



Prirodno-matematički fakultet
Smer: Astronomija sa astrofizikom

Seminarski rad iz Fizike Zvezda:

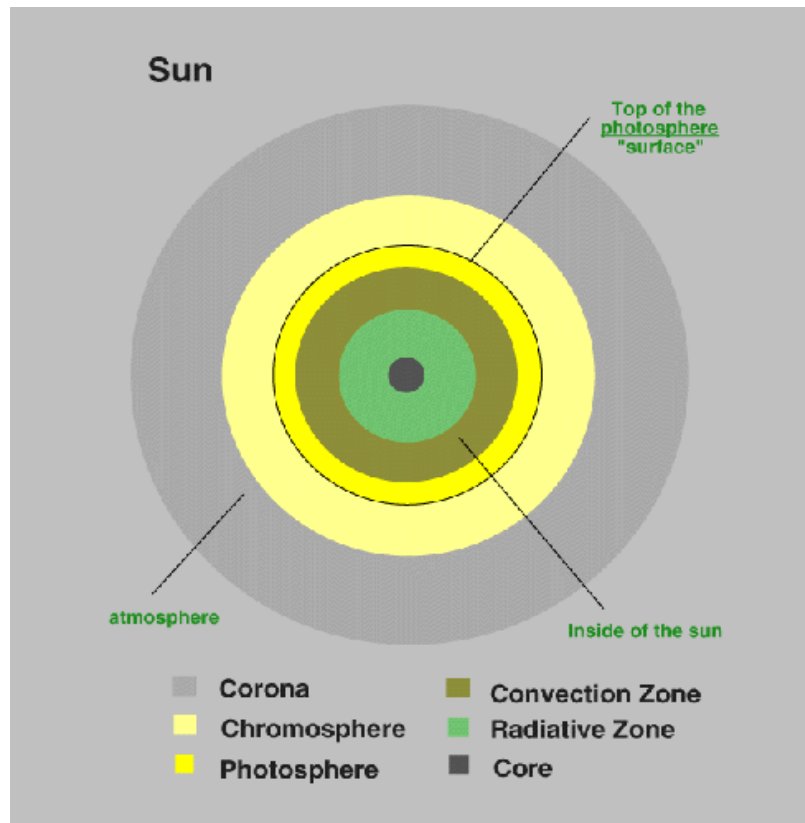
FOTOSFERA ZVEZDA

Profesor: Dr Božidar Vujičić

Student: Milena Tomašević

Novi Sad, decembar 2007. godine

Fotosfera zvezde (Sunca)



Unutrašnja građa zvezde

Unutrašnjost Sunca okružena je površinskim slojem debljine 300 do 400 km koji se naziva *fotosfera*. Sa Zemlje fotosfera se uočava u obliku sjajnog diska. Ona je prvi prozračan sloj Sunca, dok su ostali delovi nedostupni direktnom posmatranju.

Gustina fotosfere u proseku iznosi $2 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$. Fotosfera je najgušći omotač Sunca, ali ujedno je i dosta ređi od Zemljine atmosfere. Na njenom dnu temperatura iznosi oko 9000 K, a na gornjoj granici temperatura je 4500 K. Zbog relativno niskih temperatura u fotosferi su prisutni i neki molekuli kao što su CO, H₂, CH, CN itd, pored neutralnih atoma.

Kroz fotosferu energija se prenosi uglavnom zračenjem, međutim prisutna je i konvekcija. Pokazatelj postojanje konvekcije jeste njena zrnasta struktura. U fotosferi se nalaze svetla zrna tj. granule, koja predstavljaju mlazeve gasa koji izbijaju na površinu iz unutrašnjih slojeva. Temperatura ovih gasova je za oko 100 K veća od temperature fotosfere, tako da je njihov sjaj oko 20% jači. Nakon što izbiju na površinu gas u granulama se hladi, usled čega one tonu u dublje slojeve, a na njihovo mesto dolaze nove. Obično traju 5-15 minuta, prečnik im je oko 1500 km, a na Sunčevom disku ih u svakom trenutku ima oko 2 miliona.

Granule razdvajaju tamna područja širine do 1000 km. Ove tamne oblasti su za oko 350 do 400 K hladnije. Na osnovu Doplerovog efekta utvrđeno je da se kreću brzinom od 0,3 km/s.

Konvekcija u fotosferi ispoljava se i u oblastima mnogo većih dimenzija od dimenzija granula, što dovodi do pojave tzv. supergranula. Supergranule imaju oblik poligonalnih ćelija, sa prosečnim prečnikom od oko 30 000 km i traju do nekoliko sati. One pokrivaju celokupnu površinu Sunca, a osim veće površine karakteriše ih i veća konvekcija. U centralnim delovima granule materija iz dubljih slojeve podiže se vertikalno uvis ka površini, a na njihovim obodima se ponovo vraća u dubinu. Zajedno sa gasom, koji je delimično jonizovan prenosi se i magnetno polje, pa se ono koncentriše pri rubovima supergranula.

Tamnije oblasti na fotosferi jesu pege. Imaju dimanziju od oko 10000 km, skoro veličine Zemlje. Proučavanje pega ukazuje da se one sastoje iz dva dela. U sredini pege nalazi se taman centralni deo koji se naziva senka ili *umbra*. Oko nje se nalazi nešto svetliji deo koji se naziva polusenka ili *penumbra*. Penumbra je okružena mnogo sjajnijom fotosferom. Srednji prečnik senke iznosi oko 17.000 km, a polusenke 37.000 km. Pege su u stvari hladnije oblasti fotosfere. Naučnici veruju da su pege hladnije zbog toga što jako magnetno polje zaustavlja ili preusmerava normalan konvektivan protok gasa ka površini zvezde. Temperatura u oblasti umbre iznosi oko 4500 K, a u oblasti penumbre oko 5500 K. Pege se sastoje od vrelog gasa, ali izgledaju tamne zbog toga što se nalaze okružene mnogo sjajnijom fotosferom. One nisu stabilne, menjaju svoju veličinu i oblik. Pojedinačne pege mogu da traju od 1 do 100 dana, prosečno 10-20 dana, dok grupe pega u proseku traju oko 50 dana.

Pege se najčešće javljaju u grupama. Po karakteru magnetnog polja oblasti u kojima se nalaze pege mogu se podeliti na unipolarne (oko 8,6%), bipolarne (91%) i multipolarne (0,4%). Bipolarne grupe pega su one u kojima je lako moguće izdvojiti pegu vodilju i pratilji, unipolarne oblasti nastaju iščezavanjem pojedinih pega u bipolarnim oblasima pa u grupi ostaju samo pege istog polariteta. Multipolarne oblasti su grupe u kojima je broj krupnijih pega veliki, tada nije moguće izdvojiti pegu vodilju i pratilju tako da se u toj oblasti uočava veliki broj pega sa različitim polaritetima.

Zračenja fotosfere

Osnovne informacije o astrofizičkim objektima dobijaju se posredstvom zračenja. Posredstvom zračenja se vrši transport energije iz unutrašnjosti zvezda-radijativni prenos energije, koji bitno određuje uslove ravnoteže pojedinih delova zvezde, a posebno fotosfere. Zračenje dakle, interaguje sa supstancom što dovodi do emisije i apsorpcije zračenja.

Osnovne veličine koje karakterišu polje zračenja i interakciju zračenja sa supstancom jesu:

1. **Intenzitet zračenja**
2. **Gustina zračenja**
3. **Fluks zračenja**
4. **Koeficijent apsorpcije**
5. **Emisioni koeficijent**

Intenzitet zračenja (I_ν). Energija zračenja koja prolazi kroz element površine $d\sigma$ normalno na pravac zračenja u prostornom uglu $d\Omega$ za vreme dt i u intervalu frekvencije $d\nu$ proporcionalna je $d\sigma d\nu dt d\Omega$ i jednaka:

$$dE_\nu = I_\nu d\sigma d\nu dt d\Omega \quad (1.1)$$

Koeficijent proporcionalnosti I_ν naziva se intenzitet zračenja. U opštem slučaju je očigledno da $I_\nu = I_\nu(\varphi, \theta, \nu, t)$. Zbog azimutne simetrije, intenzitet zračenja ne zavisi od ugla φ , pa je u stacionarnom slučaju $I_\nu = I_\nu(\theta, \nu)$. Iako se intenzitet zračenja najčešće obeležava samo kao I_ν , treba voditi računa o zavisnosti od θ tj. o anizotropiji zračenja.

Gustina zračenja (ρ_ν) se definiše kao energija u jediničnom intervalu frekvencije po jedinici zapremine:

$$d\rho_\nu = \frac{dE_\nu}{dV d\nu} = I_\nu \frac{d\sigma dt d\Omega d\nu}{d\sigma c dt d\nu} = I_\nu \frac{d\Omega}{c}$$

odnosno

$$d\rho_\nu = I_\nu \frac{d\Omega}{c} \quad \text{ili} \quad \rho_\nu = \frac{1}{c} \int I_\nu d\Omega \quad (1.2)$$

U slučaju izotropnog zračenja iz jednačine (1.2) sledi:

$$\rho_\nu = \frac{4\pi}{c} I_\nu,$$

a u slučaju ravnotežnog zračenja (crno telo), intenzitet zračenja $I_\nu = B_\nu(T)$ dat je Plankovim zakonom zračenja.

Fluks zračenja (H_ν) je energija koja prođe kroz jediničnu površinu u jediničnom intervalu frekvencije i jedinici vremena:

$$dH_\nu = \frac{dE_\nu}{d\sigma dt dv} = I_\nu \cos \theta d\Omega \quad (1.3)$$

Kako je:

$$E_\nu = \int dE_\nu = H_\nu d\sigma dt dv$$

sledi:

$$H_\nu = \int I_\nu \cos \theta d\Omega \quad (1.4)$$

Iz jednačine

$$d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi$$

sledi da je

$$H_\nu = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi I_\nu \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1.5)$$

Kako je za $\theta > \pi/2$, $\cos \theta < 0$, očigledno se jednačina (1.5) može napisati kao $H_\nu = \mathcal{E}_\nu - \mathcal{E}'_\nu$ gde je:

$$\mathcal{E}_\nu = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I_\nu \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1.6)$$

$$\mathcal{E}'_\nu = - \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{\pi/2}^\pi I_\nu \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1.7)$$

Jednačine (1.6) i (1.7) predstavljaju osvetljenost jedne i druge strane površine $d\sigma$, pa sledi da je fluks zračenja kroz ma koju površinu razlika osvetljenosti te površine.

Iz jednačine (1.5) sledi da je u slučaju izotropnog zračenja rezultujući fluks kroz ma koju površinu jednak nuli. U realnim uslovima (fotosfera) zračenja nije izotropno, zbog čega rezultujući fluks nije jednak nuli i usmeren je duž radijusa ka površini zvezde.

Koeficijent apsorpcije (α_ν). Ako je prostor kroz koje zračenje prolazi ispunjen sredinom koja je sposobna da zračenje apsorbuje i emituje, na putu dx se od energije date u (1.1) apsorbuje deo proporcionalan dx , tj.

$$\alpha_\nu dx I_\nu d\sigma d\Omega d\nu dt \quad (1.8)$$

Koeficijent srazmernosti α_ν naziva se koeficijent apsorpcije i pomoću njega se može definisati srednji slobodni put fotona A_ν i optička debljina τ_ν :

$$A_\nu = \frac{1}{\alpha_\nu} \quad \tau_\nu = \int_0^x \alpha_\nu dx \quad (1.9)$$

Emisioni koeficijent (ε_ν). Energija koju element zapremine dV izrača u prostorni ugao $d\Omega$ u intervalu frekvencije $d\nu$ i u jedinici vremena dt jednaka je:

$$\varepsilon_\nu dV d\Omega d\nu dt \quad (1.10)$$

gde je ε_ν emisioni koeficijent.

U stanju termodinamičke ravnoteže koeficijenti α_ν i ε_ν su vezani Kirhofovom zakonom:

$$\frac{\varepsilon_\nu}{\alpha_\nu} = B_\nu(T) \quad (1.11)$$

gde je $B_\nu(T)$ univerzalna funkcija frekvencije i temperature i data je Plankovim zakonom:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1} \quad (1.12)$$

Jednačina transporta zračenja

Jednačina transporta zračenja opisuje promenu intenziteta zračenja duž pravca prostiranja za zadate osobine sredine (α_ν i ε_ν).

Na osnovu (1.8) i (1.10) imamo jednačina transporta zračenja :

$$\frac{dI_\nu}{dx} = -\alpha_\nu I_\nu + \varepsilon_\nu \quad (1.13)$$

U slučaju termodinamičke ravnoteže može se napisati u obliku:

$$\frac{dI_\nu}{dx} = \alpha_\nu (B_\nu - I_\nu)$$

Ako je sredina homogena i izotropna ($\alpha_\nu = \text{const}$), predhodna jednačina ima rešenje oblika:

$$I_\nu(x) = I_\nu(0)e^{-\alpha_\nu x} + B_\nu(1 - e^{-\alpha_\nu x}) \quad (1.14)$$

Ako je u pitanju sloj debljine l i ako je $I_\nu(0) = 0$, na izlazu iz sloja ($x = l$) biće:

$$I_\nu(l) = B_\nu(1 - e^{-\alpha_\nu l}) = B_\nu(1 - e^{-\tau_\nu})$$

pa je

$$I_\nu(l) \approx B_\nu \quad \text{za} \quad \tau_\nu \ll 1 \quad (1.15)$$

$$I_\nu(l) \approx \tau_\nu B_\nu \quad \text{za} \quad \tau_\nu \gg 1$$

Ovo znači da posmatrani sloj zrači na frekvenciji ν kao crno telo, ako je $\alpha_\nu l = \tau_\nu \ll 1$ tj. ako je debljina sloja velika u odnosu na srednji slobodni put fotona frekvencije ($A_\nu = 1/\alpha_\nu$). Ovi fotoni se znatno apsorbuju i za tu sredinu se kaže da je *optički debela* ili *neprozračna* za zračenje frekvencije ν . U suprotnom slučaju ($\alpha_\nu l \gg 1$) tj. $l \gg A_\nu$, zračenje iz sloja ima mnogo manji intenzitet nego zračenje crnog tela na toj frekvenciji i takva sredina je *optički tanka* ili *prozračna*. Izmereni intenzitet zračenja neposredna je mera za emisijski koeficijent sredine u onim oblastima frekvencija za koje je sredina prozračna. Zbog toga, oblasti prozračnosti bitne su za proučavanje svojstva sredine, jer u oblastima neprozračnosti zračenje gubi sve osobenosti vezane za datu sredinu i opisuje se univerzalnom funkcijom od ν i T tj. Plankovom funkcijom $B_\nu(T)$.

Jednačina radijacione ravnoteže

Emisioni koeficijent ε_ν je po pravilu nepoznat i zavisi od hemijskog sastava i stanja zvezdane supstance, a može se izraziti preko energije koja se proizvede ili apsorbuje u elementu zapremine preko α_ν i I_ν . Ako u datoj sredini nema izvora energije već se kroz nju energija prenosi zračenjem (zvezdane fotosfere) uz pretpostavku stacionarnosti može se reći da svaki element zapremine emituje toliko energije koliko i apsorbuje. Ovo stanje je poznato kao *radijaciona ravnoteža*.

Energija koju apsorbuje elementarni cilindar osnovne $d\sigma$ i visine dx u jedinici prostornog ugla $d\Omega$ u intervalu frekvencije $d\nu$ i za vreme dt , kada na osnovu cilindra pada zračenje intenziteta I_ν iznosi:

$$d\sigma dx dt \alpha_\nu I_\nu d\nu d\Omega$$

Ukupna apsorbovana energija se dobija integracijom po svim frekvencijama i svim pravcima, tj.

$$d\sigma dx dt \int_0^\infty \alpha_\nu d\nu \int I_\nu d\Omega$$

Ukupna energija koju emituje element zapremine $d\sigma dx$ za vreme dt dobija se na osnovu (1.10), integracijom po svim pravcima i frekvencijama:

$$4\pi d\sigma dx dt \int_0^\infty \varepsilon_\nu d\nu$$

a u slučaju radijacione ravnoteže:

$$4\pi \int_0^\infty \varepsilon_\nu d\nu = \int_0^\infty \alpha_\nu d\nu \int I_\nu d\Omega \quad (1.16)$$

Jednačina (1.16) predstavlja jednačinu radijacione ravnoteže i sa jednačinom (1.13) predstavlja osnovnu jednačinu zvezdanih fotosfera.