
Aleksandra Dimitrievska i
Katarina Đorđević

Provera Lume-Bauelovog zakona preko fazne krive Meseca

Razmatrana je mogućnost provere Lume-Bauelovog zakona (koji se koristi za interpretaciju faznih krivih sjaja asteroida) u intervalu faznih uglova od 0 do 180 stepeni. Za test je uzet Mesec koji, budući da nema atmosferu, a fazni ugao mu se menja u okviru ovog intervala, predstavlja idealan primer za proveru. Na osnovu nekompletnih podataka, zaključuje se da je najvažnije odrediti sjaj Meseca za fazne uglove $\alpha \leq 40^\circ$ i $\alpha \geq 120^\circ$, jer je kriva sjaja u tim intervalima najosetljivija na vrednosti koeficijenta faze.

Uvod

Do osamdesetih godina prošlog veka prikupljeno je mnoštvo fotometrijskih podataka o telima bez atmosfere. Godine 1981. Lume i Baue objavljaju svoju teoriju kao rešenje problema interpretacije tih posmatračkih podataka (Lumme, Bowell 1981). Površinski sloj tela može se tretirati kao skup pojedinačnih elemenata površine određene zapreminske gustine, gde je zapreminska gustina je parametar koji pokazuje koliki deo ukupne zapremine površine tela zauzimaju svi elementi površine. Svaki element odbija svetlost, pri čemu se uzima u obzir i jednostruko i višestruko odbijanje, kao i uticaj senki, zapreminske gustine i krševitosti površine. Osvetljenost površine zavisi od faznog ugla α . Po teoriji, za opisivanje optičkih osobina dovoljna su četiri parametra: albedo jednostrukog odbijanja \mathfrak{A} , faktor asimetrije g , zapreminska gustina D i faktor krševitosti ρ .

Posmatrano sa Zemlje, praktično svi asteroidi i sateliti su tačkasti izvori svetlosti tako da jedina veličina koja se direktno može izmeriti je integralni sjaj u datom trenutku, samim tim može se odrediti fazna kriva tog objekta. Fazna kriva predstavlja zavisnost magnitude (redukovane na jedinično rastojanje od Zemlje i Sunca) od faznog ugla.

Lume-Bauelova teorija je pretendovala da, pre svega, objasni fazne krive. Iz posmatračkih podataka zaključeno je da redukovana magnituda uglavnom linearno opada sa povećanjem faznog ugla, osim za uglove manje od $5\text{--}15^\circ$ (vrednost ovog praga varira kod različitih tela), kada je redukovana magnituda veća nego što to predviđa linearna zavisnost. Ova pojava poznata je pod nazivom opozicioni efekat. Dve veličine koje se najčešće koriste za opisivanje fazne krive su srednja opoziciona magnituda (parametar H) i koeficijent faze ili nagib linearnog dela fazne krive (parametar G). Ovaj sistem naziva se H - G sistem i usvojen je kao standardni sistem za izražavanje sjaja asteroida (Čubrović 2001).

Fazni ugao većine objekata koji se mogu videti sa Zemlje je u intervalu od 0° do 25° . Ovo ograničenje dozvoljava određene aproksimacije u cilju pojednostavljenja primene zakona. Izuzev Meseca, Merkura i asteroida tipa NEA, za sva ostala tela koja se mogu posmatrati sa Zemlje, može se iskoristiti svojstvo linearnosti fazne krive na intervalima gde nema opozicionog skoka ($\alpha \leq 30^\circ$).

Cilj ovog projekta je provera Lume-Bauelovog zakona za fazne uglove koji se nalaze u intervalu od 0° do 180° . Mesec je idealan primer za ovo istraživanje jer nema atmosferu, a njegov fazni ugao se menja u okviru predhodno pomenutog intervala.

Aleksandra Dimitrievska (1984), Bor, IX brigade 11/10, učenica 3. razreda Gimnazije "Bora Stanković" u Boru

Katarina Đorđević (1985), 12242 Neresnica, učenica 2. razreda Matematičke gimnazije u

Teorijsko razmatranje problema

Normirani integralni sjaj bilo kog tela može se izračunati kao zbir jednostruko $\Phi_S(\alpha)$ i višestruko odbijene svetlosti $\Phi_M(\alpha)$, parametrizovano težinskim parametrom G :

$$\Phi(\alpha) = (1 - G) \cdot \Phi_S(\alpha) + \Phi_M(\alpha)$$

Izrazi za $\Phi_S(\alpha)$ i $\Phi_M(\alpha)$ uključuju težinsko slaganje dva efekta: uticaja senki i uticaja neravnina površine:

$$\Phi_i = W \cdot \Phi_{iS} + (1 - W) \cdot \Phi_{iL}$$

$$\Phi_{iS} = 1 - \frac{C_i \cdot \sin \alpha}{0.119 + 1.341 \cdot \sin \alpha - 0.754 \cdot \sin^2 \alpha}$$

$$\Phi_{iL} = \exp(-A_i \cdot \tan^{B_i} \frac{\alpha}{2})$$

gde je $i = S, M$, a W težinski parametar koji zavisi samo od faznog ugla:

$$W = \exp(-90.56 \cdot \tan^2 \frac{\alpha}{2})$$

Bezdimenzione konstante:

$$A_S = 3.332$$

$$A_M = 1.862$$

$$B_S = 0.631$$

$$B_M = 1.218$$

$$C_S = 0.986$$

$$C_M = 0.238$$

su najnovije testirane vrednosti poznate autorima (Lagerkvist, Magnusson 1990). One se razlikuju od vrednosti datih u članku Lumea i Bauela, jer su određene iz najnovijih posmatranja (Čubrović 2001).

Obrada posmatranja i rezultati

U toku posmatranja su korišćeni instrumenti: refraktor MEADE 178/1600, prečnika sočiva 7 inča, $f/9$; CCD kamera SBIG-ST7. Veličina polja slike je 15×10 lučnih minuta. Planirano je da se Mesec snima u različitim fazama, iz IS Petnica, u toku 2002. godine. Meteorološki uslovi i problemi tehničke prirode pružili su samo jednu priliku za snimanje, 3. avgusta 2002. Usled malog polja slike Mesec je sniman "deo po deo". Dobijene fotografije obrađene su u softverskom paketu *Astroart*, gde je

sklopljen mozaik (slika 1), da bi se odredila prividna magnituda Meseca. Integralni sjaj Meseca aproksimiran je ukupnim sjajem slike i upoređen je sa sjajem poredbenih zvezda, koje su se nalazile u istom delu neba, da bi se eliminisao uticaj prozračnosti atmosfere. Za kalibraciju su uzete dve zvezde Plejada – Alcyone, spektralnog tipa B9 i magnituda 2.96 i zvezda magnituda 8.9 spektralnog tipa G0.

Magnituda Meseca je izračunata na osnovu formule:

$$\frac{I_M}{I_Z} = 10^{0.4 \cdot (m_2 - m_1)}$$

gde je: I_M integralni sjaj Mesec odredjen sa slike - mozaika, I_Z integralni sjaj zvezde, m_1 magnituda Meseca, a m_2 magnituda zvezde.

Integralni sjaj Σ zvezde računa se po formuli:

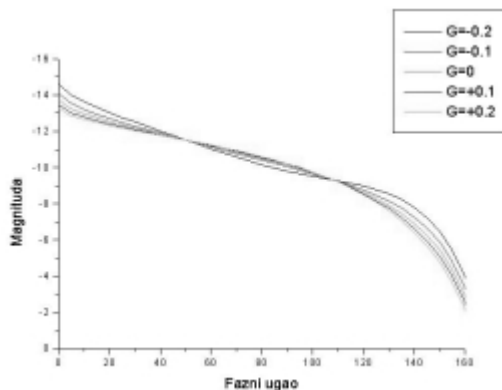
$$I_Z = \Sigma - S \cdot L$$

gde je I_M - ukupan sjaj posmatrane površine (zvezda + nebo), S - posmatrana površina i L - sjaj neba. Fazni ugao α u vreme posmatranja bio je 108°



Slika 1. Mesec u noći 3. avgusta 2002.

Figure 1. Picture of the Moon taken for analysis



Slika 2. Grafici faznih krivih za razne parametre G

Figure 2. Phase curves for several values of parameter G

Dobijeni su vrednosti za prividni sjaj Meseca:

-9.3 ± 0.1 – upoređeno sa zvezdom spektralnog tipa $G0$

-10.09 ± 0.01 – upoređeno sa zvezdom spektralnog tipa $B9$:

U daljnjem razmatranju u obzir je uzeta magnituda koja je dobijena poređenjem sa zvezdom spektralnog tipa $G0$, imajući u vidu da je Sunce tipa $G2$, što smanjuje uticaj sistematske grškeke vezane za spektralnu osetljivost CCD kamere.

Na osnovu jednog merenja nacrtan je grafik sa različitim parametrom G , u cilju utvrđivanja najbitnijih faza Meseca za buduća merenja i uspešno određivanje parametra G (slika 2).

Diskusija

Na osnovu dosadašnjih merenja nije moguća provera Lume-Bauevog zakona. Kako vidimo na grafiku 1, najvažnije je odrediti sjaj Meseca za fazne uglove $\alpha \leq 40^\circ$ i $\alpha \geq 120^\circ$, jer je fazna kriva u tim intervalima najosetljivija na vrednost parametra G . U budućnosti planiramo da izvršimo potrebna merenja, odredimo krivu sjaja i da damo

komentar o valjanosti ovog zakona na osnovu čisto eksperimentalnih podataka.

Literatura

Lumme K., Bowell E. 1981. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. I. Theory. *The Astronomical Journal*, **86**: 1694

Lumme K., Bowell E. 1981. Radiative transfer in the surfaces of atmosphereless bodies. II. Interpretation of the phase curves. *The Astronomical Journal*, **86**: 1705

Lagerkvist C., Magnusson P. 1990. Analysis of asteroid lightcurves. II. *Astronomy & Astrophysics*, **243**: 512

Čubrović M. 2001. Modeliranje oblika i karakteristika površine asteroida na osnovu optičkih krivih sjaja. *Perseidi*, **4**: 9

Aleksandra Dimitrievska and

Katarina Djordjević

Review of Lume-Baue Law Using Phase Curve of the Moon

Lume-Baue law is used to interpret the phase light curves of asteroids. In this case the possibility of testing this law for phase angles from 0 to 180 degrees was analysed. The Moon, being without an atmosphere, with a phase angle which changes within this interval, was used as an accurate example for the test. One CCD composed image of the Moon was analysed. It was found that the light curve is most sensitive in values of the phase coefficient within intervals below 40 and above 120 degrees, which implies that, for precise determining of the Moon's light curve for phase angles, it is most important to observe within this interval ☾