

NAPREDNI FIZIČKI PRAKTIKUM 1  
studij Matematika i fizika; smjer nastavnički

# STEFAN-BOLTZMANNOV ZAKON ZRAČENJA

## ZADACI

1. Odredite otpor volframove niti za razne struje i izračunajte temperature  $T$  iz mjerenih vrijednosti otpora  $R(T)$ , mijenjajući napone grijanja volframove niti do 12 V. Očitavajte pripadne vrijednosti struje.
2. Za iste napone i struje očitavajte termo EMS  $U_T$ . Odredite eksponent apsolutne temperature u Stefan-Boltzmannovom zakonu. Koliki je koeficijent korelacije? Procijenite pogrešku apsolutne temperature iz mjerenja otpora.

## Uvod

Označimo ukupni energijski tok koji zrači površina tijela  $S$  u čitavi poluprostor (hemisferu od  $2\pi$  steradiana) s  $\phi_e$ . Kad to podijelimo s površinom tijela  $S$ , dobivamo gustoću toka energije:

$$M = \frac{\phi_e}{S}, \quad (1)$$

koja se još naziva energetska (radijacijska) egzitancija, a mjeri se jedinicom W/m. Budući da egzitancija ovisi o valnoj duljini, definira se i spektralna egzitancija  $M_\lambda$ , kao gustoća energijskog toka koji se izrači u interval valnih duljina između  $\lambda$  i  $\lambda + d\lambda$ :

$$M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}. \quad (2)$$

Ukupna egzitancija se dobiva integriranjem spektralne egzitancije po svim valnim duljinama:

$$M = \int_0^\infty M_\lambda d\lambda. \quad (3)$$

Na sl.1 prikazani su emisijski spektri crnog tijela na različitim temperaturama, tj.  $M_\lambda$  kao funkcija valne duljine  $\lambda$  i temperature  $T$ . Spektri imaju karakterističan zvonoliki oblik, s maksimumom na određenoj valnoj duljini, koja je to niža što je temperatura tijela veća. Ukupna energija koju tijelo izrači proporcionalna je površini ispod krivulje, a naglo se povećava s povećanjem temperature.

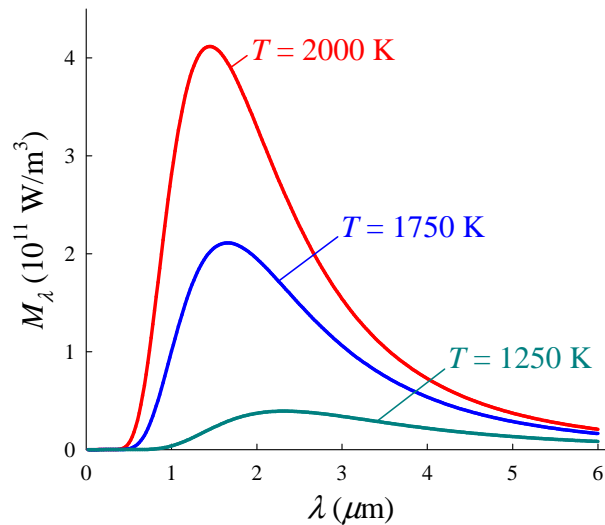
Spektralna egzitancija koju emitira crno tijelo temperature  $T$  dana je pomoću Planckove formule:

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}, \quad (4)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu,  $k_B$  je Boltzmannova konstanta, a  $h$  Planckova konstanta. Integriramo li spektralnu egzitanciju po svim valnim duljinama  $\lambda$  dobivamo snagu zračenja jedinice površine nekog tijela u čitav poluprostor. J. Stefan i L. Boltzmann nezavisno su jedan od drugog došli do rezultata da je ta energija proporcionalna četvrtoj potenciji apsolutne temperature tijela .

$$M^{CT} = \sigma T^4 \quad (5)$$

gdje je  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$  Stefan-Boltzmannova konstanta.



Slika 1. Spektralna egzitancija  $M(\lambda)$  za zračenje crnog tijela na tri različite temperature.

Ako tijelo nije idealno crno njegov faktor emisije  $\epsilon(\lambda)$  je manji od jedinice i ovisi o valnoj duljini. Emisioni spektri takvog tijela razlikovat će se i oblikom i intenzitetom od spektra crnog tijela. Ukupna egzitancija je u tom slučaju:

$$M(T) = \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) M_\lambda^{\text{CT}}(T) d\lambda \quad (6)$$

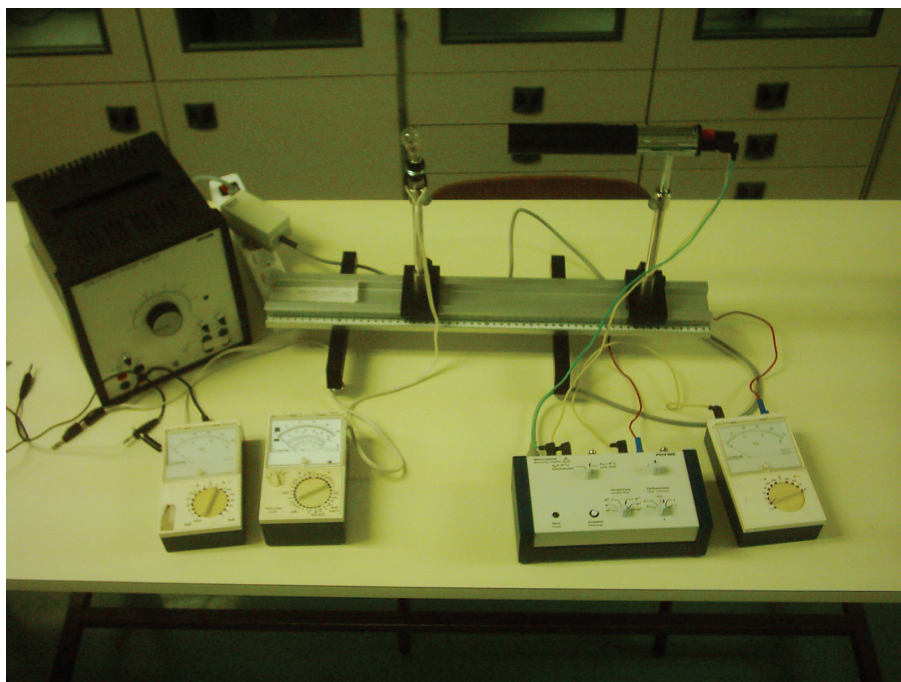
(CT  $\equiv$  crno tijelo) gdje je  $\epsilon(\lambda)$  faktor emisije definiran omjerom emitiranog toka tog tijela i toka crnog tijela iste površine pri istoj temperaturi. Za sivo tijelo ( $\epsilon = \text{konst.}$ ) Stefan-Boltzmannov zakon poprima oblik:

$$M = \epsilon \sigma T^4. \quad (7)$$

U eksperimentu nit svjetiljke predstavlja *sivo* tijelo. Ispituje se emitirana energija niti svjetiljke kao funkcija temperature niti.

## Eksperimentalni uređaj i izvođenje mjerenja

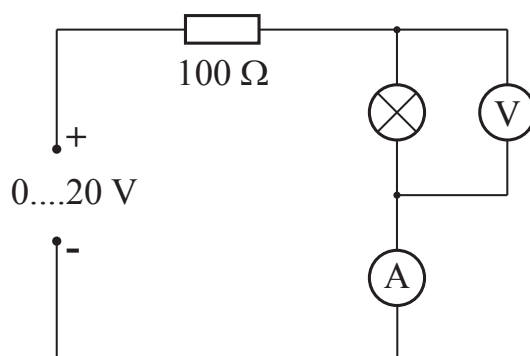
Eksperimentalni uređaj za provjeru Stefan-Boltzmannovog zakona zračenja prikazan je na sl.2. Sastoji se od izvora napona (izmjeničnog i istosmjernog), svjetiljke,



Slika 2. Postav vježbe.

Mollovog termočlanka s univerzalnim pojačalom, dva voltmetra ( $0.3 - 30 \text{ V}$ ), univerzalnog instrumenta-ampermetra ( $1 \text{ mA} - 10 \text{ A}$ ). Svjetiljka i termočlanak su smješteni na optičkoj klupi. Prvo treba izmjeriti otpor žarulje pri sobnoj temperaturi. Otpor od  $100 \Omega$  je spojen u seriju sa svjetiljkom prema sl.3. Treba odrediti pad napona na svjetiljci za male istosmjeme struje. Očitava se pad napona na voltmetru  $V$  i struja na ampermetru  $A$ . Struja mora biti dovoljno mala te se može zanemariti zračenje žarulje pri tim strujama.

Zatim, treba načiniti eksperimentalni uređaj prikazan na sl.2. Otpornik od  $100 \Omega$  se isključi i svjetiljka se uključi direktno na izvor istosmjernog napona. Treba paziti da napon na žarulji ne prelazi  $12 \text{ V}$ ! Paralelno žarulji spaja se voltmetar. Prije početka mjerenja treba centrirati nit žarulje i Mollov termočlanak. U to svrhu primijenite neki napon pri kojem svjetiljka svijetli, postavite termočlanak oko  $30 \text{ cm}$  od svjetiljke i tražite položaj maksimalnog otklona instrumenta koji registrira termoelektromotornu silu (EMS). Os cilindrične niti treba biti okomita na optičku os klupe. Za točno očitavanje elektromotorne sile koristite pojačalo. Prije očitavanja termoelektromotorne sile treba za svako pojačanje odrediti položaj



Slika 3. Shema sklopa.

“nule” EMS. Treba svjetiljku skinuti s optičke klupe na nekoliko minuta. Nakon ponovnog stavljanja svjetiljke na optičku klupu treba pričekati da termočlanak dođe u ravnotežu. Za to je potrebna jedna minuta. Treba paziti da parazitno zračenje ne utječe na mjerenje. Koristite faktor pojačanja pojačala  $10^2$  ili  $10^3$ , pri korištenju voltmetra na području  $0.3\text{ V}$ . Koristite “Low drift mode”.

Mollov termočlanak se koristi kao detektor zračenja za cijelo spektralno područje, od ultravioletnog do infracrvenog u području od  $150\text{ nm}$  do  $15\text{ m}$ . Njegova osjetljivost je neovisna o valnoj duljini zračenja. Zacrnjena površina detektora sastoji se od 16 termočlanaka spojenih u seriju, a smještena je u centru cilindričnog kućišta. (Unutarnji otpor termočlanka je  $10\ \Omega$ , osjetljivost je  $0.16\ \mu\text{V}/\mu\text{W}$ . Referentna točka temperature je temperatura kućišta termočlanka, koja je na sobnoj temperaturi. Ako nema zračenja površina detektora i kućište su na istoj temperaturi, te se elektromotorna sila ne pojavljuje. Primakne li se detektoru topao objekt, površina detektora se brzo grije zbog malog toplinskog kapaciteta, dok je kućište s referentnim spojem na sobnoj temperaturi. Nakon nekoliko sekundi, površina kojoj mjerimo temperaturu je u termičkoj ravnoteži. Razlika temperatura između detektora i kućišta je proporcionalna snazi zračenja koja pada na termočlanak. Kako je i termo EMS proporcionalna istoj razlici temperatura, napon na izlazu iz termočlanka je proporcionalan upadnoj snazi zračenja. U slučaju da se pred termočlanak stavi objekt čija je temperatura ispod sobne temperature, termo EMS će biti u protivnom smjeru.

Za provjeru Stefan-Boltzmannovog zakona mjerimo zračenje koje emitira svjetiljka koja predstavlja *sivo* tijelo. Za neku udaljenost između niti i termočlanka,

energetski tok  $M(T)$  koji grije termočlanak je proporcionalan  $U_T$ . Zbog proporcionalnosti između termo EMS  $U_T$  termočlanka i  $M(T)$  možemo pisati:

$$U_T \propto T^4, \quad (8)$$

u slučaju da je termočlanak na temperaturi 0 K. Budući da je termočlanak na sobnoj temperaturi  $T_R$  on zrači proporcionalno  $T$ , te tako možemo pisati:

$$U_T \propto (T^4 - T_R^4). \quad (9)$$

Mjerene vrijednosti termo EMS  $U_T$  i temperature  $T$  treba prikazati u dvostrukom logaritamskom mjerilu. Apsolutna temperatura niti  $T = t + 273$  izračunava se iz mjerenih vrijednosti otpora  $R(t)$ . Za nit volframove svjetiljke vrijedi slijedeća temperaturna ovisnost:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2), \quad (10)$$

gdje je  $R_0$  otpor na  $0^\circ\text{C}$  i

$$\begin{aligned} \alpha &= 4.82 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \\ \beta &= 6.76 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}. \end{aligned}$$