

O ALBEDIH

VID KAVČIČ¹

¹Fakulteta za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani

Ključne besede: albedo, navidezni sij, fazna funkcija

V članku obravnavamo pojem albeda, ki opisuje delež odbite svetlobe nebesnih teles. Najprej predstavimo dve definiciji: Bondov albedo, ki meri skupni delež odbitega sevanja, in geometrijski albedo, ki izhaja iz primerjave z idealno Lambertovo površino. Nato izpeljemo matematično zvezo med obema definicijama, pri čemer se izkaže, da sta povezani preko fazne funkcije in faznega integrala. V nadaljevanju se osredotočimo na vlogo albeda pri določanju navideznega sija planetov in Lune. Posebej obravnavamo primer Lune, pri čemer uporabimo model Lambertove sfere za izračun svetlosti polne Lune in prvega krajca. Rezultati pokažejo, da se izračunane vrednosti razlikujejo od izmerjenih, saj Lunina površina ne odraža idealnega Lambertovega obnašanja. Pri opazovanjih pride do opozicijskega učinka, ko se svetlost Lune blizu polne faze izrazito poveča. Učinek povzročata izginotje senc in koherentno povratno sipanje. V članku se tako osredotočimo na pomen faznih funkcij pri razumevanju opazovane svetlosti nebesnih teles.

ON ALBEDOS

This article discusses the concept of albedo, which quantifies the fraction of reflected light from celestial bodies. We first present two definitions: the Bond albedo, measuring the total fraction of reflected radiation, and the geometric albedo, defined through comparison with an ideal Lambert surface. A mathematical relation between the two is derived, showing that they are linked through the phase function and the phase integral. We then examine the role of albedo in determining the apparent brightness of planets and the Moon. Special attention is given to the case of the Moon, where a Lambert sphere model is applied to calculate the brightness of the full Moon and the first quarter. The results reveal deviations from observations, since the lunar surface does not behave as a perfect Lambert reflector. Observations show a pronounced opposition effect near full Moon, caused by the disappearance of shadows and coherent backscattering. The article thus emphasizes the importance of phase functions for understanding the observed brightness of celestial objects.

1. Uvod

Planeti, lune in druga mala telesa v Osončju nimajo lastnega izvora sevanja, temveč del Sončeve svetlobe odbijejo, del pa absorbirajo in nato izsevajo. Svetlost telesa je odvisna od njegove oddaljenosti od Sonca, položaja v Osončju glede na Zemljo in od albeda njegovega površja. S pojmom albedo, ki izhaja iz latinščine in pomeni *belina*, opišemo zmožnost telesa, da odbije vpadno svetlobo.

V članku bomo najprej obravnavali različni definiciji albeda in povezavo med njima, nato pa s tem v zvezi proučili dejavnike, ki vplivajo na navidezni

sij planetov in Lune. V sklepnem delu se bomo dotaknili še navideznega sija polne Lune in prvega krajca ter primerjave z izmerjenimi vrednostmi.

2. Dve definiciji albeda

2.1 Bondov albedo

V astronomiji poznamo dve različni definiciji albeda, in sicer Bondov albedo in geometrijski albedo. Ko govorimo o albedu in posebej ne poudarimo, katero vrsto albeda imamo v mislih, navadno mislimo na Bondov albedo. **Bondov albedo** A (tudi *sferični*, *planetarni* ali *bolometrični* albedo) definiramo kot delež odbitega sevanja. Izrazimo ga kot

$$A = \frac{P_{\text{od}}}{P_{\text{vp}}}, \quad (1)$$

kjer je P_{od} odbiti svetlobni tok in P_{vp} vpadni svetlobni tok. Iz definicije je jasno, da lahko Bondov albedo zavzame vrednosti med 0 (črno telo) in 1 (zrcalo, belo telo). Ta vrsta albeda se imenuje po ameriškem astronomu **Georgeu Phillipsu Bondu**, ki je mimogrede razen po definiciji albeda poznan tudi po prvi fotografiji zvezde (Vega) leta 1850 in dvozvezdja (Mizar) leta 1857 [1].

Zamislimo si krogelni planet z Bondovim albedom A in s polmerom R , ki se nahaja na razdalji r od Sonca. Potem lahko odbiti energijski tok P_{od} izrazimo kot

$$P_{\text{od}} = AP_{\text{vp}} = A \cdot \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} \cdot \pi R^2 = \frac{AL_{\odot}R^2}{4r^2}, \quad (2)$$

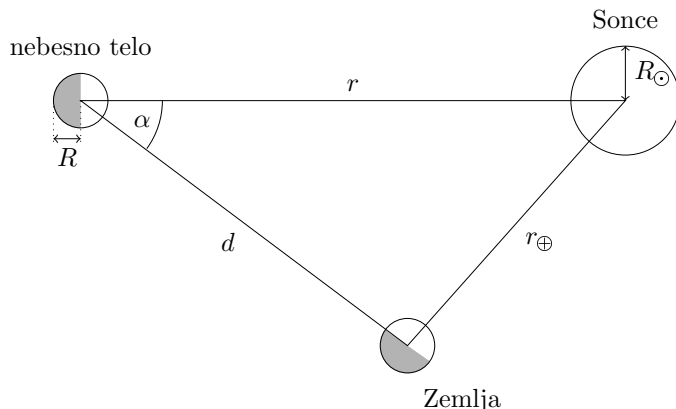
kjer smo z $L_{\odot}$ označili Sončev izsev.

Svetlost telesa na našem nebu ni odvisna samo od odbitega energijskega toka, pač pa tudi od medsebojne lege Zemlje, Sonca in telesa. Svetloba se namreč ne odbije izotropno v vse smeri.

Medsebojno lego Zemlje, Sonca in telesa opišemo s **faznim kotom** (α). To je kot med zveznicama Zemlja–telo in Sonce–telo. Definicija faznega kota je grafično predstavljena na sliki 1. Če se telo nahaja na razdalji d od Zemlje, potem gostoto svetlobnega toka j , ki jo izmerimo na Zemlji, izrazimo kot

$$j = C\Phi(\alpha)\frac{P_{\text{od}}}{4\pi d^2}, \quad (3)$$

kjer sta C **normalizacijska konstanta** in Φ **fazna funkcija**, ki opisuje to fazno odvisnost. Pri tem naj velja, da je $\Phi(0) = 1$ [3]. S tem lahko fazna funkcija doseže vrednosti vse od 0 pa do 1.



Slika 1. Skica za definicijo količin. Obravnavano nebesno telo s polmerom R se nahaja na razdalji d od Zemlje in na razdalji r od Sonca. Fazni kot nebesnega telesa je α . Oddaljenost Zemlje od Sonca smo označili z $r_{\oplus}$, polmer Sonca pa z $R_{\odot}$.

2.2 Geometrijski albedo

Preden definiramo geometrijski albedo, moramo pojasniti pojem Lambertove površine. To je popolnoma bela površina, ki odbije vso vpadno sevanje ($A = 1$), in je videti v vseh smereh enako svetla. Slednje pogosto imenujemo **Lambertov zakon** in velja za večino hrapavih ravnih svetil.

Namesto da govorimo o svetlosti površine, lahko Lambertov zakon zapišemo tudi s *svetilnostjo* I površine, ki v nasprotju s svetlostjo ne vključuje popravka zaradi projekcije dela površine telesa na pravokotno ravnino. Če z α označimo kot med pravokotnico na površino in smerjo pogleda, lahko Lambertov zakon za svetilnost v odvisnosti od smeri pogleda zapišemo kot

$$I(\alpha) = I_0 \cos \alpha, \quad (4)$$

kjer je α kot med pravokotnico in smerjo pogleda ter I_0 svetilnost v pravokotni smeri. S tem v zvezi lahko fazno funkcijo za ravno Lambertovo površino zapišemo kot

$$\Phi(\alpha) = \begin{cases} \cos \alpha, & \text{če je } 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}; \\ 0, & \text{sicer.} \end{cases} \quad (5)$$

V vsakdanjem življenju do te mere popolna površina seveda ne obstaja, vendar pa obstajajo materiali, ki se obnašajo skoraj tako kot Lambertova površina. Stena z belim mat zaključkom je kar dober približek zanjo; čeprav ne odbije vse vpadne svetlobe, je porazdelitev odbite svetlobe približno enakomerna, njena svetlost pa je v vseh smereh enaka. [5].

2.3 Geometrijski albedo

Pri definiciji geometrijskega albeda izkoristimo primerjavo telesa z ravno Lambertovo površino. **Geometrijski** (tudi *fizični*) **albedo** p je razmerje med gostoto svetlobnega toka, ki ga pri faznem kotu $\alpha = 0$ odbije dano telo, in gostoto svetlobnega kota, ki ga pri istem faznem kotu odbije Lambertova površina z enakim prečnim presekom. Za Lambertovo površino je geometrijski albedo torej enak $p_{\text{Lambert}} = 1$.

Geometrijski albedo je torej odvisen tako od odbojnosti površja kot tudi od fazne funkcije Φ telesa. Veliko hrapavih površin odbije večino vpadne svetlobe naravnost nazaj. V tem primeru je geometrijski albedo p večji kot v primeru izotropno odbojne površine. Primer takega površja je tudi površje naše Lune, kar bomo podrobneje proučili v nadaljevanju. Ni torej nepomembno poudariti, da za nekatera telesa velja $p > 1$. Najsrajnejši primer tega je zrcalo, za katerega velja odbojni zakon, kar pomeni, da je $p = \infty$. Vrednosti geometrijskega albeda za telesa v našem Osončju se večinoma nahajajo med 0,03 in 1. Geometrijski albedo Lune je $p = 0,12$, največja vrednost geometrijskega albeda pa je bila izmerjena za Saturnovo luno Enkelad, in sicer $p = 1,38$.

Vrednosti Bondovega in geometrijskega albeda se očitno med seboj razlikujeta. Za ilustracijo je v tabeli 1 predstavljena primerjava Bondovega in geometrijskega albeda za nekatera telesa v Osončju. Ko v poljudni literaturi zasledimo besedo albedo brez pojasnila, za katero vrsto gre, navadno mislimo na Bondov albedo. Naravna razloga za to sta očitni fizikalni pomen kot tudi dejstvo, da je Bondov albedo normiran na intervalu $[0, 1]$.

Izkaže se, da lahko vrednost geometrijskega albeda za posamezni planet določimo iz opazovanj, Bondov albedo pa lahko določimo le, če poznamo fazno funkcijo Φ . Na težavo naletimo že pri zunanjih planetih, ki jih lahko opazujemo le na določenem intervalu faznih kotov. Zaradi tega fazne funkcije Φ zanje prav natančno ne poznamo, s tem pa tudi Bondovega albeda ne moremo natančno določiti.

nebesno telo	Bondov albedo	geometrijski albedo
Merkur	0,09	0,14
Venera	0,76	0,69
Zemlja	0,31	0,43
Luna	0,11	0,12
Mars	0,25	0,17

Tabela 1. Primerjava Bondovega in geometrijskega albeda za nekaj teles Osončja [7]. Bondov albedo je lahko večji ali manjši od geometrijskega albeda. Razlika je odvisna od površine in lastnosti atmosfere telesa. Podatki se zaradi različnih meritev v različnih virih med seboj razlikujejo.

3. Zveza med Bondovim in geometrijskim albedom

Pri vsakem zainteresiranem bralcu se hitro pojavi naravno vprašanje, ali sta ti, na videz popolnoma različni definiciji albeda, morda kljub vsemu nekako povezani.

Spomnimo se, da smo gostoto svetlobnega toka j , ki jo izmerimo na Zemlji, v enačbi (3) povezali z odbitim svetlobnim tokom P_{od} , oddaljenostjo d telesa od Zemlje in s fazno funkcijo $\Phi(\alpha)$. Odbiti svetlobni tok lahko izrazimo z integralom po sferi s polmerom d . Velja

$$\int_S C \Phi(\alpha) \frac{P_{\text{od}}}{4\pi d^2} dS = P_{\text{od}},$$

iz česar nemudoma sledi

$$\frac{C}{4\pi d^2} \int_S \Phi(\alpha) dS = 1. \quad (6)$$

V primeru točkastega svetila je integral na levi strani zgornje enačbe tri-vialen, v našem primeru pa moramo upoštevati še fazno odvisnost. Če površinski element dS sfere izrazimo kot

$$dS = d^2 \sin \alpha d\alpha d\varphi,$$

lahko razpišemo

$$\int_S \Phi(\alpha) dS = d^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \Phi(\alpha) \sin \alpha d\alpha d\varphi = 2\pi d^2 \int_0^\pi \Phi(\alpha) \sin \alpha d\alpha.$$

To pomeni, da lahko iz enačbe (6) normalizacijsko konstanto izrazimo kot

$$C = \frac{2}{\int_0^\pi \Phi(\alpha) \sin \alpha d\alpha}.$$

Ker poznamo fazno funkcijo za Lambertovo površino (enačba (5)), lahko izračunamo normalizacijsko konstanto C_L za Lambertovo površino. Velja

$$\int_0^\pi \Phi(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \int_0^{\pi/2} \cos \alpha \sin \alpha d\alpha = \frac{1}{2}, \quad (7)$$

kar pomeni, da je normalizacijska konstanta enaka $C_L = 4$. Zdaj imamo vse, kar potrebujemo, da geometrijski albedo preko gole definicije povežemo z Bondovim albedom.

Iz enačb (2) in (3) izrazimo gostoto odbitega svetlobnega toka j , ki jo izmerimo na Zemlji v primeru, ko je $\alpha = 0$ oziroma $\Phi(\alpha) = 1$. Velja

$$j = \frac{CA}{4\pi d^2} \frac{L_{\odot} R^2}{r^2}. \quad (8)$$

Podobno izrazimo še gostoto svetlobnega toka j_L pripadajoče Lambertove površine, pri čemer upoštevamo, da je Bondov albedo Lambertove površine po definiciji $A_L = 1$, normalizacijska konstanta pa $C_L = 4$. Sledi

$$j_L = \frac{4}{4\pi d^2} \frac{L_{\odot} R^2}{r^2}. \quad (9)$$

V kvocientu enačb (8) in (9) prepoznamo definicijo geometrijskega albeda. Izpeljali smo torej, da geometrijski albedo in Bondov albedo povezuje enačba

$$p = \frac{CA}{4}. \quad (10)$$

V enačbi normalizacijsko konstanto C pogosto nadomestimo z izrazom (6). V tem primeru lahko Bondov albedo izrazimo v obliki

$$A = pq, \quad (11)$$

kjer smo uvedli **fazni integral**

$$q = 2 \int_0^{\pi} \Phi(\alpha) \sin \alpha \, d\alpha. \quad (12)$$

Končna zveza med Bondovim in geometrijskim albedom je videti posebej preprosta – loči ju samo en faktor, ki smo ga definirali kot fazni integral. V njem je kompaktno zajet učinek na izmerjeno gostoto svetlobnega toka, ki je posledica faze oziroma fazne funkcije, slednja pa je posebej značilna za vsako telo v Osončju [3].

4. Navidezni sij telesa v Osončju

Od albeda je odvisen tudi navidezni sij telesa v Osončju, denimo planeta ali Lune. Izpeljimo splošni izraz za navidezni sij telesa. Iz enačb (8) in (10) neposredno sledi zapis

$$j = \frac{p}{\pi} \Phi(\alpha) \frac{1}{d^2} \frac{R^2}{4r^2} L_{\odot}. \quad (13)$$

Če solarno konstanto izrazimo kot

$$j_{\odot} = \frac{L_{\odot}}{4\pi a^2},$$

za razmerje gostot svetlobnih tokov dobimo

$$\frac{j}{j_{\odot}} = \frac{pR^2a^2}{d^2r^2}\Phi(\alpha).$$

Ker navidezni sij Sonca na razdalji $a = 1$ a. e. ustreza $m_{\odot} = -26,7$, lahko iz Pogsonove enačbe

$$m - m_{\odot} = -2,5 \log \frac{j}{j_{\odot}} \quad (14)$$

z nekaj matematične telovadbe izraz za navidezni sij m telesa preoblikujemo v

$$m = m_{\odot} - 2,5 \log p \frac{R^2}{a^2} + 5 \log \frac{dr}{a^2} - 2,5 \log \Phi(\alpha). \quad (15)$$

Izraz za navidezni sij smo prikladno zapisali kot vsoto več različnih prispevkov. Prvi člen je konstanten, drugi člen pa je odvisen samo od velikosti planeta in odbojnih lastnosti njegovega površja ter je s tem značilen za posamezen planet oziroma drugo telo v Osončju. Tretji člen vsebuje odvisnost od razdalje, četrti pa odvisnost od faznega kota [3].

Razvito orodje lahko najprej uporabimo za izračun navideznega sija naše Lune, ki je povsem naravna kandidatka takšno početje. Hitro nas zaskrbi, da je največja neznanka v enačbi (15) pravzaprav le fazna funkcija. Fazno funkcijo za različna telesa v Osončju astronomi določijo na podlagi meritev in z modeliranjem. V teoretskem smislu jo je skoraj nemogoče določiti, saj je v veliki meri odvisna od značilnosti površja in oblike telesa.

V nadaljevanju bomo zato najprej izpeljali fazno funkcijo za najpreprostejše krogelno telo, ki si ga lahko zamislimo – to je za kroglo z Lambertovo površino. Nato bomo na podlagi dobljenega rezultata izračunali navidezni sij polne Lune in prvega krajca.

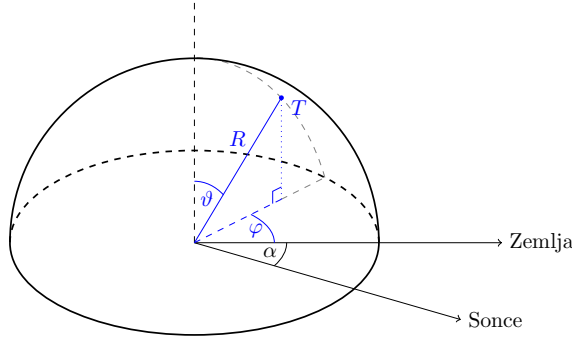
5. Fazna funkcija Lambertove sfere

V razdelku o definicijah albeda smo pri definiciji geometrijskega albeda zapisali fazno funkcijo za ravno Lambertovo površje (enačba (5)). Če želimo ob predpostavki Lambertovega površja obravnavati navidezni sij Lune v različnih menah, moramo izpeljati fazno funkcijo za Lambertovo kroglo.

Označimo z R polmer Lune. Definiramo polarni kot ϑ , azimutalni kot φ in fazni kot α (kot Zemlja–Luna–Sonce), kot to prikazuje slika 2.

Obravnavajmo majhen košček Luninega površja, ki ga omejujejo koordinate φ in $\varphi + d\varphi$ ter ϑ in $\vartheta + d\vartheta$. Za svetlobni tok dP_{vp} , ki s Sonca vpada na tak košček, velja

$$dP_{vp} = j_{\odot} R^2 \cos^2 \vartheta \cos(\varphi + \alpha) d\vartheta d\varphi,$$



Slika 2. Položaj točke T na površju Lune opišemo s sfernim koordinatama ϑ in φ ter s polmerom R . Fazni kot α je kot med zveznicama Zemlja–Luna in Luna–Sonce.

kjer je $j_{\odot}$ solarna konstanta, $R^2 \cos^2 \vartheta d\vartheta d\varphi$ pa projekcija površine koščka. Bondov albedo Lambertove površine je po definiciji enak 1. To pomeni, da za svetlobni tok dP_{od} , ki ga tak košček odbije izotropno v vse smeri, velja

$$dP_{\text{od}} = I_0 \pi R^2 \cos \vartheta d\vartheta d\varphi, \quad (16)$$

kjer smo z

$$I_0 = \frac{j_{\odot} \cos \vartheta \cos(\varphi + \alpha)}{\pi} \quad (17)$$

označili svetilnost v pravokotni smeri. Krajši račun pokaže, da je celoten svetlobni tok P^* , ki ga odbije ravna Lambertova površina, enak

$$P^* = \pi I_0. \quad (18)$$

Skupaj z Lambertovim zakonom to pomeni, da je delež odbitega svetlobnega toka, ki se odbije v smeri proti Zemlji, enak

$$dP = dP_{\text{od}} \cos \beta \frac{d\Omega}{\pi}, \quad (19)$$

kjer je β kot med smerjo proti Zemlji in normalo na površino koščka, $d\Omega$ pa prostorski kot, v katerega se odbija svetloba. Svetlobni dP se na površju Zemlje razporedi po površini $dS = d^2 d\Omega$, kjer je d razdalja med Luno in Zemljo. Hitro vidimo, da velja tudi $\cos \beta = \cos \vartheta \cos \varphi$. S tem lahko svetlobni tok izrazimo kot

$$dP = \frac{j_{\odot} R^2 dS}{\pi d^2} \cos^3 \vartheta \cos \varphi \cos(\varphi + \alpha) d\vartheta d\varphi.$$

Gostota svetlobnega toka j , ki jo izmerimo na Zemlji, je potemtakem

$$j = \frac{j_{\odot} R^2}{\pi d^2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^3 \vartheta d\vartheta \int_{-\pi/2}^{\pi/2-\alpha} \cos \varphi \cos(\varphi + \alpha) d\varphi, \quad (20)$$

kjer smo z mejami integralov poskrbeli, da upoštevamo samo osvetljene dele Luninega površja. Rešitev prvega integrala je

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^3 \vartheta \, d\vartheta = \frac{4}{3}, \quad (21)$$

drugi integral pa lahko prepišemo v

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2-\alpha} \cos \varphi \cos(\varphi + \alpha) \, d\varphi = \frac{1}{2} [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha]. \quad (22)$$

S tem lahko lahko gostoto svetlobnega toka j izrazimo kot

$$j = C\Phi(\alpha) \frac{R^2}{d^2} j_{\odot}, \quad (23)$$

kjer je

$$\Phi(\alpha) = \frac{1}{\pi} [(\pi - \alpha) \cos \alpha + \sin \alpha] \quad (24)$$

iskana fazna funkcija za Lambertovo sfero in $C = 2/3$ pripadajoča normalizacijska konstanta [2, 4].

6. Navidezni sij Lune

Med astronomi je splošno znano, da je navidezni sij polne Lune okoli $-12,7$ magnitude. Za primerjavo, navidezni sij Sonca znaša $m_{\odot} = -26,7$, kar po Pogsonovi enačbi pomeni, da je Sonce na našem nebu videti okoli $10^{0,4 \cdot (-12,7 - (-26,7))} \simeq 400000$ -krat svetlejšo od polne Lune.

S fazno funkcijo (24) za Lambertovo sfero in z enačbo (15) lahko izračunamo navidezni sij Lune v različnih menah. Poskusimo najprej izračunati navidezni sij polne Lune, če bi Luno prekrivala Lambertova površina.

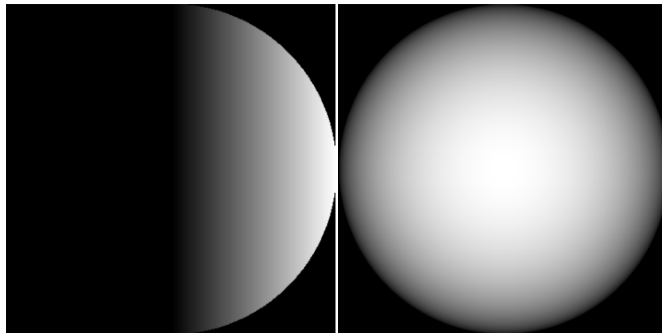
V tem primeru je $\alpha = 0$ in s tem $\Phi(\alpha) = 1$. Ker je normalizacijska konstanta za Lambertovo sfero enaka $C = 2/3$ in je Bondov albedo za Lambertovo sfero enak $A = 1$, iz enačbe 10 sledi, da je geometrijski albedo za Lambertovo sfero enak $p = 1/6$.

Upoštevamo še, da je polmer Lune $R_L = 1740$ km, srednja oddaljenost Lune od Zemlje $d_L = 384\,000$ km in da sta oddaljenosti Lune in Zemlje od Sonca približno enaki, torej, da velja $r \simeq a = 1,5 \cdot 10^{11}$ m. V tem primeru se enačba (15) poenostavi v

$$m = m_{\odot} - 2,5 \log p \frac{R^2}{a^2} + 5 \log \frac{d}{a} = -13,0. \quad (25)$$

Izračunali smo torej, da je polna Luna v tem modelu nekoliko svetlejša kot v resnici. Odstopanje ni nepričakovano, saj smo upoštevali, da je Bondov albedo Lune enak 1, čeprav literatura navaja podatek 0,11, kar je celo manj od dejanskega geometrijskega albeda Lune $p = 0,12$.

Zato lahko že na tem mestu sklepamo, da površja Lune z modelom Lambertove sfere ne moremo dobro opisati. V resnici Luna večino vpadne svetlobe odbije naravnost nazaj v smer, iz katere je prišla.



Slika 3. Prvi krajec in polna Luna, če bi bilo Lunino površje Lambertovo.

6.1 Navidezni sij prvega krajca

Obravnavajmo drugi poseben primer, in sicer navidezni sij prvega krajca. Na pamet bi rekli, da je polna Luna dvakrat svetlejša od prvega krajca. Kaj pa pravi fazna funkcija za Lambertovo sfero? V primeru prvega krajca izračunamo $\Phi(\pi/2) = 1/\pi$, kar je za faktor π manj kot pri polni Luni. To pomeni, da je v tem modelu polna Luna od prvega krajca svetlejša za faktor π in ne 2, kot bi morda pričakovali.

Z enačbo (15) izračunamo še pripadajoči navidezni sij prvega krajca v tem modelu in dobimo rezultat $m = -11,8$. Če smo se malo poprej nekoliko zmrdovali pri odstopanju med rezultatom $-13,0$ in podatkom iz literature $-12,7$ za polno Luno, se bomo ob podatku o navideznem sijju prvega krajca iz literatura naravnost zgrozili. Zanimivo dejstvo je namreč, da je navidezni sij prvega krajca v resnici $-10,0$. Če vnovič upoštevamo, da je navidezni sij polne Lune enak $-12,7$, iz Pogsonove enačbe dobimo, da razmerje svetlobnih tokov s polne Lune in prvega krajca v tem primeru ustreza faktorju $10^{0,4 \cdot (-10,0 - (-12,7))} \approx 12$.

Tolikšnega razmerja prav gotovo nismo pričakovali, zato je treba o dobljenem rezultatu posebej razmisliti in ga nekoliko razčleniti. Vsekakor bi pričakovali faktor 2, morda π , vendar to še zdaleč ne pojasni dobljenega faktorja 12.

7. Sklep

Ugotovili smo že, da površje Lune ni Lambertovo, saj se na Luno vpadla svetloba ne odbije v vse smeri, temveč se v veliki meri odbije v smer proti Soncu, iz katere je prišla. Ampak kaj bi lahko bil razlog za to?

Površje Lune je nepravilno in hrapavo, saj je posejano s **kraterji** in tako imenovanimi **morji**. Pri večjih faznih kotih, kamor spada tudi prvi krajec, nastane na Luninem površju več senc in je zato "efektivni" albedo manjši. Ko pa se fazni kot približuje vrednosti 0° oziroma se Luna bliža opoziciji, pride do opaznega poskoka svetlosti. Pojav imenujemo **opozicijski učinek**. Sence na Luninem površju takrat izginejo, poleg tega pa k zvišanju svetlosti pripomore tudi **koherentno povratno sipanje**. Gre za pojav, pri katerem se koherentna svetloba siplje na mediju, ki sestoji iz delcev, katerih medsebojna razdalja je primerljiva z valovno dolžino svetlobe [6].

Učinki, ki smo jih omenili, razmerje 12 pojasnjujejo le kvalitativno. V praksi pa bi lahko model spreminjanja svetlosti Lune napravili iz izmerjenih svetlobnih krivulj, s katerimi bi lahko določili pravo fazno funkcijo za Luno.

8. Zahvale

V sklepnem delu članka se želim prijazno zahvaliti Andreju Guštinu, Žanu Arsovu, Gabrijelu Pflaummu, Petru Andolšku, Simonu Bukovšku in Antonu Ramšaku, ki so s svojimi idejami, predlogi in nasveti tako ali drugače pomembno pripomogli k članku. Hvala vam.

LITERATURA

- [1] Guštin, A., Fabjan, D., Kavčič, V., Bukovšek, S. (2024). Zbirka nalog z astronomskih tekmovanj 2009–2024: teorija in rešene naloge za srednje šole (Let. 98, str. 363). Fakulteta za matematiko in fiziko.
- [2] Hulst, H. C. van de. (19812018, cop.). *Light scattering by small particles* (str. 470). Dover Publications.
- [3] Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K. J. (2007). *Fundamental astronomy, fifth edition*. Helsinki: Springer.
- [4] Kuščer, I., Kodre, A. (2016). Matematika v fiziki in tehniki (3. natis, Let. 36, str. 399). DMFA - založništvo.
- [5] Strnad, J. (1995). Fizika. Del 2 (5. natis, Let. 11, str. 294–562). Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije.
- [6] *Opposition surge*, *Wikipedia*, dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Opposition_surge, ogled: 1. 10. 2022.
- [7] *Bond albedo*, *Wikipedia*, dostopno na: https://en.wikipedia.org/wiki/Bond_albedo, ogled: 25. 3. 2025.