

## Numerički model evolucije meteorskog roja Geminidi

---

*Izvršena je numerička integracija meteoroidskih čestica sa početnim uslovima koji odgovaraju orbitalnim elementima asteroida Phaeton, da bi se ispitala dinamička evolucija nastalog meteorskog roja. Analiza dobijenih rezultata daje mogućnost da se proceni u kojoj meri je hipoteza o Phaetonu kao roditeljskom telu Geminida saglasna sa posmatranim karakteristikama ovog meteorskog roja.*

---

### Uvod

Geminidi su meteorski roj sa maksimumom aktivnosti 14/15. decembra. Do sada nije pouzdano utvrđeno njihovo poreklo, a jedna od hipoteza je da su nastali od Near Earth asteroida Phaeton 3200 (Whipple 1983). U ovom radu izvršena je numerička integracija meteoroidskih čestica sa početnim uslovima koji odgovaraju orbitalnim elementima asteroida Phaeton, sa ciljem ispitivanja dinamičke evolucije nastalog meteorskog roja u unutrašnjem delu Sunčevog sistema. Analiza dobijenih rezultata daje mogućnost da se proceni u kojoj meri je hipoteza o Phaetonu kao roditeljskom telu saglasna sa posmatranim karakteristikama roja.

### Metod integracije

Za integraciju je korišćen simplektički integrator (Wisdom & Holman 1991) sa modifikacijama predloženim u Saha & Tremaine (1984). Suština ovog algoritma sastoji se u podeli svakog vremenskog koraka na dva dela: u prvom se računaju gravitacioni uticaji planeta i koriguje impuls svakog tela, dok pritom koordinate ostaju nepromenjene, a u dru-

gom se tela kreću po neperturbovanim (Keplerovim) orbitama. Ovakav integrator se formalno može predstaviti kao preslikavanje hamiltonijana sistema na simplektičku diskretnu mapu, koja odvaja integrabilni (Keplerov) i neintegrabilni deo:

$$H \rightarrow \bar{H}_{\text{Kep}} + \bar{H}_{\text{pert}}$$

Pri tome crta označava da se, sa desne strane jednačine, tj. u integratoru, radi o (diskretnoj) aproksimaciji hamiltonijana sistema.

### Dinamički model

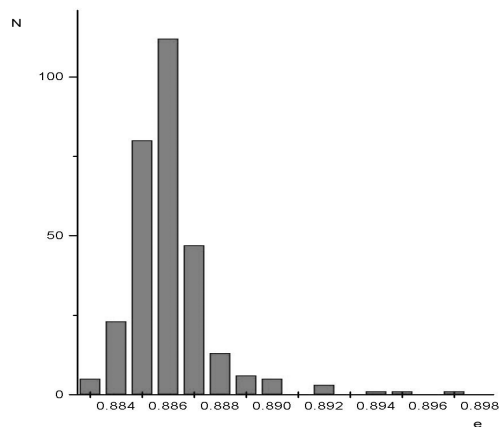
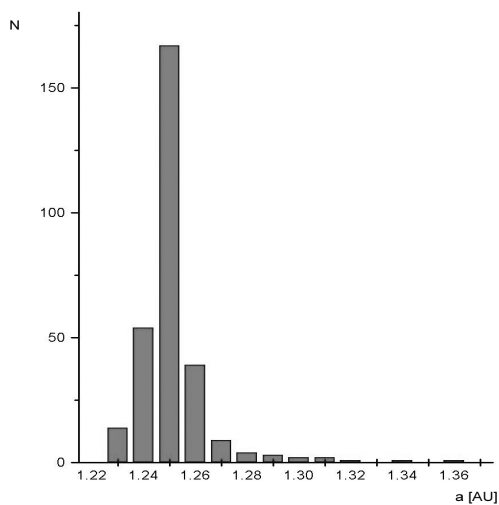
Uračunati su gravitacioni efekti prvih pet planeta Sunčevog sistema (od Merkura do Jupitera). Takođe, uzet je u obzir i pritisak Sunčevog vetra, kao i efekat Poynting-Robertson-a (PR) u nerelativističkoj aproksimaciji (Klačka 2000). Zanemarivanje relativističkih efekata može se smatrati opravdanim na nivou preciznosti naših integracija, kao i zanemarivanje efekta Yarkovskog koji je, za submilimetarske čestice, zanemarljiv u odnosu na Poynting-Robertsonov efekat. Za početne vrednosti orbitalnih elemenata meteoroida usvojeni su orbitalni elementi asteroida Phaeton za 1. januar 2000. (preuzeto iz Ryabova 2005). Integraljen je skup od 1000 probnih čestica, inicijalno ravnomerno raspoređenih po orbiti Phaetona (što za početne poluose i ekscentricitet daje  $a = 1.271$  AU i  $e = 0.890$ ), a za vremenski korak je uzeta vrednost stotog dela njegovog orbitalnog perioda (približno pola dana). Ukupno vreme integracije je 300 godina. Pretpostavljeno je da se odvajanje meteoroidskih čestica vrši bez početne brzine u odnosu na asteroid. Za albedo čestica uzeta je vrednost (albedo Phaetona, *ibid.*), a za gustinu  $2 \text{ g/cm}^3$ . Izvršene su dve različite integracije: u prvoj je uzeta uniformna raspodela masa, a u drugoj uniformna raspodela poluprečnika meteoroida; u oba slučaja čestice imaju masu u intervalu od  $10^{-12}$  kg do  $10^{-6}$  kg. Čestice koje bi ušle u Hill-ov radijus Zemlje isključivane su iz dalje integracije. To su one čestice koje bi sa Zemlje bile opažene kao meteori.

---

*Vladislav Jelisavčić (1987), Obrenovac, Vojvode Putnika 38/7, učenik 4. razreda Gimnazije u Obrenovcu*

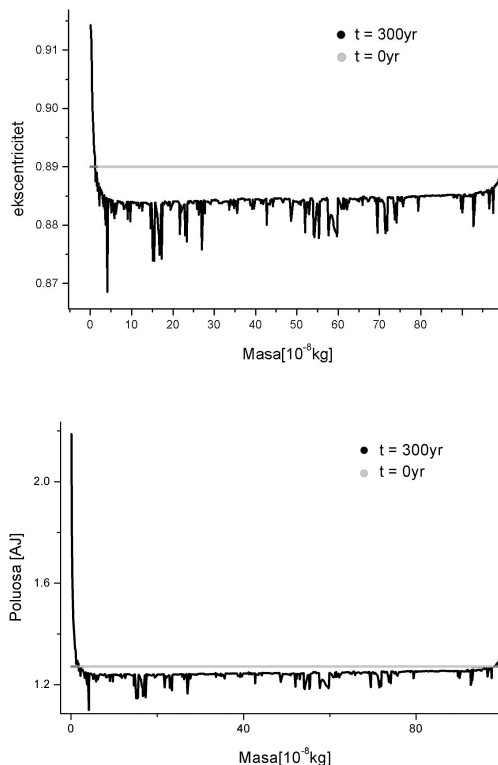
## Rezultati

Za vremenski period od 300 godina, broj meteoroida zahvaćenih u Hill-ovu sferu Zemlje iznosi 297. Raspodela ovih čestica po poluosama i po ekscentricitetima data je na slici 1. Preostale čestice nastavile su da se kreću po relativno stabilnim orbitama. Raspodela poluosa i ekscentriciteta za celu populaciju data je na slici 2. Iz nje vidimo da određene čestice teže da migriraju u spoljašnji



Slika 1. Raspodela meteoroida zahvaćenih u Zemljinu Hill-ovu sferu po poluosama (levo) i ekscentricitetima (desno).

Figure 1. Distribution of the meteoroids which enter the Hill sphere of the Earth, in semi-major axis (left) and eccentricity (right).

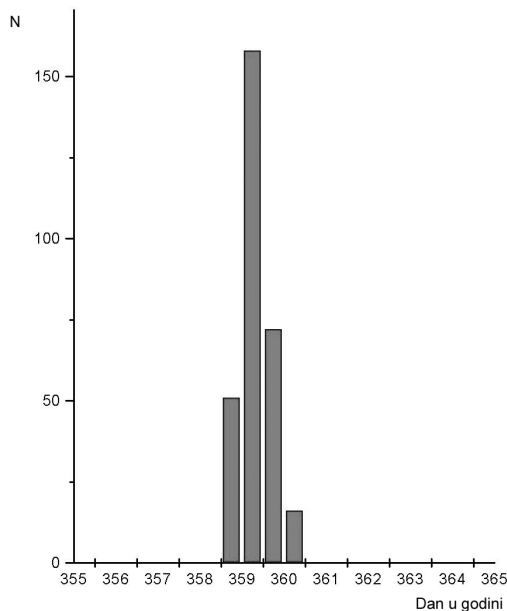


Slika 2. Raspodela ekscentriciteta (levo) i poluosa (desno) po masama meteoroida na kraju integracije, za celu populaciju. Sive linije pokazuju početne vrednosti.

Figure 2. Distribution of the whole population with respect to the mass, in semi-major axis (left) and eccentricity (right) at the end of the integration. The gray lines show the initial values.

Sunčev sistem (one sa najmanjom masom), a da, osim ovog efekta, ne postoji primetna segregacija po masi. Čestice koje teže da migriraju u smeru suprotnom od Sunca dostižu vrednosti poluosa od oko 2.38 AU i ekscentriciteta od oko 0.91. To je moguće objasniti dominantnim uticajem pritiska Sunčevog vetra (koji deluje na česticu silom u smeru suprotnom od Sunca) nad PR efektom (čiji je efekat, generalno govoreći, suprotan, tj. ispoljava se kao opadanje vrednosti velike poluose) usled male mase ovih čestica.

Čestice koje ulaze u Hill-ovu sferu Zemlje, ulaze u nju gotovo uvek istog datuma (slika 3). Taj datum je maksimum aktivnosti za simulirani roj i to je 25/26. decembar.



Slika 3. Aktivnost simuliranog roja u zavisnosti od rednog broja dana u godini. Vidljiv je oštar maksimum koji odgovara noći 25/26. decembar.

Figure 3. Activity of the simulated meteor stream. On the abscise is the number of the day in the year. A sharp peak is clearly visible, corresponding to the night 25/26. December.

## Zaključak i diskusija

Posmatrani evolucionni put se dobro uklapa u opšta saznanja o postanku i evoluciji meteorskih rojeva. Uočena je relativno velika populacija objekata (oko 30%) koji bivaju privučeni ka Zemlji i, većinom, dovode do pojave meteora. Takođe je potvrđeno da pritisak svetlosti dominira kod najmanjih objekata, dok kod većih glavnu ulogu ima PR efekat.

Rezultati, međutim, nisu u potpunosti saglasni sa hipotezom F. L. Whipple-a. Dobijeni maksimum se razlikuje za 11 dana u odnosu na Geminide, čiji je maksimum 14/15. decembra. Ekscentricitet simuliranog roja razlikuje sa za približno 0.01 od ekscentriciteta Geminida (0.8960 radarskim, 0.8975 fotografskim metodom, Savić 2001), a poluosu za približno 0.09 AU (za Geminide: 1.350 radarskom, 1.379 fotografskom metodom, *ibid.*). Međutim, iako

ne potvrđuju hipotezu o Phaetonu kao roditeljskom telu, navedeni rezultati nisu sa njom u potpunosti nesaglasni, jer bi primećene razlike mogle da budu prouzrokovane pojedinim ovde zanemarenim fenomenima (Ryabova 2005).

Pouzdaniji rezultati bi se mogli dobiti uzimanjem u obzir efekta Yarkovskog i, posebno, uvođenjem korekcija za nesferičnost čestica.

**Zahvalnost.** Želeo bih da se zahvalim Mihailu Čubroviću na konsultacijama i podršci.

## Literatura

Wisdom J., Holman M. 1991. Symplectic maps for the n-body problem, *AJ* **102**: 1528.

Saha P., Tremaine S. 1994. Long-term planetary integration with individual time steps, *AJ* **108**: 1962.

Klačka J. 2000. *Solar Radiation and Asteroidal Motion*, arxiv:astro-ph/0009109.

Danby J. M. A. 1988. *Fundamentals of Celestial Mechanics*, Addison-Wesley, New York.

Ryabova G. L. 2005. On the dynamical consequences of the Poynting-Robertson drag caused by solar wind, *Proceedings of the IAUC 197*: p. 411, Cambridge University Press.

Savić B. 2001. Geminidi – meteori sumnjivog porekla, *Perseidi* **4**: 58.

Whipple F. L. 1983. *IAU Circular* 3881.

Vladislav Jelisavčić

## Numerical Simulation of the Geminid Meteor Stream

We use a simple numerical model to estimate the plausibility of a hypothesis due to F. H. Whipple (1983), which postulates the asteroidal origin (from 3200 Phaeton) for the Geminid meteor stream. Our strategy is to analyze the orbital elements and the overall dynamical behavior of the simulated stream, which starts its evolution on the orbit of Phaeton, and to compare it to the values computed from the observations of the Geminid meteor shower.

Our model uses a symplectic integrator (Wisdom&Holman 1991; Saha&Tremaine 1992) to integrate 1000 meteoroid bodies (as test particles), under the influence of the Sun and five planets (Mercury to Jupiter). Solar radiation pressure and the Poynting-Robertson (PR) drag have also been taken into account (as in Klačka 2000). The particles that enter the Earth's Hill sphere are discarded from further integration (it's these particles would be seen as meteors).

Our results are roughly consistent with the aforementioned hypothesis, as about 30% of particles end up as meteors. Also, the histograms of semi-major axis and eccentricity (Figure 1) give the average values for these orbital elements not too different from

the observed ones. The low-mass particles tend to be ejected further from the Sun, as, for them, the radiation pressure overcomes the PR effect; for the more massive particles, the opposite happens (Figure 2). However, the maximum of our simulated shower falls in the night of December 25/26, which is eleven days after the observed date.

Overall, we cannot univocally confirm or reject the hypothesis about the 3200 Phaeton as the parent body; it is possible that a more detailed model is necessary to decide if the discrepancies of our data with the observed shower are due to the fallacies of our model or a consequence of the false hypothesis about the parent body.

