

## Analiza oblika krivih sjaja video meteora rojeva Orionidi i Geminidi

---

*Oblik krive sjaja može pružiti informaciju o strukturi meteoroida koji je tu pojavu izazvao. U ovom radu poređeni su meteori meteorskih rojeva Orionidi i Geminidi po obliku krivih sjaja. Za razliku od većine dosadašnjih radova, analizirani su meteori dobijeni video kamerama manje osjetljivosti, koje se široko koriste u amaterskoj upotrebi. Razvijen je metod za analizu oblika krivih sjaja meteora nekog roja snimljenih pomoću samo jedne kamere. Takođe je ispitano da li oblik krive sjaja zavisi od zenitne daljine radijanta. Dobijeni rezultati za Orionide u okviru greške odgovaraju prethodno dobijenim rezultatima, dok je za Geminide to nije slučaj. Na osnovu ovakvih snimaka meteora nije konstatovana značajna razlika između krivih sjaja za visok i nizak položaj radijanta.*

---

### Uvod

Meteoroidi su čestice koje uglavnom potiču od kometa i asteroida. Pri kretanju meteoroida kroz Zemljinu atmosferu dolazi do interakcije meteoroida i atmosfere, što za posledicu može imati svetlosnu pojavu koja se naziva meteor. Postoji više metoda detektovanja meteora (npr. vizuelna, teleskopska, fotografske i video metode, itd). Meteor nam može pružiti informaciju o strukturi meteoroida koji je tu pojavu izazvao.

Procesi koji karakterišu pojavu meteora prilično su složeni i teško ih je objediniti jednim teorijskim modelom, pa stoga postoji više modela koji se koriste za opisivanje ove pojave. Meteoroidi se, na osnovu teorijskih modela kojima se nastoje opisati meteorske pojave, po strukturi

moгу grubo podeliti na kompaktne i porozne (Campbell-Brown i Koschny 2004).

Najjednostavniji model, elementarna fizička teorija meteora (Savić 1995 i reference u tom pregledu), može opisati prolazak kompaktnih meteoroida kroz atmosferu (Campbell-Brown i Koschny 2004). Model predviđa da se maksimum zračenja ovakvih čestica dešava na drugoj polovini luminozne putanje meteoroida kroz atmosferu, tako da su krive sjaja (koje predstavljaju zavisnost apsolutnog sjaja od atmosferske visine) ovih meteora asimetrične (slika 1).

Za opisivanje prolaska poroznih meteoroida kroz atmosferu pogodan je tzv. model „prašnjave lopte” (dust ball model, Campbell-Brown i Koschny 2004; predlažemo, u sličnom stilu, srpski naziv „model prljave pahuljice”). Model su inače prvi razvili Hawkes i Jones (1975), na osnovu ideje Ernsta Öpika iz 1958. Porozni meteoroid opisuje se kao telo sastavljeno od više manjih kompaktnih čestica povezanih „lepkom”, odnosno supstancom niže tačke topljenja, pa pri prolasku kroz atmosferu dolazi i do njegove fragmentacije. Ovakav model predviđa da se maksimum zračenja poroznih meteoroida dešava blizu sredine luminozne trajektorije, tako da su krive sjaja ovih meteora približno simetrične (slika 2).

Navedeni primeri predstavljaju teorijske krive sjaja, dobijene iz modelâ. Realne krive sjaja meteora mogu se dobiti, na osnovu snimaka meteora, između ostalog i video snimaka.

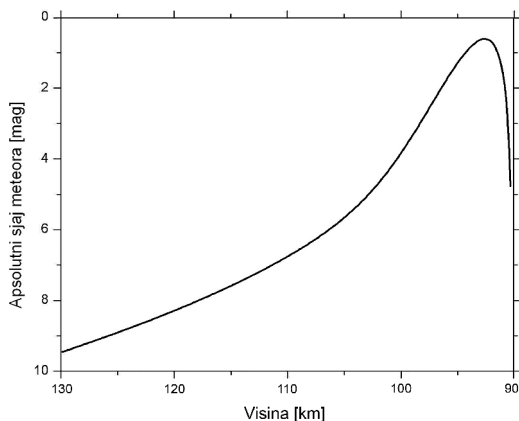
Cilj ovog rada je poređenje meteoroida meteorskih rojeva Orionidi i Geminidi po strukturi na osnovu oblika krivih sjaja i odgovarajućih pretpostavki navedenih modela. Ovakva istraživanja do sada su vršena korišćenjem krivih sjaja dobijenih analizom snimaka meteora sa video kamera

---

*Nikolina Milanović (1995), Skadarska 26b, Pančevo, učenica 4. razreda Gimnazije „Uroš Predić” u Pančevu*

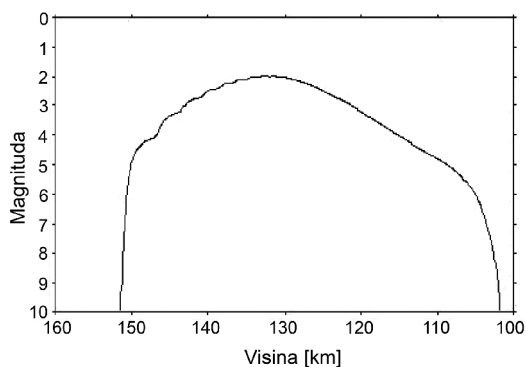
*Ljubica Grašić (1995), Cara Dušana 124/25, Niš, učenica 4. razreda Gimnazije „Jovan Jovanović Zmaj” u Novom Sadu*

*MENTOR: Dušan Pavlović, student Matematičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu*



Slika 1. Kriva sjaja koju predviđa elementarna fizička teorija meteora dobijena numeričkom simulacijom (prema: Pavlović 2009)

Figure 1. Numerically simulated light curve of meteor modelled as a single body (Pavlović 2009)



Slika 2. Kriva sjaja koju predviđa model „prašnjave lopte” dobijena numeričkom simulacijom u radu Campbell-Brown i Koschny (2004)

Figure 2. Numerically simulated light curve of meteor modelled as a “dust ball” (Campbell-Brown & Koschny 2004)

sa fotomultiplikatorom (eng. image-intensified camera), odnosno snimaka dobijenih televizijskim metodama, koje mogu detektovati meteore prividne magnitude i do  $+9^m$  (Fleming *et al.* 1993; Koten *et al.* 2004). U našem radu korišćeni su snimci sa kamera manje osetljivosti koje mogu detektovati meteore prividne magnitude do oko  $+3^m$ .

U ranijim radovima koji se bave ovom temom korišćeni su snimci meteora snimljenih pomoću dve ili više kamera (Fleming *et al.* 1993; Koten *et al.* 2004), jer je na taj način moguće odrediti atmosfersku trajektoriju za svaki meteor pojedinačno. Poznavanje atmosferske trajektorije potrebno je za dobijanje stvarne promene sjaja meteora duž trajektorije, pa time i zavisnosti apsolutne magnitude (sjaja) od nadmorske visine pojave u atmosferi (atmosferske visine). U ovom radu razvijen je metod i napravljen alat za analizu oblika krivih sjaja dobijenih na osnovu snimaka meteora snimljenih jednom kamerom za meteore kojima je unapred poznat radijant. Metod je iskorišćen za analizu krivih sjaja meteora rojeva Orionidi i Geminidi. Takođe je ispitan uticaj ugaone visine radijanta meteora (ugla pod kojim meteor ulazi u atmosferu) na oblik krive sjaja.

## Parametar F

Za opisivanje oblika i poređenje krivih sjaja meteora može se koristiti F parametar (Fleming *et al.* 1993). Krivu sjaja meteora karakteriše F parametar koji predstavlja srednju vrednost seta  $F_i$  vrednosti, zadatih relacijom:

$$F_i = \frac{H_B(i \cdot \Delta M) - H_{\max}}{H_B(i \cdot \Delta M) - H_E(i \cdot \Delta M)} \quad (1)$$

gde je  $H_{\max}$  visina na kojoj se nalazi meteoroid u trenutku maksimuma svog sjaja, a  $H_B(i \cdot \Delta M)$  i  $H_E(i \cdot \Delta M)$  su redom visine pre i posle maksimuma zračenja na kojima je apsolutna magnituda meteora bila manja od maksimalne apsolutne magnitude za  $i \cdot \Delta M$ , gde  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ , pri čemu se  $n$  može proizvoljno izabrati, a vrednost korišćena u ovom radu je  $n = 10$ . Korak  $\Delta M$  se dobija kao  $\Delta M = \frac{M_{\max} - \max(M_B, M_E)}{n}$ , gde je

$M_{\max}$  najveća vrednost magnitude, a  $M_B$  i  $M_E$  su redom magnitude na početku i kraju meteora. Parametar F stoga može uzimati realnu vrednost od 0 do 1.

Prema modelima, kod kompaktnih meteoroida (single body) F parametar iznosi oko 0.7, a kod poroznih (dustball) oko 0.5 (Koten *et al.* 2004). Na osnovu pojedinačnih vrednosti F parametara za meteore jednog roja, njihova srednja vrednost može ukazati na poroznost čestica tog roja (*Ibid.*).

U našem radu korišćeni su snimci kamera manje osetljivosti, kako bi se odredili F parametri rojeva Orionida (kometskog porekla) i Geminida (za koje je prihvaćeno da su asteroidnog porekla). Kako ovi snimci registruju samo sjaniji deo trajektorije, kriva sjaja dobijena na osnovu ovakvih snimaka pokriva samo jedan deo procesa koji se dešavaju prilikom prolaska meteoroida kroz atmosferu. Stoga postoji mogućnost da se vrednost parametra F dobijena iz ovakvih snimaka razlikuje od vrednosti dobijenih iz snimaka sa kamera veće osetljivosti.

Takođe, ispitano je da li F parametar zavisi i od zenitne udaljenosti radijanta (V. Lukić, usmene informacije). Naime, kako meteorska čestica kojoj odgovara niži radijant prelazi duži put kroz razređene slojeve atmosfere, veća dužina puta kroz gornje slojeve atmosfere mogla bi se odraziti na oblik krive sjaja, a samim tim i vrednosti F parametra.

Kako bi se ispitale navedene pretpostavke, određeni su F parametri za rojeve Geminidi i Orionidi. To je urađeno kakoza meteore snimljene jednom kamerom (sa jednog punkta), tako i za meteore snimljene sa dva punkta. Dobijene vrednosti su dalje poređene međusobno, a takođe i sa vrednostima drugum analizama (npr. Koten *et al.* 2004).

## Obrada video snimaka meteora i računanje parametra F

Za sve analize korišćeni su video snimci japanske mreže kamera SonotaCo. Obradom video snimaka meteora sa jedne kamere pomoću softvera UFO Analyzer (sonotaco.com) za svaki meteor se dobijaju podaci o samom meteoru, kao što su pripadnost roju, prividne magnitude i koordinate meteorske pojave na svakom frejmu, itd.

Za potrebe računanja parametra F napisan je program u programskom jeziku Python 3. Aplikacija je posebno adaptirana za snimke rojeva poznatih radijanata dobijene samo jednom kamerom. Obe varijante programa (za snimke meteora dobijene sa jednog i za snimke dobijene sa dva punkta) poslale smo japanskoj organizaciji SonotaCo koja nam je na osnovu snimaka njihove mreže vratila izlazne parametre potrebne za dalju analizu.

Atmosferska visina meteoroida na svakom frejmu određena je na osnovu horizontskih nebeskih koordinata meteora, kao i visine radijanta koje su preuzete sa sajta (www.imo.net) i prosečne brzine meteoroida tog roja. Udaljenost meteorske pojave od kamere računata je na osnovu nebeskih koordinata (azimuta i visine) i izračunate atmosferske visine pojave. Umesto apsolutne magnitude, koja je korišćena u prethodnim radovima, korišćen je apsolutni sjaj meteora (tačnije osvetljenost). Apsolutni sjaj meteora na svakom frejmu određen je na osnovu podataka o prividnom sjaju (koji se dobijaju neposredno obradom snimaka) i udaljenosti meteorske pojave u datom trenutku od kamere, pomoću formule:

$$L_A = L_p \cdot \left( \frac{d}{100} \right)^2$$

gde je  $L_A$  apsolutni sjaj,  $L_p$  prividni sjaj (dobijen obradom snimka), a  $d$  udaljenost meteorske pojave od kamere (izražena u kilometrima). Za dobijanje kontinualne apsolutne krive sjaja linearno su interpolirane tačke koje predstavljaju zavisnost apsolutnog sjaja od atmosferske visine meteorske čestice na svakom frejmu.

Parametar F moguće je izračunati samo za one krive sjaja koje su neopadajuće od početka do maksimuma i nerastuće od maksimuma do kraja, a takve krive sjaja su u stvarnosti retke. Stoga je za „ravnanje” krivih sjaja primenjen metod najbližeg suseda sa težinama 1-2-1 (eng. 1-2-1 nearest neighbor), kako bi se dobile krive za koje se može računati parametar F prema jednačini (1). Krive za koje se ni nakon primene ovog metoda nije mogao izračunati parametar F, a kojih od ukupnog broja krivih sjaja ima preko 70%, nisu korišćene.

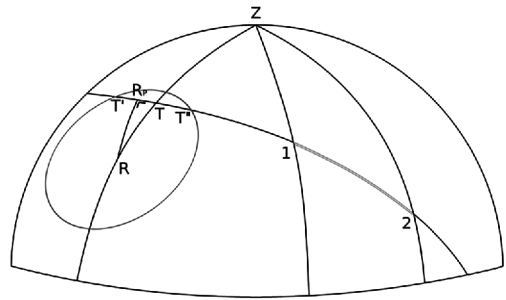
Ukoliko je meteor snimljen pomoću bar dve kamere moguće je odrediti atmosfersku trajektoriju meteora (npr. korišćenjem softvera UFO Orbit, sonotaco.com), odakle se dobijaju početna i krajnja atmosferska visina pojave, kao i visina radijanta meteora. Ukoliko je meteor snimljen samo sa jednog punkta, potrebno je znati koordinate radijanta.

Tabela sa koordinatama radijanata rojeva u zavisnosti od datuma preuzeta je sa sajta Međunarodne meteorske organizacije (www.imo.net). Kako radijant roja realno predstavlja oblast na

nebeskoj sferi, pomenute koordinate odnose se na središta tih oblasti. Naime, pošto se čestice istog roja ne kreću po idealno paralelnim putanjama, „tablični” radijant roja ne predstavlja radijant svakog zasebnog meteora koji pripada roju, pa se samim tim ni ne mora nalaziti na projekciji putanje tog meteora na nebesku sferu – sferne putanje meteora (slika 3). Zbog toga se uzimanjem radijanta meteorskog roja za radijant pojedinačnog meteora pravi određena greška. Kako se radijant pojedinačnog meteora mora nalaziti na sfernoj putanji meteora, preuzeti tablični radijant (R) projektovan je na sfernu putanju meteora. Međutim, ni tako dobijen radijant ( $R_p$ ) ne mora biti radijant tog meteora, već može biti pomeren duž velikog kruga meteora unutar oblasti radijanta. Nepreciznost ovako određenog radijanta meteora proizvodi grešku pri određivanju atmosferske trajektorije.

Kako bi se proverilo koliko mala pomeranja radijanta po sfernoj trajektoriji meteora utiču na vrednost parametra F, prvo je određena tačka (T) preseka velikog kruga meteora sa vertikalom tabličnog radijanta (velikim krugom koji sadrži zenit i tablični radijant R). U odnosu na tačku T određena su dva probna radijanta (tačke T' i T'') koja se nalaze na preseku putanje meteora i malog kruga koji definiše oblast radijanta. Na segmentu T'T'' dobija se opseg mogućih radijanata tog meteora, pa samim tim i njegovih trajektorija. Za dobijeni opseg trajektorija vrednosti F parametra meteora razlikuju se na trećoj decimali, što je zanemarljivo. Zbog toga je, za računanje F parametra meteora snimljenih jednom kamerom, za radijant meteora uzeta tačka  $R_p$ , odnosno normalna projekcija tabličnog radijanta na trajektoriju meteora.

Za meteore istog roja F parametar je određen na dva načina: korišćenjem podataka dobijenih sa pojedinačnih snimaka i korišćenjem podataka dobijenih na osnovu snimaka sa dva punkta. Dobijene vrednosti su upoređene Studentovim t-testom za zavisne uzorake. Kako nisu dobijene statistički značajne razlike između ovih dveju grupa ni za Orionide ni za Gemenide, ustanovljeno je da je moguće odrediti zadovoljavajuće vrednosti F parametra roja na osnovu snimaka samo jednom kamerom. U daljem radu korišćeni su ovakvi snimci, jer ih ima znatno više nego snimaka meteora snimljenih sa dve kamere, čime je



Slika 3. Ilustracija uz metod određivanja radijanta meteora: R – tablični radijanta meteorskog roja,  $R_p$  – projektovani radijant; T – presek velikog kruga meteora sa vertikalom tabličnog radijanta, T' i T'' probne (kontrolne) tačke radijanta. Tačke 1 i 2 predstavljaju redom početnu i krajnju tačku meteora.

Figure 3. True meteor radiant determination: R – common radiant of meteor stream,  $R_p$  – normal projection on meteor trajectory; T – cross section of meteor trajectory and vertical of R, T' and T'' – trial radiants. Points 1 and 2 represent beginning and ending of meteor's luminous trajectory.

dobijen dovoljno veliki uzorak potreban za dalju statističku analizu. Podaci o brojnosti uzorka nalaze se u odeljku o rezultatima.

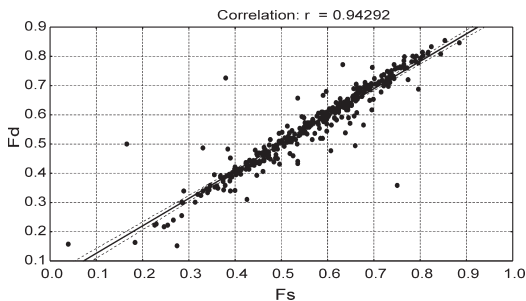
Za svaki od rojeva meteori su podeljeni su u dve grupe na osnovu visine radijanta. U jednoj grupi su se nalazili meteori za manju visinu radijanta, a u drugoj za veću. Studentovim t-testom za nezavisne uzorke međusobno su upoređene F vrednosti ovih dveju grupa. Na isti način su, za svaki od rojeva, upoređene vrednosti F parametara za grupe meteora sa najvećim i sa najmanjim visinama radijanta.

## Rezultati

Vrednosti F parametara određeni su za iste meteore na dva načina: na osnovu snimaka sa jednog punkta, pri čemu je korišćen pristup koji smo ovde razradili, i na osnovu snimaka sa dva udaljena punkta, pri čemu je u drugom slučaju atmosferska trajektorija meteora određivana standardno, paralaktički. Za Orionide su dobijene vrednosti  $F = 0.561(8)$  za snimke sa jednom kamerom i  $0.564(8)$  za snimke sa dva punkta, a za Geminide  $0.53(3)$  i  $0.54(3)$ , respektivno. Kao

što se može primetiti, vrednosti F parametra su ujednačene za oba pristupa i kod Geminida i kod Orionida, što potvrđuje i koeficijent korelacije između F vrednosti dobijenih dvama pristupima:  $r = 0.943$  ( $p < 0.05$ ) za ceo uzorak Geminida i Orionida (slika 4); pri tome je samo za Orionide  $r = 0.939$ , a samo za Geminide  $r = 0.972$ , i oba su statistički značajni ( $p < 0.05$ ).

U tabeli 1 prikazani su rezultati poređenja između Orionida i Geminida, dobijeni t-testom



Slika 4. F vrednosti simultano određene za dva tipa snimaka: snimaka dobijenih sa jednog (Fs) i sa dva udaljena punkta (Fd)

Figure 4. F values for two types of luminous trajectory determination: Fs – single station approach, Fd – standard parallactic (double station) approach

za nezavisne uzorke. Statistički značajna razlika u F parametru postoji jedino između Geminida i Orionida snimljenih samo pomoću jedne kamere, pri čemu je za Geminide manja! Takođe, nije dobijena značajna razlika u F vrednostima za visoke i niske položaje radijanta (tabela 2).

## Diskusija i zaključak

Usaglašenost F vrednosti dobijenih na osnovu snimaka meteora jednom kamerom i onih snimljenih pomoću dve kamere, ukazuje da se za F parametar roja mogu koristiti snimci samo sa jednog punkta.

Pretpostavka da parametar F, izračunat na osnovu video snimaka dobijenim kamerama male osetljivosti (do  $3^m$ ), zavisi od visine radijanta nije potvrđena ni za Geminide, ni za Orionide. Kako iz ove pretpostavke sledi da razlika u visini radijanta ima veći uticaj na oblik krivih sjaja poroznijih meteoroida, pa samim tim i na vrednosti njihovih F parametara, bilo bi dobro da se razmotre snimci dobijeni pomoću osetljivijih instrumenata, na primer snimci dobijeni televizijskim metodama. Analizu treba primeniti i na druge rojeve kometskog porekla (npr. Perseide, Leonide,  $\eta$ -Akvaride itd).

F parametar Orionida dobijen na osnovu snimaka jednom kamerom, koji iznosi  $0.549(6)$ ,

Tabela 1. Rezultati poređenja vrednosti F parametra za Orionide (O) i Geminide (G)

Način određivanja putanje	N	$F_{ORI}$	$SE(F_O)$	$F_G$	$SE(F_G)$	t	$t_{0.05}$
Paralaktički	315	0.564	0.008	0.54	0.03	0.8128	2.0181
Na osnovu jednog snimka	845	0.561	0.006	0.53	0.03	3.2711*	1.6489

N – brojnost uzorka,  $SE(F)$  – standardna greška srednje vrednosti za F, t – dobijena vrednost t-statistika,  $t_{0.05}$  – kritična vrednost t-statistika za nivo značajnosti  $p = 0.05$ ; zvezdicom je označena statistički značajna razlika

Tabela 2. Rezultati poređenja vrednosti F parametra za različite visine radijanta

Grupe koje su poređene	$N_1$	$F_1$	$SE(F_1)$	$N_2$	$F_2$	$SE(F_2)$	t	$t_{0.05}$
Orionidi – visok vs. nizak radijant	157	0.558	0.012	157	0.563	0.012	0.3719	1.9679
Orionidi – najviši vs. najniži radijant	51	0.58	0.03	51	0.58	0.02	0.3139	1.9842
Geminidi – visok vs. nizak radijant	18	0.53	0.04	18	0.55	0.04	0.2140	2.0322

Indeksom 1 označena je viša pozicija radijanta. Ostale oznake kao u tabeli 1. Sve F vrednosti su izračunate na osnovu paralaktički određenih trajektorija.



odgovara vrednosti dobijenoj iz televizijskih snimaka meteora istog roja, koja iznosi 0.545(12) (Koten *et al.* 2004).

Vrednost parametra F dobijena za Geminide ( $0.511 \pm 0.014$ ) razlikuje se od vrednosti dobijene korišćenjem televizijskih snimaka meteora istog roja ( $0.583 \pm 0.016$ , Koten *et al.* 2004). Moguće je da su niske vrednosti F parametra kod Geminida dobijene zbog korišćenja snimaka sa kamera manje osetljivosti, odnosno zbog nedovoljne pokrivenosti procesa u oblasti niže luminoznosti.

Bilo bi zanimljivo izračunati F parametre za televizijske snimke meteora sasečene na prag osetljivosti standardnih video kamera sa kojih su dobijeni snimci korišćeni u ovom radu. Takođe, bilo bi poželjno sprovesti finiju analizu raspodela F parametara, tako što bi se detaljnije analizirao oblik raspodele. Možda bi se tako i pomoću standardnih video snimaka dobili podaci upotrebljivi za analizu fizičkih modela i strukture meteorida.

**Zahvalnost.** Na ustupljenim podacima, strpljenju i uspešnoj saradnji autorke se zahvaljuju japanskoj meteorskoj mreži i gospodinu SonotaCo. Na ideji za ispitivanje zavisnosti parametra F od visine radijanta, kao i drugim smernicama u radu zahvaljujemo se Vladimiru Lukiću (Stevens Institute of Technology, New Jersey, USA), za pomoć u programiranju Nemanji Martinoviću (Astronomska opservatorija Beograd), a za pomoć u adaptaciji programa za izvršavanje na sistemu SonotaCo mreže Viktoru Kerkezu (Seven Bridges Genomics, Beograd).

## Literatura

Campbell-Brown M. D., Koschny D. 2004. Model of the ablation of faint meteors. *Astronomy & Astrophysics*, **418**: 751.

Fleming F. E. B., Hawkes R. L., Jones J. 1993. Light curves of faint television meteors. U *Meteoroids and their parent bodies* (ur. J. Štohl i I. P. Williams). Bratislava: Astronomical Institute, Slovak Academy of Sciences, str. 261-264.

Hawkes R. L., Jones J. 1985. A quantitative model for the ablation of dustball meteors. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **173**: 339.

Koten P., Borovička J., Spurny P., Betlem H., Evans S. 2004. Atmospheric trajectories and light curves of shower meteors. *Astronomy & Astrophysics*, **428**: 683

Pavlović D. 2009. Sjaj meteora pri standardnoj ablaciji. *Petničke sveske*, 67: 11.

Savić B. 1995. Elementarna fizička teorija meteora. *Perseidi*, 2: 11.

Sonotaco.com.

[http://sonotaco.com/soft/e\\_index.html](http://sonotaco.com/soft/e_index.html)

www.imo.net:

<http://www.imo.net/calendar/2014>

---

*Nikolina Milanović and Ljubica Grašić*

## Video Meteor Light Curve Analysis of Orionids and Geminids

The shape of the meteor light curve can be described with the F parameter, which indicates a deviation from symmetry of the light curve. Based on theoretical models, the shape of meteor light curve and therefore the value of the F parameter can give us a rough insight into the structure of the meteoroid which caused the phenomenon. The F parameter of a meteor shower can be statistically calculated using F parameters of meteors which belong to that shower. Unlike previous papers, we analysed meteor showers observed with less sensitive video cameras. We developed a method for calculating F parameters based only on one-station video data. It was examined if there is a correlation between F parameter and meteor radiant elevation. The method was applied on video data of Geminids and Orionids. The calculated value for F parameter of Orionids fits in the error range of the previously known value, whilst it is smaller than expected for Geminids (Koten *et al.* 2004). It would be interesting to calculate the F parameters of television meteor light curves, limited to the domain of standard video cameras sensitivity such as those used for this project. In addition to that, it would be desirable to elaborate a more precise analysis of shapes of the distributions of F parameters. ☺