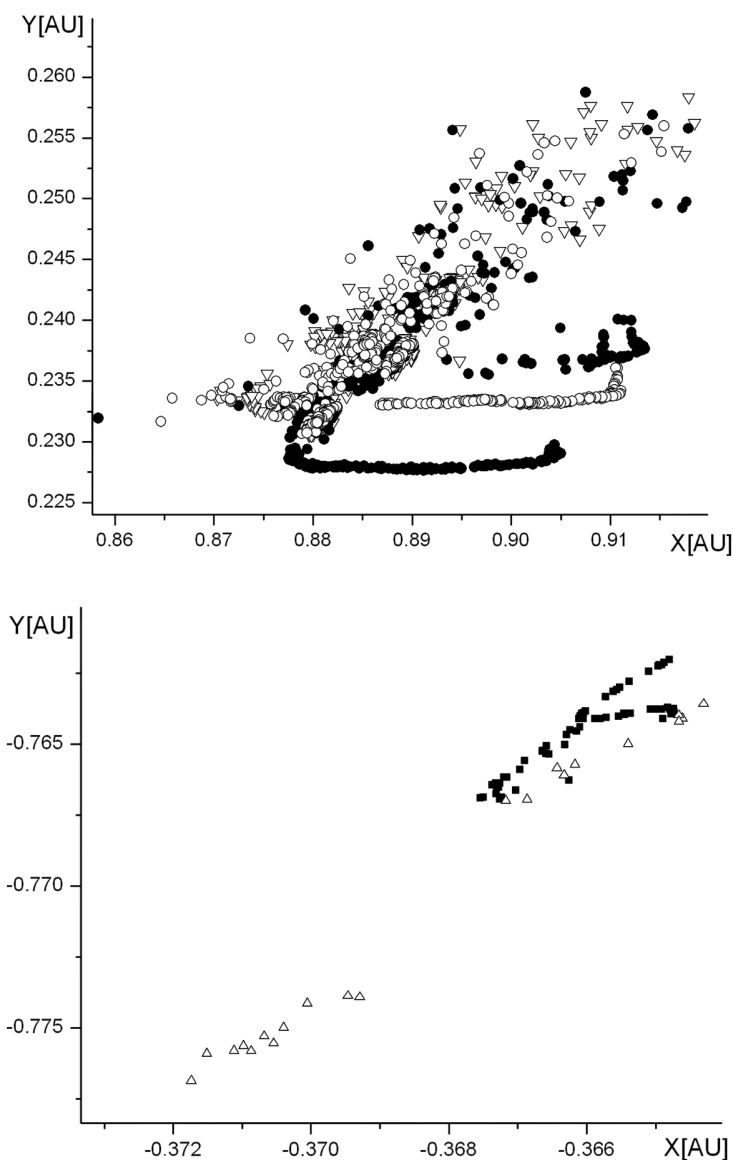


Slika 4.  
Čvorovi čestica nastalih u jednom prolasku Halejeve komete koji odgovaraju roju Orionida. Zemljina putanja je linija. Legenda je ista kao za sliku 3.

Figure 4.  
Nodes of Orionide particles from a single apparition of the Halley's comet. The Earth's path is represented with a line, the legend is the same as for Figure 3.

čestica). Uočljivo je da čvorovi nastali u različitim periodima, daju različito vreme najveće aktivnosti roja (slika 4). Na istoj slici se vidi da se najgušći deo struje nalazi daleko od Zemljine putanje.

Čvorovi čestica iz pretposlednjeg prolaska komete (slika 5, gore) su jasno podeljeni u dve grupe, od kojih jednu čine najsitnije čestice, a drugu najkrupnije. Sa druge strane, postoji grupa starijih čestica, čiji su čvorovi izmešani i ne postoje jasne granice između grupa čestica različitih masa (slika 5, dole). Jasno je da je jedina razlika u ova dva slučaja dužina pe-



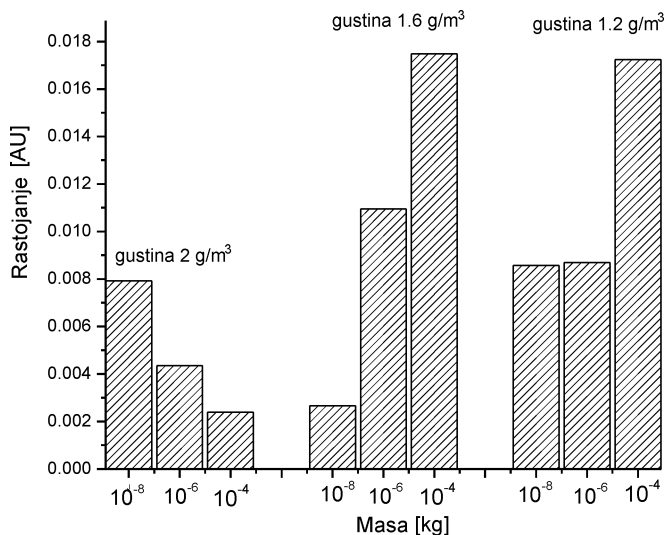
Slika 5.  
Primeri čvorova čestica različitih masa iz dva prolaska komete u periodu od 2000 do 2020 godine. Gore, čvorovi čestica nastalih u prvom, drugom i trećem prolasku komete. Dole, čvorovi čestica iz pretposlednjeg prolaska komete. Trouglovi predstavljaju čvorove čestica mase  $10^{-8}$ , kvadrati  $10^{-6}$  prazni krugovi  $10^{-4}$ , a puni krugovi  $10^{-3}$  kg.

Figure 5.  
Nodes of particles of various masses from two apparitions of Halley's comet between the years 2000 and 2020. Above are the particle nodes from the first, second and third apparition. Below are the nodes that appeared during the (n-1)th apparition of the comet (out of n apparitions). Triangles, squares, blank circles and filled circles represent the masses of  $10^{-8}$ ,  $10^{-6}$ ,  $10^{-4}$  and  $10^{-3}$  kg, respectively.

rioda, tokom kojeg su dve grupe čestica bile izložene istim uticajima (gravitacionim i negravitacionim). Iz toga sledi da je gravitacionim efektima potrebno više vremena da izmene strukturu struje, nego negravitacionim.

U cilju ispitivanja osobina meteorske stuje i nalaženja početnih uslova, urađena je analiza raspršivanja čvorova u zavisnosti od mase i gustine čestica. Ove dve veličine utiču na brzinu kojom čestica napušta jezgro komete, kao i na prečnik čestice, što je jedan od parametara pri izračunavanju negravitacionih efekata.

Integracija je vršena tri puta, sa vrednostima za gustinu komete i čestica 1.2, 1.6 i 2.0 g/cm<sup>3</sup>. Analizirano je približno 6000 čestica, raspodeljenih u 3 klase masa: 10<sup>-4</sup>, 10<sup>-6</sup>, i 10<sup>-8</sup> kg. Iz ovih podataka dobijene su tačke težišta čvorova čestica i to svih čestica zajedno i za svaku klasu mase pojedinačno. Težišta čvorova čestica (dalje: težišta) su dobijena kao srednje vrednosti njihovih kartezijanskih koordinata (x, y) u ekliptičkoj ravni. Zatim su izračunata odstupanja težišta svake klase od zajedničkog težišta svih čestica. Rezultat je prikazan na slici 6.



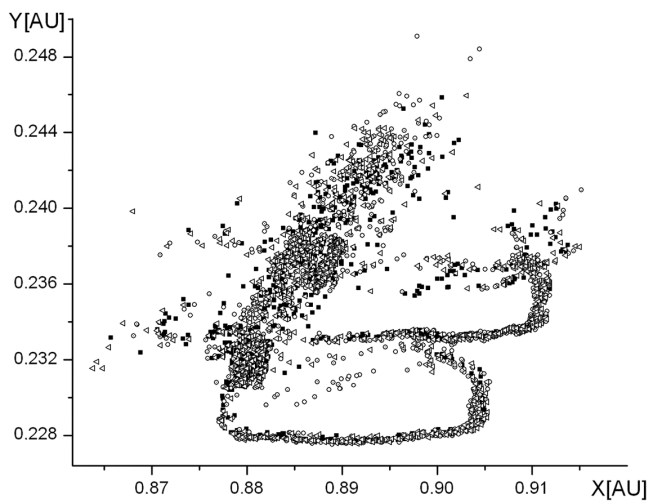
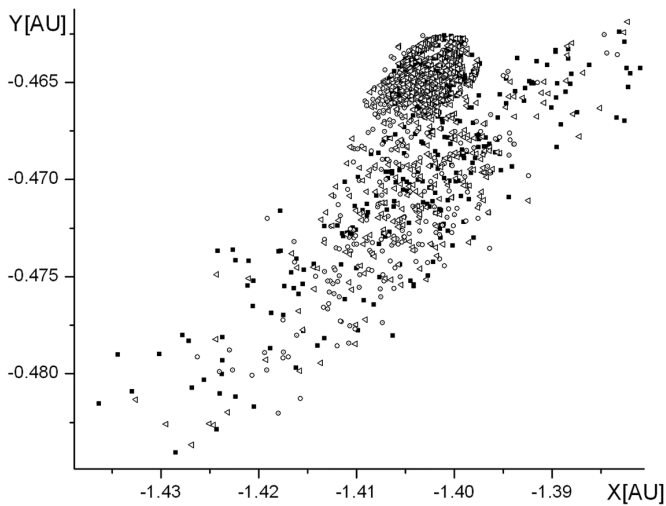
Slika 6. Zavisnost rastojanja težišta jedne klase čestica od težišta svih čestica zajedno u zavisnosti od mase, za tri različite gustine. U obzir su uzete čestice nastale u istom prolasku komete.

Figure 6. Mass segregation for three different densities of the meteoritic particles. Segregation is quantified as the distance of the center of gravity of the particle from one mass class from the common center of gravity of all the particles. Only the particles from one and the same apparition are taken into account.

Na slici se odmah uočava da čestice najveće gustine (2.0 g/cm<sup>3</sup>) imaju utoliko veće raspanje težišta ukoliko im je masa manja. Kod preostale dve klase gustine, ova zavisnost je obrnuta.

Urađena je i analiza rasipanja čvorova za čestice različite gustine. Na slici 7 je data raspodela čvorova u ravni ekliptike, koja pokazuje da čestice različitih gustina pokazuju slično ponašanje. Čvorovi na slici 7 odgovaraju starijim česticama, kod kojih je separacija slabo izražena, što je posledica gravitacionih efekata. Iz ovoga proizilazi da se separacija po masi i gustini vremenom gubi, pa se može očekivati da nije opservabilna kod starijih čestica.





Slika 7.  
 Čvorovi čestica različite mase raspoređeni u tri grupe po gustini (gore ETA, dole ORI). Krugovima su predstavljene čestice gustine 1.2, trouglovima čestice gustine 1.6, a kvadratima (crno) 2.0 g/cm<sup>3</sup>.

Figure 7.  
 Nodes of particles with different masses and densities (above ETA, below ORI). Circles, triangles and black squares correspond to densities of 1.2, 1.6 and 2.0 g/cm<sup>3</sup>.

## Zaključak

Najvažniji zaključak koji sledi iz naših rezultata je definitivno utvrđena egzistencija separacije. Kvantitativna predviđanja variraju sa parametrima modela, ali se može pretpostaviti da bi za sve njihove vrednosti došlo do separacije. Takođe je utvrđeno da gravitacioni efekti mešaju čestice različite mase. Zato ovim metodom nije moguće utvrditi uticaj Jupitera (i drugih dugoperiodičnih faktora) na meteorsku struju.

Uočljivo je veliko rastojanje čvorova čestica nastalih u različitim prolascima, što je posledica odabranih početnih uslova. Iz toga sledi da

početni položaji čestica imaju veći uticaj na njihovu putanju nego kasnije perturbacije, jer u modelu gotovo nigde nema mešanja čestica iz različitih prolazaka komete. Utvrđeno je da korišćeni model izbacivanja čestica utiče na oblik meteorske struje, ali nije pokazano da promenom početnih parametara (mase i gustine komete, čestica) dolazi do mešanja filamenata struje. Takođe se može zaključiti da brzine izbacivanja čestica treba da budu nekoliko puta veće nego što ovaj model daje, da bi došlo do mešanja filamenata. To neki noviji modeli i uzimaju u obzir (Vaubaillon *et al.* 2005).

Konačno, ustanovljeno je da postoji kritična vrednost gustine, između 1.6 i 2.0 g/cm<sup>3</sup>. Za gustine veće od kritične rasipanje jeste opadajuća funkcija mase. Za gustine manje od kritične vrednosti, slučaj je obrnut. Ukoliko se pokaže da je ovo opservabilni efekat, bilo bi moguće proceniti gustinu čestica na osnovu raspodele posmatranih meteora po masi (sjaju).

Dobijeni rezultati su nastali integracijom približno 34000 čestica, što nije dovoljan uzorak da bi se izvršila analiza periodičnosti separacije čestica po masi u okviru roja. Utvrđeno je da se numerička greška smanjuje sa smanjenjem vremenskog koraka, do vrednosti od dvadesetog dela dana. Posledice numeričke greške su neprecizno određivanje trenutka prolaska komete kroz perihel, srednjeg perioda komete i nepoklapanje trenutka maksimuma aktivnosti rojeva sa posmatrački utvrđenim trenucima.

U daljem radu će biti određeni i korišćeni realističniji modeli Halejeve komete i tačniji model za računanje početnih brzina čestica. Takođe treba realizovati izuzimanje čestica koje uđu u Hilovu sferu neke od planeta iz dalje integracije. Ova poboljšanja treba da omoguću detaljniju analizu separacije po masi kao i testiranje postojećih modela izbacivanja čestica i njihovog uticaja na formiranje struje.

**Zahvalnost.** Zahvaljujemo se na velikoj pomoći Branislavu Saviću, mentoru Mihailu Čubroviću, Igoru Smoliću i ostalim saradnicima programa astronomije u Istraživačkoj Stanici Petnica, posebno Nikoli Božiću, vodi ovog programa. Svojim savetima su pomogli i Peter Jenniskenes (JPL, NASA) i Galina Ryabova (Tomsk University). Zahvaljujemo se Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na ustupljenom procesorskom vremenu.

---

## Literatura

- Dubietis A. 2003. Long-term activity of meteor showers from Comet 1P/Halley, *WGN, the Journal of IMO*, **31** (2): 43.
- Hajduk, B.A McIntosh, 1983. Comet Halley meteor stream: a new model. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **205**: 931.
- Klačka J., Williams I. P. 2002. The Poynting-Robertson effect and relevance of radiation force to meteoroid streams, ISBN 92-9092-810-7,

141–144. Dostupno na [http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article\\_query](http://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query)

- Marjanović A., doković N. 2002. Separacija čestica u meteorskim rojevima. *Petičke sveske*, **54**: 42.
- Marsden B. G., Sekanina Z., Yeomans D. K. 1972. Comets and nongravitational forces V. *Astronomical Journal*, **78**: 211.
- Mcintosh B. A., Jones J. 1988. The Halley comet meteor stream: numerical modelling of its dynamic evolution. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **235**: 673.
- Saha P., Tremaine S, 1994. Long-term planetary integration with individual time steps. *Astronomical Journal*, **108**: 1962.
- Sitarski G. 1988. On the nongravitational motion of Comet P/Halley. *Acta Astronomica*, **38**: 253.
- Vauballion J., Colas F., Jorda L. 2005. A new method to predict meteor showers. *Astronomy & Astrophysics*, **439**: 751.
- Whipple F. L. 1951. A Comet Model. II. Physical Relations for Comets and Meteors. *Astrophysical Journal*, **113**: 464.
- Wisdom J., Holman M, 1991. Symplectic maps for the n-body problem, *Astronomical Journal*, **102**: 1528.

---

*Milan Darijević, Vladisav Jelisavčić and Natalija Jovanović*

## Evolution of Halley Comet Meteor Showers

In this paper we give a crude picture of the structure and evolution of the Halley comet meteor showers, obtained from a numerical simulation. The basic motivation of our work is the recently established evidence for the mass segregation and periodic ZHR variations in these showers. We use a linear mixed-variable symplectic integrator corrected for the radiation pressure and the Poynting-Robertson drag. We find our model is not accurate enough to allow a detailed analysis of the segregation, but we give definite evidence for the existence of the effect. The positions of nodes of the meteoroid particles depend critically upon their mass and density. The dispersion of nodes is, however, insensitive to these parameters and remains almost constant in the whole parameter space. We conclude that, aside from the numerical accuracy of the integrator, our model is not capable to reproduce the periodicity of the mass segregation, and that more refined models are necessary to shed more light on this issue.

