

## Određivanje učestanosti sudara Zemlje i malih tela Sunčevog sistema

---

Krateri na Zemlji su loše očuvani zbog uticaja erozije i ostalih geoloških procesa, dok Mesec, koji nema atmosferu, predstavlja skoro idealnu sredinu za njihovo uočavanje. Sa CCD snimaka Mesečevih mora utvrđeni su prečnici za 301 krater na osnovu čega su primenom Pieracovog zakona skaliranja, procenjene dimenzije odgovarajućih imaktnih objekata. Time je dobijena kumulativna distribucija objekata koji su udarili u Mesec u proteklih 3.45 Gyr. Potom je izvršena procena učestanosti sudara sa Zemljom na osnovu odnosa gravitacionih radijusa Meseca i Zemlje. Za objekte veće od 10 km, 1 km i 200 m očekuju se udari jednom u  $5 \cdot 10^6$ ,  $4 \cdot 10^4$  i  $(1 \div 2) \cdot 10^3$  godina, respektivno.

---

### Uvod

Većinu kratera na Zemlji nastalih udarom malih tela Sunčevog sistema nemoguće je uočiti zbog efekata erozije prouzrokovane atmosferom i ostalim geološkim procesima. Krateri na Mesecu su znatno bolje očuvani zbog odsustva navedenih faktora. Smatra se da su sva Mesečeva mora formirana izlivanjem bazaltne lave u kratkom intervalu vremena pre oko 3.45 milijarde godina (Stuart 2003), i od tada su pretrpela vrlo male promene, ako se izuzmu posledice sudara. Ovakva sredina i poznavanje vremena nastanka mora omogućavaju određivanje učestanosti formiranja udarnih kratera u unutrašnjem delu Sunčevog sistema, tačnije u sistemu Zemlja – Mesec, kao i distribucije imaktnih objekata po veličini.

Cilj ovog rada je da se na osnovu CCD snimaka Mesečeve površine odredi distribucija objekata koji su udarili u Mesec, a na osnovu toga proceni učestanost njihovog sudara sa Zemljom.

### Metod

Za potrebe rada korišćeni su snimci napravljeni teleskopom Meade 178ED i CCD kamerom SBIG ST-7 tokom noći 17/18. jula 2003. godine u IS Petnica. Obrada slike urađena je u softverskom paketu Astroart. Pretpostavljeno je da svi krateri imaju kružan oblik, tako da se u projekciji vide kao elipse čije krajnje tačke definišu prečnik kratera. Ograničena rezolucija slika je uzrok selekcionog efekta, koji se ogleda u smanjenoj efikasnosti detekcije kratera manjih dimenzija.

U cilju da se dobijene dužine u pikselima izraze u kilometrima, određen je poluprečnik lika Meseca fitovanjem kružnice metodom najmanjih kvadrata za 30 tačaka limba. Dimenzijama jednog piksela odgovara 2.49 km na Mesečevoj površini. Ukupna površina posmatranih mora je  $1.09 \cdot 10^9$  km<sup>2</sup>, odnosno 28.9% ukupne površine Meseca.

Za izračunavanje prečnika imaktnih objekata ( $D_i$ ) korišćen je Pieracov zakon skaliranja, koji je dobijen analizom numeričkih simulacija sudara objekata pri velikim brzinama (Pierazzo *et al.* 1997):

$$D_i^{0.78} = \frac{D_c \cdot g^{0.22}}{1.16 \cdot (v \cdot \sin \alpha)^{0.43} \cdot \left(\frac{\rho_i}{\rho_c}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (1)$$

gde je:  $D_c$  – prečnik kratera,  $g$  – gravitaciono ubrzanje na Mesecu ( $1.365 \text{ m/s}^2$ ),  $v$  – brzina udara ( $19.2 \text{ km/s}$ ),  $\alpha$  – ugao udara ( $45^\circ$ ),  $\rho_i$ ,  $\rho_c$  – gustine imaktnog objekta i Meseca ( $2700 \text{ kg/m}^3$ ). Date vrednosti parametara određene su na osnovu analize populacije NEA objekata (Stuart 2003).

Distribucija po veličini malih tela Sunčevog sistema standardno se aproksimira stepenim zakonom. Zbog pomenutog selekcionog efekta, pretpostavljeno je da će kumulativna distribucija imaktnih objekata po veličini biti adekvatno opisana dvostrukom stepenom funkcijom (DPL – Double Power Law) (Berstein *et al.* 2003):

---

Anja Šišarica (1987), Novi Sad, Bulevar cara Lazara 43, učenica 3. razreda Gimnazije "Isidora Sekulić" u Novom Sadu

MENTOR: Igor Smolić, ISP

$$N = (1 + c) \cdot B \cdot [D_i^{-A_1} + c \cdot D_i^{-A_2}]^{-1}$$

$$c \equiv D_0^{A_2 - A_1} \quad (2)$$

gde je:  $A_1$  – koeficijent pravca asimptote distribucije za male vrednosti veličine kratera (vezane za selekcionu efekat),  $A_2$  – koeficijent pravca asimptote distribucije za velike vrednosti veličine kratera,  $B$  – konstanta normiranja,  $D_i$  – dijametar kratera u km,  $D_0$  – karakteristična vrednost veličine kratera,  $N$  – broj impaktnih objekata.

Procenu učestanosti sudara objekata sa Zemljom moguće je izvršiti na osnovu odnosa preseka za gravitacioni zahvat objekta od strane Meseca i Zemlje. Presek za gravitacioni zahvat objekta od strane nekog tela je funkcija veličine i mase tog tela, i data je sledećom formulom (Stuart 2003):

$$\sigma = R^2 \left(1 + \frac{v_{esc}^2}{v_{enc}^2}\right) \quad (3)$$

gde je:  $\sigma$  – presek za gravitacioni zahvat,  $R$  – radius,  $M$  – masa i  $v_{esc}$  – druga kosmička brzina tela, a  $v_{enc}$  – relativna brzina objekta i tela, i  $G$  – univerzalna gravitaciona konstanta.

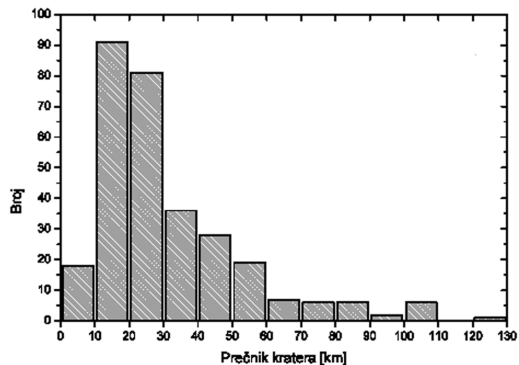
## Rezultati

Analizirano je 12 snimaka, sa kojih su određeni prečnici za 301 krater iz 11 Mesečevih mora. Distribucija kratera po veličini prikazana je na slici 1.

Na slici 2. prikazan je fit DPL funkcijom kumulativne distribucije impaktnih objekata dobijene primenom formule 1. Desna asimptota funkcije definiše pravu raspodelu impaktnih objekata. Odavde se dobija da kumulativna raspodela impaktnih objekata za Mesečeva mora ima oblik:

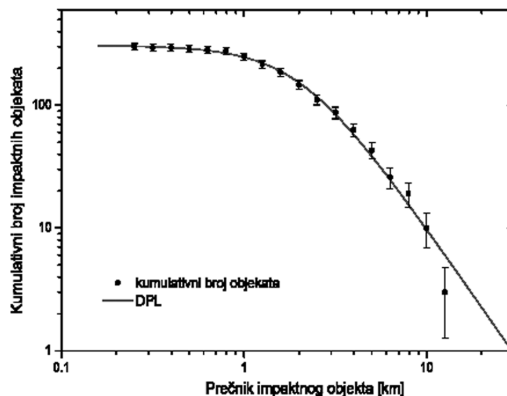
$$N = (14 \pm 2) \cdot 10^2 \cdot D_i^{-(2.1 \pm 0.2)} \quad (4)$$

Za odnos preseka za gravitacioni zahvat od strane Zemlje i Meseca dobija se 18.54, što uz činjenicu da Mesečeva mora zauzimaju 28.9% Mesečeve površine, omogućava izračunavanje prosečne učestanosti udara objekata većih od date veličine sa Zemljom u proteklih 3.45 milijardi godina. Na ovaj način, dobijeno je da to vreme iznosi: za objekte veće od 10 km oko  $5 \cdot 10^6$  god, za veće od 1 km oko  $4 \cdot 10^4$  god. i one veće od 200 m oko  $(1 \pm 2) \cdot 10^3$  godina.



Slika 1. Raspodela detektovanih kratera po prečnicima u Mesečevim morima. Uočava se umanjeno efikasnosti detekcije sa opadanjem dimenzije kratera.

Figure 1. Lunar crater diameter distribution. Decrease of detection efficiency is evident and in direct correlation with crater diameter diminish.



Slika 2. Kumulativni broj impaktnih objekata. Dimenzije impaktnih objekata određene su iz dimenzija kratera detektovanih u Mesečevim morima primenom zakona skaliranja (Pierazzo *et al.* 1997), datim formulom 1. Plava linija predstavlja najbolji fit podataka dvostrukom stepenom funkcijom (DPL).

Figure 2. Cumulative distribution of the impact objects. Lunar crater diameter and Pierazzo's Scaling Law (Pierazzo *et al.* 1997) are used to derive impact object diameter (Formula 1). Blue line represents the best data fit by applying Double Power Law function (DPL).

## Diskusija i zaključak

Upoređujući dobijene rezultate sa podacima dobijenim pomoću drugih metoda, kao što su Shoemaker i Melosh-Pi zakoni skaliranja (Stuart 2003), uočava se odstupanje i za red veličine. Realna verovatnoća sudara objekata većih od 1 km sa Zemljom je jednom u svakih  $5 \cdot 10^5$  godina (*ibid.*).

Uzroci neslaganja bi mogli biti nepoznavanje tačnog zakona skaliranja, jer se kod eksperimenata u laboratoriji ne mogu postići ni približno realni uslovi sudara, pogotovo po pitanju mase i brzine objekata, a numeričke simulacije nemaju adekvatnu proveru.

Sledeći izvor greške je nesumnjivo vrednost koeficijenta pravca desne asimptote kumulativne distribucije, koji je određen na osnovu malog broja kratera velikog prečnika, a pojavljuje se kao karakteristični parametar stepenog zakona koji opisuje distribuciju veličina udarnih objekata. Sa druge strane, iz distribucije kratera malih prečnika je nemoguće izvući pouzdane informacije zbog izraženog selekcionog efekta.

Ovaj metod može da posluži samo za određivanje prosečne učestanosti sudara, usrednjene u proteklom intervalu od  $3.45 \cdot 10^9$  godina.

**Zahvalnost.** Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, Igoru Smoliću, rukovodiocu programa astronomije, kao i Andreju Mesarošu i Vesni Topolovački za mnoge sugestije, nesebičnu i brzu pomoć kada je to bilo najpotrebnije, a takođe Mihailu Čubroviću za iskrenost i korisne sugestije.

## Literatura

Stuart J. S. 2003. *Observational Constraints on the Number, Albedos, Sizes, and Impact Hazards of the Near-Earth Asteroids*, Massachusetts Institute of Technology

Bernstein M. G., Trilling E. D. 2003. *The Size Distribution of Trans-Neptunian Bodies*

Pierazzo E. 1997. *A Reevaluation of Impact Melt Production*, Icarus 127, 408-423

---

Anja Šišarica

## Determination of the Earth Collision Frequency of Minor Solar Bodies

Most of the craters on Earth have been degraded by erosion and the geological movements. Without an atmosphere and topographical obstructions, lunar maria provide a unique resource for the research of the local impact environment. Using CCD images to measure the crater diameters, and Pierazzo's scaling law to determine the diameters of the impact objects, the lunar cratering rate was defined, and it matched the expected. Double Power Law fit was introduced in order to correct certain crater counting inefficiency caused by the selective effect. As a result, by applying the Earth-Moon capture cross-section relation and processing the data given, it was possible to estimate the Earth impact frequency in the past 3.45 Gyr. It was calculated that impacts of the objects larger than 10 km, 1 km, 200 m occur every  $5 \cdot 10^6$ ,  $4 \cdot 10^4$  and  $(1 \div 2) \cdot 10^3$  yr, respectively. These results do not perfectly match the expected, due to the nature of the experiment and the number of Moon craters available to detect.

