

Človeško oko je naravni sprejemnik svetlobe oziroma sevanja. Oko, samo ali skupaj z opazovalnimi napravami, pri človeku ustvarja najbolj neposreden stik z zunanjim svetom oz. naravo (90%), tj. okolico. Je izredno pomemben inštrument, ki ga imamo vedno pri sebi. Spoznavanje materialnega sveta neizbežno spremlja z ocenjevanjem in/ali merjenjem svetlobnih količin pri opazovanju teles in pojavov blizu in daleč. Na področju opazovanja vtisov je tako prišlo do osnovanja in razvoja posebnega dela fizike - fotometrije¹, nauka o svetlobnih merjenjih.

Namen prispevka je informativen. Gre za izpeljavo osnovne enačbe astronomske fotometrije, opremljeno z opombami in rahlo nakazano uporabo enačbe v astronomski praksi, kar javno še ni bilo objavljeno.

Osnovna enačba astronomske fotometrije

Teoretična razmeroma zahtevna vsebina, napisana že za srednješolce.

Nebesna telesa človek opazuje z daljnogledom že vsaj od leta 1610, odkar je Galileo Galilej prvič uperil svoj skromni daljnogled v zvezdno nebo in začel tam odkrivati čudesa. In tudi pisati o njih.

Pred kakšnimi dobrimi 150. leti pa so začeli poleg prostega očesa in daljnogleda pri astronomskih opazovanjih uporabljati še druge sprejemnike svetlobe (fotografsko ploščo, nato fotocelico, fotoelement, termočlen, bolometer, ..., TV, ccd kamero, ...) in tako začeli vse bolj prikazovati svoje nebesne meritve v energijskih količinah in njih enotah, ne več samo v fizioloških kot prej (gl. opombo 1). Take meritve imenujemo fotometrične (astronomske) meritve.

Prve fotometrične meritve v zgodovini astronomije je opravil znameniti Hiparh v 2. stol. pr. n. š., ko je v svojem zvezdnem katalogu okoli 1000 zvezd razvrstil zvezde po njihovem (navideznem) sijju na 6 magnitud (oz. razredov kategorij, "velikosti"). Natančno razlago te razvrstitve so pojasnili šele 2000 let pozneje, in sicer v 19. stoletju kot posebni primer psihofizičnega Weber-Fechnerjevega zakona (1856), oz. še natančneje v obliki Pogsonovega obrazca

¹ Fotometrija je del optike. Ukvarja se z merjenjem različnih svetlobnih količin, kot so npr. svetloba (energija), svetlobni tok, gostota svetlobnega toka, osvetljenost, svetilnost, svetlost itn. Obravnava dve vrsti svetlobnih količin: *energijske* – objektivne, in *fiziološke*, vezane večinoma na opazovanje z očmi – subjektivne (prvotne). Fizikalne enote objektivnih fotometričnih količin so npr. J, W = J/s, W/m², enote subjektivnih fotometričnih količin pa npr. lumen, sveča, luks. V astronomski fotometriji, kjer povezujemo astronomske fotometrične količine s fizikalnimi, velja podobno. Med astronomske fotometrične količine spada v prvi vrsti *sij* (nebesnega telesa), ki ima enoto magnitudo. Ta enota nima dimenzije, zato v enačbah ob številčni vrednosti ne pišemo znaka oz. imena za magnitudo, kar včasih navajamo z ^m (npr. zvezda z magnitudo 2^m ali zvezda s sijem 2^m itn.; 2^m preberemo "2m"). Pogoste fotometrične količine v astronomiji so še: absolutni sij, vizualni, fotografski, fotovizualni, U-B-V sij, radiometrični, bolometrični sij. V podrobnosti se tu ne bomo spuščali.

(formule, enačbe). Stara razdelitev zvezd po siju na šest magnitud (od najsvetlejših zvezd do komaj vidnih zvezd) je bila namreč narejena popolnoma intuitivno (po neposrednem – subjektivnem zaznavanju oz. dojemanju svetlobe zvezd).

Astronomska fotometrija ali astrofotometrija je del astronomije, ki proučuje sevanja nebesnih teles, npr. zvezd, če od njih pridejo sevanja do Zemlje. Ta sevanja najbolj karakterizira *sij* nebesnih teles. Čim svetlejša se nam zdijo nebesna telesa, tem večji je njihov sij. Zvezde zgledajo kot točkasti svetlobni viri, katerih navideznih razsežnosti ne moremo zaznati niti z daljnogledi. Svetli planeti se prostemu očesu sicer tudi prikazujejo kot svetleče pike, vendar pa jih z daljnogledi že vidimo kot majhne okrogle svetle ploskvice. Pri nebesnih objektih, ki imajo zaznavne kotne razsežnosti (zorne kote), lahko razen navadnega sija uvedemo celo površinski sij (kar tukaj samo omenimo, vendar pa tega zaradi zahtevnosti snovi ne bomo obravnavali).

Učinkovitost vidnega sevanja (vidne svetlobe) nebesnih teles oz. 'svetil' (v nadalje zvezd) ugotavljamo po povzročeni osvetljenosti oz. učinku gostote vpadnega svetlobnega toka na določen sprejemnik na Zemljinem površju. Sij zvezd povzroča določeno osvetljenost oz. določen učinek pri padcu gostote svetlobnega toka na svetlobni sprejemnik (mrežnico očesa, fotografsko ploščo, fotoelement, bolometer itn.). Sija zvezd ne merimo v enotah gostote energijskega toka (W/m^2) ali enotah osvetljenosti (luksih), ampak v relativnih enotah, v magnitudah. Pri tem velja: svetlejša je zvezda, manjša je njegova vrednost magnitude.

Oceno sija zvezd z magnitudami so torej uvedli že v 2. stol. pr.n.š. (Hiparh). Osnovana je bila na sprejemanju svetlobe zvezde s prostim očesom, ki dobro razloči svetli zvezdi, če je ena zvezda približno 2,5-krat svetlejša ali šibkejša od druge. Kot že rečeno, je ta značilnost človeškega očesa postala znanosti znana šele v 19. stoletju. Je poseben primer psihofizičnega zakona, ki sta ga sformulirala v tem stoletju fiziolog E. Weber (1795–1878) in psiholog G. Fechner (1801–1887).

⌘ Weber-Fechnerjev zakon pove: sprememba občutka je sorazmerna relativni spremembi dražljaja, ki povzroči občutek. ⌘

Gostota svetlobnega toka predstavlja dražljaj (objektivna količina), sij pa občutek oz. vtis (subjektivna količina). Označimo dražljaj z j , občutek z m , njuni spremembi (diferenciala) pa z dj in dm . Po W-F zakonu je: $dm = -k \cdot dj/j$ (–pove, da se z večanjem količine j , količina m manjša; pri zvezdah že to velja). Po integraciji dobimo $m = -k \ln j + c$. Tu je k sorazmernostni koeficient, c pa integracijska konstanta. Dvema svetlobnima viroma, od katerih sprejemamo različni gostoti svetlobnega toka j_1 in j_2 , pripadata sija m_1 in m_2 , katerih razlika je: $m_2 - m_1 = -k \ln (j_2/j_1)$, od koder sledi $j_2/j_1 = e^{-(m_2 - m_1)/k} = a^{-(m_2 - m_1)}$.

Angleški astronom N. R. Pogson (1829–1891) je predlagal, da pri razliki sijev za 5 magnitud upoštevamo 100-kratno razmerje gostot svetlobnih tokov (po domače povedano, če se zvezdi po siju razlikujeta za 5 magnitud, je sprejeta gostota svetlobnega toka ene zvezde glede na drugo stokrat večja ali manjša). Iz $(m_2 - m_1) = 5$ in $j_2/j_1 = 100$ sledi $a^5 = 100$ in $a = 10^{2/5} = 10^{4/10} = 10^{0,4} = 2,512$. Tako smo izpeljali znamenito Pogsonovo formulo (obrazec, enačbo) ali osnovno enačbo astronomske fotometrije:

$$j_2/j_1 = 10^{-0,4(m_2 - m_1)}.$$

Po tej formuli lahko iz znanega razmerja gostot svetlobnega toka izračunamo razliko njunih sijev oz. iz znane razlike sijev izračunamo količnik njunih gostot svetlobnega toka. Za razliko sijev $\Delta m = m_2 - m_1 =$ ena magnituda, je pripadajoči količnik gostot svetlobnega toka enak 2,512 (ali okroglo 2,5, kar zelo pogosto navajajo; število $2,512 = 10^{0,4}$ imenujejo tudi Pogsonova konstanta). Danes merijo sij že na 0,005 magnitode natančno.

Iz Pogsonove formule lahko ugotovimo (samo spomniti nas mora kdo na to), da *dražljaj raste v geometričnem zaporedju, vtis pa v aritmetičnem*, kar je tudi bistvo W-F zakona.

Meritve kažejo, da zvezda s sijem prve magnitode, torej $m_1 = 1$, pošilja na Zemljo svetlobni tok z gostoto $j_1 = 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Tako lahko vedno izračunamo sprejeto gostoto svetlobnega toka nebesnega telesa, če poznamo njegov sij, in obratno, izračunamo sij, če poznamo njegovo gostoto svetlobnega toka.²

Zgleda:

1. Najsvetlejša zvezda Sirij ima sij $m = -1,5$ magnitode. Kolikokrat večjo gostoto svetlobnega toka pošilja Sirij na Zemljo kot s prostim očesom komaj vidna zvezda s sijem $m_0 = 6,5$ magnitode?

Razlika sijev je $m - m_0 = -1,5 - 6,5 = -8$ (magnitode, ki je kot enote ne pišemo), kvocient gostot svetlobnega toka pa $j/j_0 = 10^{-0,4 \cdot (-8)} = 10^{3,2} \approx 1600$.

² Da zvezda s sijem prve magnitode pošilja na Zemljo svetlobni tok z gostoto 10^{-8} W/m^2 , so ugotovili s fotometri, ki so jih postavili na umetne Zemljine satelite. Z njimi so izmerili gostoto svetlobnega oziroma energijskega toka, ki prihaja k nam s Sonca, to je solarno konstanto $j_0 = 1400 \text{ W/m}^2$ (natančneje 1375 W/m^2), za sij Sonca pa so vzeli bolometrični sij $m_0 = -26,85$ magnitode. Če ti dve vrednosti vstavimo v Pogsonovo formulo in postavimo še za sij zvezde $m = 1$ magnituda, izpeljemo vrednost $j = 10^{-8} \text{ W/m}^2$. Tu gre za merjenje bolometričnega sija oz. bolometrične gostote svetlobnega toka, to je v vseh valovnih dolžinah elektromagnetnega spektra.

Mimogrede, sij nebesnega telesa je lahko pozitiven ali tudi negativen (npr. nebesna telesa s sijem, večjim od 1. magnitode (1^m): s prostim očesom komaj vidne zvezde imajo sij šeste magnitode (6^m), Severnica ima sij 2,3 magnitode ($2,3^m$), najsvetlejša zvezda Sirij ima sij $-1,5$ magnitode ($-1,5^m$), Venera v največjem siju $-4,4^m$, Luna v ščipu okoli $-12,5^m$, Sonce pa $-26,85^m$, ki je najsvetlejšo nebesno telo.

2. Sij Marsa ob opoziciji s Soncem je npr. $m = -2$. magnitude. Kolikšna je gostota svetlobnega toka j , ki pade z Marsa na Zemljo?

Gostoto svetlobnega toka j izračunamo iz enačbe $j/j' = 10^{-0,4(m-m')}$, kjer je $j' = 10^{-8} \text{ W/m}^2$ in $m' = 1$. magnituda. Sledi, da je $j = 10^{-8} \cdot 10^{-0,4(-3)} \text{ W/m}^2 = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$.

Naloge:

1. Kolikšen sij ima Sonce, če na Zemljo pošilja svetlobni tok z gostoto $1,35 \text{ kW/m}^2$? [Okoli -27 . magnitude.]

2. Sij neke zvezde je $3,5$ magnitude. Kolikšna je gostota svetlobnega kota, ki s te zvezde pade Zemljo? [10^{-9} W/m^2]

3. Na nebu sta dve zvezdi. Prva s sijem $1,5^m$ pošilja na Zemljo 40-krat večjo gostoto svetlobnega toka kot druga. Izračunajte sij druge zvezde. [Razlika njunih sijev je 4 magnitude, sij druge zvezde pa $5,5^m$]

Kranj, 8. december 2017

Majo Prosen